

磷石膏

引领
创新
合作

磷石膏管理和使用的核心原则



总编辑

Julian Hilton, 阿莱夫集团 (Aleff Group), 组织者,
国际肥料协会磷石膏工作小组

战略咨询团队

Connie Nichol, 加拿大 Nutrien 公司, 协助组织者,
国际肥料协会磷石膏工作小组

Ranjit Misra, 帕拉迪普磷肥有限公司

Tibaut Theys, 比利时普瑞昂集团

Volker Andresen, 国际肥料协会

国际肥料协会, 巴黎, 2020 年 6 月

目录

致谢	3
执行摘要.....	6
第 1 部分 引领.....	9
前言.....	9
评审和批准.....	11
磷石膏使用之路.....	11
前瞻性.....	14
气候行动.....	14
附录.....	19
2018-19 年会员企业磷石膏调查	21
第 2 部分 创新.....	28
1. 案例研究：农业.....	28
1.1 造林和磷石膏人造土：加拿大.....	29
1.2 磷石膏 - 含石膏的土壤改良剂：俄罗斯.....	40
1.3 在中亚地区综合使用磷石膏来发展该地区的适应性农业生态系统：哈萨克斯坦.....	52
1.4 磷石膏作为肥料的价值评估 - 农学田间试验的结果：摩洛哥.....	57
1.5 对使用磷石膏作为盐碱/钠质土壤改良剂的评估：农田试验 - 摩洛哥.....	63
2. 案例研究：建筑材料.....	74
2.1 磷石膏与可持续发展的业务：比利时.....	74
2.2 建筑材料：中国.....	84
3. 案例研究：道路建设.....	87
3.1 在道路建造中使用半水合型磷石膏的创新：俄罗斯.....	87
3.2 在道路建设中使用磷石膏的创新方法：摩洛哥.....	96
4. 案例研究：综合方法.....	105
4.1 磷石膏的生产和使用平衡：巴西.....	105
4.2 磷石膏的用途 - 农业、水泥和道路：印度.....	109
4.3 磷石膏肥料和道路施工材料：帕拉迪普磷酸盐有限公司的两种磷石膏使用措施.....	110
4.4 各种磷石膏价值增值应用的法规状况 - 印度监管机构.....	119
第 3 部分 合作.....	123
愿景寄语.....	125
第 4 部分 结论.....	140
缩写和缩略语.....	141
词汇表	144
附录 1:	150
附录 2: 磷石膏样品材料安全数据表.....	152

致谢

磷石膏的探路者们

英国

Julian Hilton, 阿莱夫集团

AE Johnston, 罗森斯特德研究所

Malika Moussaid, 阿莱夫集团

法国

Volker Andresen, 国际肥料协会

École des Ponts, 巴黎理工学院

Les Grands Travaux Routiers

Lucia Castillo Nieto, 国际肥料协会

芬兰

Renara Malmberg, 雅苒公司

荷兰

Kees Langeveld, 顾问

瑞士

Harikrishnan Tulsidas, 联合国欧洲经济委员会

比利时

Yves Caprara, 比利时普瑞昂集团

Thierry Garnavault, 比利时普瑞昂集团

Antoine Hoxha, 欧洲肥料协会

Tibaut Theys, 比利时普瑞昂集团

加拿大

Nancy Case, 美盛公司 (Mosaic) Co.

Connie Nichol, Nutrien公司

Manzoor Qadir, 联合国大学水、环境与健康研究所

西班牙

David Herrero Fuentes, Fertiberia 公司

Francisca Galindo Paniagua, Fertiberia 公司

Rafael García Tenorio, 塞维利亚大学国家加速器中心主任

摩洛哥

国家道路研究中心

哈萨尼亚公共工程学院

Khalil El Mejahed, 穆罕默德六世理工大学

Hanane Mourchid, OCP集团

Kamal El Omari, OCP集团

Youssef Zeroual, OCP Innovation, OCP 集团

美国

Gary Albarelli, 佛罗里达州工业和磷酸盐研究所

Atusa Amiri, 美盛公司 (Mosaic)

Neil Beckingham, 美盛公司 (Mosaic)

G Michael Lloyd Jr., 佛罗里达州工业与磷酸盐研究所

Chris Niemann, Nutrien 公司

Andy O' Hare, 肥料研究所

Beril Yalçın, 国际原材料有限公司

巴西

Salvador Gullo

Paolo Pavinato, 圣保罗大学土壤科学系

土耳其

Esin Mete, Mt 咨询公司

Burcu Türke, 托洛斯农业公司

黎巴嫩

Antoine Aoun, 黎巴嫩化学品公司

约旦

Brent Heimann, 阿拉伯钾肥公司

埃及

Mohamed Ali, 阿拉伯化肥工业协会

俄罗斯

NI Akanova, D. N. Pryanishnikov 全俄农业化学研究所, 莫斯科

TV Grebennikova, 欧洲化学公司贸易罗斯有限公司, 莫斯科

AV Kochetkov, ROSDORNII FAU 公司

SA Korotkovsky, 萨拉托夫州立大学

MV Kuznetsov, 俄罗斯肥料生产商协会

Boris Levin, PJSC PhosAgro 公司

Inos Kochetova Niuif, PhosAgro 公司

Mikhail Pleshev, PhosAgro 公司

Timur Rashidov, PhosAgro 公司

MB Seregin, 欧洲化学公司贸易罗斯有限公司, 莫斯科

AV Shibnev, Apatit 股份有限公司巴拉科沃分公司
VV Talalay, TSSA (A) MSK 有限公司
MM Vizirskaya, 欧洲化学公司贸易罗斯有限公司, 莫斯科

波兰

Edyta Zielińska, Grupa Azoty 公司
Monika Zienkiewicz, Grupa Azoty 公司

哈萨克斯坦

Kazyia Semenikhina, 哈萨克斯坦磷肥集团 (KazPhosphate)

中国

何光亮, 贵州磷化(集团)有限责任公司
李寿生, 中国石油和化学工业联合会
李善曾, 金正大集团诺特拉化学有限公司
熊永强, 金正大集团
修学峰, 中国磷复肥工业协会

沙特阿拉伯

Dhafer Abu Hetlah, 马阿登磷酸盐公司
M Marwahi, 马阿登磷酸盐公司

印度

TK Haldar, 阿莱夫集团
Rakeesh Kapur, 印度农民肥料合作社
Ranjit Misra, 帕拉迪普磷肥有限公司
SK Nand, 印度化肥工业协会
Birinder Singh, 印度农民肥料合作社
Stalin Soundarapandian, 阿莱夫集团

特别要感谢即将离任的国际肥料协会(IFA)总干事 **Charlotte Hebebrand** 女士。她于 2013年开始任职, 标志着我们行业对磷石膏的态度历史上一个新时代的开始。在她整个任期内, IFA 出版了《磷石膏可持续发展管理与使用》(2016 年) 及其后续报告 - 本报告。本报告正好在她任期即将结束时发行。在她的支持和鼓励下, IFA 成员公司已开始系统地定义、测试并抓住磷石膏作为一种资源在全球范围内所提供的广泛机会, 尤其是磷石膏使用对可持续发展的贡献。

在本报告的《磷石膏的探路者们》中, 列出了为本报告做出许多不同贡献的探路者们的姓名和工作单位 (无论是当前的还是其为本报告做贡献时的工作单位), 以表示对他们的衷心感谢。

执行摘要

由于国际肥料协会（IFA）所编写的第一份磷石膏报告《可持续性的管理和使用（2016年）》（简称“报告 1”）[1]受到好评，IFA 于 2020 年编写和发表第二份磷石膏报告《引领、创新和合作：磷石膏管理和使用的核心原则》（简称“报告 2”）。

“报告 1”是在一支独立的科学和技术专家团队领导下按照“从外而内”的原则编写的。“报告 2”建立在“报告 1”基础之上，但编辑理念恰好相反。在与“报告 1”相同的同行评审程序下，“报告 2”由行业本身按照“从内而外”的原则编写的。它反映并记录了磷肥行业正在经历的重大转变。

正如“报告 2”第 2 部分中的案例研究所表明的那样，这种转变体现在有关全球磷石膏资源综合利用方面的真实、有力的证据中。在制定和发布此证据库所依据的无形的价值和核心原则中，也可以明显地看出这一转变。这些核心原则是引领、创新和合作。

因此，根据这些原则，“报告 2”分为三个部分。

第 1 部分, 引领, 阐述了 IFA 自 2014 年 1 月由即将出任 IFA 主席的原托洛斯农业公司(TorosAgri)首席执行官埃辛·米特(Esin Mete)女士所提出的由四部分组成的行业行动议程以来所遵循的道路。其中包括: 1. 可持续发展与联合国可持续发展目标(UNSDGs); 2. 资源利用效率(RUE); 3. 磷石膏; 4. 利益相关者的参与和社会许可。为响应这一议程, “报告 1”于 2016 年 3 月发布。

在 193 个国家元首于 2015 年末签署了《联合国可持续发展目标-2030 年议程》的几周后, “报告 1”就被发表了。到 2018 年初, IFA 成员公司已承诺在其年度公司报表中报告其在实现可持续发展目标方面所取得的进展, 包括磷石膏价值评估的进展和使用。

企业现已普遍设立了负责实施可持续发展目标、循环经济、零废物排放和资源效率的新高级管理职位。国家和地方各级政府 and 监管机构同时参与制定政策和经济杠杆, 例如修订有关磷石膏使用的监管法规修订和为磷石膏使用提供补贴, 以加快实现这些目标。

在推动可持续发展的过程中, 化肥行业是更广泛的商业活动的一部分。当企业公开认识到, 员工、供应商、价值链和客户以及整个社会的利益已作为价值衡量标准在公司议程中占据一席之地时, “利益相关者”资本主义于 2019 年底正式启动。

所有这些快速发展的政策变化都有利于行业自身、监管机构和利益相关者改善它们看待磷石膏问题的方式。

现在的挑战是增加并保持努力。增加努力需要领导和创新。下表汇总了 IFA 成员 2018-19 年磷石膏调查的结果, 显示了所有主要磷石膏生产地区都在增加努力。

第 2 部分, 创新, 包括实例研究和国家概况。实例研究着重于磷石膏利用的三个大用量领域: 农业/林业、建筑材料和道路建设。巴西和印度的国家概况, 分别由巴西的圣保罗大学及美

盛公司和印度的印度化肥工业协会及帕拉迪普磷肥有限公司（ParadeepPhosphateLtd.）提供。他们介绍了这些国家的磷石膏综合利用方法，并协调了这些大量应用中的多种机会。

第三个国家概况聚焦中国。中国是世界最大的磷石膏生产商和消费者（每年生产约 8000 万吨磷石膏，其中约 40%用于商业消费）。中国磷酸盐行业现在正面临着磷石膏完全利用（100%利用）的挑战。IFA-中国咨询小组正在积极规划如何实现这一雄心勃勃的目标。该小组的计划在执行策略方面从“报告 2”中获取着有益的帮助。

为了实现磷石膏的 100%利用，巴西是世界上第一个在磷石膏生产与消费之间达到平衡的国家。该国有两个区域性磷石膏市场，一个用于农业，另一个用于水泥。在塞拉多（Cerrado）农业地区，也许是世界上单个最重要的农业区，不仅当前所有的磷石膏年产量都被消耗掉了，而且过去几年中堆积起来的遗留磷石膏也正在从渣堆中开采出来以供使用。挖掘渣堆是一个“双赢”的结果。它弥补了当地磷石膏的不足，以满足农民的需求，并且开始让出长期用于堆放磷石膏（实际上是将磷石膏作为废物堆放）的土地，让这些土地重新用于经济生产中。从历史上看，磷石膏的“处理性堆放”通常是全世界各地用来处理磷石膏的方法。当磷石膏最初开始被堆放时，这些磷石膏堆放点一般距离城市较远或在这些城市的边缘。在这些城市，例如巴西的乌贝拉巴（Uberaba）由于城市的发展，曾经远离人类住区的磷石膏堆放点现在被住宅和企业所侵占或完全包围。

为了避免此类问题的发生，15 多年以来，印度一直在政策制定者、监管者和运营商之间的合作基础上，投资开发一种利用而不是当废物处置磷石膏的解决方案。现在，这种方法的好处开始显现出来。其具有 100%利用磷石膏而不是长期存储或处置磷石膏的真正前景。这既需要既定的应用，例如为水泥工业提供磷石膏作为原料，又需要以新产品的形式进行创新，例如以商业规模生产和销售的富含硫的新型肥料，叫做 Zypmite（一种富含微量营养素的磷石膏土壤改良剂）。其他应用（例如道路建设）同样需要政府与行业之间的合作，例如帕拉迪普磷肥有限公司与中央道路研究实验室之间的合作。正如来自摩洛哥 OCP 公司和俄罗斯 PhosAgro 公司的两个道路建设案例研究那样，无论是从技术还是从监管的角度来看，其他国家的公司都在与各自的国家利益相关者遵循类似的合作模式。

巴西和印度的监管方法是，在充分保护职业、公共和环境健康与安全的同时，降低或消除市场壁垒的大部分领导力不是来自行业，而是来自政策制定者和相关监管机构。政府机构发布了正式的技术和科学声明，并引用了基于证据的审查，来论证为什么将磷石膏“废物”重新分类（通常从“危险”级调为“非危险”级），以鼓励磷石膏的利用。在国际机构的认可或鼓励下，国家监管机构已采用“分级方法”，来根据当地的需要和优先事项规范特定的磷石膏应用，例如在农业应用或作为建筑材料的原料。

第 3 部分，合作，阐述了创新如何为合作铺平道路，但也取决于合作。它追溯了从 1980年（当时的佛罗里达磷酸盐研究所（FIPR）开始其关于磷石膏的开创性的系列技术研究和出版物）到“报告 2”宣称开启磷石膏历史新篇章的 2020年这 40年历程的关键阶段。如今，磷石膏被归类为副产品、二次（人为的）资源或可重复使用的原材料。在这个新术语命名平台的基础上，如何按照“人、地球与繁荣”原则实现联合国《2030年议程》所要求的百分百利用磷石膏的雄心勃勃的愿景？

在第 3 部分中，来自 40 年历程的一些重要人物，如 MikeLloyd 和 GaryAlbarelli（FIPR）、

Rafael Garcia Tenorio 教授(塞维利亚大学)、Manzoor Qadir 博士(ICARDA 和联合国大学)、S. Nand 博士(印度化肥工业协会)、Hari Tulsidas 博士(国际原子能机构和联合国欧洲经济委员会)就我们如何做到这一点以及今后的发展方向发表了意见,同时确认了他们各自和普遍的意愿,即继续与 IFA 成员企业合作以实现磷石膏 100%利用的目标。

自 2017 年以来, Manzoor Qadir 和 Hari Tulsidas 都参加了磷石膏工作小组会议,并在“报告 1”和“报告 2”的整个编写过程中提供了咨询服务。现在,“报告 2”综合了来自世界各地的卓越中心的以前零散的知识 and 证据库,并得出了结论,根据此结论,发起了 100%利用磷石膏的倡议。从联合国的这样的高角度,第 3 部分的结尾部分阐述了如何实现这一倡议。

“报告 2”最初定于 2020 年 4 月在德里举行的 IFA 年会上被发布。场地很合适,因为“报告 1”于 2016 年 3 月就在这里被发布。但是受新冠疫情的影响,与许多其他活动一样,该报告被迫只能在线上发布。现在还不清楚,新冠疫情将对整个化肥行业,尤其是磷石膏行业,产生何种持久影响。但是,好像我们需要提醒的那样,新冠疫情在全球范围内对每种能源的供应安全所构成的威胁已大大加强了食品-能源-水(FEW)资源纽带的根本重要性。同样,新冠疫情中断了用于满足我们基本食品、能源和水需求的关键资源的全球流动,使得全球经济大部分处于停止状态。这提醒我们,我们不只是出于道德方面的原因而被联系在一起。我们别无选择,只能彼此密切合作,来找到一条可持续的前进之路。

第 1 部分 引领

前言

由于国际肥料协会（IFA）所编写的第一份磷石膏报告《可持续性的管理和使用（2016年）》（简称“报告 1”）[1]受到好评，IFA 编写和发表第二份磷石膏报告《引领、创新和合作：磷石膏管理和使用的核心原则》（简称“报告 2”）。

“报告 1”是在一支独立的科学和技术专家团队领导下按照“从外而内”的原则编写的。所有这些专家都参与了国际原子能机构（IAEA）在 2013 年发布的具有颠覆性意义的磷肥行业安全报告（简称“SR78”）[2]。此报告提出了如下观点：a) 将磷石膏归类为磷酸生产的副产品，而不是废物，b) 认为对磷石膏的使用不存在放射性上的异议，c) 建立在独立专家审议，以“分级方法”为准绳的磷石膏综合利用，从环保角度方面比地上堆放和输送到海里要优越很多。“分级方法”是指：“一种使对产品或过程施加的控制严格程度与失去控制相关的风险相称的结构化方法” [3]（见图 5）。在全球经济向循环经济过渡的背景下，两种处理方式都不可取。相反，磷石膏应作为“可重复使用的原材料”进行管理，并且在不利于磷石膏的立即利用的经济条件下，应将这些材料存储在经过适当工程设计的临时存储设施中，以备将来使用。

“报告 1”的第 1 和第 2 部分包含了对磷石膏生产和使用的放射学（自然发生的放射性物质（NORM））方面的详细分析。“报告 2”的读者可以从中获得有关自然发生的放射性物质的一般信息，国际原子能机构的 SR78 报告的第 9 节也专门讨论磷石膏，并且比较完整地总结了磷石膏在农业、建筑/建筑材料和道路建设等方面的应用。

“报告 2”建立在“报告 1”基础之上，但编辑理念恰恰相反。按照“从内而外”的原则，该报告主要由 IFA 成员企业及其合作伙伴撰写的经过同行评审的案例研究组成的。这些研究案例被编辑在一起，形成该报告，以生成一幅完整展示全行业到目前为止所取得进步的图片。这一过程也得到了地区协会的大力支持，特别是欧洲肥料协会（FE）¹和印度化肥工业协会（FAI）²，以及一些卓越的学术/科学中心，例如佛罗里达磷酸盐和工业研究所（FIPRI）³，联合国大学水、环境与卫生研究所⁴，阿尔伯塔大学，圣保罗大学土壤科学系⁵和联合国欧洲经济委员会（UNECE）资源管理专家组（EGRM）。在 IFA-中国咨询小组（IFA-CCG）的领导下，最近在中国也举行了非常卓有成效的咨询会议，以支持中国执行 100% 使用磷石膏的政策。“报告 2”包含 IFA-中国咨询小组的 2020-2025 战略工作计划的大纲。

自从其在 2014-2015 年被编写以来，“报告”对三大国际政策发展产生了颠覆性的影响。这为“报告 2”设定了政策背景。

这些巨变性的政策是：

- 联合国可持续发展目标⁶
- 《巴黎气候行动协定》⁷
- 向绿色[4]循环经济过渡的总体承诺。⁸

由于预期这些变化，即将出任 IFA 主席的埃辛·米特女士在 2014 年 1 月发表的具有里程碑意义的演讲中谈到了这三个方面。她在埃及 Sharm-el-Sheikh 市举行的阿拉伯化肥工业协会年度论坛上发表演讲，为未来所有由 IFA 支持的有关磷石膏的活动确定了框架。她的演讲为准备“报告 1”和随后发表“报告 2”奠定了基础。她的演讲的主要段落在本报告中被首次发表。

以上讲到的政策（尤其是“联合国可持续发展目标”）的影响可以通过多种方式在“报告 2”中进行衡量。首先，磷石膏可以成为一种非常强大和丰富的磷酸盐产业资产，为可持续发展的全球二次资源存量做出贡献，特别是用于土壤和各种建筑模式。其次，“报告 1”词汇表中关键术语的数量和性质现已扩展，从约 30 个扩展到 58 个。在许多新术语，例如循环经济，反映了政策和监管格局的深刻变化。其他术语（例如土壤）的定义已大大扩展，反映了我们对土壤的物理、化学和生物健康对整个可持续发展有多重要的新认识。对它们影响的认识还远远没有完成，尤其是对磷肥行业本身的影响。第三，缩写词和首字母缩略词的列表已从 54 个增加到 78 个，反映了引起变化的相同驱动力。但是，也许最重要的变化衡量标准是，“报告 2”的编辑立场不仅仅是变化的观点之一。

“报告 2”表明，行业在应对政策框架所面临的挑战方面，尤其是在满足可持续发展目标的深刻社会需求方面，正在发挥积极的领导作用。事实证明，有远见的领导力已转化为业务实践，因为形成该报告主体的案例研究所包含的大量证据清楚地表明了这一点。尽管在 2014 年 100% 利用磷石膏这一目标看起来似乎是一个遥不可及的梦想，但现在（2020 年）实现了一些主要的中期目标，并且整个行业都参与了这项任务，所以实现磷石膏的 100% 利用现在看来似乎是一个可以实现的目标，在某些情况下该目标甚至到 2030 年就能实现。这一广泛的进步都建立在行业的道德承诺的基础上。该行业现在表现出接受以下事实：为实现这些“联合国可持续发展目标”，只有该行业具有全球力量和影响力，能够调动足以完成任务的资源。

埃辛·米特在演讲中提出了三个价值观。这些价值观是行业道德承诺不可或缺的要素。它们在“报告 2”（《引领、创新和合作》）的所有案例研究中都很明显地展现出来。这些价值观赋予了本报告的标题。令人惊讶的是，案例研究中这些价值观不仅仅体现在使命陈述中，还体现在成员企业正在完成或甚至实际上已经完成的工作绩效指标中。IFA 成员现在愿意用磷石膏作为副产品来衡量和报告其进展情况，如结合到“报告 2”中的案例研究的范围和广度所示。他们在研发和试点项目上投入了大量资金，以验证其生产的不各种类型的磷石膏的性能和质量。他们也与其他行业的合作伙伴（例如建筑材料）以及独立的卓越技术和科学中心密切合作，以在扩大规模之前验证其试点项目的发现。引领、创新和合作之间的这种联系反映了一个清晰的认识，即利益相关者的参与是信任和信心的源泉，并取决于信任和信心。将磷石膏成功、连续地大规模推向全球市场，在很大程度上取决于市场的信任度和信心，取决于其作为产品的价值潜力、产品性能和对客户的增值。

在“报告 2”的开头部分，在“磷石膏使用之路”的标题下，阐述了在 IFA 文化中如何发展引领、创新和合作这些价值观。该过程于 2012 年开始正式形成，现在由 IFA 的 PG/NORM 工作小组执行。如果没有其领导力，“报告 1”或“报告 2”都不会产生。

评审和批准

特别是针对案例研究的评审和批准过程是反复互动进行的,通过电子邮件和电话会议等各种方法来逐一核对每个案例研究文稿及其贡献者团队。同时,磷石膏工作小组的成员也参与了整个创作和编辑过程。

在编写和编辑案例研究时,采用了“轻触式”编辑方法。该方法尊重以下因素:

-文稿的基调和观点反映了全世界正在开发的磷石膏各种有益用途的个性、地域、政策和文化背景以及不同的社会经济环境;

-大多数贡献者不会用英语作为他们的第一语言;

-在技术和科学诚信以及工作功绩方面,所有贡献者都树立了自己的高标准。这在在工业界、学术界和监管机构之间广泛的合作和其他形式的合作中都体现出;

-“报告 2”编辑和审核团队也遵循了这一“高标准”原则。

案例研究遵循“共同作者”模式,其中贡献者已在各个开发阶段提交了草稿。这些内容已由“报告 2”编辑和审核团队反复审核和编辑,有的还从法文译成英文,从俄文译成英文,直至签署批准。通过这种方法,案例研究既可以独立工作,也可以完全集成到该报告中。

现在已经出现了一幅全面且日益连贯的有关行业与磷石膏不断变化的关系的图景。在环境、经济和社会利益的稳定平衡的基础上,行业投入了大量的精力、创造力和承诺来寻找和巩固可持续发展的长期使用磷石膏的解决方案。在此过程中,一组关键的成功因素已变得可识别。如果这些因素在整个行业范围内应用,则会显着增加最终实现 100%利用磷石膏预期结果的可能性。在这方面,遵守上述“可持续发展目标”和相关政策已成为该行业的自然结果,而不是一个繁重的约束。

遵守“可持续发展目标”已经取得了国际上越来越多的认可和尊重。这来得正是好时候,因为该行业正在努力修改其全球角色的陈述,将其全球角色修改为可持续发展、资源利用效率以及保障食物可得性、安全性和零饥饿,从而导致就业机会的大大增加。

磷石膏使用之路

设置议程:

标志性事件, 2014 年 1 月

2014 年 1 月,时任托洛斯农业公司首席执行官埃辛·米特(Esin Mete)出任 IFA 主席。她提出并采用了 IFA 有关磷石膏的公共新方法,并将其置于中心位置。应阿拉伯化肥工业协会(AFA)秘书长沙菲克·阿什卡(Shafik Ashkar)博士的邀请,她在埃及 Sharm-el-Sheikh 市举行的阿拉伯化肥工业协会年度论坛上发表了重要演讲。当时最新被任命为 IFA 秘书长的夏洛特·赫伯布兰德(Charlotte Hebebrand)也在演讲现场。

埃辛·米特女士的演讲题目是“**展望未来: 为化肥行业打造一个可持续的未来**”。¹ 她提出

¹ 经埃辛·米特本人的允许,本报告发表了埃辛·米特演讲的许多节录。

的议程的四个主题是：

- 1.可持续发展，以及联合国可持续发展目标 2 的出现
- 2.资源利用效率，包括核心的养分效率
- 3.磷石膏
- 4.利益相关者的参与以及社会许可。

所有四个主题对“报告 1”（2016）[1]和本报告（“报告 2”）（2020）都具有中心意义。它们具有演讲中所强调的应对变化的共同要求，并提醒行业代表，他们应更好地自愿应对此类变化，而不是等待将其强加于他们。

由于持有对全球而言至关重要的磷酸盐资源，中东北非（MENA）地区是全球磷酸盐产业的中心地区，因此该地区被选为她演讲的地点，这也不是巧合。在提倡整体资源利用效率的背景下，Mete 女士提出了养分效率与磷石膏之间的联系，这也并非巧合。磷石膏是富含硫的土壤改良剂的理想来源。

从后面的案例研究分析中可以看出，成功地将态度转变为对磷石膏的增值，与亲自动手、自上而下的领导力密切相关，因为人们认识到磷石膏的可持续解决方案对全球磷酸盐行业而言具有生死攸关的意义。

为化肥工业构建可持续发展的未来：给磷石膏一个背景

为了认识埃辛·米特 (Esin Mete)的演讲具有远见的意义，下面完整复制了她的演讲的 4 个主要段落。

“在第二十届 AFA 全球肥料网络论坛上向您们致辞，这是我的荣幸和愉悦。首先，我要对阿拉伯化肥工业协会表示感谢，以感谢邀请我在阿拉伯世界主要肥料参与者的重要聚会上讲话。

IFA 是肥料行业的唯一全球性组织。仅此特征就使其成为一个非常特殊和独特的全球组织，因此，作为该组织的成员，我们必须确保 IFA 继续开展其活动并实现其成员提出的目标。为了实现这一目标，像 IFA 这样具有悠久历史的组织必须进行更新，以应对我们业务环境中发生的变化，并使其适应这些变化，同时仍保持其核心价值不变。

变革最初是由我的前任威廉·道伊尔(William Doyle)先生发起的。包括我本人和执行管理层在内的新任和未来总裁们将继续进行变革。作为现任 IFA 主席，我强烈鼓励进行改革，以使 IFA 与时俱进。在这方面，我与行政小组和委员会中的同事们一起努力设计出一种新的、更透明的治理体系，以促进每个地区的会员公司的参与。这个新的治理系统将更好地解决我们行业的优先课题。我想今天就与您们探讨这些重要课题：与多边组织的互动、2015 年后的议程、营养管理、产品管理和磷石膏。”

1.零饥饿：可持续发展目标 2

她的演讲强烈预期“可持续发展目标 2”（零饥饿）将成为该行业的重点：

“首先，我想强调，尽管我们所有人都可能面临特定地区的挑战，但是全球社会挑战对我们

所有人来说，无论身处世界何处，都既会带来风险，也会带来机遇。作为一个行业，我们必须共同认识到这些共同点，并共同努力，以为养活世界做出我们独特的贡献，这是当今世界面临的最重要挑战。同时，我们必须表明我们充分认识到我们为可持续发展做出贡献的责任。

肥料能提供养分给农作物，而这些农作物可以养活不断增长的人口。在这方面，肥料可以继续发挥至关重要的作用。此外，通过农艺生物强化，肥料已开始解决微量营养素缺乏的问题，从而对人类健康产生积极影响 [可持续发展目标 3]。这些重要角色并不总是被决策者、利益相关者和广大公众所认可。近年来，由于我们的行业总体上倾向于保持低调，它无法避免进行更多的审查，尤其是在诸如温室气体排放 [可持续发展目标 13] 等环境问题以及对养分使用效率 [可持续发展目标 12] 等方面的审查。

在联合国这个旗面下，国际社会正在着手制定一套新的普遍目标，以取代先前确立的千年发展目标，并在今后 15 年内适应发达国家和发展中国家的增长战略。由于 2015 年后国际议题和可持续发展目标，在这种背景下，化肥行业拥有一次难得的机会，可以最终在国际议程上被视为为世界提供粮食并为营养安全做出贡献的战略提供者。但是，突然强调农作物营养成分也增加了该行业的声誉风险，因为越来越多的关注将增加实现可持续性指标的压力。预计该行业将展示其在改善营养性能和减少有害环境影响方面的目标。

我个人认为，我们应该抓住这个机会，通过有效地采用、实施和传播我们的管理计划，来提高我们的声誉。在这些管理倡议当中，我认为有两个对我们行业至关重要。这就是营养管理和产品管理。”

2.资源利用效率和养分管理

议程上的下一个主题是资源利用效率和营养管理这两个关键概念：

“营养管理是应对更严格的环境法规要求的有力工具，因为它解决了肥料的消耗问题，特别是田间农民使用肥料对环境的影响。营养管理计划正在全球范围内开始实施。北美开发了 4R 营养素管理框架和 4R 研究基金。一些国家制定了自己的计划。澳大利亚实施了 FertCare 计划，新西兰实施了监督者计划。该框架向农民、政策制定者和所有其他利益相关者传达了以正确的速率和在正确的时间、正确的地点使用正确的肥料的原则，以实现经济、社会和环境目标。”

3.作为可持续发展共同支柱的矿物肥料和肥沃土壤

精明地预见 2015 年将给可持续发展政策和实践带来的重大变化：

“2015 年对于整个农业部门，特别是化肥行业而言，将是至关重要的一年。世界将在联合国旗面下融合，为 2015 年后的发展议程确定一条新的发展道路。此外，联合国的 193 个会员国将集体谈判，制定一套新的普遍目标，以指导到 2030 年的经济增长。2015 年也将是国际土壤年。我认为这将是现代历史上第一次对农业在为未来提供解决方案以及建立一个没有贫困、饥饿和营养不良的更美好世界方面的作用给予如此广泛的关注。我相信，我们的行业将为这一重要的一年做好准备，将重点放在上述优先事项上，并得到会员公司、姐妹地区和国家协会以及研究机构的集体支持。”

4. 磷石膏

然后，在这种背景下，她将注意力转向了磷石膏：

“最近，IFA 和 AFA 合作处理的一个课题是磷石膏。

展望肥料和农业中存在的自然发生的杂质（NORM）所带来的挑战和新的重大机遇，是一项行业优先事项。通过合作和有效的倡导，我们可以使它们为我们的行业带来积极的好处。磷石膏涉及 IFA 的许多战略问题：材料的再利用和回收、安全性和可持续性、生命周期、存储、技术机会和新的商业模式，以及利益相关者的参与及社会许可。在这些领域，共享来自世界各地的生产者、协会和研究机构的专业知识很有价值的，而且是非常需要的。在过去，作为一个行业，我们可能冒着更大的声誉损失风险，因为我们不直接解决磷石膏问题。如果我们透明地解决磷石膏问题，那么这种声誉损失风险将会大大减少。这就是为什么磷石膏在 2014 年成为 IFA 技术委员会的一个战略性工作领域的原因。

最后，我想强调，我们通过国家、地区和国际协会开展工作时的使命是提高行业知名度，并形成积极、准确的形象，以及促使我们为应对此类挑战进行努力工作。作为肥料行业的商业领袖，我们知道挑战是巨大的灵感和创新来源，从中我们可以找到应对风险方法并寻求更合适解决方案。为此，我邀请大家一起努力建设和提高化肥行业的声誉资本”。

正如本报告充分说明的那样，埃辛·米特女士所指的努力已经并且正在作出。结果不仅是获得声誉资本，而且还广泛扩展和巩固了全球化肥行业在磷石膏应用方面的综合知识库。因此，磷酸盐工业的产品线现在包括了作为磷酸生产副产品的磷石膏。

前瞻性

埃辛·米特女士的 2014 年议程是否有良好结构，可以通过它为 2020 年再次展望未来创造平台的能力来衡量。现在，她提请注意的“联合国可持续发展目标”正在吸引越来越多的行业的关注。企业正在自愿报告它们的合规性。因此，本报告详细关注以下优先事项：气候行动（可持续发展目标 13）、循环经济包括二次资源的再利用和回收利用、生命周期分析（LCA）和物料流分析（MFA）（可持续发展目标 12.）。

气候行动

磷酸盐行业如何最好地参与气候行动仍处于相对较早的阶段。如案例研究所示，一个非常令人振奋和令人鼓舞的方向是，磷石膏可以被用作种植速生树木的基质，因此大量使用磷石膏对气候行动具有直接和可量化的影响。这些树木可捕获大量的温室气体（GHG），如地面上的二氧化碳，并进一步捕获地下二氧化碳，形成树根物质和土壤有机质的积累。基于加拿大加阳化肥制造公司（Agrium Inc.）（现在叫 Nutrien Inc.）的广泛参与，案例研究 1.1 阐述了这一方法。它表明这种方法在环境和经济上都是合理的，而且是可持续的。“报告 2”也给出了其他类似性质的相关机会，供 IFA 成员们参考。

循环经济

考虑了两个与循环经济有关的方法。第一个是循环前的“过渡”模型（图 1）。该模型解释了废物层次如何充当从“线性”到“拒绝/重新考虑/重新设计”中间步骤到循环经济的桥梁作用。第二个（图 2）是关于“循环经济”作为连续物料流的新循环范式的“最终状态”元模式。至关重要的意义在于，循环经济中的物质仍保留在系统的范围之内，不会作为废物而离开。

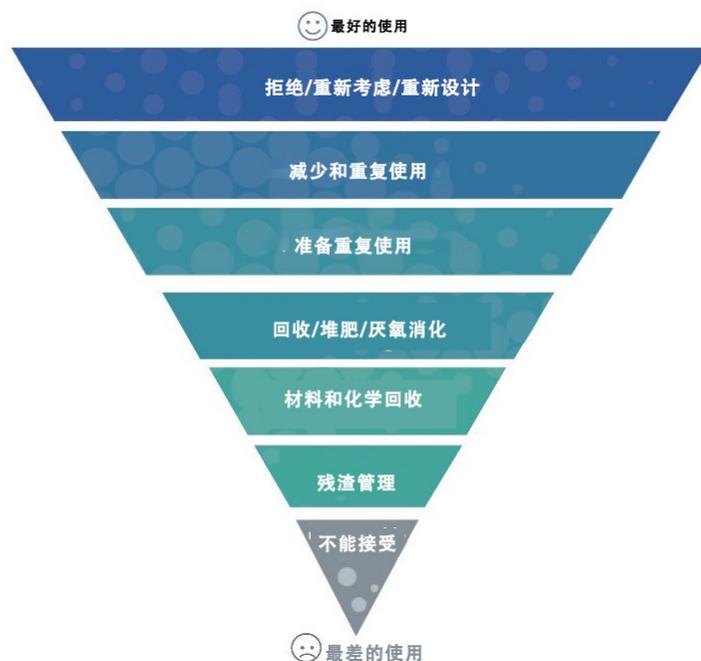


图 1. 过渡：从残渣管理到“拒绝”、“重新思考”和“重新设计”

这种“废物”的性质及其在资源管理系统中的作用的根本转变，可能是过渡所要求的最根本的变化，因为它有效地利用了监管选项，宣布初步把磷石膏从废物表单中去除。

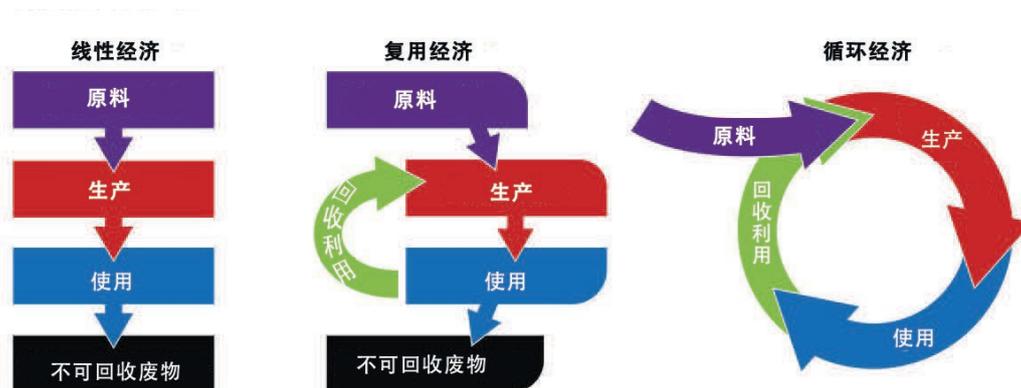


图 2. 循环：从“线性”到“重用”到“循环经济”过渡的元模式

再利用和回收：磷石膏的临时存储区域和再处理设施

从线性经济到循环经济的转变，对我们对所使用资源的理解和我们对其进行使用的实践的影

响一样大。从正式的意义讲，这导致在资源管理法规中重新分类它们 - 例如，磷石膏从废物被划分为副产品（或“人为资源”）。重新分类还需要对术语进行其他重大更改，例如将来如何以及在何处将磷石膏存储为资源，以供重新使用，而不是简单堆放处理。

这些重命名原则应用于磷石膏的示例，是由欧洲肥料协会委托为其磷石膏生产成员进行的一项有关新旧磷石膏的寿命终止和废物终结措施的研究。该研究于 2019 年 1 月发布[5]。通过按照美国环境保护局²的要求，使用“完全成本核算”程序对磷石膏山堆进行成本估算，得出的结论是，设计为处置场地的磷石膏山堆的经济和环境成本是不可持续的，与循环经济目标不符。这些循环经济目标是：a) 通过替代二次资源来节约初次资源，以及 b) 零废物排放。磷石膏堆放会占有大量土地，使这些土地无法生产粮食或产生其它受益，从而使其无法在未来带来任何经济利益，并给子孙后代带来了不必要的外部成本。在做出堆放处置的决策过程中，决策者无法与这些子孙后代进行协商[6]。

首先，在循环经济中，磷石膏被归类为磷酸的副产品，而不是废物。因此，它不会被堆放处置或排放。相反，它作为二次资源或“可重复使用的原材料”保留在系统中。这种定位使磷石膏与欧盟循环经济行动计划的宗旨和目标保持一致，并达到了该计划中规定的实现废物终结状态的根本目的。这又使其与新的《欧盟肥料条例》 [7]³的基本原则保持一致。

重新分类过程的结果是，重命名长期存储磷石膏的场地或设施为“临时存储场地”（ISA）或“临时存储设施” [8]，而不是“山堆”。鉴于少数具有全球影响力的磷酸生产商产生大量磷石膏，这对于本地磷石膏管理策略而言是必然的结果。在过去的 30 年中，磷石膏山堆常被认为是垃圾堆。这对社会接受磷石膏山堆产生了重大的负面影响。

生命周期评估和材料流分析

生命周期分析和评估（LCA）以及物料流分析，是绘制磷石膏生产、使用和最终处置整个过程的基本工具。磷石膏从湿法反应器中的结晶，然后过滤，最后被存放在堆场。在“循环经济”中，堆放的废物（关于物料流的线性模型，请参见图 3）可以转换为可重复使用的资源 [8]。它支持在一个产品的整个使用过程中与该产品相关的环境和经济方面的描述和评估过程。

²有关美国环境保护署完整成本核算模型，请参阅 <https://archive.epa.gov/wastes/conserves/tools/fca/web/html/whatis.html>

³ 参见 <https://www.consilium.europa.eu/zh-CN/press/press-releases/2019/05/21/eu-adopts-new-rules-on-fertilisers/>

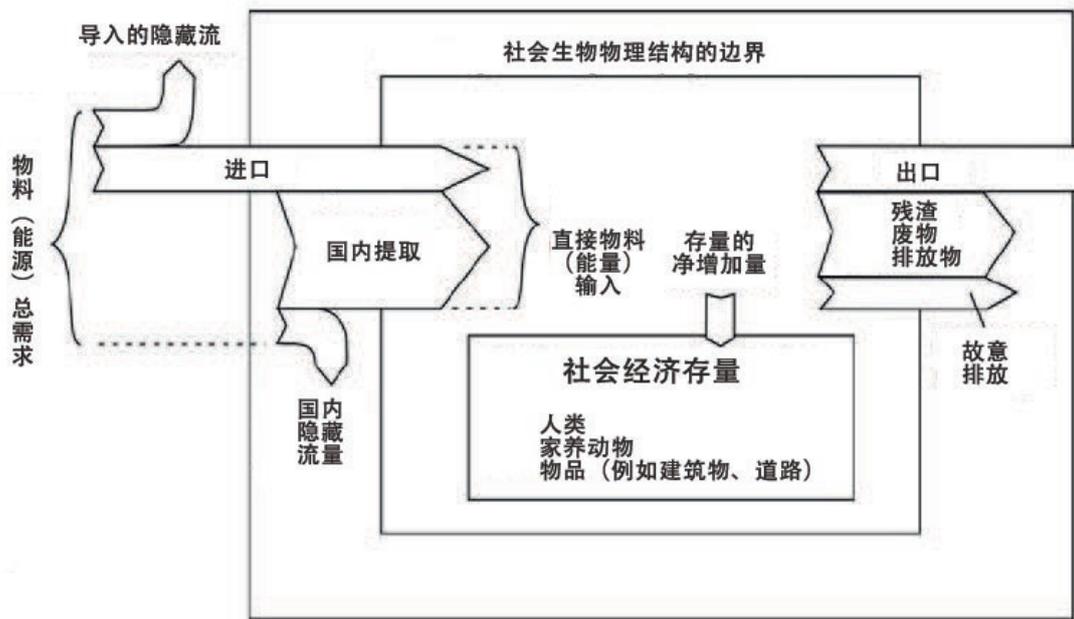


图 3. 废物故意排放的物料流线性模型

在磷石膏的线性 LCA 模型中（图 3），它充其量只有一种用途，而最坏的情况下根本没有用途。在最佳循环经济中（图 2），磷石膏将被完全重用。根据它的应用，它可能会被重新处理成其他东西，或者大体上保持完整无缺，例如就像人造土一样（见案例研究 1.1）。作为人造土，a) 它保持原样，但在生产中用作土壤，b) 需要时，它大体上可回收，用于其他用途。

典型的 LCA 研究可能包含以下四个组成部分中的一个或多个：⁴

1. **范围定义和职权范围：** 定义将产品生命周期的哪些部分包括在 LCA 以及 LCA 的用途。
2. **库存分析：** 库存分析从产品系统中收集数据并描述该系统中的物料流和能量流，包括其生产过程和技术、原材料和输入、对环境的输出和排放、以及能源和余额。
3. **影响评估：** 生产和使用过程的执行结果，无论是材料、经济绩效还是环境和社会影响，包括外部性[8]，均可通过规范化和相对权重（如需要）进行量化和归类。
4. **解释：** LCA 解释涉及关键/独立评审和同行评审，确定数据敏感性和发现。

⁴ 参见 <https://www.iso.org/standard/37456.html>

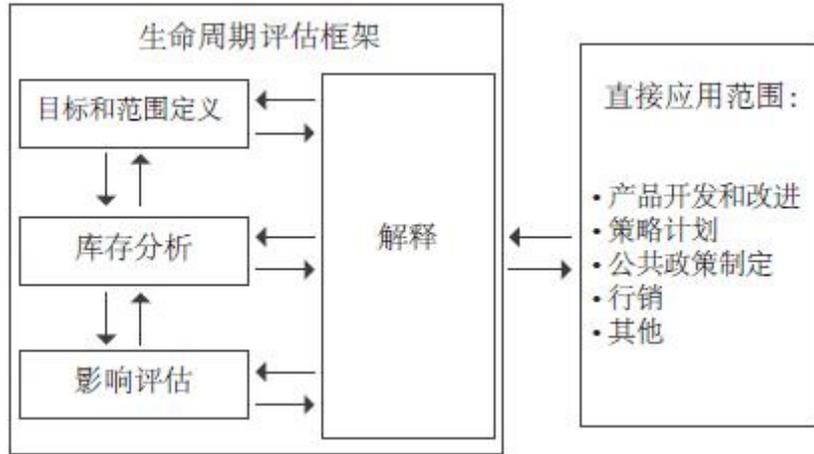


图 4. 生命周期分析 (LCA) 的阶段, EN ISO 14040

图 4 显示了符合 ISO 14040 准则[9]的这些方面。

可以通过计算产品生命周期中每个阶段所消耗的资源 and 能源（输入）以及所排放由此产生的污染物和废物（输出）来确定人类活动对环境造成的负担。然后评估输入和输出对可再生和不可再生资源、人类健康和生物多样性等的长期可持续性的不利影响。一旦知道了这些，就可以采取措施减轻输出（或库存）对环境的影响。例如，由国际原子能机构的 SR 78 团队完成的磷石膏完整生命周期分析和评估研究，做出了 SR 78 中的一个监管发现，即对磷石膏来说，使用它而不是将其丢弃到陆地或海洋里可获得一个更好的环境经济结果[2]。

“报告 2”的相关目标

除了批准“报告 2”的开发和发布，包括一个用于指导“报告 2”整个开发过程的草拟目录外，在马德里举行的磷石膏/自然发生的放射性物质工作小组（PGNWG）会议就“报告 2”5 的三个主要相关目标达成共识，其中每个目标都影响了本报告的发布。这些目标为：

1. 加强新型磷石膏认识的交流
2. 循环经济政策所要求的用于可持续磷石膏管理和使用的质量规程模板
3. 消除市场参与的障碍，包括在利益相关者和投资者之间建立信任。

用于可持续磷石膏管理和使用的质量规程

在 2018 年 4 月的会议上，PGNWG 成员同意为可持续磷石膏管理和使用开发并试点一套独立的、经过同行评审的质量协议（QP）（即良好做法模型）。这些质量协议将是用于与监管机构和最终用户进行沟通和鼓励他们参与的战略的重要组成部分，并有助于在一些地区（例如欧盟国家）为磷石膏获得“废物终结”认证，因为在许多欧盟国家，磷石膏现仍被归类为“废物”，无论它是否有害或无害。这项任务将由三个国际机构完成，包括联合国经济委员会（日内瓦）、联合国大学和国际原子能机构（维也纳）。

运营商与监管机构之间的参与策略的目标是，同意并实施合作策略，以至少把磷石膏分类为“可重复使用的原材料”。最终目标是 100% 利用目前生产的磷石膏和在世界 50 多个国家/地区发现的陈年堆放的磷石膏。它还实现了国际原子能机构 SR78 团队的一项关键发现，该发现鼓励监管机构以这种方式积极地与运营商合作[2]。

质量规程和安全数据表

随附产品的安全数据表⁵ (SDS) 将包含根据磷石膏的使用或应用类型而定的可信的磷石膏质量协议，SDS 用于产品的注册和最终应用。

质量规程结构、目录和证据库

质量规程至少包括四个叙述部分、四个附录以及一个由六个步骤组成的起草和维护过程，如下所示：

- 1.工艺说明：**什么是磷石膏？它是如何制造的？湿法磷酸和磷石膏生产简介
- 2.使用的选项：**磷石膏可以是 a) “按原样” 再利用，即很少或不进行再处理，或 b) 再循环，例如通过把它再处理成硫酸铵和碳酸钙，以及富含硫的化肥产品（如硅藻土）或新的土壤（人造土）
- 3.性能和影响的证据：**有关所拟定的用途符合质量协议中规定的特性、安全和性能数据的证据
- 4.案例研究/参考案例：**专门针对一个企业所生产的磷石膏的工作实例。

用于“废物终结”认证的所有质量协议的起草要求

需要包括质量规程的以下组成部分：

- 1.评估您的材料当前是否被归类为废物
- 2.适用的废物管理控制规则
- 3.相关的非废物产品规定
- 4.进出口要求，包括许可证和执照
- 5.监视和更新质量协议
- 6.与环境监管机构的合作。

验收标准

为了满足“废物终结”状态的验收条件，必须具备三个主要条件，并提供独立验证的支持证据：

- 1.磷石膏的应用对人类和环境安全吗？
- 2.是否存在现有或可能的使用市场？
- 3.使用是否有助于如下目标：废物减量/零废物排放，向循环经济过渡，以及可持续发展目标 12，即“可持续的生产和消费”？
- 4.参考文献和同行评审过程中展示的《质量协议》的叙述和证据库必须表明，这三个验收标准已满足了，并将定期进行审查。

附录

磷石膏新意识由四个附录补充：

⁵ 根据联合国标准，从 2016 年开始使用的 SDS 的 16 部分格式可以在 <https://www.osha.gov/Publications/OSHA3514.html> 找到。

附录 A: 定义

附录 B: 行业生产标准和质量控制

附录 C: 根据 a) 放射性核素和 b) 重金属含量的分级方法对磷石膏进行规范化分类 (图 5)

附录 D: 磷石膏的储存、处理和使用的良好做法。

分级方法

国际原子能机构将分级方法定义为：“一种使对产品或过程施加的控制严格程度与失去控制相关的风险相称的结构化方法” [3]。

磷石膏		
表征		
$^{226}\text{Ra} \ll 1\text{Bq/g}$	$^{226}\text{Ra} \sim 1\text{Bq/g}$	$^{226}\text{Ra} > 1 \sim 2\text{Bq/g}$
所有金属<限值	1 种或更多关键金属>限值	1 种或更多关键金属>限值
+++	++	+
可选项用途		
所有用途： - 农业 - 建筑 - 建筑材料 - 垃圾填埋场 - 道路等	所有用途： 但用于住宅建筑的分级方法除外	- 副产品回收/硫 - 垃圾掩埋场 - 非住宅建筑 - 分级方法 - 农业 - 有限方法 - 建筑用途/住宅
监管		
无需监管的途径： “无需监管”	吸入途径限制： 对住宅而言，视情况而定	需要监管的吸入、摄入和环境途径： - 目标用途 - 逐项豁免
分级方法		
→		

图 5. 用于磷石膏用途类型分类的分级方法

对于磷石膏作为一种自然发生的放射性物质残渣的情况，根据基于协议的、经过同行评审的表征研究的结果，分级方法的应用将产生三种监管选项 (图 5)：

- 1.超出法规范围：磷石膏不受限制地用于任何给定的应用，但需不断监控所使用的磷石膏与安全数据表 (SDS) 中记录的特征是否一致
- 2.授权用于一般用途，但对某些用途有限制 (例如，用于住宅)
- 3.授权，但受一系列特定应用的限制，需要通知 (较低风险类别) 或许可 (较高风险应用)。

2018-19 年会员企业磷石膏调查

当启动 2018-19 年成员企业磷石膏调查时，没想到成员企业会为“报告 2”做出如此丰富和全面的贡献。因此，“报告 2”的重点自然地转移到成员企业所实施的实际项目和计划上来。每个这样的项目和计划对于在何处以及如何扩大经过证实的大规模应用以及新产品开发等方面都具有指示性的价值。

但是得益于收到的调查回复以及来自公共来源的一些补充信息，一份按国家划分的资源分类、法规环境和政策趋势的全面汇总清单现已形成了，并具有有关磷石膏年产量（吨数）和按主要用途类型的使用百分比趋势的一些相关指标（有关汇总清单的当前状态，请参见表 1）。这些应用类型映射到第 2 部分中的案例研究，以便对试用此类用途感兴趣的生产厂商相信，他们在执行和评估方面都有参考案例可遵循。反过来，这将为将来编写安全数据表和质量协议提供丰富的参考资料。

在监管机构和运营商之间建立信任的一种重要方法是展示 IFA 的成员企业已经开发了磷石膏管理和使用的良好做法，显示所有生产国的共同属性。反过来，这增加了成员企业彼此之间分享这些做法的信心，表明现在可以选择将其中一些做法转换为标准和规范，作为对《安全数据表》和《质量协议》的自然、可操作的补充。

由于政策和法规问题关系到国家或地区主权，因此表 1 的内容 a) 按国家排列，并且 b) 有来自联合国机构，特别是地区经济委员会和国际原子能机构，的附加信息。需要做很多工作来协调这些法规。这意味着跨地区的磷石膏也可以改变其分类状态，从而影响其使用潜力。但是，如果 IFA 会员企业决定采取这种方式，则在联合国的支持下有实现这种协调的经过证实的方法。

由于零废物排放和循环经济等政策驱动因素，目前中国磷酸生产者欲实现 100% 利用磷石膏的目标。现在，似乎已经可以通过一种或多种方式在其他地方逐步实现这样的目标。

表 1. 磷石膏的某些用途、应用类型、政策和监管趋势（截至 2020 年⁶的状态）

地区	主要应用领域 C: 商业 P: 试点	磷石膏量 (千吨/年)	占比 (%)	新应用开发 研发 新产品开发	磷石膏分类/法规	磷石膏使用 合作伙伴关系	政策监管趋势	市场障碍 监管的 商业的
比利时	农业 (C) 生物多样性	5	~5 ~95	√	允许的土壤改良剂-用于保水品质。 最近意识到 磷石膏 作为生物多样性促进剂的作用。	√	在明确和商定的职权范围内与监管机构合作。虽然有歧义： “被处理后，磷石膏就成为无害废物。在生产现场尚未正式确定所生产的石膏的地位。1995 年，当局在一份书面文件中承认，水泥和灰泥工业中使用的硫酸钙不应被视为废物。同时，我们拥有授在水泥和灰泥行业使用石膏。这意味着石膏的废物地位。”	满足可耐福(Knauf)公司的产品验收标准是主要问题。 认识并克服限制被视为刺激创新和新产品开发的动力。 AGW 促进某些废物的回收， 地方当局正在制定有关“废物和副产物利用”的“瓦隆计划 (Walloon Plan)”。
	灰泥 (C)			√	可重复使用的原材料 (已有 42 年的商业历史) -但故意模棱两可。 - AGW-01/16/2014 - 与某些对环境产生重大影响的活动有关的部门条件 - AGW-04/07/2002 - 1999 年 3 月 11 日法令涉及的环境许可证所涵盖企业的一般运营条件 - 环境法规 - 第一册：法规部分 - 环境法规 - 第二册：水法规 - 2015 年 8 月 19 日发布的单个许可证 D3200/61080/RGPED/2015/2/AU/ss-PU 续签经营 CET 的授权 - 2003 年 2 月 27 日发布的 AGW，为运营技术垃圾掩埋中心设置了部门条件 - AGW-12/13/2007 - 定期通知环境数据的义务 - AGW-03/18/2004 - 禁止将某些废物放入技术掩埋场。 - AGW-14/06/2001 促进某些废物的回收	√	磷石膏使用需要每种使用类型的许可证。 磷石膏存储的许可系统已经建立。 在 2015 年续签的许可证 - 有限期延长到 2035 年。 存放磷石膏无需 HDPE 衬垫。 生物多样性红利是一个主要好处。	
巴西	农业 (C)	10,000	~85	✓	国家核能委员会，2014 年 4 月 30 日第 171 号决议，[10]	✓	现在，巴西已使用 100%+ 磷石膏，已开始开采遗留的磷石膏堆。	运输费用。乌贝拉巴靠近塞拉多农业地区。
	水泥 (C)		~100	✓		✓	例如，美盛公司 (Mosaic) 乌贝拉巴 (Uberaba) 工厂生产磷石膏的 83% 被利用，其中 90% 以上用于农业。 美盛公司卡哈蒂 (Cajati) 工厂生产磷石膏的 112% 被利用 (即利用遗留磷石膏)，	运输费用。

⁶ 来源：IFA 成员企业的调查回复、“报告 2”的案例研究、公共领域

							其中将 90% 以上用于水泥生产。		
加拿大	生长介质(人造土) (P)	磷酸生产		✓	可重复使用的原材料 加拿大卫生部《自然发生的放射性物质管理指南》 磷石膏使用不受限制，但要遵守自然发生的放射性物质行业扩散和分发准则。	✓		进入市场的“有机”方法。与大学和/或政府一起测试有效的方法。伙伴 18 跟随市场，例如林业/碳信用额。社会接受度具有挑战性。	
	林业 (C)	已停止		✓		✓			
	生物多样性	只有遗留的磷石膏							
	水泥 (P)			✓		✓			
中国	农业	79,000	40		无害废物。 中华人民共和国环境保护法。 日期：该法律的最新版本于 2015 年 1 月 1 日生效。		推动零废物和循环绿色经济。 鼓励使用磷石膏： 贵州和湖北等磷肥生产省份强制 100% 磷石膏使用。 其他地方的最低使用目标： 到 2025 年，从 15% 上升到 25%。 对质量协议有浓厚兴趣。 如果未达到目标，将按比例缩减生产以充分利用磷石膏。 强制性使用目标被视为对行业有利。	磷石膏产量巨大。中国的磷石膏年产量约为 8000 万吨/年。 水泥 (C) (P)；遗留的磷石膏量估计为约 4 亿多吨，年均上涨 4 千万多吨。 在中国，磷石膏被包括在更广泛的石膏类别中，包括烟气脱硫所生成的石膏。 石膏行业每年产生 10 亿吨石膏。多数类别的石膏比磷石膏面临更高的市场进入壁垒。 由于依赖煤炭能源的水泥生产厂被关闭，水泥市场承受压力。	
	水泥 (C) (P)					✓			
	建筑 (C)					✓			
	肥料 (C)					✓			
	矿山回填					✓			
欧盟					可重复使用的原材料 (如果可以显示“废物终结”状态)		肥料法规；“可重复使用的原材料” 废物终结途径/标准 质量协议 安全数据表		
芬兰	农业 (P) 林业 (P) 道路建设/路堤 (P)				常见废物 适用于 Siilinjärvi 场地的环境许可证 (其中还包括磷石膏堆放法规) -环境法 (Ympäristönsuojelulaki527/2014)， -废物法 (Jätelaki834/2017)		符合可持续发展目标 (SDG) 循环经济转型	最低使用目标被视为有利。 石膏中的重金属浓度阻止了其在环境或农业领域中的使用。	

	道路建设/路堤 (P) 环境 (P)				-垃圾填埋场指令 (Kaatopaikka asetus (331/2013))			
印度	农业 (C)			✓	原子能监管委员会 (AERB) AERB 指令 10/09 中央污染控制委员会 (CPCB) 磷石膏指南 (2015) [11] 产品规格 -灰泥中磷石膏 IS 12679 (1989): 用于灰泥、转块和石膏板中的副产品石膏 [CED 4: 建筑石灰和石膏制品]	印度的年磷石膏产量的 77%已被利用 (生产 827万吨, 使用 696万吨); 目标是 100%; 水泥占使用的 62%, 农业占 7%。剩下的磷石膏 - 有许多用途。缺硫土壤被视为主要的提高磷石膏使用量的机会。	磷石膏使用不受限制, 但需要定期监视和测试(土壤采样, 径流情况下的渗滤液)	
	水泥 (C)			✓				遵守法规规定; 商业 - 运输成本; 后勤瓶颈
	建筑			✓				
	道路建设			✓				符合法规要求。
	土壤改良剂			✓				遵守法规规定; 在缺硫土壤里使用是磷石膏使用增长的主要机会。
哈萨克斯坦	土壤改良剂 (C)				无害废物 1. 哈萨克斯坦共和国生态法; 2. 哈萨克斯坦共和国技术监管法 3. 哈萨克斯坦共和国消费者保护法 4. 肥料安全要求 5. ST RK 2208-2012 农业用磷石膏 - 技术条件	在积极规划中, 以扩展应用类型/用途。磷石膏按危险等级分类: 第 5 危险等级, 即不危险 (共和国 SES ST RK 2208-2012 的结论)	用作土壤改良剂的既定用途受到运输成本的严格限制。 市场吸收受到以下因素的抑制: - 高运输成本 (公路和铁路); 缺乏投资 - 缺乏商业伙伴 主要机会: - 用于道路建设	
摩洛哥	农业 -土壤改良剂 (P) -肥料 (P)	37,000- 42,000		✓	危险废物 无机化学过程产生的废物: 酸的制造、配制、分配和使用 (FFDU) 产生的废物: 磷酸和亚磷酸	✓ 磷石膏储存 没有关于储存磷石膏的特定国家法规。 对于有害废物: - 2008 年 7 月 18 日发布的第 2-07-253 号法令, 关于废物分类和危险废物清单。 - 2009 年 12 月 8 日发布的第 2-09-284 号法令, 规定了与受控垃圾填埋场有关的管理程序和技术要求。	首次试点测试成功。 主要用途: - 缺 S 的土壤 - 苏打/盐渍土壤 - 物理退化的土壤 (侵蚀/荒漠化)	

	道路建设			✓		✓		首次试点测试成功。 广泛把磷石膏用于各类道路建设是主要增长机会。
菲律宾	农业	1000					对墙板制造中进口磷石膏使用的新 (2019年)法规限制(放射学方面的考虑)	
	水泥(C)		50			✓		
	稀土元素 & 铀回收(P)			✓		✓		
波兰			✓		无害废物 国家立法(仅以波兰语提供): - 2012年12月14日《废物法》。(Dz.U. 2018 poz.992 t.j) 23, - 2013年4月30日环境部长关于垃圾掩埋场的规定(Dz.U. 2013. 523) 24, - 2015年7月16日经济部长关于批准将废物存储在垃圾填埋场中的标准的规定(Dz.U.2015.1277) 25, - 2001年4月27日发布的《环境保护法》(Dz.U.2018.799t.j.) 26, - 2014年12月9日环境部长关于废物目录的规定(Dz.U. 2014.1923) 27, - 公司内部法规,例如 综合许可证和垃圾填埋场手册。		监管气氛宽松的迹象。 2019年批准每年可将5,000 - 10,000吨磷石膏用于研发特定用途(例如土壤改良剂)。	对于分类为废物的东西,它们的每种应用类型都需要许可,并抑制市场对它们的吸收。 它们的运输也有限制。 努力将每年5,000吨至10,000吨的磷石膏的“废物”分类更改为“副产品”。最近同意把磷石膏用于研发目的。
	农业		2%	✓	无害废物		每种使用类型都需要许可证	
俄罗斯联邦	土壤改良剂(C)				- 10.1.2002 N 7-FZ《俄联邦环境保护法》 - 24.06.1998 N 89-FZ 联邦法律《俄联邦生产和消费废物法》 - 俄罗斯联邦政府第 03.10.2015 N 1062 号决议,“关于收集、运输、加工和处置 I-IV 危险类别的废物的许可活动” - 俄罗斯联邦政府 16.08.2013 N712 号决议“关于对 I-IV 级危险废物进行认证的法令” - 俄罗斯联邦政府 13.09.2016 N 913 号决议“关于对环境造成负面影响的支付比例及其他系数” -俄罗斯自然资源部 30.09.2011 N 792 法令«关于维护国家废物清单法令的声明» - 俄罗斯联邦自然资源部 25.02.2010 N 49 法令 《关于批准废物放置物品清单的规则》		磷石膏的农业使用补贴于 2020 年初恢复。 报销 100% 农民的磷石膏使用成本,包括运输成本(部分地区)	用作土壤改良剂的既定用途受到运输成本的严格限制。 市场吸收受到以下因素的抑制: - 高运输成本(公路和铁路), 缺乏投资 - 缺乏商业伙伴 主要机会: - 用于道路建设

					<ul style="list-style-type: none"> - 俄罗斯自然资源部 25.02.2010 N 50 法令 “关于开发和批准废物形成标准及其放置限制的法令” - 俄罗斯自然资源部 04.12.2014 N 536 法令 “关于批准对I-V类危险废物对环境造成负面影响程度的参照标准” - 俄罗斯自然资源部 04.03.2016 N 66 法令 «关于废物处理设施的所有者以及拥有或使用这些设施的人负责这些设施范围内的废物处理对象、监测条件和 环境污染及其对环境的影响程度的法令» - 俄罗斯自然资源部 01.09.2011 N 721 法令 «关于废物管理领域的核算程序的申明» 			
	道路建设 (C)			✓			政府批准把磷石膏用作筑路材料	成功完成试点研究。 扩大潜力
联合国					人为资源	✓	在 UNFC 中将磷石膏重新归类为人为资源 (UNFC 指南, 2019 年) [12]	<p>用作土壤改良剂的既定用途受到运输成本的严格限制。</p> <p>市场吸收受到以下因素的抑制:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 高运输成本 (公路和铁路), 缺乏投资 - 缺乏商业伙伴 <p>主要机会:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 用于道路建设
美国	农业 (C)	32,000			美国环境保护署,《有害空气污染物国家排放标准》(NEHSAP)R 部分[13]。			
	水泥 申请豁免 (2019 年 11 月)				磷石膏法规中定义的有害废物 (基于放射性考虑) [17]			
	筑路 申请豁免 (2019 年 11 月)					如果其放射性浓度低于 0.37 Bq/g, 在美国东南部磷石膏允许用于农业。但要求每年对相关土壤进行采样和表征。		
	矿山回填							
国际					副产品 基本安全标准 (2014) [4]		磷石膏储存必须确保公众和环境的健康与安全。	参与可能会大规模磷使用石膏的潜在应用:

原子能机构					<p>原子能机构安全报告 78 [7]</p> <p>阻止磷石膏使用没有放射学依据</p> <p>按使用类型和使用环境（社会和环境考虑），遵照相称原则，通过“分级方法” [8]使用磷石膏</p>		<p>无论是陆上还是海上，都应使用对环境有利的磷石膏处置方法。</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 二氧化碳封存/气候行动 - 防治荒漠化/防止毁林
联合国					<p>人为资源</p>		<p>在食物-能源-水资源关系中把磷石膏被重新分类为人为资源[13]</p>	<p>参与可能会大规模磷使用石膏的潜在应用：</p> <ul style="list-style-type: none"> - 二氧化碳封存/气候行动（可持续发展目标 13） - 防治荒漠化/防止毁林（可持续发展目标 12）

第 2 部分 创新

1. 实例研究：农业

根据“报告 1” [1] 的数据，全世界磷石膏的再利用主要领域是农业、建筑/建筑材料和道路。几个 IFA 成员企业已详细考虑了在其中一个或多个领域中开发磷石膏的再利用，并在以下案例研究中记录了他们的方法。尽管编辑过程已经统一了所有文稿所述的方法，但区域需求和当地的工作文化习俗得到了尊重，正如原始的未编辑文稿中所介绍的那样。在整个案例研究中都有证据表明，无论是在公司政策形成方面还是在案例研究的基于科学的实施中，都是在开发良好做法方面进行的重大投资。现在还没有人尝试在适当时候把证据中的许多优良做法规范成一个统一标准，以用于正式认证。现在可以启动这样的过程，但是将由 IFA 成员企业确定何时希望进行下一步。

自 1980 年代以来，人们就对磷石膏进行了广泛的研究以用于农业，尤其是在美国佛罗里达工业和磷酸盐研究所（FIPRI）资助和部分领导下的美国企业，以及在巴西联邦政府机构，包括联邦和州级监管机构，与学术界和工业界之间所形成的利益联盟支持下的巴西企业。Alcordo 和 Rechcigl 于 1993 年对美国把磷石膏应用到农业所做的工作进行了精彩总结[14]。

随着世界上越来越多地区的土壤中缺乏硫元素(S)缺乏，S 与 N、P 和 K 一起被认为是一种重要的宏观营养素。磷石膏是农作物 S 和 Ca 的良好来源，是苏打和粘土土壤的改良剂，是一种改善土壤铝毒性的改良剂，但在灌溉系统中也可以显着提高用水效率。在全球范围内，已经进行了关于成功地将磷石膏施用到 50 多种主要作物上的研究。这些作物生长于各种气候条件和多种土壤中。自 2018 年以来，磷石膏已越来越多地被用作生产创新的、经济实惠的富含 S 的肥料（如 Zypmite）的原料（见以下案例研究 4.3.4）。

在来自塞维利亚和韦尔瓦大学的拉斐尔·加西亚·特诺里奥教授（Prof. Rafael García Tenorio）及其团队的领导下，在 2000 - 2005 年西班牙西南部，从放射学和更广泛的环境角度对农业中的磷石膏用途进行了首次循证研究。磷石膏在 1950 年代首先用作人造土，从瓜达尔基维尔河（the Guadalquivir）三角洲的盐沼中收回了大片土地用于农作物生产。此后，该三角洲成为欧洲最高产的农业地区之一。在国际原子能机构的“安全报告 78”（SR 78）的第 10.5.1 节[2]中，可以找到特诺里奥教授团队的工作细节。它还提供了在把磷石膏应用于农业中的科学条件下进行的研究的更一般的总结。“报告 1” 的第 3 部分也介绍了磷石膏的广泛农业应用。

以下案例研究，以及磷石膏在巴西、加拿大、印度、哈萨克斯坦、摩洛哥和俄罗斯等国的农业和林业中广泛应用的概述，提供了有关在这些国家将磷石膏用于农业的详细观点。如上所述，已采用“轻触”方法对文稿进行复制编辑，同时尊重原始文稿的色调和风格。

1.1 造林和磷石膏人造土：加拿大

作者简介

康妮·尼科尔（**Connie Nichol**）于 1995 年开始在加拿大加阳公司（**Agrium**）工作，是 IFA 磷石膏工作组的长期成员。康妮对磷石膏教育充满热情，并定期向员工、社区团体和大学课程进行演讲。在 2010 年，她制作了一个内容丰富且有趣的视频，《磷酸盐的故事》。该视频在 2020 年得到了重大更新。可以在 <https://vimeo.com/392091921/5ec1339ac7> 上观看该视频。

康妮拥有阿尔伯塔大学（**University of Alberta**）的农业学士学位和土壤化学博士学位。她于 2007 年至 2014 年间在艾伯塔大学担任课程讲师，开发了一个有关废物管理和利用的大四土地复垦课程。

1.1.1 背景

Nutrien 公司（前身为 **Agrium** 公司）是世界最大的化肥公司，是由加拿大钾肥公司（**PotashCorp**）和北美最大的农业公司加拿大加阳公司（**Agrium**）在 2017 年合并而成的巨无霸企业。它在加拿大拥有两个磷石膏储存设施，其中一个位于阿尔伯塔省萨斯喀彻温堡（**Fort Saskatchewan**），那里的磷肥是由该企业的一家前身公司在 1965 年至 1991 年之间生产的。在此期间，约 500 万吨的磷石膏被生产。磷石膏的存储面积约为 32 公顷。目前已回收了该面积的一半。加拿大加阳公司在 1996 年收购了这些磷石膏资源，作为另一个商业交易的一部分。

Nutrien 的第二个更大的加拿大磷石膏储存区位于艾伯塔省的 **Redwater** 附近。磷肥在该地区生产了 50 年，遗留了约 5 000 万吨磷石膏（覆盖约 275 公顷的土地）。磷肥生产厂已于 2019 年 4 月被关闭，因此必须在不久的将来对所有磷石膏存储区进行复垦。

加拿大加阳公司花了一些时间考察 80 年代和 90 年代磷石膏的再利用机会，并开发了材料安全数据表（**MSDS**）用作其磷石膏副产品（请参阅附录 2）。磷石膏被用作苏打土壤的土壤改良剂，以及用作堆肥和油砂尾矿修复的添加剂，但仅限于小规模试验和示范。从历史上看，加拿大既不鼓励也不禁止使用磷石膏，除规定 **NORM** 材料释放极限的加拿大卫生准则外，磷石膏的使用不受任何其他法规的约束。

磷石膏从未被推广为加拿大加阳公司的一个产品。该公司在 2000 年代初将重点从磷石膏的再利用转变为就地（即在存储地点）进行磷石膏的“改造”。加拿大加阳公司仍根据需要向当地农民提供磷石膏，以用于奶牛场垫料或土壤改良，但并未积极开发磷石膏再利用市场。

1.1.2 监管环境

在艾伯塔省或甚至在整个加拿大，都没有政府法规要求回收磷石膏山堆，也没有标准方法来回收它们。在艾伯塔省，默认复垦方案是将磷石膏山堆视为一个填埋场；当关闭该填埋场时，用 1 m 厚的土壤覆盖它。加拿大加阳公司认为，这种土壤深度对于复垦成功或环境保护是不必要的。由佛罗里达工业和磷酸盐研究所（**FIPR**）资助的在美国佛罗里达州进行的研究表明，如果 pH 升高到 4.0 以上，并且提供了氮、钾和镁等养分，则可以直接在磷石膏上建立良好的植被覆盖³³。在 2001 年对 **Redwater** 磷石膏山堆进行的研究证实了这一发现，并

表明仅需少量的土壤改良剂即可促进植被在已浸出酸性工艺水的磷石膏上健康、茁壮地生长。

艾伯塔省监管机构同意让加拿大加阳公司进行研究，以确定最佳的复垦策略，并指示加拿大加阳公司在完成复垦计划之前确定需要调查的关键因素。这些因素包括设计一个“寿命终止”（EOL）盖，该盖将执行多种环境保护功能，其中包括：

- 为植物生长提供合适的基质
- 尽量减少来自磷石膏山堆的潜在污染物的渗透和向下迁移
- 减少磷石膏山堆所产生的氦气和伽马射线
- 尽量减少磷石膏的风蚀和水蚀
- 尽量减少潜在受体与磷石膏材料之间的暴露途径
- 提供自我维持的 EOL 设计。

1.1.3 与阿尔伯塔大学合作

2005 年，加拿大加阳公司与阿尔伯塔大学土地复垦系开始了一项合作的复垦研究计划。多年来，根据需要研究的领域，他们与不同的土壤科学、复垦和林业学教授合作。尽管加拿大加阳公司之前曾在 Redwater 磷石膏山堆上进行过复垦研究，但监管机构并未认为此研究是稳健而公正的，因此需要与独立的外部组织进行合作研究项目。

在过去的 13 年中，有 7 名学生因在该项目各个方面的工作而获得了硕士学位³⁴。最初的研究项目研究了覆盖磷石膏山堆所需的土壤厚度以及需要播种的草。但是随着时间的流逝，研究人员发现，显然将土壤混合到磷石膏中而不是使用屏障方法进行复垦是有益的。一旦将土壤混入磷石膏中并且不再考虑植被的生根深度，便可以考虑种植树木，这为降低长期维护成本和隔离二氧化碳以应对气候变化提供了可能性。

Nutrien 已为大学生提供了技术和财务支持，并为他们的顾问委员会提供服务。它每年花费约 50,000 美元来支持一名研究生来开展研究计划。这包括学生的津贴、分析和设备费用、车辆津贴和大学间接费用。这些学生享受了在工厂现场工作的机会，同时帮助创建针对实际问题的创新解决方案。

2014 年，加拿大森林局加入了这项合作，提供将短轮伐期木本作物系统应用于工业场所方面的专业知识。Nutrien 目前正在资助第八个阿尔伯塔大学理学硕士学生。该学生正在评估一个树木覆盖的磷石膏山堆的水文平衡。该学生将测量渗入、径流和蒸散量，并检查树木的生根习惯，并对不同的输入进行建模，以确定长期的水平衡。

研究项目的结果通过在林业、工业和复垦会议和讲习班上的演讲以及在通讯刊物，期刊和论文中发表的论文而被广泛分享。在国际肥料协会（IFA）、美国土壤科学、加拿大土地复垦协会、Remtech 和土壤科学研讨会的会议上，他们作了有关磷石膏复垦研究的相关演讲。他们已在诸如《环境质量杂志》、《加拿大土壤科学杂志》、《伐木和锯木厂杂志》以及社区和行业报告以及当地报纸等参考期刊上发表了论文。许多个人、社区团体和加拿大土地复垦协会（CLRA）参加了他们举办的 2015 年夏季参观项目，参观他们的树木覆盖的磷石膏山堆。

1.1.3.1 通过与独立科学研究合作伙伴进行合作所得的经验教训

与大学或其他外部组织合作，是回答任何类型的有关研究可靠性的质疑或测试磷石膏再利用或复垦的创新方法的一个好主意。它对化肥公司和大学都有利。化肥公司从专门的研究人员那里获得了无偏见的、统计可验证的结果，并且只需相对少量的资金就可以使用不同领域的专业知识和设备。大学和研究生获得了在工厂现场解决实际问题的经验。他们非常享受这一经历，并且这为学生毕业后找到工作提供了宝贵的技能。

尽可能多地走进社区并参加各种研讨会、讲座和会议，来结识不同学科的人。这是产生新想法和看待事物的方法，也为将来的合作开辟了可能性。进行研究需要花费大量时间，而且您不能看得太远。一个实验的结果将指导下一个项目。结果通常令人惊讶。请放开地思考并尝试新的想法吧。

1.1.4 磷石膏资源在原位的有益利用

在北美，磷石膏资源被归类为废物或废物副产品，并以堆放在地上作为“寿命终止”计划。堆放场地的复垦包括对磷石膏山堆进行轮廓处理，用土壤覆盖山堆并散播草种子到山堆上以形成植被。

Nutrien 于 2005 年开始对复垦的替代方法进行研究。在阿尔伯塔大学和加拿大森林局的帮助下，它发现通过将土壤混入磷石膏中来创造高性能的“人造土”而不是在磷石膏山堆上覆盖一层土壤以形成屏障，可以改善复垦程序。

与仅在土壤中生长的植物相比，生长在磷石膏/土壤混合物中的职务已显示出生产更健康和产出更多的生物量。然后可以在磷石膏/土壤苗床中建立集中的人工林。该项目既可以看作是创新的复垦方法，又可以作为原位使用磷石膏的有益手段。它还为创建“人造土”的概念提供了宝贵的数据，特别是在农业资源稀缺或土地使用面临巨大压力或冲突的国家，例如人口稠密的城市地区。

在磷石膏存储设施的顶部建立森林对环境具有许多积极影响，包括促进或重新引入生物多样性。绿化方法直接产生碳，同时生产生物质用于能源生产。树木还能够对生根区内的任何过量养分和水进行植物修复，从而改善长期地下水质量。野外观察表明，在加拿大大草原的半干旱气候下，浓密的人工林下几乎没有水渗入磷石膏山堆中。位于加拿大艾伯塔省萨斯喀彻温堡的 Nutrien 工厂已在 20 公顷的磷石膏上建立了人工林（图 6、图 7）。



图 6. 25 厘米长的杂交杨树插条（图片由 Nutrien 提供）



图 7. 将插条种植在磷石膏山堆的顶部（图片由 Nutrien 提供）

树木生长得非常旺盛 - 看柳树在 2015 年到 2017 年 9 月的近两个生长季节里的生长情况（图 8）；在 2016 年至 2017 年 9 月之间，杂交杨树 Tristis 品种的平均身高从 85 cm 增至 280 cm，单年增加了近 2 米的身高（图 9）。经过三年的生长，许多树木的高度超过 5 米（图 10）。



图 8. 2017 年 9 月的柳树 - 经过接近两个生长季节后（图片由 Nutrien 提供）



图 9. 杨树 – 经过将近两个生长季节后（图片由 Nutrien 提供）



图 10. 杂交杨树 – 经过大约三个生长季节后（图片由 Nutrien 提供）



图 11. 林冠郁闭 – 三年后的柳树（图片由 Nutrien 提供）

不到三年后就观察到了林冠郁闭（图 11）。这抑制了树木下方的植被生长。该场地上的植物基本上保持自由生长状态，无需维护。观察到磷石膏山堆上的树木比普通土壤上的树木生长快得多。这可能是因为磷石膏具有出色的保水能力和一些残留的植物养分。

预计在 Nutrien 建立的人工林将封存 30 吨二氧化碳当量/公顷/年。因此，在 20 年内，迄今

为止回收的磷石膏山堆面积将固存 12,000 吨二氧化碳当量。预计该区域还会产生 10 烘干吨/公顷/年的地上木质生物量。因此，据估计，在接下来的 20 年中，该地区将生产 4,000 吨绿色环保煤。随着 Nutrien 继续在其磷石膏山堆上进行垦殖和建立集中的木本人工林，这些数量将继续增加。

1.1.4.1 业务案例

造林的经济利益可能是巨大的。阿尔伯塔省的碳信用价值为 30 加元/ t。种植 20 公顷森林的磷石膏山堆可能在 20 年内产生 360,000 加元的碳信用。建立短轮伐期木本作物的成本约为每公顷 3,800 加元，因此造林可以在几年内收回成本。

如果需要，也可以出售木质生物质。在艾伯塔省，木质生物质价值约为 50 加元/t。就满足自我维持的 EOL 结果而言，一旦林冠郁闭，维护工作便基本上不需要了，因此与被草覆盖的磷石膏山堆相比，被树木覆盖的磷石膏山堆可显着减少维护和割草成本。

1.1.5 增加生物多样性

将树木纳入复垦计划还将改善磷石膏山堆的长期可持续性和生态系统多样性。在被森林覆盖的磷石膏山堆地区，发现了诸如鹿（图 12）、兔子、狐狸、小型啮齿动物和许多鸟类等野生动物的数量增加了。



图 12.在不到两个生长季节里就在磷石膏人造土上创建了野生动物栖息地。鹿是那儿的常客。
（图片由 Nutrien 提供）

1.1.6 造林植物的建立和维护

Nutrien 遵循加拿大自然资源部加拿大木纤维中心制定的协议，开发高产值的人工林，以在短期至中期内使生物量和碳积累最大化。通常，这些类型的人工林建在加拿大的中等至高质

量土地上，但事实证明在包含 80-90%磷石膏和 10-20%土壤的磷石膏人造土上建立这样人造林也非常成功。

在加拿大的草原省份，考虑进行高产和固碳的主要树种是杂交杨（*Populus spp*）。1100-1600 茎/公顷的杂交杨人工林的地上木质生物量单产为 13.6-20 立方米/公顷/年或 7.3-10.8 烘干吨/公顷/年。地下和地上碳预算的初步评估为，在20年的轮换中，潜在的碳增量为500-650 吨 CO₂ 当量/公顷，或 25- 32.5 吨 CO₂ 当量/公顷/年。杂交柳（*Salix spp*）也适合高产和生物能源开发。人工林种植密度为 15625 茎/公顷，地上木质生物量的产量为 6 - 12 烘干吨/公顷/年。对地下和地上碳预算的初步评估为，在 6-7 3 年内的循环期内，潜在的碳增量为 14 - 28 吨 CO₂ 当量/公顷/年。

加拿大自然资源部还设计了一种使用杨树和白云杉所形成的混合人工林，旨在通过发展硬木和软木作物来使人造林在中期（20 年）和长期（70 年）内的生物量积累、碳固存和纤维生产最大化。对地下和地上碳预算的初步评估为，在相应的硬木和软木作物轮作 20 年和 70 年后，潜在的碳增量为 644 – 820 吨 CO₂ 当量/公顷/年。

1.1.6.1 种子准备

将约 15 cm 的表土放在不活跃的风化磷石膏山堆上，并混入磷石膏中，深度约为 25-30 cm，为杨树创造一个合适的生根环境（图 7）。混合所需的设备将取决于磷石膏的压实程度，但深耕和良好的苗床准备对于造林成功至关重要。我们已经成功地使用重型圆盘将土壤混合到适当的深度的磷石膏中。对于很密实的磷石膏，我们首先使用 D6 卡特彼勒（Caterpillar）的撕裂刀片将磷石膏打碎，然后用重型圆盘处理磷石膏，以创建合适的苗床。

请注意，在该试验中复垦和造林的磷石膏山堆已经停用了近二十年，不含酸性工艺水。磷石膏表面的 pH 值约为 5。对于较新的磷石膏山堆，必须首先除去工艺水，并在添加土壤和耕种之前，先用石灰或其他碱性改良剂将磷石膏的 pH 值至少调到 5。

1.1.6.2 树木种植与管理

任何种植设计的目标都是确保茎在整个区域上均匀分布，以便每棵树都能平等地利用场地的资源。设计还必须考虑操作因素。

种植设计：杂交杨、白杨

密度：1100-1,600 个茎/公顷

间距：3m x 3m（1100 个茎）或 2.5m x 2.5m（1600 个茎）

种植：手工

轮伐时间：15-20 年

产量：13.6-20.0 立方米/公顷/年或 7.3-10.8 烘干吨/公顷/年

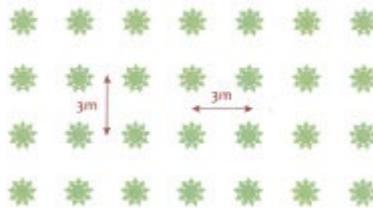


图 13. 杂交杨树种植设计

种植设计：杂交柳

密度：15,625 个茎/公顷

间距：3 行/床设计：树木间距 60 cm x 60 cm，行间距 60 cm，行间距 2.0m

种植：机械

轮伐时间：6-7 年，三年轮伐

产量：6.0-12.0 烘干吨/公顷/年

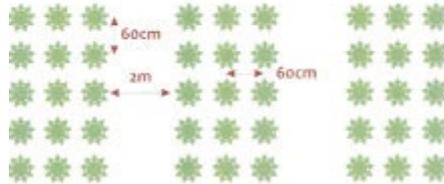


图 14. 杂交柳树种植设计（图片由 Nutrien 提供）



图 15. 成行种植杂交杨树插条（图片由 Nutrien 提供）



图 16. 2015 年 8 月，柳树插条长出枝叶（图片由 Nutrien 提供）

Nutrien 遵循加拿大木纤维中心的建议，并采用 3.0 m x 3.0 m 和 1600 个茎/公顷的种植设计（杂交杂交杨/白杨，（图 13、图 15））或三行床设计：树木间距 60 cm x 60 cm、行间距 2 m、1100 个茎/公顷杂交柳（图 14、图 16）。行之间以及行内树之间的均匀间距允许进行多方向管理操作。

种植设计：

混合树林- 杂交杨木、白云杉

密度：1600 个茎/公顷杂交杨树 + 1200 个茎/公顷白云杉

间距：1.88m x 1.88m

种植：手工

轮伐时间：杂交杨@ 16-20 年；白云杉@ 70 年

产量：杂交杨→ 13.6-20.0 立方米/公顷/年或 7.3-10.8 烘干吨/公顷/年

白云杉→ 4.0-5.0 立方米/公顷/年或 1.9-2.3 烘干吨/公顷/年

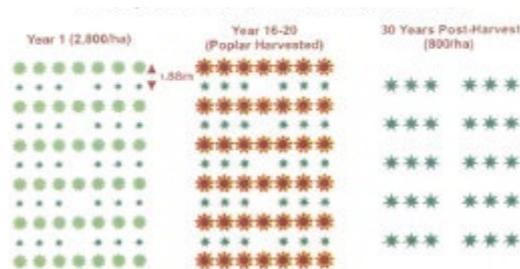


图 17. 混合树木种植和 70 年生命周期（图片由 Nutrien 提供）

图 17 显示了一种“混合树林”种植设计。这也阐明了两个互补的种植生命周期，即在 16 至 20 年后商业上收获更快生长的杨树品种以获取绿色能源，而白云杉在约 70 年后被收获，用于多种用途，包括建筑用木材和造纸工业的纸浆。



图 18. 在 2015 种植的杂交杨，长到 2019 年（图片由 Nutrien 提供）

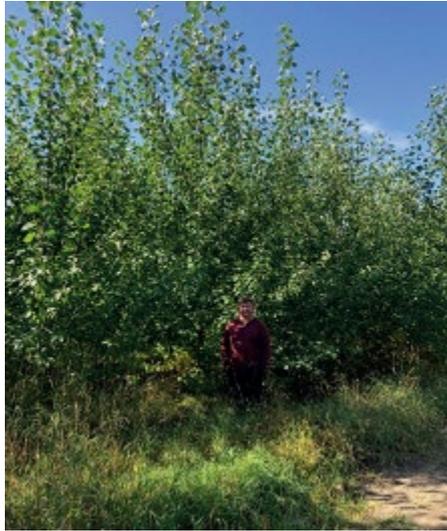


图 19. 在 2015 年种植的柳树，长到 2019 年（图片由 Nutrien 提供）

为了进行比较，图 18 显示了杂交杨在三个季节的生长情况，图 19 显示了柳树在相同气候条件下在同一时期内的生长情况。图 20 显示了杂交杨在 10 年后的模拟生长情况。



图 20.模拟：约 10 年后的杂交杨（图片由 Nutrien 提供）

1.1.7 栽植其他作物

由磷石膏/土壤组成的人造土可以种植多种类型的高价值农作物。其实，我们能否在萨斯喀彻温堡的 Nutrien 磷石膏山堆上成功种植什么作物的唯一制约因素是鹿在收获前不吃该农作物。

1.1.7.1 在磷石膏人造土上种植的其他作物



图 21. 帕蒂潘南瓜（图片由 Nutrien 提供）

在过去的两年中，已在复垦的磷石膏存储场地上种植了下列农作物：覆盆子、大黄、西瓜、土豆、西红柿、番茄、南瓜、小南瓜（图 21）、装饰性葫芦和各种花卉。分析结果表明，这些蔬菜的质量与普通土壤上种植的蔬菜的质量相同或更好。

磷石膏存储场地上的菜园/南瓜菜地正在不断扩大。这是在旅行、演示和团队建设活动中消

除神话的绝好机会。



图 22. 磷石膏菜园中的什锦蔬菜和土豆（图片由 Nutrien 提供）

员工很吃惊地看到在如下方面所取得的进展：磷石膏存储场地的复垦，随后的造林或被开发成菜园。这些给许多人的脸上带来了微笑。尽管 Nutrien 从事“养活世界”的业务，但肥料的生产过程远远超出了仅在土壤上耕种和在土壤或土壤中种植植物的范围。磷石膏堆放场上种植的蔬菜（图 22）在整个生长季节都分发给员工。南瓜和装饰性葫芦用于装饰行政大楼和控制室，并通过捐款、南瓜雕刻比赛和首届南瓜粉碎/猜南瓜重量比赛等方式为“联合之路” (United Way) 慈善组织筹集资金。

1.2 磷石膏 - 含石膏的土壤改良剂：俄罗斯

作者们

N.I. Akanova（位于俄罗斯莫斯科的 D. N. Pryanishnikov 全俄农业化学研究所），以及 **M.M. Vizirskaya、M.B. Seregin 和 T.V. Grebennikova**（位于俄罗斯莫斯科的欧洲化学公司贸易罗斯有限公司）

1.2.1 概述

磷石膏不仅是受盐害土壤的宝贵改良剂，可改善土壤结构及其物理性质，而且还是一种多营养的富硫肥料。一项长期研究计划对磷石膏应用的农艺和经济效率进行了评估，从而开发了在农业中应用磷石膏的规程和相关法规。该研究计划最重要的成果是，根据独立的、完全参考的使用协议，将磷石膏重新纳入政府肥料补贴计划，作为富含石膏的土壤改良剂[16]。

关键词：磷石膏；土壤肥力；高碱性土壤；氮、磷、钾、肥料；土壤结构；富含石膏的改良剂

1.2.2 欧洲化学公司简介

欧洲化学公司（EuroChem）是世界领先的矿物肥料生产商之一，总部位于瑞士。由于世界对食品的需求日益增长，该公司致力于为各种农作物提供营养，以促进食品生产。该公司使

用采矿和加工设施，来生产矿物肥料、工业产品和动物饲料补充剂，同时在俄罗斯、欧洲、亚洲和美洲设有自己的物流和分销网络。

随着钾盐矿开采的开展，欧洲化学公司成为仅有的三家全球肥料公司之一，能够同时提供所有三种主要农作物养分：氮（N）、磷肥（P）和钾肥（K）。

就化肥产能而言，2018 年欧洲化学公司占全球矿物肥料年产量的 2.5%。在该年度公司的销售量为：氮肥 781.3 万吨，磷和复合肥 568.5 万吨，钾肥 63.2 万吨，采矿产品 597.7 万吨，和工业产品 187.1 万吨。

欧洲化学公司目前正在开发新一代产品，例如水溶性化肥和相关创新肥料。

欧洲化学公司非常注重研发，目前与 18 个研究合作伙伴和 12 所大学合作，在 25 个国家/地区进行了 250 多次田间试验。目的是测试新土壤改良剂配方，其中包括一些基于磷石膏的配方，以使这些改良剂在特定的土壤中提供最佳结果，不管是什么作物、位置或气候。

对于其磷石膏研究计划，欧洲化学公司不仅生产和供应矿物肥料，而且还开发了适应特定区域农业气候条件和作物需求的矿物营养系统。欧洲化学公司不仅致力于获得作物高产，还致力于保持土壤肥力和良好的物理条件。

公司的主要生产设施位于俄罗斯的欧洲部分，但公司在哈萨克斯坦、中国和欧洲（比利时和立陶宛）设有分部。在俄罗斯，公司的磷肥生产设施主要位于金塞谢普（在列宁格勒地区）和别洛琴琴斯克（在克拉斯诺达尔地区）。此外，欧洲化学公司还运营其他复杂的矿物肥料工厂：它们分别是位于斯塔夫罗波尔地区的 Nevinnomyssk 的肥料厂、位于图拉地区的新莫斯科斯克的 NAC 氮肥厂，和位于彼尔姆地区的 Usolsky 钾肥厂。

1.2.3 磷石膏：在农业的潜在用途

在农业中使用磷石膏可以带来一系列好处，例如 a) 改善土壤肥力和物理状况 b) 提高植物的生产力和作物产量，c) 优化自然资源的合理利用，以及 d) 通过废物再利用和回收，有利于废物的管理和减量[17] [18] [19] [20]。目前在俄罗斯，磷石膏作为副产品堆放在生产企业附近，在农业中的使用很少。

相反，在苏联时期，使用磷石膏作为土壤改良剂的做法很普遍。例如，在 1964 年，苏联通过了一项特别决议：“关于在碱土上进行石灰和磷石膏的活动以及发展石灰石粉和生地面灰泥的生产”（dd 10.09.1964 No.776），其中 50%-85% 把磷石膏用作土壤改良剂的费用是由国家预算补贴的。该措施导致含磷石膏的土壤改良剂在全国范围内的广泛使用。在苏联后期，含磷石膏的土壤改良剂的施用量达到约 150 万吨/年（图 23）。目前，在俄罗斯磷石膏作为土壤改良剂使用每年不超过数千吨（图 24）[21]。

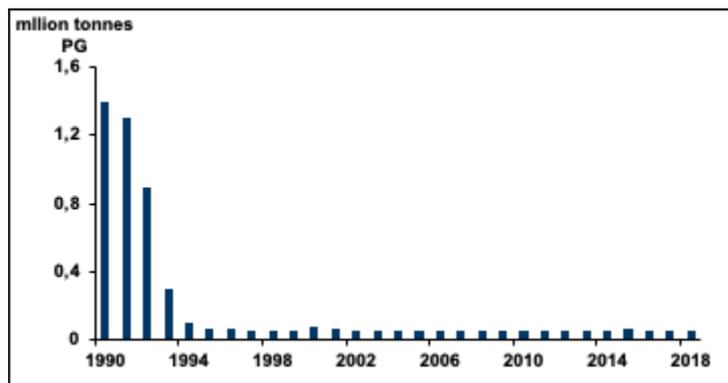


图 23. 在俄罗斯磷石膏作为肥料使用不断减少的趋势

目前俄罗斯每年生产约 1400万吨的磷石膏，其中 100万吨由欧洲化学公司-BMU 工厂生产。尽管相对销售额有显著增长，但欧洲化学公司-BMU 工厂所生产的中和磷石膏的消费量仍然微不足道（图 24）[22]。

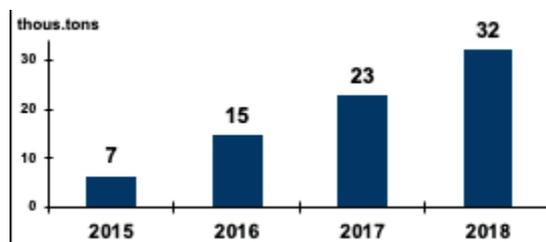


图 24. 磷石膏的销售量

结果，欧洲化学公司-BMU 工厂积累了超过 3 000万吨的遗留磷石膏储备。这种情况在整个俄罗斯联邦领土上都是典型的，并深深扎根于 1990 年代的经济和社会转型中。

欧洲化学公司的磷石膏在农业上使用具有巨大的潜力。通常，磷石膏的特点是低 pH（高酸度）。但是在克拉斯诺达尔地区的矿物肥料生产设施 - 欧洲化学公司-BMU 工厂中，中和后的磷石膏是通过使其与弱碱性介质反应而制成的。磷石膏本身是磷酸的副产品。在俄罗斯，磷酸是通过酸化国产的磷灰石而产生的，而俄罗斯产的磷灰石中的自然重金属和自然存在的放射性物质都很少。所以，俄罗斯产的中和磷石膏对环境无害，并且作为一种材料不会结块 [20] [23]。

中和磷石膏包含约 92%的硫酸钙（CaSO₄），非常适合用作盐渍土壤的改良剂，以改善其物理、化学和保水性能[24]。欧洲化学公司生产的磷石膏不仅是一种有效的土壤改良剂，而且还可以作为植物营养的来源。1 吨磷石膏包含 25-30 千克磷（P₂O₅），200 千克硫（SO₄⁻²），370 千克钙（CaO），以及一系列微量元素*（Si - 210 kg/t, Mg - 2.5 kg/t, Mn - 1 kg/t, Cu - 0.8 kg/t, Zn - 0.3 kg/t）。在俄罗斯，盐碱地的总面积在 3500-4000 万公顷之间，约占总耕地面积的 20%。在盐碱地中，耕地面积约为 1000万公顷，这表明对这些土壤的修复需求仍然很高。此项修复工作对磷石膏的需求量估计约为 150-300万吨/年[25] [26]。

1.2.4 田间试验

自 2013 年以来，欧洲化学公司-BMU 工厂与俄罗斯领先的农业研究机构合作进行了许多田间试验，以研究并证实磷石膏作为土壤改良剂在农业生产中的有效性（图 25）。

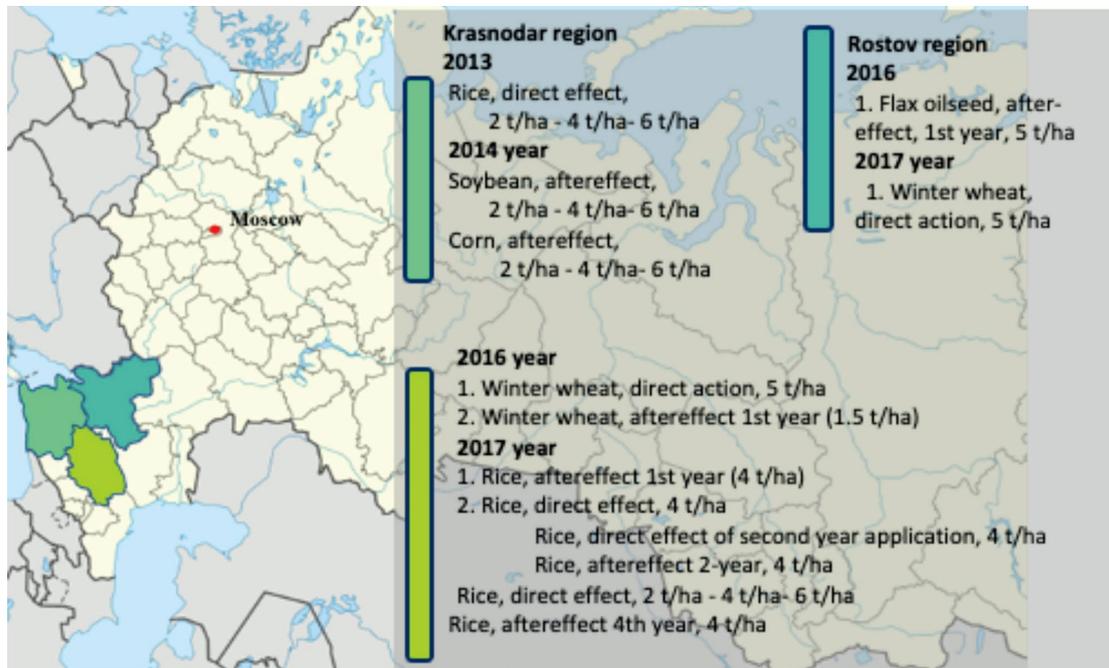


图 25. 在俄罗斯克拉斯诺达尔和罗斯托夫地区进行的磷石膏田间试验图

在俄罗斯克拉斯诺达尔（Krasnodar）、罗斯托夫（Rostov）和斯塔夫罗波尔（Stavropol）地区（图 25），对磷石膏的使用进行了试验（图 25），在这些地区，普遍存在土壤盐化、因灌溉引起的土壤结构恶化以及高土壤 pH 值等问题，严重限制了农作物的产量。田间试验测试了不同的变量和参数，例如 a) 磷石膏的相对用量，b) 在春季和秋季施用磷石膏的相对影响和效益，c) 作物轮作后磷石膏施用在 4 年中的影响，d) 对产量的影响，e) 土壤性质，以及 f) 土壤的 pH 值。



图 26. 使用散装物料撒布机 BOMAG BS12000 撒布磷石膏（图片由欧洲化学公司提供）

磷石膏使用了适用于农业的标准设备。首先，使用有机肥料撒布机或散装物料撒布机（建筑设备）将磷石膏撒布在土壤表面（图 26），然后将其耙松（图 27）。根据标准的耕作程序进

行了进一步的田间工作。



图 27. 盘耙处理过程（图片由欧洲化学公司提供）

研究结果揭示了磷石膏的三种特别有效的使用方式：

1. 作为钠质土的富含石膏的土壤改良剂。磷石膏中所含的钙（ Ca^{2+} ）取代了土壤吸收的复合物中的钠（ Na^+ ）。该复合物中钠离子以硫酸盐的形式从土壤中被洗出（阳离子交换机制）[27] [28] [29]。

2. 用于改善灌溉土地物理状况的改良剂。磷石膏改善了土壤结构，提高了土壤的保水能力，促进了土壤团聚体的形成，并提高了土壤的透水性[26]。

3. 作为退化土壤中必需的 S 和 P 养分的提供者。磷石膏的硫含量为 21-22%，磷含量约为 4-6%。这些营养素对谷物和油料作物至关重要，因为它们对品质特性和产量有积极影响[30]。

1.2.5 改善灌溉土地的物理状况

克拉斯诺达尔（Krasnodar）是俄罗斯的主要农业地区。俄国 80% 以上的大米都在此种植。

稻米生产有非常特殊的要求，特别是要对稻田进行定期的漫灌。与稻田有关的最大问题之一是土壤结构的退化，导致结皮形成和土壤压实。2015 年，欧洲化学公司进行了一个示范田间试验，以评估在水稻种植系统中使用中和磷石膏的有效剂量和施用期限。磷石膏同时用作磷源和土壤改良剂。稻田的主要土壤类型为黑钙土（即腐殖质含量丰富的草原土壤），其 pH 为 7.4，腐殖质含量为 2.5%。

最有效的方法是，按 4 吨/公顷的剂量使用磷石膏对土壤进行秋季处理（图 28）。这将土壤的粮食产量提高 0.5 吨/公顷（或 6%）。结果表明，与使用磷酸铵的传统施肥系统（通常为 MAP 12-52）相比，这种方法的有效性更高。磷石膏的施用还增加了后续农作物的产量。例如，在施用磷石膏后，苜蓿的产量在春季增加了 47%，在秋季增加了 76%。

实验结果表明，在春节施用 40 千克/公顷的尿素和 4 吨/公顷的磷石膏，而不是给予水稻矿物营养的传统肥料（播种前用量为 150 千克/公顷磷酸铵（12-52）），可保持土壤和植物中氮素的有效形态以及磷和钾水平在合适水平，如同施用全营养素用量 $N_{18+56+46}P_{78}K_{60}$ 。在秋季耕作前施用磷石膏比在春季播种前施用磷肥更为有效，并且可以使产量增加 5 千克/公顷（或

6%) (图 28)。在这种情况下, 施用磷石膏的效率甚至比施用常规的含 P 肥料 (通常为 MAP 12-52) 的传统肥料系统还要高。

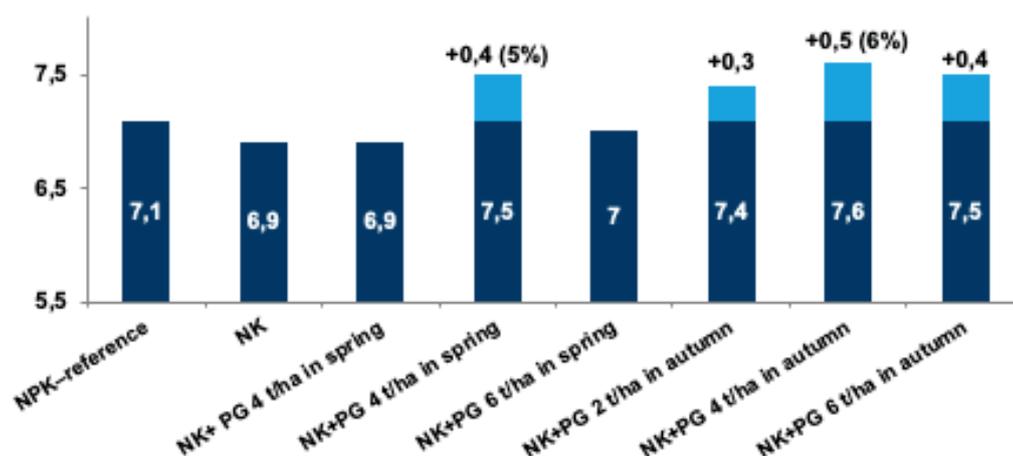


图 28. 水稻种植中磷石膏施用量和施用周期的效率评估, 吨/公顷

生产力的提高是由于提高了植物的存活率, 增加了每穗的粒数和增加了每株植物的粒重所致。此外, 中和后的磷石膏的正面效果可在使用后持续 2 年。施用一年后 (即第二年的影响), 与施用传统矿物肥料相比, 苜蓿的年绿色产量提高了 18-49% (2.0 - 5.3 吨/公顷)。施用磷石膏使苜蓿的产量提高 47%。

表 2. 土壤中的腐殖质和养分含量, 标准比例

营养土壤含量等级 (标准刻度)	腐殖质 % (酪蛋白法)	P ₂ O ₅ (CHIRICOV 法)	K ₂ O (CHIRICOV 法)
极低	<2	<50	<40
低	2-4	50-100	40-80
平均	4.1-6	101-150	80.1-120
高	6.1-8	151-200	120.1-180
高	8.1-10	201-250	180.1-250
极高	> 10	> 250	> 250

2017 年, 进行了类似的实验, 以研究中和磷石膏对阿迪格共和国 (the Republic of Adygea) 的水稻产量的影响。实验地点的土壤是稻草甸沼泽, 其 pH 值为 6.3, 腐殖质*含量为 2.9%, 钾交换含量为 198 mg/kg (非常高), 移动磷含量为 38.6 mg/kg (很低)。标准比例显示在上表 (表 2) 中。

地块面积为 1000 平方米 (25m×40m) (图 29)。该试验重复进行了 3 次: i) 在秋季播种前施用磷石膏, 剂量为 4 吨/公顷; ii) 前身 - 大米; iii) 播种 - 分散的灌溉制度 - 缩短了漫灌时间。与之前的试验相同, 与没有施用肥料的对照组相比, 按 4 吨/公顷的用量施用磷石膏可使产量提高 0.9 吨/公顷 (表 3), 并增加 8000 多卢布/公顷 (18%) 的利润。



图 29. 试验田的布置情况（图片由欧洲化学公司提供）

表 3. 施用磷石膏后的水稻产量

处理	产量, t/ha	产量增长	
		t/ha	%
对照（未施肥）	5.0	-	-
使用磷石膏, 4t/h	5.9	0.9	17.1

为了评估中和磷石膏对冬小麦的效用，2016 年进行了田间试验。土壤的主要类型是普通的碳酸盐黑钙土，具有很高的沃土颗粒组成。一般而言，尽管它们有不同的肥力、粒度分布和土壤物理力学性质，试验田的土壤均有利于冬小麦的种植（表 4）。

表 4. 实验田的农业化学特性

处理	pH	含量, mg/kg 土壤		
		P ₂ O ₅	K ₂ O	S-SO ₄
施用磷石膏前	-	18.6	430	2.0
施用磷石膏后	8.3	35.1	421	24.1

在播种作物轮播中前一种作物如大豆和玉米前，在土壤中同时施用中和磷石膏和矿物肥料，有助于增加土壤中氮、磷和钾的水溶性形态的浓度，并后续作物如冬小麦的生长和发育起到积极的促进作用。相对于仅施用 NPK 的对照组，施用磷石膏具有更长期的影响，从而获得了最高的增产。磷石膏的施用量为 5 吨/公顷。与对照组相比，冬小麦增产约 0.43 吨/公顷（即增产 9%）（表 5）。

表 5. 磷石膏对冬小麦产量的后续影响

处理	产量, t/ha					产量增长	
	I	II	III	IV	平均	t/ha	%
对照（未施肥）	4.58	4.70	5.03	4.65	4.74	-	-
使用磷石膏, 5t/h	5.30	5.00	4.98	5.40	5.17	0.43	109

1.2.6 营养源，和 pH 值校正

2016 年，进行了一项试验，以研究罗斯托夫地区的生长条件下中和磷石膏对含油亚麻产量的影响（表 6）。在这种情况下，主要的土壤类型是典型的黑钙土，pH 值为 8.3，腐殖质含量为 3.4%。与对照组相比，施用 5 吨/公顷的磷石膏后，发现亚麻幼苗具有更均匀的大小，更深的叶色（图 30）。与未施用磷石膏的对照组相比，亚麻平均产量增加了 4 多吨/公顷，带来了 3 000 多卢布/公顷（或 24%）的额外利润。亚麻油产量为 0.54 吨/公顷，比不施肥的情况高出 0.13 吨/公顷。亚麻种子的含油量为 32%，比对照处理高 1.4%。用磷石膏处理土壤的另一个好处是可以改变土壤的 pH 值，磷石膏将土壤 pH 值从平均 8.3 降低到 7.7。

表 6. 上部土壤层（0-30 厘米）中的农业物理和农业化学参数

处理	pH	腐殖质 %	含量, mg/kg 土壤				土壤密度 g/cm ³ t/ha
			N-NO ³	P ₂ O ₅	K ₂ O	S-SO ₄	
发芽前							
对照（未施肥）	8.3	3.40	8.1	22.7	385	4.2	1.28
使用磷石膏, 5t/h	8.1	3.42	9.3	31.1	403	10.1	1.17
收获后							
对照（未施肥）	8.3	3.37	4.0	19.2	361	4.0	1.41
使用磷石膏, 5t/h	7.7	3.38	4.2	24.4	340	9.4	1.28



图 30. 含油亚麻（图片由欧洲化学公司提供）

1.2.6.1 土壤 PH 值的校正

在斯塔夫罗波尔（Stavropol）地区的春季大麦田里进行了一项试验，以研究中和磷石膏对 pH 的影响（作为土壤肥力的关键指标），并评估磷石膏作为碱性土壤改良剂的直接作用（图 31）。选择种植区域时，要考虑以下因素：a）平坦的地形，b）相似的土壤类型，c）均匀的肥力，d）相似的前代和当前农业化学指标（表 7）。分析结果表明，土壤中的活性磷*（17.5 mg/kg）和腐殖质（4.5-4.8%）的含量一般与其平均含量相当，钾交换含量*为 554-581 mg/kg（高）。

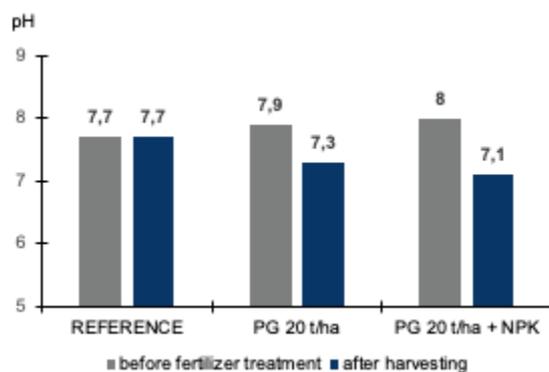


图 31. 中和磷石膏在斯塔夫罗波尔地区用于改善碱性土壤，2017 年

主要的土壤类型是典型的黑钙土。磷石膏的施用将每个生长季节的土壤酸度从 0.5 单位降低到 1.2 单位。对于不使用磷石膏的土壤，pH 值的降低很小，约为 0.09 至 0.13。当磷石膏施用量为 20 吨/公顷时，农作物结构的最佳综合指标是典型的。由于施用磷石膏增加了养分的可用率，大麦的生长茂盛度、谷粒重量和产量均增加了。

表 7. 土壤农药的特性

田块号	P ₂ O ₅ mg/kg	K ₂ O mg/kg	pH KCl	pH	腐殖质 %	S mg/kg
1	18	581	6.6	7.84	4.8	4.2
2	17	554	6.9	8.02	4.5	5.0

因此，根据其自己的协议驱动的田间试验结果，欧洲化学公司-BMU 工厂证实了磷石膏可以作为一种有效的土壤改良剂。这些试验使用了常规营养提供方法和生长条件作为对照组。

在具有良好耕作条件（温度、降雨）、最适合种植高利润作物的地区，建议在耕作期间把磷石膏施于未经处理的土壤中，用作土壤改良剂。根据 Pryanishnikov 全俄农业与土壤科学研究所建模的数据，在俄罗斯联邦的四个主要农业地区（克拉斯诺达尔，斯塔夫罗波尔、罗斯托夫和沃洛格达地区）施用磷石膏可以使谷物总产量增加 500 万吨，相当于增加 500 亿卢布的利润。

1.2.7 成本效益分析

从经济（成本收益）的角度来看，磷石膏的应用代表了一项巨大的财务投资，其中，到应用地点的搬运和运输成本所占份额最大。国家对磷石膏运送到应用现场的财政支持，可以将磷石膏作为土壤改良剂的好处扩展到更大范围的盐渍土壤上。

为应对磷石膏应用所面临的经济挑战，采取了以下步骤：

1. 为了增加磷石膏和其他改良剂的使用，欧洲化学公司-BMU 工厂向有关政府机构提出了针对性的建议。俄罗斯联邦农业部支持欧洲化学公司-BMU 工厂的举措，其中包括将磷石膏作为盐渍土壤改良剂纳入“国家农产品出口计划”，以提高土壤肥力。根据俄罗斯联邦农业部的指示，欧洲化学公司-BMU 为俄罗斯南部地区准备了具体的商业建议。

2. 欧洲化学公司与领先的土壤研究机构合作，根据系统化、协议驱动的经验专家评审的田

间试验的结果，制定了一个政府认可的富含磷石膏的土壤改良剂标准。

3. 此倡议（即制定政府标准和验证欧洲化学公司和俄罗斯肥料生产商协会所宣称的磷石膏土壤改良剂的好处）之后，在联邦政府对其国内食品安全政策提供支持的框架内，俄罗斯联邦农业部宣布了对退化土壤进行强制性土壤改良的要求。做出相关决定的目的是补贴农业企业的土壤降酸费用的 30%。此土壤降酸方法是向土壤里施加磷石膏，这样可同时向土壤施加 2 个关键养分，即 P 和 S。这项补贴始于 2019 年。根据官方批准的磷石膏使用协议，并按照分配给农场土壤改良计划的预算规定（包括运输、施用和产品购买费用）的授权，此补贴最多可报销磷石膏使用费用的 50%。在某些选定地区，该补贴可报销高达 100% 的相关费用。

由于此 2019 年补贴计划的成功，斯塔夫罗波尔地区决定从 2020 年初开始启动一项新计划。根据官方的磷石膏使用协议，该计划将最多可报销 100% 的相关成本，包括农民购买磷石膏的费用，以及相关运输成本的 50%。该计划得到地区农业部和欧洲化学公司的支持。

自 IFA “报告 2” 发布之日起，俄罗斯农业生产商得出结论，土壤改良剂对于提高该国土壤的生产效率至关重要。反过来，政府与化肥生产商一起致力于鼓励广泛使用磷石膏等土壤改良剂。

1.2.8 规程驱动的应用

尽管标题中未使用“规程”一词，但用作试点的科学依据的文件与欧盟质量规程的概念是完全一致的，并作为田间试验的参考文件。该文件的标题为“关于将中和磷石膏用作化学改良剂和富硫肥料的科学和实用建议” [14]。如下所述，该文件具有正式协议书的地位。该文件太长，无法完整复制到“报告 2”中，但已与案例研究一起以英文翻译文的形式提供。

为了说明该文件与 EU 质量协议格式的相似性，并且出于比较目的，在此引用了该文件的两部分，即开头的段落和目录。

1.2.8.1 规程现状

“在本文件中，已经制定了有关如何使用中和磷石膏的科学和方法建议，以鼓励和促进把该产品用作所有类型土壤的矿物肥料，以达到以下目的：i) 改善土壤结构和其物理化学特性； ii) 对植物增加钙、硅和硫的养分供应， iii) 将磷石膏土壤改良剂适当施用到碱土中。中和磷石膏不仅是湿法磷酸生产的副产品，而且是一种可以通过中和过程显著增强其性能的材料，可用作矿物肥料。将有用的副产品转化为优质肥料是提高其农业价值的主要途径，同时还可以在整个生命周期内节省能源并减少总的二氧化碳排放量。这不仅增加了其更广泛的环境友好性，而且还说明了被认为适合提高土壤肥力的副产品所必需的环境保护质量。

这些建议提出了科学的、基于证据的把中和磷石膏用于农业的方法，并得到有关当前可用实验材料性能的公开证据的支持。这包括所使用的磷石膏的化学成分和粒度结构，以及其主要特征，包括增强土壤的特性、提高植物产品的产量和质量，以及适合田间应用的最有效技术方法。该文件还指出了计算磷石膏用量的方法及其用于各种作物轮作的特殊方面。

本文件中包含的建议适用于农用化学品服务人员、规划机构、农工综合体的服务机构、与其土地拥有各种所有权关系的土地使用者，以及工程机构的生产人员。该文件的作者认为，该出版物也将对研究人员有用，因为尚未发现和公开披露中和磷石膏的所有积极方面和应用技术。

科学和实用建议已由 D. N. Pryanishnikov 全俄农业化学研究所科学理事会审查并批准，定为第 11 号协议，于 2011 年 12 月 20 日发行。”

1.2.9 目录 - 磷石膏规程

正式的磷石膏规程目录是全面而稳健的。它为此类规程的范围和方法提供了很好的参考示例，而不论哪个管辖机构是责任监管机构。合作确保了其可信性。该合作包括生产者、独立科学家、经验丰富的最终用户和客户。来自用户和客户的证词也增进了该规程的可信性。这表明了所有利益相关者之间的密切参与。

介绍

- 1.磷石膏的农学效益
- 2.碱土的遗传多样性及其分类。
- 3.复垦的化学方法
 - 3.1.改良剂用量的计算方法
- 4.灌溉条件下复垦碱土的特殊方面
- 5.复垦的化学法技术
- 6.用中和磷石膏对碱土进行化学复垦的环境限制
- 7.磷石膏作为硫肥的应用
- 8.磷石膏作为含硅肥料的重要性
- 9.磷石膏与其他肥料的组合
- 10.中和磷石膏在公路侧道和市区内区域可能有效使用的预测
- 11.中和磷石膏的质量要求
 - 11.1.技术指标的主要特征
 - 11.2.安全与环境要求
 - 11.3.验收规则
- 12.参考
- 13.附录

如上所示，虽然该规程主要关于磷石膏用作土壤改良剂，但已认识到相同的磷石膏在道路建设中有潜在用途。请参阅案例研究的第 3 部分。

1.2.10 证词



图 32. Askhat Khazritovich Sheudzhen 博士

我们正在积极探索使用中和磷石膏作为多组分肥料的可能性。磷石膏可以用作复合肥料，因为它包含数十种植物必不可少的营养成分。我们已经开发并批准了完整的磷石膏施用技术，包括施用时机、剂量和方法 – 而且也指出了磷石膏在农业中的实际需求。

Askhat Khazritovich Sheudzhen 博士

生物科学博士，水稻研究所精密技术部主任，俄罗斯科学院通讯院士



图 33. Akanova Natalia Ivanovna 博士

按照全俄农业化学研究所的规格所进行的长期试验表明，磷石膏不仅可作为盐渍土的改良剂，而且还可作为具有改良土壤的肥料。无需重新证明磷石膏中所含磷对作物产量的重要性，而且磷石膏还含有另一种重要植物营养素 - 硫 (S)！在过去的十年中，全世界的农民都越来越重视施 S 的必要性，特别是从可负担的来源施 S。该研究所与欧洲化学公司共同制定了关于磷石膏用作盐渍土的修复剂和用作更广泛的营养源的综合法规。现在，任何农民都可以获得有关施用方法和效率的详细信息。

Akanova Natalia Ivanovna 博士，生物学博士，D. N. Pryanishnikov 全俄农业化学研究所教授。

在我们的田地里，我们种植 5 - 7 种农作物。由于积极使用灌溉系统，我们的田地出现了含盐量高的斑点或出现了土壤盐渍化的现象。灌溉还会导致上层土壤过度压实，从而降低土壤肥力。为了消除或平衡多余的盐分含量并改善土壤结构，我们在每公顷田地里施用了 2-6 吨的磷石膏。该磷石膏施用系统的开发是基于土壤分析结果、作物产量和田间的目视检查。我们在作物轮作期间平均施用磷石膏一次或两次。特别关注急需磷石膏的稻田。

随着磷石膏的应用，土壤中的磷营养增加了，土壤中的钙缺乏得到纠正，在土壤中形成了更有结构的腐殖质层。按照我们的标准施用程序，我们计划在 2019 年秋季施用磷石膏，总量约为 1 万吨。

Rothko Anatoliy Viktorovich 是罗斯托夫州马尼池农业(Manych-Agro)公司的总裁。

- 磷石膏可用于修补土壤结构中的破坏，并稳定土壤中的水-空气交换。这将改善植物养分吸收。这对我们的土壤而言是最重要的。是的，磷石膏能稍微提高作物产量，但其主要作用是改善土壤的物理状况。这样，土壤将遭受较小因机械操作或降雨而造成的损害，并且植物生长的条件会更好。

- 磷石膏对受盐碱影响的土地非常有效。在整个克拉斯诺达尔地区，我们大约有 10% 的盐碱地，但是在巴格耶夫斯基 (Bagaevsky) 地区，盐碱地甚至达到了 30%。我的农场占地 7,000 公顷。如果我在这些条件下灌溉土地，情况只会变得更糟。在这样的情况下，我必须在我的农田里施用磷石膏。但是首先应该对磷石膏产品进行测试，这是我们计划在不久的将来进行的工作。

独立专家的意见（农业生产者）。

在 6 个焦点小组内进行了独立专家意见调查，以评估消费者对磷石膏的需求。每个小组有 30 个成员。

1.3 在中亚地区综合使用磷石膏来发展该地区的适应性农业生态系统：哈萨克斯坦

作者

Manzoor Qadir 博士，联合国大学水、环境与健康研究所 (UNU-INWEH) 副主任

1.3.1 背景和挑战

淡水短缺加剧和水质恶化是，尤其是在中亚，实现农业生产可持续增长的关键瓶颈，并且越来越阻碍人们实现主要的可持续发展目标，尤其是有关确保粮食安全的“可持续发展目标 2”和有关确保所有人的用水和卫生的“可持续发展目标 6”。中亚对气候变化的更敏感性，因为与平均全球变暖情景相比，中亚的极端高温事件预计将变得更加强烈、更为频繁且持续时间更长[31]。随着平均农作物需水量的增加，预计降水量与农作物需水量之间的预期差距将扩大并加剧。

土地退化是该地区的另一主要挑战。它对农业产量和经济发展产生了负面影响，未来对实现有关应对气候变化的“可持续发展目标 13”和有关逆转土地退化的“可持续发展目标 15”也将具有消极影响。在中亚，如果不充分解决土地贫瘠和水资源短缺等问题，就不可能消除赤贫并实现“联合国可持续发展目标”。这意味着整个地区在实现 2030 年可持续发展议程的关键要素方面将滞后，包括《巴黎协定》也定义的“可持续发展目标 13”（气候行动）。“可持续发展目标 13”旨在加强全球对气候变化威胁的反应。这同样适用于联合国其他倡议和公约，特别是用于应对灾难性侵蚀和土壤流失的《防治荒漠化公约》(UNCCD)，以及在日本爱知县签署的用于实现生物多样性目标的《生物多样性公约》(CBD)。

贫瘠的退化土地上的“欠收”所造成的收入损失估计在 15%（最佳情况）至 69%（最坏情况）之间，具体取决于种植的作物、土地退化强度和水质恶化情况等变量[32]。这些估算未考虑到额外的成本，例如失业、人类和动物健康问题的增加、财产价值的下降以及相关的环境成本。根据全面的经济分析，中亚地区每年的土地退化成本估计约为 60 亿美元[33]。考虑到 30 年的发展前景，在该地区采取行动应对土地退化的成本要比不采取行动的成本低 5 倍。也就是说，解决土地退化问题所花费的每一美元都可能带来约 5 美元的增值收益。这些估计值表明，与让土地退化继续并加剧的不作为相比，采取行动扭转土地退化可获得令人信服的经济收益。

盐分升高所造成的土地退化是中亚收成低和对环境造成影响的主要原因。集约灌溉和过度淋洗农田是该地区的普遍做法[34]。在某些地区，例如在哈萨克斯坦南部，灌溉水中的镁含量高于钙含量[35]，从而导致土地退化。这种土壤被称为镁化土壤，其渗透率和水力传导率比较低。在其他中亚国家也存在这样的土壤。哈萨克斯坦南部，超过 30% 的灌溉土地已经拥有 25-45% 的可交换镁含量（EMP），在某些情况下高达 60% 的 EMP [36]。结果是这些表现欠佳的灌溉土地上的棉花单产逐渐下降，大约 1.5 吨/公顷，并在进一步下降，而该地区的经济仍然严重依赖于棉花。

1.3.2 应对方案

考虑到中亚的自然资源和人力资源，该区域所有国家都有可能扭转环境恶化的趋势。要改善镁化土壤，需要使用钙源来替代这些土壤阳离子交换部位中过量的镁。钙的施用量取决于要交换的可交换镁的程度。然后，通过过量灌溉将置换后的镁从根部浸出。

用于改善镁化土壤的钙的常见来源是磷石膏。磷石膏（主要成分是硫酸钙）是一种廉价的钙和硫的来源，还含有微量的磷。因此，磷石膏为农民提供了额外的价值，为其提供了一系列必需的营养素，尤其是植物和农作物生长所必需的磷和硫。

已经采用农民参与的方法进行了若干试点研究，以利用当地生产的磷石膏逆转镁化土壤的退化。在哈萨克斯坦南部，对高镁土壤进行了为期 4 年的研究[37]。当地农业社区也参与了该研究的以下方面：

1. 确定不同剂量的磷石膏施用对镁化土壤化学变化的影响
2. 观察棉花对磷石膏施用的反应
3. 估算使用磷石膏作为土壤改良剂的所带来经济收益。

使用了三种处理方式：（1）不施用磷石膏，（2）以 4.5 吨/公顷的剂量施用磷石膏，和（3）以 8.0 吨/公顷的剂量施用磷石膏。灌溉用水也有较高含量的镁（镁钙比 > 1.3）。

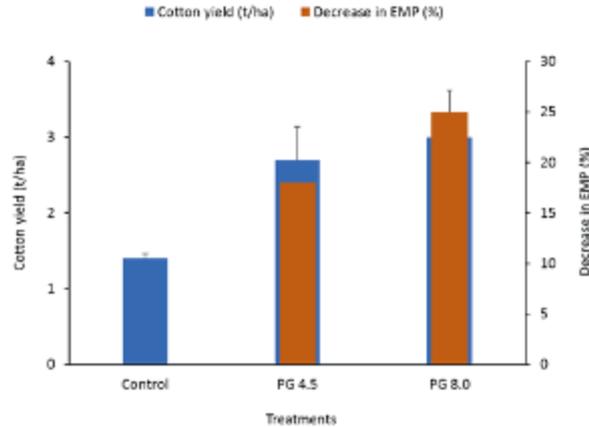


图 34 .在哈萨克斯坦南部镁化土壤中施用磷石膏对棉花产量和可交换镁含量（EMP）的影响 [36]

对每年收获棉花后收集的土壤样品进行的分析表明，施用磷石膏可以增加根区钙的浓度。钙含量的增加可促使钙取代土壤中过量的可交换镁，从而形成土壤的化学平衡。施用磷石膏后第一年的棉花单产记录显示，在土中施用磷石膏的有益作用显而易见。与把磷石膏施用到土壤前的可交换镁含量水平相比，根区的可交换镁含量显著降低。在施用 4.5 吨磷石膏/公顷的田地中可交换镁含量降低了 18%，而在施用 8 吨磷石膏/公顷的田地中可交换镁含量降低了 25%（图 34）。

磷石膏的施用导致土壤可交换镁含量的降低，养分（磷和硫）利用率的增加以及土壤结构稳定性的改善。综合考虑这些因素，从作物产量增加中可以明显看出在土壤中施用磷石膏的有益效果：在施用磷石膏的情况下，施用 4.5 吨磷石膏/公顷的田地的棉花产量为 2.7 吨/公顷。当在田中施用 8.0 吨磷石膏/公顷时，棉花产量进一步增至 3.0 吨/公顷（图 34）。施用磷石膏的田地的棉花产量为 2.7-3.0 吨/公顷，而没有施用磷石膏的对照田地的棉花产量仅为 1.4 吨/公顷，所以它们棉花产量存在显著差异，表明在土壤中施用磷石膏可使棉花产量翻倍[36]。

在随后的几年中，对照田地的棉花产量保持不变（1.3-1.4 吨/公顷），而施用磷石膏处理的田地的棉花产量从第一年的峰值产量开始下降。这与第一年根区可交换镁含量的显著降低成正比。因为仅在研究开始时对土壤施用一次磷石膏，可交换镁含量在以后年份会逐渐增加。随着时间的流逝，土壤中的钙含量开始减少，在以后几年中土壤中的大部分磷酸钙将会被用尽。

在 4 年的时间里，在土壤中施用 4.5 吨磷石膏/公顷的情况下，第一年的棉花产量为 2.7 吨/公顷，然后逐年下降，到第 4 年下降到 2.2 吨/公顷，4 年的平均棉花产量为 2.4 吨/公顷。在土壤中施用 8 吨磷石膏/公顷的情况下，棉花产量从第一年的 3.0 吨/公顷下降到第 4 年的 2.2 吨/公顷，4 年的平均棉花产量为 2.6 吨/公顷。由于作为土壤改良剂施于土中的大部分磷石膏在 4 年内会被耗尽[36]，因此建议每隔 4 年向镁化土壤中添加一定剂量的磷石膏。该时间间隔可能会因产量模式和土壤条件而异。基于多年数据的财务可行性分析结果表明，施用磷石膏的田地的经济效益几乎是未施用磷石膏的田地的两倍。

在哈萨克斯坦进行了进一步研究，以研究如何以合适的剂量和次数把磷石膏施用到镁化土壤。在降雪前的冬季（一月）或融雪后的春季，土壤改良剂的施用量分别为 3.3 和 8.0 吨/公顷。在性能上，施用磷石膏的土地要优于未施用磷石膏的土地。施用磷石膏的效果在三种方面很

明显：（1）根区可交换镁含量降低；（2）上层土壤的水分运动和水分含量增加；（3）每单位面积和每单位施水量的棉花产量增加 [35]。从总体效果来看，降雪前冬季施用磷石膏要好于春季。在未施用磷石膏的田地，两年内的每单位施水量的平均作物产量为 0.32 kg/m^3 ；而在降雪前冬季施用 8.0 吨磷石膏/公顷 的田地，两年内的每单位施水量的平均作物产量增加至 0.52 kg/m^3 （图 35）。

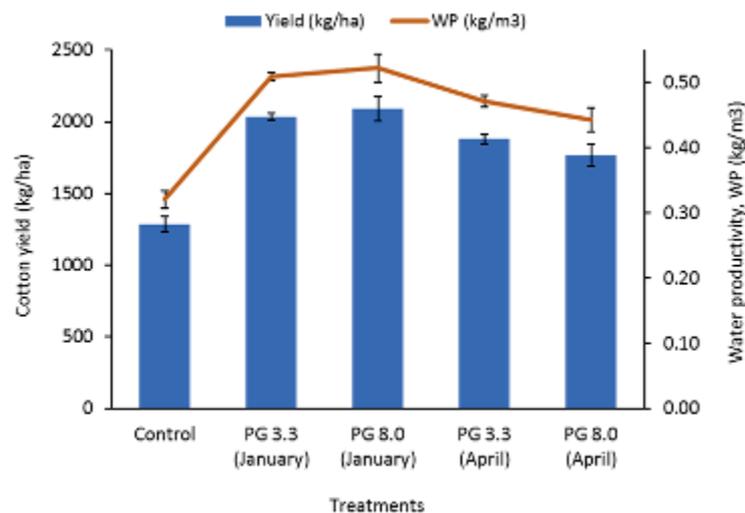


图 35. 在降雪前（1 月）的冬季和融雪后的春季往哈萨克斯坦镁化土壤里施加磷石膏的数量（分别为 3.3 和 8.0 吨/公顷 ）对作物产量和水分作用的影响[35]

1.3.3 应对方案的经济性

一系列成本是由于土壤中镁含量高而导致的土地退化而产生的，例如：（1）对环境健康和生态系统服务的损害；（2）农场财产市场价值的下降；（3）农场就业的减少，这可能会导致移民；（4）从农场经营和商业机减少转化而来的社会成本；（5）对当地文化的潜在影响，以及文化遗产的衰落或丧失。

人们已经对以下情形的经济性进行了一些研究：（1）“不作为”，即因高镁土壤而带来的潜在利益的丧失，以及（2）“作为”，即采取措施来防止或逆转灌溉地区镁引起的水质恶化和土地退化。例如，一项研究[36]通过使用以下处理方法评估了对镁含量高的水和土壤的“作为”与“不作为”的经济性：“不作为” - 不施用磷石膏的情况（对照组），和“作为” - 在土中分别施加 4.5 和 8.0 吨磷石膏/公顷 。“作为”与“不作为”的经济性是根据田地的净收入来评估的。在“不作为”情况下，田地的净收入为 241 美元/公顷 ，而在“作为”情况下，田地的净收入为 $522 - 554 \text{ 美元/公顷}$ 。这表明与在镁化土壤里施用磷石膏的棉农相比，那些不施用的棉农的净收入将减少近一半。

对当地农业社区进行的为期多年的研究表明，通过在因土壤和灌溉水中的镁含量高而退化的土地上施用磷石膏，农民可以增加作物的产量，从而改善他们的生计[36]。在研究地区，棉花价格是由负责棉花收购和区域营销的私营公司决定的。由于大多数农场属于自给自足的农民，因此即使在一个作物季节，他们也无力负担全部农场运营成本。他们与私营公司签订协议，从后者获得贷款以购买农场投入物和支付运营费用。作为回报，他们在季节开始时便与这些公司确定棉花价格。这个议定价格总是低于公开市场上棉花的实际价格。公司接收棉花，

并根据棉花收入与提供给农民的贷款额之间的差额退还一部分钱给农民。整个等式对这些公司有利。因为最终农民只剩下少量钱，这迫使他们为下一个作物季节而借钱，并在“不作为”的情况下呆在“生存”陷阱中。

在镁化土壤里施用磷石膏有助于农民（1）通过逆转土地退化来改善土壤状况；（2）显著增加作物产量（图 36）；（3）获得高净利润，几乎是“不作为”地区的两倍；（4）退出与公司的合同；（5）独立决定在公开市场上购买农场投入物和经营贷款以及销售他们所收获的作物。在镁化土壤区域 300 公里范围之内，农民即可获得大量的磷石膏。根据世界银行的成本效益模型判断，相对于上述农民所获得的经济收益，这样的运输距离在经济上是合理的。



图 36. 一个农民施用磷石膏于其镁化土地里并收获了好的棉花产量(哈萨克斯坦南部阿里斯土耳其斯坦)(图片由联合国大学提供)

1.3.4 未来展望

由于环境恶化，中亚国家有必要应用相关的生态系统资源管理战略来改善水土资源的生产力。在不损害整个生态系统健康的前提下，可以看到特定的环境效益，例如通过增强土壤碳固存和增强粮食安全来减轻气候变化的影响。该地区的研究和实践表明，磷石膏等钙补充剂的有益用途可触发灌溉、牧场和雨养系统中退化土地的恢复，以增加农业产量，确保粮食安全，并通过固碳减轻气候变化的影响，并提高人们的生计适应力。

中亚地区是自然资源最丰富的地区之一，但也是环境脆弱的地区。在该地区有计划、有效、高效和生产性地使用磷石膏可以为环境、生态系统和自然资源带来一系列好处，同时增强人们的生计适应力以及社会经济效益。

1.3.4.1 盐渍土壤的修复

通过施用磷石膏作为土壤改良剂来修复盐渍退化土地，可以在农业产量、碳捕获、土地价值、经济和生计方面取得可观的收益（图 37）。研究表明，这可使盐渍退化土地上的农业产量翻番[35] [38]，并可大大降低当地农民的贫困程度，从而使农民可以独立决定在公开市场上购买农场投入品和经营贷款以及出售他们收获的作物[36]。

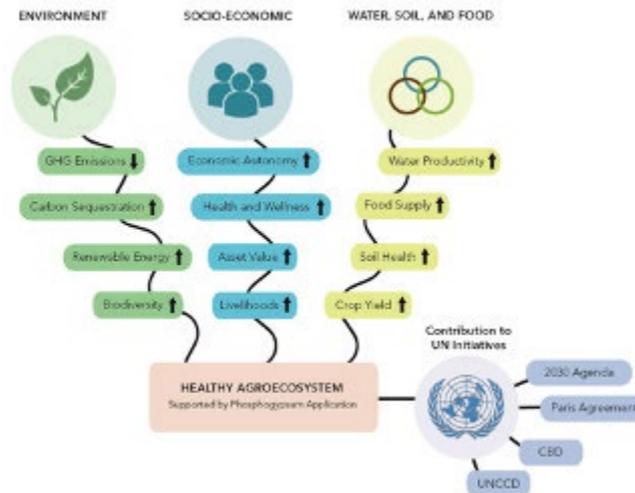


图 37. 磷石膏应用所带来的健康农业生态系统可以带来一系列好处，同时为全球可持续发展进程做出贡献

以磷石膏为主要原料制成人造土导致高产人工林，以隔离碳以及产生绿色能源或木片和生态系统多样性[39]。

在盐水灌溉地区，使用磷石膏可减轻作物生产和农林业系统中的盐分效应。这可为其他用途节约用水，将碳固存于土壤，并生产可再生能源、农产品和作物多样化选项[40]。

这些以磷石膏为主导的干预措施可以带来共同的收益，例如通过碳排放带来的环境收益、土地价值和生计适应力的提高，以及美学和生计弹性的提高。这些干预措施是全球可持续性进程的核心。它们为诸如 2030 年可持续发展议程、《巴黎气候变化协定》、《防治荒漠化公约》和《生物多样性公约》之类的联合国倡议做出了贡献。

在明确定义的商业模式的基础上，商业化使用磷石膏来发展中亚的适应性农业生态系统，同时考虑利益相关者需求的敏感性，是使用磷石膏辅助管理该地区的恶劣土地和水资源来提供多重收益和繁荣的方法。

1.4 磷石膏作为肥料的价值评估 - 农学田间试验的结果：摩洛哥

作者们

Khalil EL MEJAHED（穆罕默德六世理工大学），和 **Youssef ZEROUAL**（OCP 创新公司）

穆罕默德六世理工大学（UM6P）是一个教育、研究、创新和企业家精神中心，希望成为摩洛哥、非洲地区和更广阔世界之间一个牢固的知识桥梁。UM6P 校园位于摩洛哥本格拉伊尔市的“穆罕默德六世绿色城市”区的马拉喀什社区附近。它采用“边做边学”的教学方法，同时与世界一流大学建立良好的合作，以促进它在重点研究领域的领导力和学术卓越。通过以这些方法，它希望为培训新一代的摩洛哥和非洲研究人员、企业家和领导人做出贡献，并且致力于将摩洛哥定位为一个位于技术和人文科学前沿的国家。

1.4.1 引言

植物需要硫（S）才能合成氨基酸以生产蛋白质。不同的植物对硫的吸收量区别很大，在很大程度上取决于植物品种和农业做法。作物对硫的需求量介于 13 千克/公顷和 60 多千克/公顷，而对钙的吸收量可能在 20 千/公顷和 196 千克/公顷之间。⁷ 谷物中的 S 含量在干重的 0.08% 至 0.173% 之间[41]，而其 Ca 含量在干重的 0.5% 至 5% 之间。⁸即使作物不表现出 S 缺乏症状，甚至中度的 S 缺乏就会影响作物的产量和品质。各种研究[42]，如 TSI⁹ 2018 [43][44]，已证明硫不仅可提高谷物的营养价值，而且可提高谷物的单产。当同时对作物施用 N 和 S 时，也可能会更好地提高作物的产量[45] [46] [47]。由于谷物的硫资源利用效率比较低（平均水平仅约 18% [48]），所以硫肥的施用量可能很大。

硫缺乏症在世界许多不同地区越来越普遍。在印度分析的土壤中，70% 以上土壤中的硫含量处于“低至平均”范围，而施用硫肥到硫缺乏的土壤里，可显着提高许多作物的单产。¹⁰可以预见田间作物的硫利用率将进一步下降，这是因为农业集约化程度的提高和含硫肥料的有限使用，以及某些地区的工厂减少了向大气中排放硫以及“采矿性农业”减少了土壤有机质（主要 S 源）水平（即由于土壤有机质的减少和有限的肥料施用而导致的土壤贫瘠）。

磷石膏可以用作肥料，特别是可作为 S、Ca 和酸度（低 pH）的来源。但是与用作土壤改良剂的磷石膏相比，用作肥料的磷石膏的消耗量很小。本案例研究评估了（1）磷石膏作为营养源对非盐渍土壤的影响，以及在雨育地区对两种不同类型的农作物（油菜和豆科作物）的影响，以及（2）为作物和土壤施用磷石膏对环境的影响。

1.4.2 材料与方方法

1.4.2.1 试点选择和处理方案

在摩洛哥塞塔特（Settat）地区的九个地点，进行了磷石膏应用的田间试验（图 38）。根据它们的土壤质地、深度和 pH 值差异，选择该地区的不同地点来进行这样的试验。

处理方法包括将不同剂量的磷石膏施用到油菜籽和/或可食用的豆科作物。

每个试验由三块 900 平方米（每块 300 平方米）的田块组成，其中田块 1 被施用 0 公斤磷石膏/公顷（对照田块），田块 2 被施用 1,500 公斤磷石膏/公顷，田块 3 被施用 3,000 公斤磷石膏/公顷。通过浅耕（约 15 厘米深度）将磷石膏掺入土壤中。

⁷ 请参考 <https://www.croplnutrition.com/efu-secondary-nutrients>

⁸ 请参考 <https://www.extension.uidaho.edu/publishing/pdf/CIS/CIS1124.pdf>

⁹ 请参考 <https://www.sulphurinstitute.org/about-sulphur/sulphur-the-fourth-major-plant-nutrient>

¹⁰ 请参考 <https://www.researchgate.net/publication/298788613>



图 38. 塞塔特地区

田间试验按如下方案进行：

油菜籽

- i. 塞塔特地区的 Ouled Saïd 地点（纬度：北纬 32°58'50.21”，经度：西经 7°48'21.34”）。土壤类型（深处）为变性土（本地称为 TIRS）。
- ii. 塞塔特地区的 AïnAli Moumen 地点（北纬 32°55'50.78”，西经 7°36'23.73”）。土壤类型为 Calcixeroll – 一种含有石灰硬锅的粘土质浅土，深约 20-35 厘米。
- iii. 塞塔特地区的 Jamaat Riah 地点（北纬 33°9'11.23”，西经 7°26'21.41”），这是国家农学研究所(INRA)的农业研究站。研究的土壤类型是具有弱酸性至中性 pH 的沙壤土。
- iv. 塞塔特地区的埃尔加拉（El Gara）地点（纬度：北纬 33°17'24.80”，经度：西经 7°19'7.68”）。土壤类型是变性土，非常粘质，非常深。

豆科作物 (粮食作物)

- i. 塞塔特地区的 El Gara 地点（纬度：北纬 33°17'24.80”，经度：西经 7°19'7.68”）。被测作物是冬季鹰嘴豆。土壤类型与上述的 iv 相同。
- ii. 拉巴特地区罗马尼（Rommani）镇的 Aïn Sbit 地点（1 北纬 33°33'9.28”，经度：西经 6°32'21.64”）。被测作物是春季鹰嘴豆和小扁豆。该地点的降雨量比其他测试的地点更高。

播种前，将磷酸盐作为磷酸二铵（DAP）应用于所有试验田块（田块 1、2 和 3）里。除了磷石膏以外，没有施加任何其它 S 源。

1.4.2.2 土壤和植物的采样与分析

在两个不同的阶段对油菜籽进行植物采样：在完整的开花/结实期和收获（成熟）期；而对鹰嘴豆和小扁豆的采样则在收获期进行。从每个地点的每块试验田中采取三个复合植物样品。

采样后，将所有样品风干。然后称重在开花期采集的油菜植物样品，并将其分成茎、叶和种子荚。将鹰嘴豆和小扁豆样品脱粒并手动清洗，以确定豆粒和秆各自的重量。根据干物质和菜籽重量，评估在收获（成熟）期采集的油菜籽的重量。对受测作物所有成分的干物质和果实分别进行了营养、重金属和放射性含量分析。分析涉及 N、P、K、S、Mg、Ca、Na、Cl、Zn、Mn、Fe、Cu 和 B 以及某些重金属如 As、Cd、Hg 和 Pb（表 8）。对于在两个采样阶段采集的油菜籽以及在收获期采集的小扁豆和鹰嘴豆，均采用相同的分析和样品制备程序。

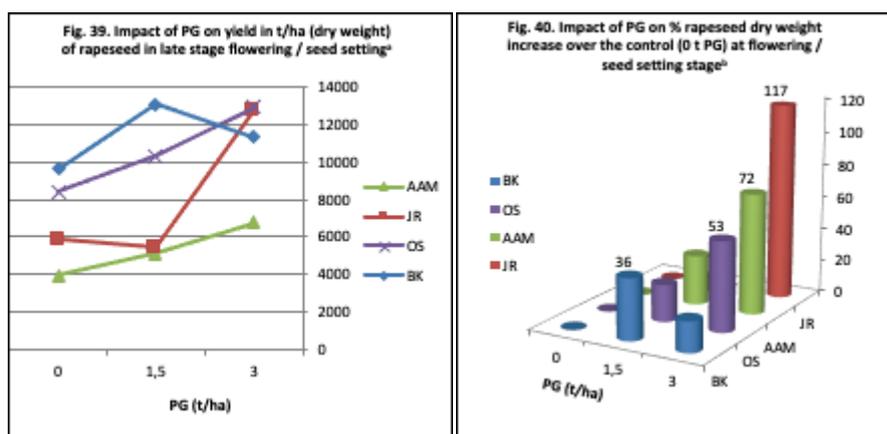
土壤样品取自 OuledSaïd、El Gara 和 Jemaat Riah 地点的油菜试验田（包括对照田块和施用磷石膏的田块）的土壤上层（0-20cm）。将它们烘干、研磨并过筛至 2mm。

土壤的理化分析：

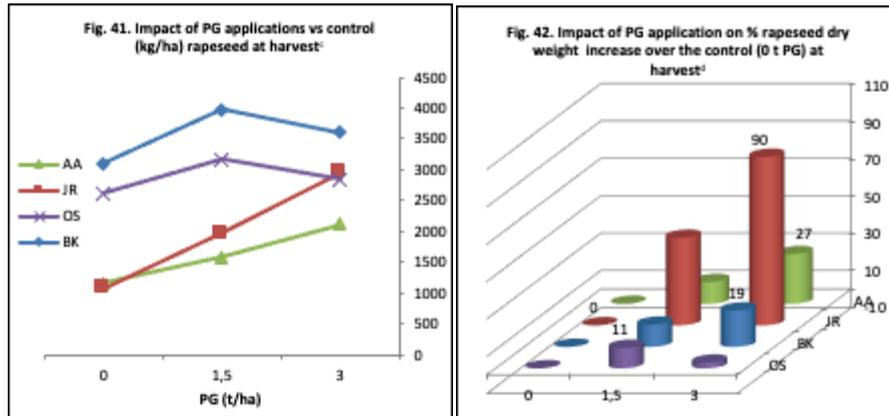
- 粒度分析（五份：粘土，两份淤泥和两份粘土），pH、土壤有机质（SOM）、CaCO₃、活性 Ca、电导率（提取 1/5）
- 植物可用的 P₂O₅；可交换阳离子（K₂O、Na₂O、CaO 和 MgO）、Fe、Mn、Zn、Cu、Cl、硝酸盐和铵盐（NO₃ 和 NH₄）
- 重金属：As、Cd、Hg 和 Pb
放射性元素：²³⁸U 链（²³⁴Th、²²⁶Ra、²¹⁴Pb、²¹⁴Bi）；²³²Th 链（²²⁸Ac、²⁰⁸Tl、²¹²Pb、²¹²Bi）、²³⁵U 和 ⁴⁰K 链。

1.4.2.3 结果

位于 OuledSaïd 和 El Gara 的试验田的土壤是非常含黏土的、轻微含钙质的，呈弱碱性；而 Jemaat Riah 实验站的土壤具有平衡至沙质的特性，呈弱酸性。OuledSaïd 和 El Gara 的土壤含有近似的中等水平的 K 含量，但植物中有效磷和微量元素含量不同。OuledSaïd 的土壤中 P 含量明显偏低，但 El Gara 和 Jemaat Riah 土壤中的 P 含量均处于平均水平。通过在两个不同的生长阶段采样来测量磷石膏施用对油菜的影响：（1）晚期开花/结实期和（2）成熟（收获）期（图 39、图 40、图 41、图 42）。



^{a,b} 试点位置的图例（图 39、40）。BK: El Gara; OS: OuledSaïd; AAM: Aïn Ali Moumen; JR: Jemaat Riah



c,d 试点位置的图例。 BK: EL Gara; OS: OuledSaïd; AAM: Aïn Ali Moumen; JR: Jemaat Riah

表 8. 在后期开花/结实期采集果实和植物物质（干重）样品中的 As、Pb、Cd 和 Hg 的含量

地点	磷石膏 (t/ha)	后期开花/结实期				收获的果实				收获的秸秆			
		As	Pb	Cd	Hg	As	Pb	Cd	Hg	As	Pb	Cd	Hg
AA_Moumengt(AAM)	0	0.56	0.24	0.11	0.3	0.54	0.04	1.99	0.06	0.85	0.1	0.07	0.39
AA_Moumengt(AAM)	1.5	0.69	0.08	0.12	0.61	0.21	0.33	0.47	0.03	0.56	0.08	0.09	1.0
AA_Moumengt(AAM)	3	0.58	0.03	0.11	0.4	0.48	0.02	1.69	0.05	0.16	0.27	0.1	0.59
El Gara(BK)	0	0.47	0.29	0.09	0.65	0.59	0.01	2.01	0.03	0.66	0.9	0.06	0.76
El Gara(BK)	1.5	0.38	0.23	0.1	0.75	0.59	0.13	2.28	0.03	0.65	1.02	0.07	0.39
El Gara(BK)	3	0.36	0.08	0.09	0.53	0.6	0.01	1.92	0.03	0.47	0.22	0.08	0.49
Jemaat Rlyah(JR)	0	0.2	0.36	0.08	0.58	0.28	0.4	0.85	0.03	0.01	0.52	0.08	0.31
Jemaat Rlyah(JR)	1.5	0.81	0.09	0.07	0.62	0.49	0.06	1.54	0.03	0.48	0.46	0.08	0.54
Jemaat Rlyah(JR)	3	0.4	0.03	0.01	0.56	0.44	0.2	1.14	0.02	0.56	0.53	0.05	0.56
Owled Said(OS)	0	0.4	0.3	0.1	0.46	0.52	0.17	1.91	0.05	0.17	2.71	0.09	1.26
Owled Said(OS)	1.5	0.36	0.14	0.15	0.41	0.49	0.17	1.49	0.03	0.27	0.29	0.1	0.92
Owled Said(OS)	3	0.44	0.16	0.1	0.4	0.79	0.17	2.43	0.04	1.3	1.65	0.09	0.66

表 9. 土壤和植物（干物质；果实和秸秆）中的放射性，以 Bq/kg 计

	处理	²²⁶ Ra	²³⁴ Th	²¹⁴ Pb	²¹⁴ Bi	²²⁸ Ac	²⁰⁸ Tl	²¹² Pb	²¹² Bi	²³⁵ U
土壤	对照	25.9	20	13.5	9.1	33.3	11.7	32.9	32.9	0.9
	1.5t/ha	29.8	18.2	14.3	15	33.8	10.8	32.7	32.7	0.8
	3t/ha	25.9	18.3	13.1	14.6	34.7	10.7	31.1	31.1	0.8
植物(干物质, 果实和秸秆)	所有	<LD:3.7	<LD:7.9	<LD:2.09	<LD:2.2	<LD:2.7	<LD:2.4	<LD:1.9	<LD:1.9	<LD:5.2



图 46.春季鹰嘴豆和小扁豆 (Ain Sbit) (图片由 OCP 提供)



图 47.冬季鹰嘴豆 (El Gara) (图片由 OCP 提供)

1.4.3 主要结论

1.4.3.1 油菜籽

- 与对照田块相比，施用磷石膏的田块的后期开花/结实期作物的干物质（秆）产量增加显著。
- 通过直接影响土壤的有效磷含量以及间接影响土壤的其他养分含量，包括痕量元素，以及引起土壤化学变化，施用磷石膏增加了植物在后期开花/结实期对磷的吸收。因此，施用磷石膏不仅可提高作物产量，而且可增加其他效益。
- 与对照田块相比，施用磷石膏的田块中的磷含量增加量介于 0-18 千克磷/公顷（1.5 吨磷石膏/公顷）和 8-20 千克磷/公顷（3 吨磷石膏/公顷）之间；磷吸收量的增加等于 100 千克 DAP 中磷的含量。
- 施用磷石膏释放出的 S 不仅影响了开花后期油菜干物质的含量，而且整体上影响了油菜对 S 的吸收。
- 施用磷石膏有助于增加植物对其他养分的吸收，尤其是氮、钾、钙和镁。根据施用磷石膏的田块中开花后期的干物质测定结果，作物对氮和钾的吸收平均比对照田块分别高 22-100 千克 N/公顷和 26-128 千克 K₂O/公顷。
- 在田里施用磷石膏用作肥料，在增加作物的干物质产量和作物对矿物质营养素的吸收方面都具有直接和间接的好处。这些增加是由于提高了作物的用水效率和土壤中养分的利用率。
- 根据在开花后期采集的样品的干物质中的微量元素含量分析结果，施用磷石膏对开花后期油菜对微量元素的吸收产生了积极影响。
- 在 El Gara (BK) 和 OuledSaïd (OS) 的田里，施用 1.5 吨磷石膏/公顷可获得最大的作物

产量；而在 AinAli Moumen (AA) 和 Jemaat Riyah (JR) 的田里，施用 3 吨磷石膏/公顷可获得最大的作物产量。相比之下，除 OS 以外，当施用 3 吨磷石膏/公顷时，所有地点的作物干物质产量最高。而在 OS，当施用 1.5 吨磷石膏/公顷时，作物的干物质产量才最高。相对对照田地，各地田块的总产量增幅差异很大，果实产量增幅为 21%-175%，而总干物质或秆产量增幅为 11%-90%。

- 施用磷石膏对开花期油菜干物质中微量元素的含量也有积极影响。

施用磷石膏所引起的产量增加是通过果实/荚果的增加以及果实重量/总生物量的增加而实现的。这表明施用磷石膏对生物量生产和果实灌浆都具有积极影响。

- 磷石膏的施用增加了果实对 P、N、K、S 和 Ca 的吸收
- 除硼外，施用磷石膏增加了果实对微量元素（锌、铜、锰、铁）的吸收
- 磷石膏的施用对作物对重金属（As、Pb、Cd 和 Hg）的吸收影响可忽略不计，因此对菜籽的质量没有影响。实际上，施用磷石膏甚至降低了作物中的 Pb 含量（表 8）
- 放射性核素分析结果（表 9）清楚地表明，与对照田块相比，试验田土壤中既没有放射性核素积累，也没有把放射性核素转移到植物中。实际上，收获后植物和土壤中的放射性核素水平都低于检测极限 (<LD)（表 9）。

1.4.3.2 豆科作物 - 鹰嘴豆和扁豆

- 磷石膏的施用增加了冬季鹰嘴豆的产量（图 43、47）。施用 3 吨磷石膏/公顷可实现最高增产（30%）。该结果证明磷石膏可增加旱地条件下作物的水分利用效率。
- 当施用 1.5 吨磷石膏/公顷和 3 吨磷石膏/公顷时，春季鹰嘴豆的产量都提高了 50%（图 44、46）。当施用 3 吨磷石膏/公顷时，小扁豆的产量提高了 27%（图 45、46）。
- 磷石膏还增加了鹰嘴豆作物对宏观和微观矿质养分的吸收，特别是 N、K、S、Zn、Cu、Mn、Fe 和 B。没有证据表明施用磷石膏会增加鹰嘴豆对重金属的吸收。

春季鹰嘴豆和小扁豆的播种条件见图 46，而扁豆和冬季鹰嘴豆的播种条件见图 47。

1.4.4 后续试验

在受控条件下以及在田间使用不同农作物和土壤类型的组合以及不同磷石膏用量的情况下，正在开展使用磷石膏作为肥料的新型田间试验。我们正在与摩洛哥农业、海洋渔业、农村发展、水和森林部的国家农艺研究所 (INRA) 合作一起开展一些试验。穆罕默德六世理工大学创新与技术转让中心将进行其他试验。

1.5 对使用磷石膏作为盐碱/钠质土壤改良剂的评估：农田试验 - 摩洛哥

作者们

Khalil EL MEJAHED（穆罕默德六世理工大学），和 Youssef ZEROUAL（OCP 创新公司）

1.5.1 前言

土壤盐分在全球范围内加剧了土壤和地下水水质的恶化,同时严重限制了农作物的产量,虽然盐度和碱度本身是公认的土壤自然属性。此问题在全球范围内很普遍而且解决起来很费钱,但令人惊讶的是,当前还没有有关此问题影响程度和性质的可靠统计数据。早期分析[49]认为,全球盐渍土壤面积占全球灌溉地区的所有土壤面积的 50-60%。

然而,2019年发布的一份最新分析报告得出的结论是:“据我们评估,盐渍土壤的总面积约为10亿公顷,并且呈明显增长趋势”[50]。联合国粮农组织和国际原子能机构都高度重视盐渍土壤的管理和修复,因此出版了专门的盐渍土壤诊断手册[51]。¹¹

这些盐渍土壤主要分布在75个发展中国家的灌溉地区,这些国家有干旱或半干旱的气候,而且其粮食安全已经受到威胁。在这些国家中,边际土壤和水资源的使用是同时发生的,这是不可避免的,并且在不断增加,以满足人们对食物不断增长的需求。

在干旱和半干旱条件下,盐分会由于强烈的蒸发而积聚,尤其是在灌溉用水时,盐分会大量蒸发,而降雨不足,难以将盐分从根区洗掉。这种现象称为次生盐渍化,影响了摩洛哥的多个灌溉地区的土壤,特别是道加拉、塔德拉、加尔布、苏斯-马萨、穆卢亚、卢科斯、塔菲拉莱特、德拉、德拉科拉德斯格纳、巴希拉、塔萨奥和奇绍瓦等地区的土壤,也会影响许多其他地区(图48)。实际上,与世界其他地方一样,水和土壤的盐渍化正在增加,并影响土壤的质量及其生产力。联合国粮农组织于1988年估计,摩洛哥的盐渍土壤表面积为114.8万公顷[52]。¹²

由于其物理性质的变化(例如土壤被盐渍覆盖、结皮、硬化,粘土的溶胀和分散以及结构的丧失,及径流和侵蚀),受盐渍影响的土壤会退化。这对土壤中水分的保留、可利用性、流动性或自由排放都产生了负面影响。这种变化通过限制作物的生长、产量和质量而对作物产生直接影响。

为了修复盐渍土壤,可单独或组合使用不同的化学、物理或生物方法,包括施用化学改良剂、添加有机物、耕犁土壤,以及种植耐盐作物和品种。

化学改良剂,例如用于校正土壤盐度的硫酸、盐酸和多硫化钙,可用来提供 Ca^{2+} (如石膏、磷石膏、水合氯化钙)或溶解沉淀的方解石(CaCO_3),尤其是在钙质土壤中。在溶液中和土壤交换复合物中,增加 Ca^{2+} 含量可改善土壤颗粒的聚集并减少土壤结皮,从而改善土壤的水力学性能。

1.5.2 研究目的

使用磷石膏作为土壤改良剂或肥料,或两者,具有许多优点:除了向缺乏这些元素的土壤供

应 Ca 和 S 外，磷石膏还包含有效磷和一系列其他植物营养素，包括微量营养素。这项研究的目的是在实地条件下评估磷石膏（1）对作物生长和产量的影响，（2）对摩洛哥盐渍土壤的质量的影响，以及 3）对土壤中放射性核素和重金属变化及向植物迁移的影响。

1.5.3 材料与方方法

1.5.3.1 地点和作物的选择

田间试验地点位于萨拉德斯拉赫纳（El Kelaâ des Sraghna）地区的塞德马斯朱内镇（Sed El Masjoune）（图 49）。该地区处在有拉姆哈拉（Had Lamharra）平原上，以土壤和地下水中的高盐度而闻名。该地区的气候为半干旱，降雨量低。种植的主要农作物是大麦和用于青贮的饲料玉米。

1.5.3.2 种植和处理

每块试验田都施用了 DAP 形式的磷酸盐基础肥料（图 50、图 51），种植了两种作物，即大麦和玉米。试验田的处理包括三种处理方式：不施用磷石膏（对照田），和在田里施用两种不同用量的磷石膏。对 2 块大麦田分别施用 15 吨磷石膏/公顷和 30 吨磷石膏/公顷，对 2 块玉米田分别施用 20 吨磷石膏/公顷和 40 磷石膏吨/公顷（图 10）（表 10）。

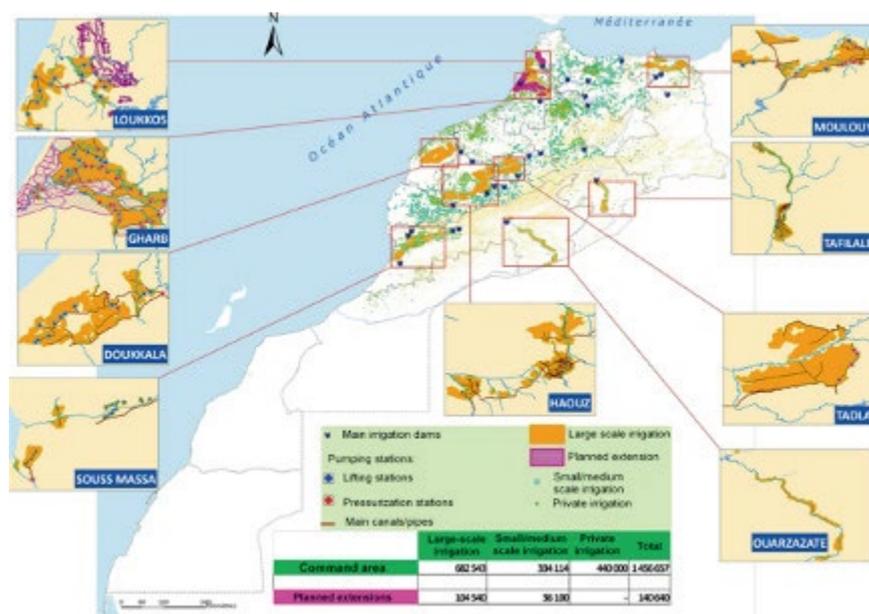


图 48. 摩洛哥的主要灌溉区



图 49. 田间试验地点的位置

表 10. 作物、对照和处理

作物	对照田	处理 1	处理 2
大麦	0 t/ha	15 t/ha	30 t/ha
玉米	0 t/ha	20 t/ha	40 t/ha



图 50. 试验田，包括对照田（图片由 OCP 提供）



图 51. 装袋的磷石膏，准备施用（图片由 OCP 提供）



图 52. 在预先施用 DAP 的大麦田和玉米田里施用磷石膏（图片由 OCP 提供）

1.5.3.3 土壤和作物的取样和分析

从施用不同用量磷石膏的所有田块中获取土壤样品。玉米田的取样深度为 0-20 厘米，大麦田的取样深度为 0-20 和 20-40 厘米。所进行的理化分析涉及以下参数：粒度分析（5 份）、pH、土壤有机质（SOM）、 CaCO_3 、活性 Ca、电导率（EC: 1/5）、植物有效 P_2O_5 、可交换的 K_2O 、可交换的 Na_2O 、可交换的 MgO 、可交换的 CaO 、Fe、Mn、Zn、Cu、Cl、 NO_3 和 NH_4 。

在每块试验田，采集四份饲用玉米样品，称重并干燥。样品首先在露天干燥，然后在烘箱箱里烘干。对于每个样品，进行以下测量：干物质的重量、秆和茎的数量、果仁（穗）的数量及其重量，以及谷物的重量。

对于每种处理方式，对四个子样本的复合样本进行了谷物和玉米干物质的分析（表 11）。有关营养成分的分析包括：N、P、K、S、Mg、Ca、Na、Cl、Zn、Mn、Fe、Cu 和 B。

1.5.4 结果

分析结果表明，实验田的土壤具有以下特点：（1）是粉质粘土，SOM 含量低，并且具有碱性；（2）在土壤表面（0-20cm）稍含钙质，在深度处（20-40 厘米）适度含有钙质；（3）富含磷、镁、锰和锌，但铁和钙的平均含量较低，而钠和盐分含量很高。将磷肥作为基本肥料施加到两种作物中，以确保对作物来说磷不是一个限制因素。

表 11. 大麦和玉米试验田的土壤理化分析

种植 (深度)	磷石膏 剂量	黏土	沙	泥	K ₂ O	P ₂ O ₅	pH	MO	EC1/5	CaCO ₃	Ca Act.	Na ₂ O	CaO	MgO	Fe	Mn	Zn	Cu	Cl	NO ₃	NH ₄
		%			ppm	ppm		%	mmhos/ cm	%	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	mg/100 g soil		
玉米 (0-20cm)	0	39	31	30	497	138	8.1	1.89	2.99	7.7		2,894	4,032	1,082	10.55	61.82	2.37	1.96	497	138	8.1
玉米 (0-20cm)	20	40	29	32	394	226	8.2	2.23	1.89	7.7		1,470	4,480	1,445	11.54	46.74	3.3	1.81	394	226	8.2
玉米 (0-20cm)	40	36	33	31	525	205	7.9	2.4	5.75	6.8		4,552	6,888	1,602	12.84	84.94	3.63	2.06	525	205	7.9
大麦 (0-20cm)	0	38	28	34	405	411	8.3	3.71	1.44	8.2		2,031	3,528	1,416	10.2	60.24	6.65	2.81	405	411	8.3
大麦 (20-40cm)	0	41	25	34	466	148	8.5	1.79	1.02	11.3	6.4	1,375	3,052	1,034	5.66	21.86	1.63	1.53	466	148	8.5
大麦 (0-20cm)	15	40	25	36	350	212	8.1	2.45	1.86	8		1,412	5,152	1,156	7.68	33.51	3.44	1.72	350	212	8.1
大麦 (20-40cm)	15	44	27	30	359	42	8.5	1.22	0.85	11.7	6.8	1,078	3,528	835	5.81	13.65	0.54	1.34	359	42	8.5
大麦 (0-20cm)	30	42	24	35	340	115	8.3	2.38	1.08	8.8		717	4,228	956	7.94	21.57	1.74	1.99	340	115	8.3
大麦 (20-40cm)	30	38	27	35	320	25	8.8	1.12	0.48	14	8.3	937	3,220	821	5.54	9.1	0.44	1.08	320	25	8.8

1.5.4.1 大麦试验

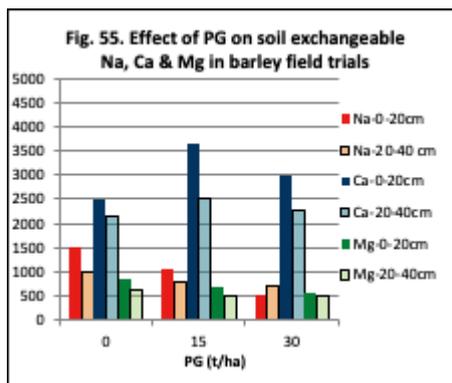


图 53. 作物反应 -

大麦 (左: 没施用磷石膏的对照田; 右: 标有白色信封的施用磷石膏的田块, 30 吨磷石膏/公顷) (图片由 OCP 提供)



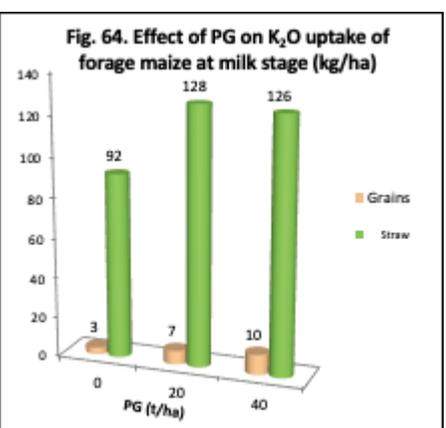
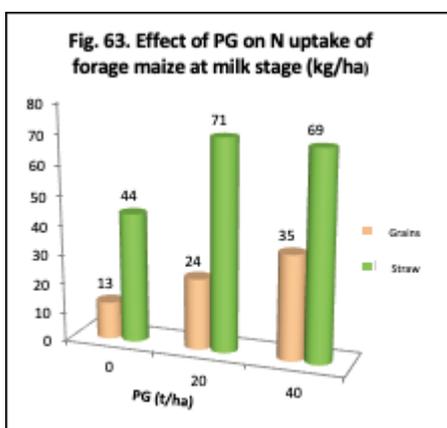
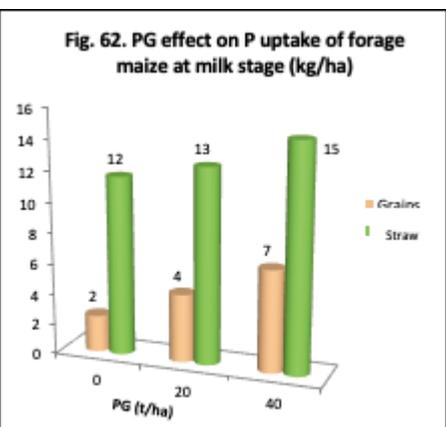
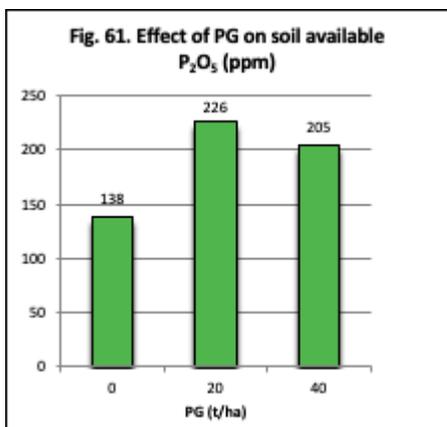
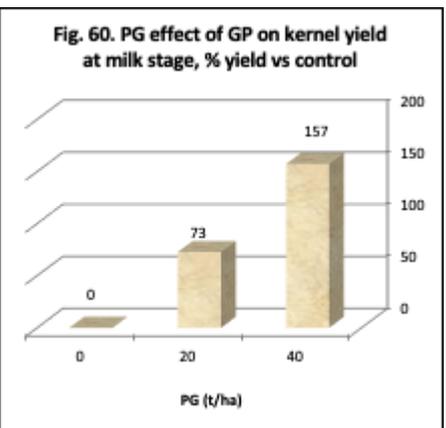
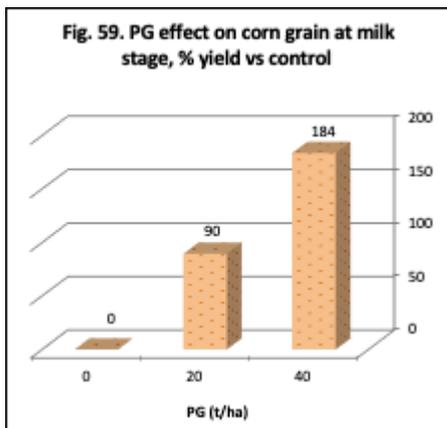
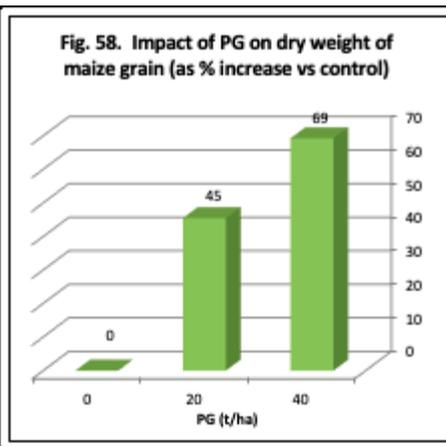
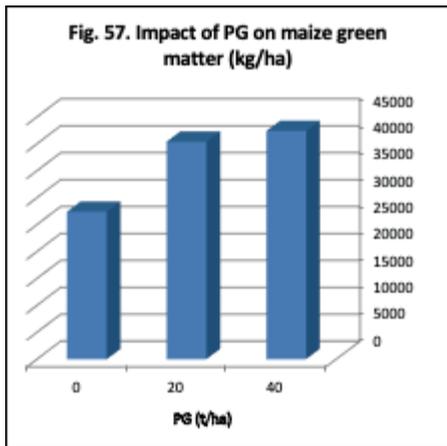
图 54. 施用磷石膏减少了叶子烧伤 (左: 没施用磷石膏的对照田; 右: 施用 30 吨磷石膏/公顷的田块) (图片由 OCP 提供)

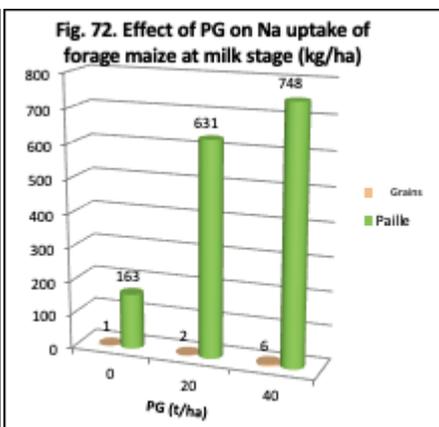
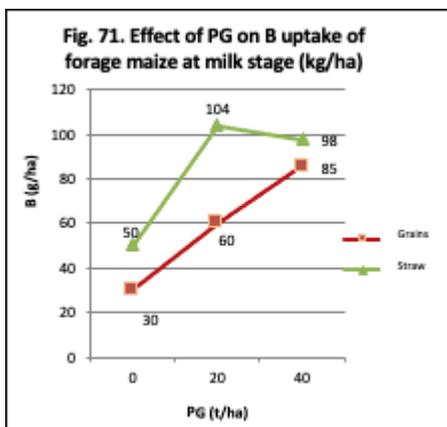
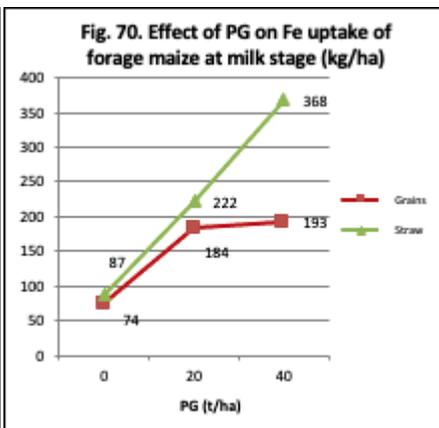
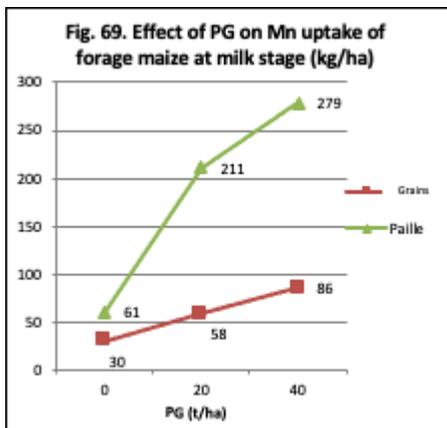
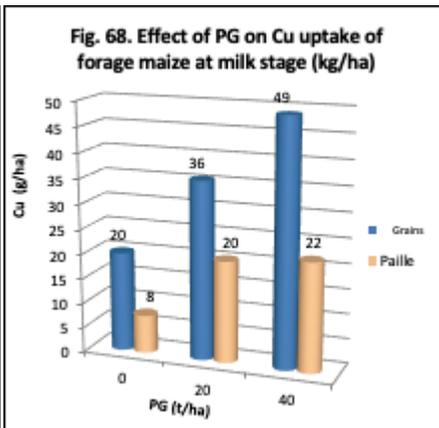
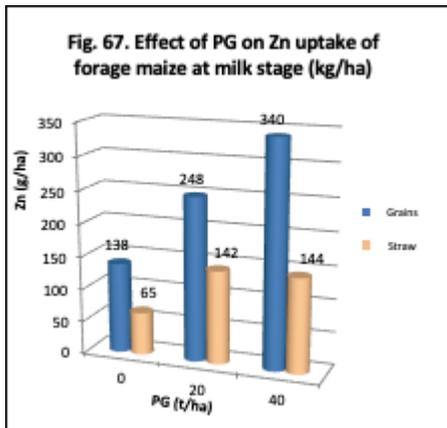
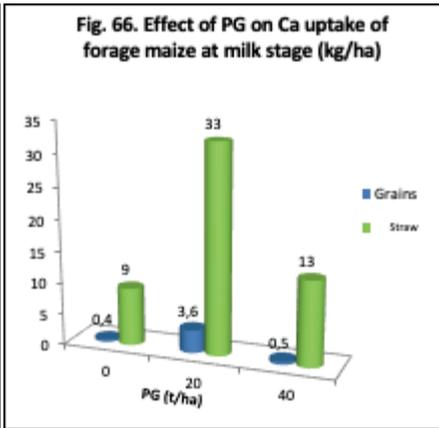
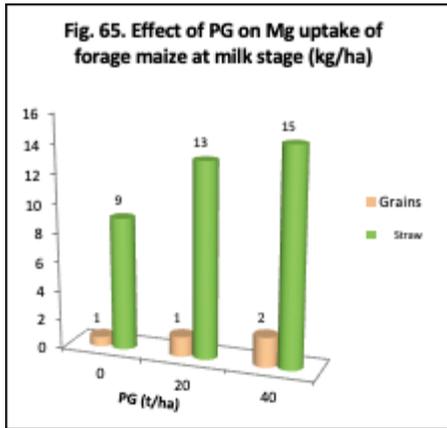


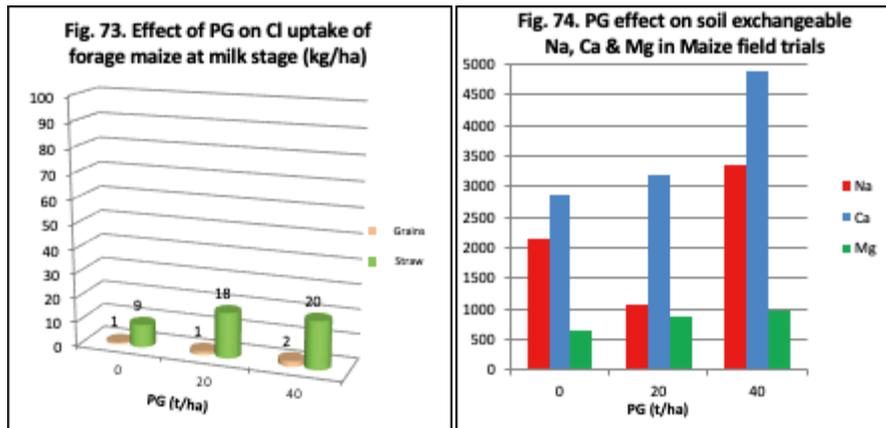
1.5.4.2 玉米试验



图 56. 施用不同剂量磷石膏的玉米：上左：0 吨磷石膏/公顷（对照）；上右：20 吨磷石膏/公顷（1）；底部：40 吨磷石膏/公顷（2）（图片由 OCP 提供）







1.5.5 主要结论

1.5.5.1 大麦试验

- 施用 30 吨磷石膏/公顷的田块的产量比对照田块（没有施用磷石膏）高 40-50%（图 53）。
- 磷石膏的使用提高了灌溉用水效率。所有试验田块都接受相同量的水，但经磷石膏处理过的田块的产量更高。与对照田块相比，施用 30 吨磷石膏/公顷的田块减少了大麦叶尖的烧伤（图 54）。
- 施用磷石膏对土壤中可交换的 Na、Ca 和 Mg 的影响如图 55 所示。在土壤上层（0-20cm）吸收钙的增多最明显，这对植物和土壤条件都有好处。

1.5.5.2 玉米试验

- 用磷石膏处理的田块的绿色生物量的产量显著高于对照田块。该增加主要是由于每根秆/茎的平均重量增加了（图 56、图 57）。
- 磷石膏的施用量分别为 20 吨/公顷和 40 吨/公顷时，干物质产量分别增加了 45% 和 69%（图 58、图 59）。
- 尽管种植玉米是为了生产草料而不是谷物，但是即使在乳熟期，草料产量也受到施用磷石膏的积极影响（图 60、图 62）。
- 所有试验田块均富含磷酸盐。因此干物质的磷含量受施用磷石膏的影响很小（图 61）。
- 施用磷石膏有助于增加植物对氮（图 63）、钾（图 64）和钙（图 66）的吸收。施用磷石膏的田块里的秸秆对氮和钾的吸收量平均为 70 千克氮/公顷和 127 千克钾/公顷，而对照田块里的秸秆对氮和钾的吸收量平均值为 44 千克氮/公顷和 92 千克钾/公顷。谷粒对 N 和 K 的吸收量很低，因为它们仍处于乳熟期，并且由于易位和灌浆，谷粒对 N 和 K 的吸收量可能会增加。由于养分效率通常与水效率相关，因此磷石膏的施用还提高了氮和钾的利用率。在不同处理方式下，玉米中的氮含量几乎相同，因此随着产量的增加，玉米中的氮含量也没有下降。
- 磷石膏的施用增加了秸秆中的微量营养素含量（表 12）。磷石膏的施用对秸秆产量和微量营养素含量都有积极影响。它增加了秸秆中这些微量营养素的含量（图 67、68、69、70、71）。

表 12. 对照田块和施用磷石膏的田块里饲用玉米秸秆和玉米粒的矿物质含量

玉米	磷石膏 (t/ha)	N	P	K	Mg	Ca	S	Na*1000	Cl	Zn	Cu	Mn	Fe
		%MS	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg						
秸秆	0	1.01	0.27	2.12	0.21	0.21	0.98	3775.3	2.15	15.03	1.77	14.07	20.15
秸秆	20	1.17	0.21	2.11	0.22	0.54	0.76	10433	3.05	23.44	3.37	34.96	36.76
秸秆	40	1.04	0.22	1.88	0.22	0.2	0.92	11204	2.92	21.53	3.28	41.71	55.02
玉米粒	0	2.25	0.43	0.61	0.12	0.07	0.68	184.55	0.13	24.67	3.58	5.41	13.25
玉米粒	20	2.27	0.42	0.65	0.13	0.34	0.9	234.73	0.14	23.46	3.37	5.5	17.38
玉米粒	40	2.23	0.42	0.64	0.13	0.03	0.87	360.58	0.14	21.5	3.09	5.41	12.17

- 尽管土壤中可交换的 Ca（以 CaO 形式）（图 66）和 Mg（以 MgO 形式）（图 65）有所增加；但在施用和不施用磷石膏的田块中，作物的 Mg 吸收量的差异仍然很小，谷类的 Mg 含量的差异也很小。但是，施用 20 吨磷石膏/公顷的田块里作物的 Ca 吸收量高于施用 40 吨磷石膏/公顷的田块和完全没有施用磷石膏剂量的田块中作物的 Ca 吸收量（图 65）。这是由于秸秆和谷物中的 Ca 含量增加了。
- 磷石膏的施用导致秸秆中微量元素含量的增加。秸秆对微量营养元素的吸收随着磷石膏用量的增加而增加，但秸秆中任何单一元素的含量均未达到毒性的下限阈值。因此，施用磷石膏对植物对微量营养素的利用产生了有益的影响，而这些营养素在钙质土壤中通常较低。
- 磷石膏的施用总体上提高了土壤中的钙含量，但不影响镁含量。
- 植物对钠的吸收量随磷石膏施用量的增加而增加，这可能是被磷石膏所置换出来的可利用的钠的数量增多了（图 72）。植物对氯的吸收量遵循相同的趋势，但与钠的吸收量相比，氯的吸收量仍然非常低。
- 植物对 Na 的吸收（图 72）随磷石膏用量的增而增加，这是因为磷石膏从土壤阳离子交换位点置换出来土壤中已有的钠，使其流动成为可利用的钠。植物对 Cl 的吸收遵循相同的趋势（图 73），但与钠的吸收量相比，氯的吸收量仍然非常低。
- 施用磷石膏对玉米中可交换的 Na、Ca 和 Mg 的影响如图 74 所示。
- 施用磷石膏的田块中放射性核素向植物的转移与对照田块中的相似（表 13）。

表 13. 施用磷石膏作为改良剂对饲用玉米（Sed El Masjouné）的玉米粒和秸秆中放射性元素活性的影响

	玉米秆			玉米粒		
	磷石膏: 0 t/ha	磷石膏: 20 t/ha	磷石膏: 40 t/ha	磷石膏: 0 t/ha	磷石膏: 20 t/ha	磷石膏: 40 t/ha
234Th (Bq/kg)	<LD = 8	<LD = 9.8	<LD = 8.3	<LD = 7.6	<LD = 9.5	<LD = 9.9
226Ra (Bq/kg)	<LD = 4.5	<LD = 3.7	<LD = 4	<LD = 4.1	<LD = 4.5	<LD = 3.6
214Pb (Bq/kg)	<LD = 2.4	<LD = 1.6	<LD = 1.9	<LD = 1.2	<LD = 1.5	<LD = 1.5
214Bi (Bq/kg)	<LD = 3.1	<LD = 2	<LD = 1.2	<LD = 2.1	<LD = 1.7	<LD = 1.6
228Ac (Bq/kg)	<LD = 3.3	<LD = 3.1	<LD = 2.1	<LD = 4.1	<LD = 2.7	<LD = 4.6
208Tl (Bq/kg)	<LD = 2.2	<LD = 1.6	<LD = 1.9	<LD = 1.5	<LD = 2.2	<LD = 1.5
212Pb (Bq/kg)	<LD = 1.7	<LD = 1.9	<LD = 2.4	<LD = 1.5	<LD = 2.1	<LD = 1.9
212Bi (Bq/kg)	<LD = 1.7	<LD = 1.9	<LD = 2.4	<LD = 1.5	<LD = 2.1	<LD = 1.9
235U (Bq/kg)	<LD = 6.2	<LD = 4.4	<LD = 4.9	<LD = 5.7	<LD = 3.7	<LD = 4.4
40K (Bq/kg)	757.4 ± 48.6	198.4 ± 16.9	740.7 ± 39.1	379.1 ± 25.8	732.5 ± 37.4	268.9 ± 12.8

1.5.6 后续工作

我们已与有关部门商定了将进行以下后续工作：

1. 与国家农艺研究所（摩洛哥农业、海洋渔业、农村发展、水和森林部的下属研究机构）和穆罕默德六世理工大学（UM6P）合作，在受控条件下和在田间（不同土壤类型、作物以及不同的磷石膏用量和来源），使用磷石膏作为土壤改良剂进行新的田间试验。
2. 与国家农艺研究所（摩洛哥农业、海洋渔业、农村发展、水和森林部的下属研究机构）合作，绘制摩洛哥不同地区的盐渍/碱性土壤分布地图。

2. 案例研究：建筑材料

国际原子能机构 SR78 10.5.2 和“报告 1”的第 4 部分提供了有关将磷石膏用作建筑材料（例如用作水泥、制砖和房屋用缓凝剂）的研究和开发工作的概述。本节的案例研究展示，如何使用磷石膏作为“一种可重复使用的原材料”把对研发的投资转化为商业模式创新和可持续的商业成功。

2.1 磷石膏与可持续发展的业务：比利时

作者们

Tibaut Theys 和 Thierry Garnavault, 比利时普瑞昂集团 (Prayon)

2.1.1 背景

比利时普瑞昂集团 (Prayon) 在将磷石膏作为商业资源进行管理和使用方面有着悠久而卓越的历史[53]。在阿尔芒·戴维斯特 (Armand Davister) 博士在摩洛哥马拉喀什举行的 1998 年 IFA 技术会议上所发表的关于磷石膏的论文中，该案例得到了令人钦佩的总结[54]。普瑞昂的成功方法在“报告 1”中占很大的比重。在此成功的基础上，“报告 2”自然而然地想更详细地介绍普瑞昂方法的性质和来源。因此，伴随着“报告 2”的编制，为了开启全行业的咨询流程，于 2018 年 3 月 21 日至 22 日在比利时恩吉斯 (Engis) 的普瑞昂集团总部召开了一个工作会议¹³，题为“**循环经济中的磷石膏：增强磷石膏市场接受度的技术和政策选择**”。

本报告通篇讨论了磷石膏的循环经济问题，这反映了恩吉斯会议的突破性意义，即显示磷石膏的使用如何容易地适应循环经济框架。此节专门描述普瑞昂的成功案例。它探索了普瑞昂集团 40 多年的把磷石膏变废为宝的历程。在这 40 多年里，普瑞昂解决如何把作为“废物”的磷石膏转化为商业上可行、环境上可持续且社会接受的湿法磷酸的副产物，从而为磷石膏循环利用建立了全球重要的参考案例。这正是戴维斯特阐述的案例[55]。出于对他的远见和洞察力的敬意，二十年后，磷石膏的生产和销售已完全融入了普瑞昂集团的工作文化和业务范围。

¹³ 这次会议是在普拉扬、阿莱夫集团、IFA 和欧洲肥料协会的共同主持下举行的，联合国欧洲经济委员会的代表参加了该会议。

自从“报告 1”发行三年来，磷石膏目前所处的商业和监管环境已经发生了巨大变化。普瑞昂案例反应了这一变化。普瑞昂集团现在能够销售 100%它所生产的磷石膏，而在2016 年这一比例仅是 80-90%。达到磷石膏生产与使用之间的平衡点是一个了不起的里程碑。但是，除了商业上的成功之外，普瑞昂磷石膏具有一系列用途。普瑞昂集团现又为磷石膏发现了新用途，包括农业用水效率增进剂和生物多样性促进剂。对使用普瑞昂磷石膏作为土壤改良剂的比利时农民来说，提高农业用水效率十分重要。那最后一个新用途，即生物多样性促进剂，是偶然发现的。在普瑞昂的恩吉斯工厂附近，一个工人一次倒了少量磷石膏在地上，但没有像以前一样用土覆盖它。但当他回来时，他发现动植物群开始在磷石膏上生长了。因为这一发现，监管机构现在要求不要用土覆盖施放在土壤上的磷石膏。

2.1.2 磷石膏作为普瑞昂集团的现有问题

在恩吉斯会议上开幕致辞时，普瑞昂技术总监 Tibaut Theys 列举了普瑞昂集团成功背后的推动力：“有时约束会以一种非常积极的方式推动创造和创新”。普瑞昂集团在 1980 年代面临的限制是存在的：监管机构禁止向邻近的默兹河排放磷石膏，而恩吉斯也没有更多土地可以用来存储普瑞昂工厂所产生的新鲜磷石膏。

因此，普瑞昂面临一个简单而鲜明的选择：停止生产或提出根本性的创新解决方案 - 完全重新设计磷酸生产工艺，以生产可以长期出售的磷石膏，主要销给建筑材料市场，也可以销给当地农业，从而实现生产与使用之间的平衡。

四十二年来，普瑞昂集团的成功可以通过其 2018 年的磷石膏销售业绩来判断（表 14）。

表 14. 2018 年的业绩：普瑞昂磷酸和磷石膏 - 生产和销售

- 磷酸生产量（ P_2O_5 计）：159,000 吨 P_2O_5
- 磷石膏产量：790,000 吨
- 磷石膏销售：

农业应用	60,000 吨
灰泥和水泥	708,000 吨
总计	768,000 吨

因此，磷石膏的资源发展已经达到了一个里程碑，即生产（供应）和消费（需求）达到了可持续的业务平衡点，现在还达到了有关责任的生产和消费的“联合国可持续发展目标 12”。在取得这一具有里程碑意义的成就的过程中，普瑞昂一直没有享受任何政府补贴而且仍然没有享受任何政府补贴。该过程是作为一项商业活动进行的，但是它具有很大的环境和社会效益。因此，普瑞昂集团证明了纳什（Nash）可持续性经济均衡模型的有效性[55]，即可持续性和商业可行性是完全兼容的概念。

普瑞昂集团如何以及为什么会成功？所涉及的因素是否更广泛地适用于全世界的磷石生产商？总体而言，本报告表明，这些因素不仅适用于普瑞昂，也适用于世界其他磷酸生产企业，即使在这些企业所生产的磷石膏数量大大高于普瑞昂集团所产生的数量的情况下。特别是，三个“软”因素脱颖而出，它们是整个“报告 2”所确定的磷石膏管理的核心原则：

- 引领
- 创新
- 合作

2.1.3 引领

在应对磷石膏问题方面，普瑞昂集团的领导层一直积极主动采取行动，并自上而下率先垂范。普瑞昂长久以来清晰地认为，磷石膏是磷酸生产的副产品，甚至真正的副产品实际上是磷石膏生产的磷酸。它的领导力战略也是在明确的、商业上可持续、对环境负责、对环境无害的磷石膏管理战略的背景下制定和执行的。该战略被完全嵌入了公司的价值观和良好运营实践中。这些方面为公司的磷石膏领导策略奠定了基础，并在其网站上的以下标题下进行了充分说明：

- 全面的和集成的资源管理
- 工业和公共卫生与安全
- 能源与气候
- 重大环境项目
- 利益相关者的参与和沟通

然而，随着大量的磷石膏被产生，一种最终解决其存储、管理和使用问题的可持续的解决方案必须以连贯一致的方式解决以上所有五个方面的问题。

2.1.4 创新

自 1980 年代以来，湿法磷酸工业朝着集中化的大型多单元生产设施的趋势发展，这些设施的年产能一般约为 100 万吨，但与之相反，普瑞昂集团一直坚持基于“小而美”概念的商业模式。它通过实现业务多元化来完善这一模式。其业务多元化不仅体现在下游有形产品流方面，而且还基于有形资产（如过滤器之类的设备）和无形资产（如专有技术、流程图设计、培训、基于大数据管理的精确工厂控制等工程和化学工程能力）。这些功能和能力在世界范围内都是需要和/或使用的。

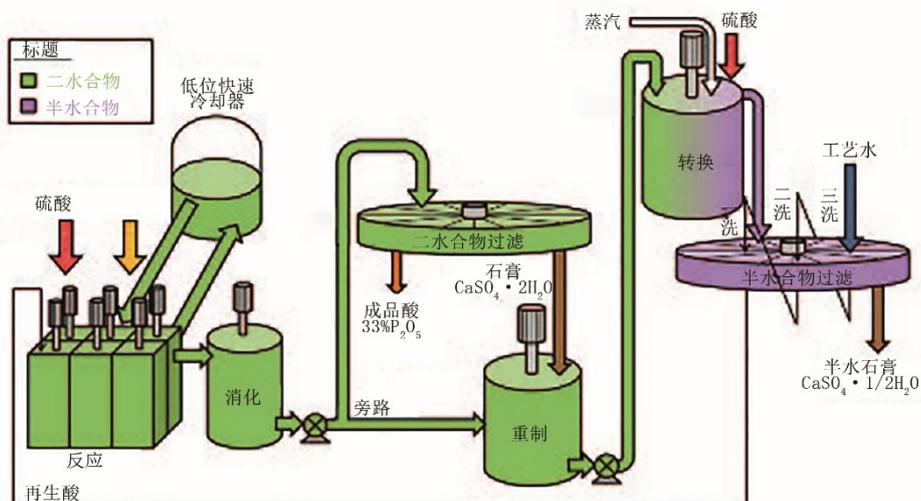


图 75. 中央普瑞昂工艺流程图（图片由普瑞昂集团提

创新的中央普瑞昂工艺流程图（图 75）总结了普瑞昂集团对其所面临的制约因素的反应。现在这已成为整个磷石膏工艺运行的基础。当面临创新或关闭的选择时，普瑞昂集团选择了创新。

中央普瑞昂磷石膏工艺的特点是：

- 高回收效率，减少了精矿消耗，产生了可销售的副产品，并具有一致的分析和性能
- 提高了过滤酸中的 P_2O_5 回收率，从而减少了蒸汽消耗并降低了能源需求
- 磷石膏能自干燥，因此减少了加工所需的燃油
- 能够适应各种磷矿石类型
- 环保的磷石膏只需临时存储，具有较高的社会和市场接受度
- 将磷石膏山堆作为废物处理场转变为更“环保”的磷石膏“采石场”（图 78）。由于在临时存储之前已将采石场中的磷石膏中和，因此杂质的浸出可以忽略不计
- 由于使用经过重新设计的 1987 年后版的中央普瑞昂工艺，因此产生了更纯的半水合物（HH）形式的磷石膏。这种纯度的提高部分是由于使用了卡乐（Kala）半岛¹⁴的磷矿石制备磷酸而导致的。这种磷矿石的放射性核素含量和重金属含量都比较低[2] [56] [57] [58]。

2.1.5 普瑞昂-可耐福制造工厂

普瑞昂-可耐福（KNAUF）制造工厂位于默兹河对岸，靠近恩吉斯镇（图 76）。图76 中还显示了现在充当磷石膏临时存储区的森林区域。



图 76. 位于恩吉斯附近的默兹河岸边的普瑞昂-可耐福制造工厂，森林区域为磷石膏临时存储区（图片由普瑞昂集团提供）

¹⁴ 参见下面的案例研究 3.1，其中 PhosAgro 在道路建设中使用的磷石膏也是用“湿法处理”卡乐半岛的磷矿石获得的。

半水合物型磷石膏是由膏普瑞昂产生的并从普瑞昂那里获得的，然后通过传送带（图 77）过河运到可耐福工厂的一个卸货点，然后在此进行临时存储。然后，在 28 天之内，无需进一步处理，半水合物型磷石膏自然地原位还原为二水合物（DH）状态，然后再由可耐福工厂进行处理（图 79），然后再河运至可耐福灰泥厂。

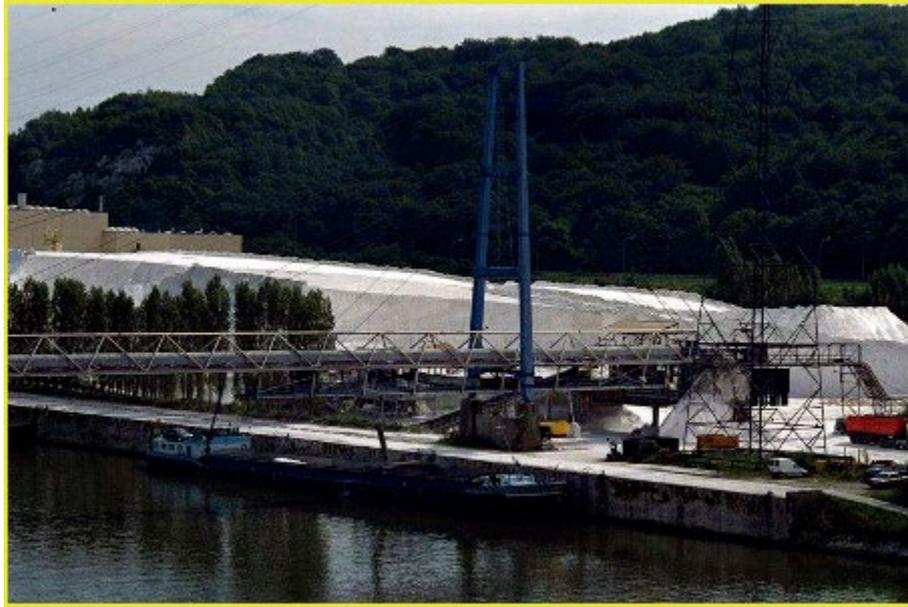


图 77. 横跨默兹河的半水合物型磷石膏输送机（图片由普瑞昂集团提供）



图 78. 磷石膏“采石场”（图片由普瑞昂集团提供）



图 79. 将二水合物型磷石膏变成硫酸钙，用于装饰灰泥的生产（图片由普瑞昂集团提供）

2018 年，约有 89.6% 的磷石膏产量达到了可耐福半水合物型磷石膏规格，而约 7.6% 用于农业，仅 2.8% 被转移到了临时存储区。

恩吉斯工厂的创新过程并不止于达到生产与使用之间的平衡点。它将继续寻求新的解决方案，例如英国 Carbon Cycle 公司开发的新型磷石膏净化技术“PureGyp”（图80）¹⁵。该 PureGyp 工艺可拆卸磷石膏晶体晶格，释放出其中的杂质以进行分离，从而产生了一种亮白的、畅销的磷石膏粉末。



图 80. 天然半水合物型磷石膏(左)以及经处理后变成的 PureGyp 磷石膏(右)(图片由 Carbon Cycle 提供)

2.1.6 合作 - 与当地监管机构的紧密合作

自 80 年代开始实施新的副产品磷石膏战略以来，普瑞昂集团已与当地监管机构和可耐福工厂建立长期的合作伙伴关系，并与一个独立的技术科学中心，即附近的列日大学，建立了非经常性的合作关系。这些都是成功的关键因素。

¹⁵ 请参考

<https://www.chemistryworld.com/news/carbon-cycles-gypsum-purification-process-cleans-up-radioactive-fertiliser-waste/401060.article>

2.1.6.1 监管机构

基于信任、相互尊重以及为保护和改善工厂运营环境，普瑞昂集团与当地监管机构建立了永久的紧密合作关系。这种关系部分反映在可通过专用网站获得的公共环境报告¹⁶。这样的报告显示了目前的状况以及为缓解这种负面经营影响状况所做的努力。

该战略允许普瑞昂集团以建设性的合作形式与监管服务部门接洽，从而可以开发与普瑞昂磷石膏所构成的环境风险相称的科学和循证解决方案。由地方当局和普瑞昂员工组成的工作小组定期举行季度会议，从而允许他们进行持续的审查和绩效监控。当地方当局于1987年禁止向默兹河排放磷石膏时，普瑞昂开始在陆地上存储磷石膏（图 81、图 82）。有关陆地上存储磷石膏的正式许可证于 2001 年颁发，最初的有效期到 2015 年结束。此后已续签至 2035 年。



图 81. 普瑞昂磷石膏的临时存储区域（无塑料垫底），位于 Bois d'Engihoul 地区的恩吉斯，2019 年 6 月。用卡车搬运磷石膏（图片由普瑞昂集团提供）



图 82. 磷石膏储存堆，2019 年 6 月（图片由普瑞昂集团提供）

¹⁶ 有关普瑞昂集团的环境报告，请参见普瑞昂集团的主要网站 (www.prayon.com) and the dedicated web page

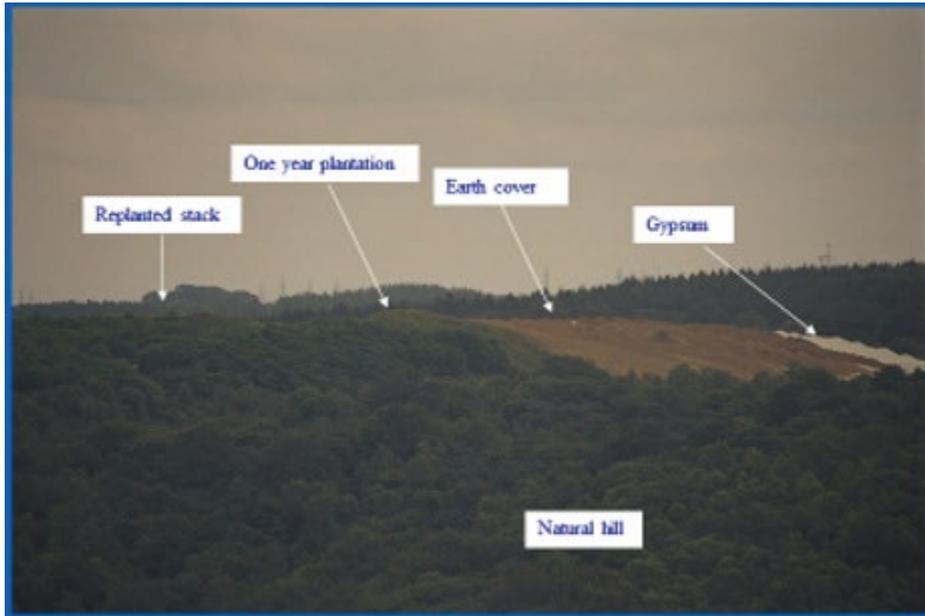


图 83. 磷石膏临时存储区与周围森林的逐步整合，位于 Bois d'Engihoul 地区（图片由普瑞昂集团提供）

如图 81-83 所示。磷石膏存储区被 Bois d'Engihoul 森林所包围，天然地丰富了森林的生物多样性。随着时间的推移，人们观察到存储在森林中的磷石膏可以创造出一种特定的人造土壤，而该人造土壤能够自然地有助于建立或重建野生植物物种和其他生物群，这些物种的大多数迄今从未在该地区看到过或存在过。在此基础上，完全独立地执行促进该地区生物多样性政策的监管机构，指示普瑞昂集团停止按照先前的监管要求在磷石膏表面覆盖一层土，而仅覆盖磷石膏堆的顶部 - 主要是为了减少任何不必要的视觉冲击 - 同时不覆盖磷石膏堆的侧面，以进一步鼓励生物多样性的物种群落的形成（图 84）。



图 84. 磷石膏临时存储堆[8] - 侧翼裸露，以吸引新的植物物种或重建已有的植物物种群落，从而促进生物多样性

2.1.6.2 环境影响：是否需要使用 HDPE 衬板？

恩吉斯堆场自 1987 年以来一直用于堆放磷石膏，这是因为那时地方当局更改了法规，禁止将磷石膏直接排放到默兹河。堆放磷石膏的正式许可证于 2001 年颁发，最初的有效期到 2015 年结束。与此同时，监管机构于 2008 年开始讨论可能把在磷石膏堆底部垫放高密度聚乙烯 (HDPE) 衬板¹⁷作为授予许可证续期的条件。由于没有明确的法规指南，衬板的使用仍然是热门话题。为了解决这个问题，普瑞昂集团与独立的水文地质专家合作，研究在什么情况下必须在磷石膏堆底部垫放 HDPE 衬板。

监管机构主要关注如何管理来自磷石膏山堆的地表水，包括：

- 监测孔隙水排放流
- 监测山堆下游的默兹河本身
- 建立收集和处理山堆水径流的系统
- 将装有大型植物床的水盆综合设施整合到水处理系统中，以进行生物修复
- 监测地下水
- 如果超出溶解物排放限值，则同意采取强制性干预程序
- 如果预防措施被证明无效，则同意强制性安装 HDPE 衬板。

有关监管要求关注将废旧磷石膏运到山堆上对环境的影响。普瑞昂集团被要求：

- 定期清理路面上洒出的磷石膏
- 覆盖运输中的所有材料
- 监测磷石膏卡车使用的道路的情况，包括普瑞昂集团为维护 and 加强道路本身而提供的强制性财政捐款。

自 1987 年以来，剩余的未售出的磷石膏被堆放在工厂附近的地上，用土覆盖，然后在上面种植树木以进行美化¹⁸（图 83）。但是最近，由于实证观察表明，未盖住磷石膏山堆顶部实际上能促进了生物多样性，所以监管机构已经改变了以上要求。周围生态系统中的磷石膏起着人造土的作用，扩大了此栖息地上动植物群落的范围（图 84）。对此的解释很简单：磷石膏是吸收并保留水的“海绵”。¹⁹比利时列日地区的当地农民都知道这一点，这就是为什么他们喜欢在他们的地里施加一些磷石膏作为土壤改良剂，从而减少灌溉需求。由于磷石膏的保水能力，通常只在默兹河地区的山谷中生长的植物才能生长到位置更高的磷石膏“土壤”里，从而为其他形式的野生动植物提供更多的食物和更高处的庇护处或栖息地。

2.1.6.3 可耐福

40 多年前，可耐福 (Knauf) 在普瑞昂工厂附近建立了灰泥生产厂，作为其与普瑞昂集团合作的运营中心。两家公司都基于信任和承诺开展了商业合作。两家公司的生产和管理团队定期开会讨论磷石膏的质量、生产数量和商业条款。

¹⁷ 这很好地说明了美国现行监管实践在多大程度上影响了美国以外的磷石膏管理，并且在 1989 年磷石膏规定下，必须使用 HDPE 内衬来堆叠磷石膏。

¹⁸ 在安曼 IFA 技术会议（2017 年 3 月）上报道的近期 Agrium [Nutrien] 经验表明，磷石膏人造土是柳树和杨树等快速生长树种的理想基质。可以在恩吉斯中测试此属性。

¹⁹ ICARDA 小组在叙利亚阿勒颇的工作独立地做发现了类似的发现，该小组用磷石膏改良的当地土壤的水效率提高了约 70%。

2.1.6.4 列日大学

当有关磷石膏废料堆放的监管框架最初考虑美国要求使用 HDPE 衬板以防止来自废堆的渗液向地面和地下水浸出的做法时，列日大学的一项独立研究建议不要这样做，因为存在“漏斗效应”风险，即将浓磷石膏渗液积累在一个有限的区域内，而不是将其扩散到生态系统中以便自然地稀释任何微量的渗液。当然，当不需要衬板并且减少土壤的覆盖深度或根本不需要覆盖时，所节省的资金和维护成本是非常可观。

与此同时，监管机构开始讨论可能把使用 HDPE 衬板作为授予许可证续期的条件。由于没有明确的法规指南，衬板的使用仍然是热门话题。为了解决这个问题，普瑞昂集团聘请了一家实力雄厚的咨询公司进行影响调查，请教列日大学的建议，并在提交许可申请之前，建立一个专门委员会来尽早与行政部门接洽。这项调查涵盖了粉尘排放、地表和地下水水流、水、运输造成的公共滋扰以及生物多样性。从不同的工作会议来看，似乎主要的焦点之一是对来自磷石膏山堆的地表水进行管理，因为它可能含有 P_2O_5 。由于磷石膏在堆放之前已被中和，因此重金属的浸出水平远低于法规限制，这是监管机构的优先要求。

考虑到专家们进行的风险分析以及列日大学的建议，监管机构普瑞昂授予了许可证，但要求普瑞昂采取以下维护和监控措施：

- 定期清理路面上洒出的磷石膏
- 覆盖运输中的所有材料
- 资助道路养护
- 监测孔隙水排放流
- 检测废堆周围许多井中的地下水水质
- 监测废堆下游的默兹河，以发现潜在的径流
- 建立一个用于收集和处理来自废堆的径流的系统
- 将装有大型植物床的水盆综合设施整合到水处理系统中，用于生物修复。

从一开始就商定，如果来自废堆的表面水中各种物质（硫酸盐、磷）的浓度超出了相应的地下水浓度限值，则必须采取强制性干预程序，如安装 HDPE 衬板。迄今为止，这种可能性从未发生过。

2.1.7 结论

自从普瑞昂技术总监 Tibaut Theys 在恩吉斯会议（2018 年 3 月）上发表演讲后，最引人注目的可能是最新动态了。普瑞昂技术经理 Thierry Garnavault（也是本案例的作者之一）报告说，普瑞昂集团在与监管机构打交道时采用的策略是以“建设性监管合作”的形式与他们互动的[59]，双方同意所采用的解决方案必须以科学和证据为基础，并与普瑞昂磷石膏所构成的环境风险水平相称（图 85）。



图 85. 位于可耐福的来自默兹河对岸普瑞昂工厂的半水合物型至二水合物型磷石膏储藏区（图片由普瑞昂集团提供）

根据这些原则，Thierry 报告说，在大学和水文地质专家的独立科学工作的支持下，许可证的续期不仅消除了对加装衬板的要求，而且这实际上提供了一个不使用衬板从而避免衬板可能带来的风险的环保案例。衬板可能会汇集潜在的有害渗液，因此把渗液的环境影响集中在一个小范围，反而增加了渗液在此范围内的环境影响。报告进一步建议，证据显示，裸露的磷石膏山堆能促进生物多样性。值得进一步鼓励的良好做法是让磷石膏山堆的顶部裸露而不是用土壤覆盖它们。

2.2 建筑材料：中国

2.2.1 背景：“定义未来”的中国磷石膏

IFA 成员应对磷石膏挑战的主要核心价值观，即引领、创新和合作伙，都明显体现在中国磷酸盐行业面临一项变革性的政策，即中国监管机构要求利用 100% 磷石膏，时所作出的努力中。在 1989 年，当时的主要磷酸生产国美国开始有效地利用磷石膏。在 2020 年，中国政府开始要求生产商根据市场对磷石膏的吸收水平来合理调整它们的磷酸生产。如果未达到磷石膏的 100% 利用，它们必须缩减磷酸的生产，直到达到或维持磷石膏的生产与消费之间的平衡点。

2.2.2 IFA 中国咨询小组

毫不奇怪，100% 利用磷石膏是 IFA 中国咨询小组在 2019 年 8 月 27 日在北京召开的会议上的主要话题。磷石膏不仅是此次会议的主要话题，也是随后在 8 月 28 日至 29 日召开的另一次大会的重点。在以协调员身份出席 IFA-中国咨询小组会议并致辞时，贵州磷化(集团)有限责任公司（由中国两家主要磷酸生产商开磷集团和翁福集团合并而成新实体）董事长何光亮先生表示，他相信 100% 利用的目标是可以实现的，但要实现这一目标需要五年过渡期。

像 IFA 主席埃辛·米特女士一样，何光亮先生在磷石膏领域的领导力和创新方面有着悠久而卓越的记录。这些涵盖了磷石膏的一系列应用，从建筑材料和建筑项目（“报告 1”的第 2.4 节和第 4.1-4.2 节）到改进的 Merseburg 工艺。该工艺可从磷石膏生产高质量的硫酸铵和碳酸钙，从而增加了大量的大量二氧化碳封存（“报告 1”的第 8 节）。每百万吨磷石膏产生的

二氧化碳封存量约为 170,000 吨。同样，在何先生及其团队的支持下，许多创新活动都是与独立的技术和科学中心（无论是在大学还是国家级研究机构）合作开发的。如此重大的研发投入将继续进行。但是，由于中国现在是世界上最大的磷酸和磷石膏生产国/消费国，因此不仅中国的磷酸盐行业应积极努力工作，而且全球磷酸盐行业都应与中国建立合作伙伴关系，以实现中国磷酸盐行业被要求达到的磷石膏生产和消费之间的平衡点。磷石膏问题是存在的，但不是我们第一次遇到。正如“报 2”中的普瑞昂案例研究所述的，普瑞昂集团在 40 年前也面临同样的问题，但经过努力后取得了成功。因此，再合适不过的是，退休的普瑞昂集团董事长伊夫·卡普拉拉（Yves Caprara）先生应被邀请参加 IFA-中国咨询小组在 2019 年 8 月召开的北京会议。

2.2.3 主题演讲：定义未来

本次会议的主题演讲是由中国石油和化学工业联合会会长李寿生先生发表的。他也是《定义未来》（2018 年）[60]的主要作者。此书由中国石油和化学工业联合会（CPCIF）和麦肯锡中国联合出版的。中国化肥工业协会隶属于中国石油和化学工业联合会。

磷石膏在《定义未来》中具有突出的地位，因为中国的磷石膏产量很大。中国的磷石膏年产量（2015 年）约为 8000 万吨，截至 2015 年，中国的磷石膏使用量约为 2650 万吨，相当于产量的 33.3%。从数量上肯定可以断言中国处于“世界领先水平”⁵²。在 IFA-中国咨询小组会议上，对这些数字进行了略微修改，因为通过优化磷酸工厂产能和关闭小型磷酸工厂，到 2018 年中国的磷石膏年产量已下降到约 7700 万吨，而利用率上升到 39.7%，即年利用 3080 万吨。据估计，2015 年中国的遗留磷石膏总量为 3 亿吨左右。假设遗留磷石膏继续增加，到 2018 年中国的遗留磷石膏总量将再增加 1.386 亿吨。中国的遗留磷石膏总量现估计为 4.386 亿吨。

52. 《定义未来》第 118 页。

53. 《定义未来》第 126 页。

54. 引用《定义未来》第 127 页。

55. 《定义未来》第 131 页。

《定义未来》[60]认识到，对磷石膏的长期管理和“综合利用”尚无商定的解决方案，这是使整个行业的未来发展面临风险的“瓶颈”。它进一步地指出，为磷石膏寻找可持续的环境经济平衡点不仅对中国化肥行业来说是必不可少的，而且是中国未来评估和利用其所有二次资源的方法的试金石，无论它们是被采掘业还是加工业生产的。

正是出于同样的动机，国际原子能机构开发了 SR78 [2]。该研究还认识到，作为还自然发生的放射性物质的工业副产品，磷石膏的任何解决方案都将放射性物质转移到其他大宗残留物中，例如铝土矿或钛加工所产生的赤泥，或铁、铜和锌冶炼所产生的炉渣。将“废物”移出“负债”列并移入“资源”资产列的过程与“可持续发展目标 12”的目标（尤其是废物减量或增值）非常吻合。它为推行诸如零废物排放（100%利用磷石膏而不进行堆放）、绿色化学、综合利用（在“报告 1”的第 2.4 节中称为“综合提取”）、工业 4.0 和循环经济等之类的绿色经济政策提供了商业案例，

实施 100%磷石膏利用政策的核心是有可靠的证据，来证明该材料是安全的且有益于使用，并遵守国际商定的标准（如果有）。李寿生会长评论说：“企业缺乏全面的指导方针和标准。”“报告 2”旨在启动为磷石膏的利用制定此类标准的过程。随着标准和质量协议的通过，将有机会对磷石膏进行估值和利用。

正如李寿生会长所言，创新、合作和引领是推动中国工业共同努力以实现习近平主席提出的“加快生态文明体系的改革，建设美丽的中国”要求的核心价值观⁵⁴。然后，为响应习近平主席的号召，李会长提出“加速磷石膏的综合利用”是实施工业生态系统改革的关键方面。⁵⁵

2.2.4 贵州

作为制定磷石膏价格综合利用计划的早期主要生产商之一，翁福集团和开磷集团（请参考“报告 1”第 4 节和第 2.4.2 和 8.2 小节）现已合并为贵州磷化(集团)有限责任公司，已利用磷石膏开发如下所示的一系列装饰和结构建筑材料，包括陶瓷、地砖、装饰性砌面（图 86）和建筑用砖块（图 87）。截至本报告发布时，尚不清楚中国的磷酸行业如何能够满足 100%利用磷石膏的要求。IFA 致力于协助中国的磷肥生产商实现这一重要目标，因为这既能造福中国，也将为世界其他地区的 IFA 成员企业提供可供参考的 100%利用磷石膏的途径。



图 86. 2020 年的产品范围 – 利用磷石膏制备的陶瓷产品 – 地砖、瓷砖和面板（图片由国际肥料协会秘书长 Charlotte Hebebrand 女士提供）



图 87. 利用磷石膏制备的建筑用砖块（图片由国际肥料协会秘书长 Charlotte Hebebrand 女士提供）

3. 案例研究：道路建设

在国际原子能机构 SR78 的第 10.5.3 节 [2]和“报告 1”的第 5 节[1]，对磷石膏单独和与其他工业辅助资源（例如粉煤灰和赤泥）一起作为路基材料的试点使用的悠久历史进行概述。本节中的案例研究标志着磷石膏用作路基材料的新时代的开始。基于节约原生资源和在可能的情况下使用二次资源替代的双重原则，它们将磷石膏应用技术（包括重要新技术和被忽略的科学技术）与驱动磷石膏在道路上应用的主要新市场力量（即向循环经济过渡）结合在一起。

3.1 在道路建造中使用半水合型磷石膏的创新：俄罗斯

作者们

B.V. Levin (PhosAgro 公司), **A.V. Kochetkov** (ROSDORNII FAU), **V.V. Talalay** (TSSA(A) MSK 有限公司), **S.A. Korotkovsky** (萨拉托夫州立大学), **A.V. Shibnev** (阿帕蒂股份有限公司巴拉科沃分公司), **M.V. Kuznetsov** (俄罗斯肥料生产商协会)²⁰

²⁰ 该案例研究最初以俄文出版，如下：Б. В. Левин, А. В. Кочетков, В. В. Талалай, С. А. Коротковский, А. В. Шибнев, М. В. Кузнецов. Дорожные инновации с применением фосфогипса. Мир дорог, 2019, 124, 110 – 113. (B.V. Levin, A.V. Kochetkov, V.V. Talalay, S.A. Korotkovsky, A.V. Shibnev, M.V. Kuznetsov. Road innovation using phosphogypsum. World of Roads, 2019, 124, 110 – 113).)。已对其进行了修改和编辑，以包含在本报告中。

3.1.1 背景

在过去的十年中，俄罗斯在道路建设中越来越重视使用基于副产品和二次资源的创新材料 [61] [62]。该案例研究阐明了俄罗斯在 2008-2019 年在路基中使用半水合型磷石膏（HHPG）进行道路建设的成功经验。在此期间，随着节约原生资源、减少废物产生和向循环经济转变等因素的重要性日益提高，为此目的使用半水合物型磷石膏的兴趣不断增强；此案例研究也详细总结了 PhosAgro 公司及其合作伙伴自 2015 年以来实施的科学研究和技术开发项目。

他们的研发工作成功的一个标志是，用于道路的磷石膏被公认为“具有潜力的材料”。巧合的是，它在“2018 年俄罗斯之路”竞赛中被誉为“前沿发展”，在此次比赛中，由阿帕蒂股份有限公司巴拉科沃分公司（Balakovo Branch of Apatit JSC）生产的路基磷石膏（RBPG）获得“年度创新奖”。正式技术规范（修订版 1）于 2018 年获得俄罗斯联邦公路局的批准，为期三年。根据俄罗斯联邦的国家标准 GOST 52398-2005 的规定，该规范授权在第 1 类至第 5 类道路的建设与维修中可使用道路磷石膏。根据国家标准 GOST 52398-2005，公共道路分为五类，从高等级公路和高速公路（第 1 类，车道宽度 3.75 m，至少 4 条车道）到普通道路（第 2 - 5 类，每条车道的数量从 4 减少到 1）。

3.1.2 道路建设中使用磷石膏的目的

在道路建设中使用磷石膏等二次资源旨在满足以下主要目标：

1. 在不需要临时维修的情况下，使通用道路的使用寿命达到至少 12 年
2. 利用使用副产品材料的现代建筑技术，将执行此类建筑项目的资金成本降低 20% 至 30%
3. 通过使用回收的二次资源所生产的现代公路建筑材料，来减少使用有限的原生资源作为建筑材料。

3.1.3 用于筑路的磷石膏的独特性能

本案例研究考察了作为建筑材料的路基磷石膏（RBPG）。该材料具有独一无二的技术和消费特性。作为新型路基替代材料，RBPG 尚未赢得筑路承包商的普遍欢迎。但是，如此处所示，与传统筑路材料（例如沙子和砾石）相比，它具有相当大的优势。

3.1.3.1 降低土层承重压力

根据已有的研究结果[63]，用 RBPG 建造的路段的土层承重压力比使用传统颗粒材料层建造的路段的土层承重压力几乎低三倍。如同一块完整的轻质现浇板一样，一层 RBPG 可将其载荷分布在较大的土层表面积上，从而减少了土层中的点应力（图 88）。这样降低了土层上的比压，使道路不太可能表现出局部塑性变形，因此可以在更长的时间内保持道路的水平表面 [63]。

将道路结构和设计的统一原理应用于 RBPG 板的工程特性，可以精确计算道路可能的弯曲和拉伸行为。这确保了路面层的最佳数量和厚度、更高效的工艺操作、更短的施工时间以及需要更少的工程机械。将道路结构统一原理与 RBPG 一起应用，还可以在设计和施工过程中考

虑到各种自然和气候因素，从而完全消除了一些负面影响，并降低了其他负面因素的影响程度。

3.1.3.2 高强度

与常规粒状材料层相比，RBPG 层的更高强度特性允许建造具有比常规多层结构更高承载强度的双层道路结构。这有效地使道路的允许轴重极限增倍，同时可显著减小道路结构的总厚度。结果是，对昂贵的经过质量认证的矿物骨料(例如砾石和沙子)的需求减少了约 45-75%。图 88 和 89 给出传统的道路结构和使用 RBPG 建造的道路结构在材料数量、类型和承载能力等方面之间的比较。

3.1.4 节约原生资源

使用 RBPG 作为人为的二次资源可减少原生天然原材料的使用。这不仅可减少目前的道路建设成本，而且还可大大降低了上游资本成本，例如勘探和开发原生原材料的新矿藏的成本、加工原生原材料或把无用碎石作为残渣/尾渣丢弃时相关废物的管理和处置成本，或者矿山和采石场被开采完后进行恢复或回填的成本。

同时，简化了道路建设的基本技术，例如道路的自然路基规范。以其高强度的晶格键，RBPG 可以形成现浇的路基，从而导致了道路交通所引起的动态和静态载荷的均匀分布。这样可以最大程度地减少纵向和横向应力，这些应力会导致内部和外部裂纹的发展以及路基和路表面的退化。因此，RBPG 可使道路结构更加耐用。

3.1.5 比较性能和弹性

使用 RBPG 材料建造的现场浇筑路基，既可使道路在季节性变化的温度循环中具有弹性，又可使路基具有抵抗冻融循环的结构，尤其是在路表面出现损坏的情况下。这是由于在路基中不存在吸水孔隙，而且消除了路基中材料的破碎，这与使用砾石建造的路基不同。同样，当某些断面下面的土层塌陷时，也看不到局部变形，也不会造成路面材料的破坏。

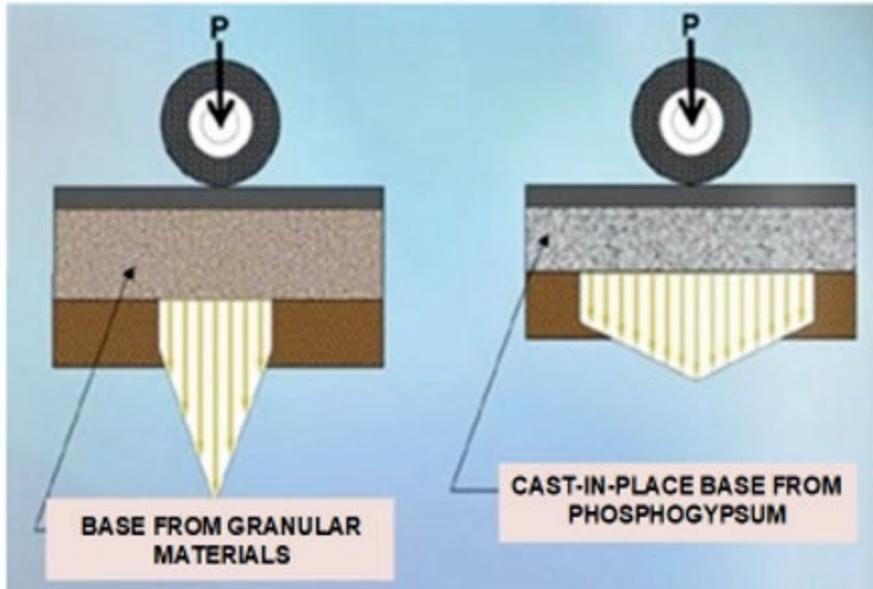


图 88. 使用砾石（左）和磷石膏（右）建造的路基对底部土层的比较应力

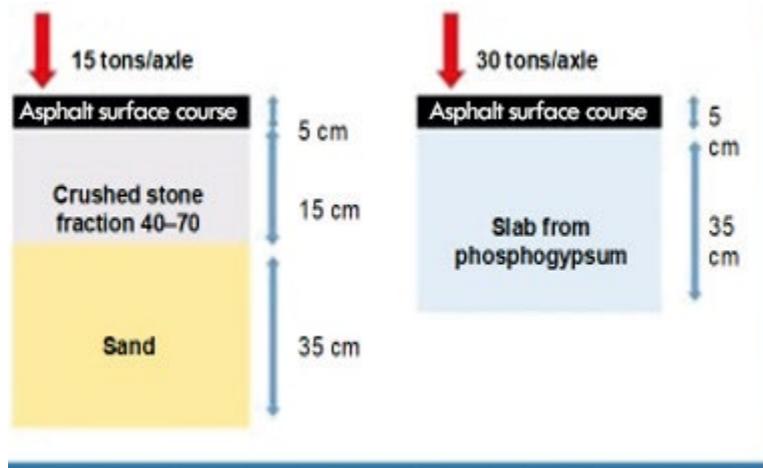


图 89. 对比承载性能和基层深度 - 常规骨料（左）和压实的 RBPG（右）

通常，晶体结构是最坚固、最耐水和最耐用的，特别是在高密度和没有大孔的情况下，因为大孔可能会降低路基对冻融循环的结构阻力[64]。这样的结构是在半水合物重结晶为二水合物的过程中由 RBPG 形成的，从而将水分锁定在晶体结构中。为了创建可以承受动态水平和垂直应力的坚固路基，有必要创建一个载荷和应力分布系统（如使用碎石和砾石所建造的路基）或一个能很好应对力量和压力的接近均质的基体。在使用 RBPG 建造的路基中，这是通过形成牢固的空间矩阵的晶体键实现的。行驶中的车辆所产生的静态和动态冲击会降低结晶键的强度，从而避免了基体内部的楔压压力和裂缝的形成，这与使用原生自然资源（沙、砾石）建造的路基中所形成的多分散系统不同。在使用沙和砾石建造的路基中，应力会在相界面产生，并通过裂缝、坑洼和碎屑反映到上层道路结构上。在使用 RBPG 建造的路基中，即使经过长时间的道路运行，也不会观察到这种现象。

3.1.6 研发和试点建设过程中的投资

2015 年，PhosAgro 公司高级管理层决定进行一项科学研究计划，并结合在道路建设中使用半水合物型磷石膏（HHPG）进行试点的实际应用。开发了一种基于磷石膏的简化施工工艺，并尝试使用 RBPG 在低交通密度的城市居民区中为通用道路和街道建造路基的底层。新的道路建造过程包括以下操作，按顺序地在下面的图 90-99 中示出：

- 准备工作，包括用平地机平整地基，用以铺设 RBPG 覆盖层（图 90）
- 运送和卸载 RBPG（图 91）
- 用推土机散布物料（图 92）
- 用平地机平整铺设的路面（图 93）
- 压路机压实路面（图 94）
- 铺展并压实砾石层（20-40），层厚 5 - 8 cm（图 95）。

地基被建仅 24 小时后的低密度道路（第 4-5 类）的情况显示在图 96 中。



图 90.准备用于铺设 RBPG 的地基
（图片由 PhosAgro 公司提供）



图 91. 运送和卸载 RBPG（图片由 PhosAgro 公司提供）



图 92.用推土机散播 RBPG（图片由 PhosAgro 公司提供）



图 93.用平地机平整道路底基（图片由 PhosAgro 公司提供）



图 94.用轻型压路机压实 RBPG 层（图片由 PhosAgro 公司提供）



图 95.铺展和压实砾石层
（图片由 PhosAgro 公司提供）



图 96.地基建造 24 小时后的道路状况（图片由 PhosAgro 公司提供）

3.1.7 合规和标准

使用半水合物型磷石膏建造道路的关键因素是要符合法规要求和性能标准。例如，必须在碾压 RBPG 之后直接执行“铺展和压实碎石层（20-40），层厚 5 - 8 cm”操作。适用标准是用于路面结构建造的“STO 24406528-01-2018 Road Phosphogypsum”标准²¹。技术规格（修订版 1）于 2018 年获得联邦道路管理局的批准，有效期为三年。该标准授权在第 1-5 类道路的建设和维修中使用“道路磷石膏”（请参见表 16）。同时，俄罗斯联邦建设和住房/公共基础设施部已修改并批准了该组织的标准，特别授权在城市环境中使用 RBPG 进行道路建设。这为维修城市道路开辟了一个重要的新机遇，而无需首先重建路基并更换退化或失效的砾石层。可以将 15 - 25 厘米厚的 RBPG 层铺于失效或性能欠佳的路基部分上，然后在 RBPG 层上覆盖最终的沥青混凝土路面层。

在海关编码为 TK-465 的“建筑”部分中，“道路磷石膏”（“ROAD PHOSPHOGYPSUM”）现已正式注册为经批准的道路建筑材料。同样重要的是，俄罗斯联邦运输部有关预算定额和费率第 423 号法令于 2018 年 1 月 1 日生效。它首次包括适用于使用 RBPG 的建设项目的规格和费率。此后，第 423 号法令的适用范围已被扩大并进一步完善，以涵盖俄罗斯联邦的所有地区。

²¹ 有关俄罗斯标准“用于公路路面建造的磷石膏 - 技术条件”（修正版 №1），请参 <http://www.rosavtodor.ru/storage/app/media/uploaded-files/sto-24406528-01-2018-tssa.pdf>

3.1.8 试点磷石膏道路工程的清单

截至“报告 2”发布之日，在俄罗斯使用 RBPG 建成的道路（包括试点路段）的总路面面积已达约 180,000 m²，记录的使用寿命为 2 至 11 年（请参考表 15）。

2017 年，在 Povolzhpravtodor 联邦州立机构的批准下，按照必要的标准施工流程图，在 Syzran - Saratov 联邦高速公路的第 83 公里处，建造了面积约 2500 平方米的路段。图 97 和 98 展示了从交叉路口两个角度看的“位于萨拉托夫（Saratov）州 Khvalynsky 区的 Syzran - Saratov - Volgograd 联邦高速公路的第 83 公里处的重型车辆的技术出口坡道”的视图。该路的最初道路底基是用湿白垩铺的。

同时，设计了该交叉路口的 3D 模型，其中包括一段 500m 的高速公路。该路段在两个方向上都从与其相邻的交叉路口延伸出来（图 99）。该模型有助于建立、集成和监控出口坡道和交叉路口的性能。

表 15. 建成路段的清单

路段名称	面积 (m ²)	建设年份
从 Bykov Otrog 村到生活垃圾场的公路	900	2008
通往巴拉科沃谢韦尔上市公司轧制段工厂的公路	59,000	2013
科梅日卡村街道	9,000	2015
玛雅加村公路	2,000	2016
阿帕蒂股份有限公司巴拉科沃分公司内的试点和运营路段	20,000	2008-2019
Balakovo - Ershov 州际公路	80,000	2014
Syzran-Saratov 联邦公路第 83 公里处 - 重型车辆出口匝道	2,500	2017
总计：运营 2 至 11 年的公路总面积	180,000m ²	

从 2012 年至 2019 年，使用 RBPG 在萨拉托夫（Saratov）州建造了具有区域重要性的公路（第 2-5 类）：

- 一条连接工业园区和萨拉托夫州巴拉科沃（Balakovo）区 Bykov Otrog 村的道路已建成，并已于 2014 年投入使用（图 100）
- 使用道路磷石膏在萨拉托夫州巴拉科沃区科梅日卡（Kormezhka,）村建造的街道。从司机角度看街道的外观如图 101 所示。
- 2012 年在阿帕蒂股份有限公司巴拉科沃分公司的领地内建造的通往当地氨厂的道路，如图 102 所示。该道路不需要排水层。道路底基直接建在整平的低洼里

3.1.9 安全与环境

对于使用阿帕蒂股份有限公司巴拉科沃分公司生产的 RBPG 建成的道路，各专业组织已使用仪器对这些道路进行了必要测试，都确认这些道路完全符合的道路建设、环境、安全和性能标准。除了具有技术和经济优势外，RBPG 还具有独特的物理和化学特性，因此它不仅是环

境安全的，而且还是一种绿色材料。

从放射学和环境角度，国际原子能机构安全报告 78 [2]确认了使用卡乐（Kala）半岛矿床中的 Khibini 磷灰石精矿与硫酸反应而获得的副产品磷石膏的安全性。因此，在全球商业化生产的所有磷石膏中，Khibini 磷灰石及其生成的 RBPG 的相对放射性和重金属含量比较低。所以 Khibini 磷石膏可以不受任何限制地用于任何应用中，例如要求磷石膏用量达 10-15 吨/公顷或更高的农业、道路建设和工业加工。如果监管机构选择遵循国际原子能机构推荐的“分级方法”原则，则甚至可以将此类磷石膏安全地视为无需监管的产品。

IFA 的报告《磷石膏：可持续管理和使用》[1] 广泛地概述了研究和开发磷石膏应用的历史，包括试点将磷石膏用于机动车道路的建设。



图 97. 已建好路段的外观（图片由 PhosAgro 公司提供）



图 98. 相同路段的反向角度图（图片由 PhosAgro 公司提供）



图 99. 在施工之前开发的已建成道路的 3D 模型（图片由 PhosAgro 公司提供）



图 100. 连接工业园区和萨拉托夫州巴拉科沃区 Bykov Otrog 村的一段道路（图片由 PhosAgro 公司提供）



图 101.使用 RBPG 建造的 Kormezhka 村的街道外观（道路交通视图）（图片由 PhosAgro 公司提供）



图 102.在阿帕蒂股份有限公司巴拉科沃分公司的领地内修建的一段道路（图片由 PhosAgro 公司提供）

所有这些工作的累积效果是，RBPG 被公认为“具有潜力的材料”，因此在“俄罗斯之路 - 2018 竞赛”中它被视为“前沿发展”。阿帕蒂股份有限公司巴拉科沃分公司生产的 RBPG 在该比赛中获得“年度创新奖”。IFA 的“报告 1” [1]描述了如何大量处理和使用磷石膏的最佳实践。根据俄罗斯的经验，特别是根据使用巴拉科沃磷石膏进行道路建设的参考案例，纯磷石膏可被视为一种“有前途的材料”，具有广泛的应用前景。

假定严格遵守 RBPG 的应用方法，则可以通过用二次资源替代原生天然原料而获得的经济可行性，而不会降低其运行性能。同样，如果正确使用，RBPG 不会对与机动车道路相邻的操作区产生任何负面影响。通过对使用磷石膏建造的萨拉托夫地区机动车道路进行的多年观察和仪器测试，这些道路的性能数据已得到了证实。这些结果与对佛罗里达州帕里什路（Parrish Road）的用磷石膏建造的试点道路的长期研究结果相一致。有关后者的详情，请参考 IFA “报告 1” 的第 5 节。

3.1.10 成本效益分析

道路行业的专业预算估算专家基于这些性能数据进行了研究，得到了在道路建造中使用新型磷石膏材料的经济可行性的计算结果。这些研究的结果显示在下面的表 16 中。表 16 列出了 RBPG 与常规建筑材料的比较经济可行性。从中可以清楚地看到，所开发的建造技术从根本上提高了一个数量级的操作性能，而不仅仅是几个百分点（表 17）。

3.1.11 总结

总之，RBPG 的主要优点是：

- 拉伸强度超过要求的基准 10 倍

- 弹性模量超过要求的基准 2 倍
- 在修建公路时，不需要排沙层
- 在潮湿的地形上保持有效的性能
- 不容易在冬季（冻融）期间隆起
- 汽车路基的保修期不少于 12 年
- 对环境无负面影响。

未来，原生建筑资源（尤其是碎石）的供应预计会受到限制。从物理（运营）和财务（投资回报）的角度来看，RBPG 是一种用于机动车道路路基建设的独特、创新的材料，有助于实现国家“安全、高质量的机动车道路”的目标。它具有实物和价格的可及性、操作的简单性和安全性、道路的高运行性能以及环境安全。

表 16. 使用 RBPG 的经济可行性

道路类别	使用 RBPG 建设的道路的单位成本（卢布/1,000 平方米）	与传统材料相比，RBPG 所节省的成本（%）
联邦公路 1-2 等级	1,634,000	21%
联邦公路 3 等级	1,434,000	27%
乡村道路 4-5 等级，资本类型	926,000	35%
乡村道路 4-5 等级，过渡类型	550,000	100%

表 17. 使用道路磷石膏建设的公路在运行性能上的改善

指标	道路实验室的测试	STO 24406528-01-2018	SP 243.1326000.2015
抗压强度，MPa	15.4	4.0 - 10.0	2.0 - 6.0
弯曲抗拉强度 MPa	4.4	1.0 - 4.0	0.2 - 1.0
耐冻性	F 25	-	F 15

3.2 在道路建设中使用磷石膏的创新方法：摩洛哥

作者们

OCP 集团、摩洛哥哈萨尼亚公共工程学院、巴黎技术大学桥梁工程学院、摩洛哥国家道路研究中心和法国主要道路项目/ COLAS)

3.2.1 经济背景

在过去的 20 年中，摩洛哥根据重要的战略部门发展目标，在重大基础设施项目上进行了大量投资，以刺激该国的经济发展。这导致世界主要交通中心连通了该国主要港口（坦吉尔地中海港、纳多尔西地中海港、肯尼特拉大西洋港、约尔夫-拉法尔港、萨菲港）、机场、火车站（丹吉尔/卡萨布兰卡高速线）和道路网络（图 103）。从 1956 年至今，摩洛哥已铺设的公路网络已从 10,348 公里增加到 43,318 公里。所有这些基础设施项目都需要大量的建筑材料，特别是沙子和骨料。

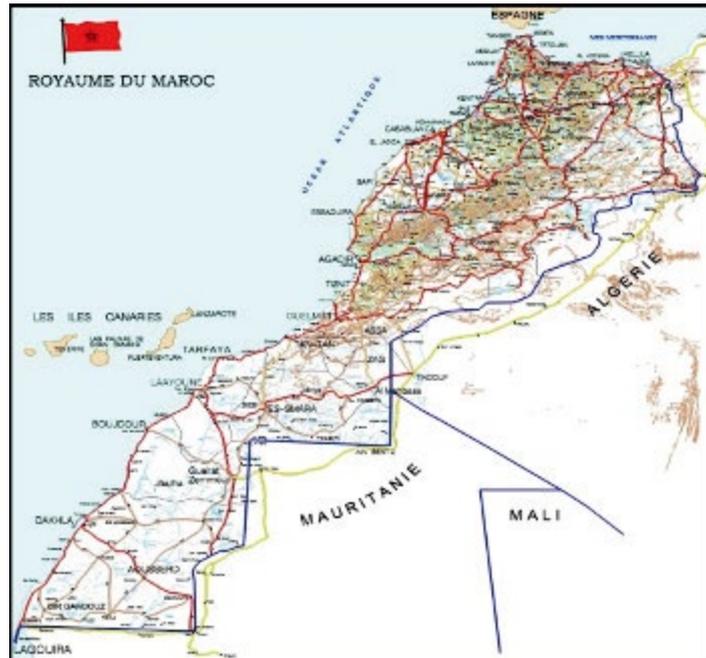


图 103. 摩洛哥公路地图，包括高速公路

3.2.2 对建筑材料需求的增加

公共工程和建筑部门是沙子和骨料的主要消费者，广泛用于建造住宅、桥梁、水坝、道路、铁路和堤坝。建设一座典型的中型住宅需要 200 吨沙子，而建设一座医院需要 3,000 吨沙子，建设高速公路需要约 30,000 吨沙子/每车道/公里²²。

此外，根据摩洛哥高级规划委员会的估计，摩洛哥日益迅速的城市化进程（1960 年为 30%，2018 年为 62%，预计 2050 年为 73.6%）大大增加了对建筑材料（如沙子和骨料等原生建筑材料资源）的需求，

3.2.3 摩洛哥对环境的承诺

2014 年，继 2008 年通过有关环境影响研究的法律之后，摩洛哥王国通过了《国家环境与可持续发展宪章》。该宪章的主要目的是“加强措施，以保护自然资源和环境、生物多样性和文化禀赋，预防和减少污染和滋扰”。摩洛哥的各个行业正在执行该宪章。

3.2.4 不断发展的法规背景

摩洛哥拥有 2,000 个公认的采石场，年总产量约为 100 万立方米。2015 年（27-13）⁶⁵通过了用于规范这些材料贸易的新法律，该法律于 2017 年 11 月生效。该法律规定了实现控制采石场产品目标的技术规格，并确定了采石场的启用和运营程序。该法律还规定了特定采石场

²² <http://www.planete-tp.com/granulats-chiffres-cles-a763.html>

的寿命终止要求，包括采石场停止运行后对场址退役和补救措施的保证。根据法律，采石场经营者被强制性要求就采石场的环境状况和影响提交年度报告。

同时，政府于 2015 年 7 月通过了涉及沿海地区的法律。该法律为沿海地区的保护和可持续管理提供了规则，同时对资源开采（尤其是沙石和骨料开采）实行了限制，对其价格产生了相应的影响。

面对传统建筑资源的减少和需求的显著增加，有必要寻找替代资源来满足需求，特别是从二次资源的库存和供应，尤其是从那些对环境影响较小的二次资源，来寻找替代资源来满足日益增长的需求。

这发生在摩洛哥开始向循环经济过渡之时。因此，把以前采掘业中忽略或未充分利用的副产品整合到建筑生态系统中的做法，可以为国家带来经济和环境效益，同时也为子孙后代保留宝贵的原生资源。联合国的“可持续发展目标 12”（负责任的生产和消费）设想了这两个目标。OCP 集团也看到了与 2018 年启动的国家“蓝色经济”倡议的潜在协同作用，以及保护和改善沿海和近海海洋环境在经济中的作用。

3.2.5 OCP 集团在其萨菲（SAFI）工厂里进行的试点项目 - “在道路建造中使用磷石膏”

多年来，OCP 集团实施了一项具有强烈而积极的社会和环境责任的政策²³，并承诺将可持续发展²⁴作为其工业发展的基础。这导致了重大的投资计划，例如：（i）合理和优化地利用水资源，使用非常规水（海水淡化和经处理的废水再利用）；（ii）一项创新的能源计划，以减少碳足迹；（iii）保证对采矿场地进行生态负责的恢复的经营方法，等等。

自 2018 年初以来，环境保护和资源节约一直处于 OCP 集团循环经济计划的核心地位，导致该集团有意识地决定建立新的工业生态系统，以使磷肥生产的副产物得以被利用。

3.2.5.1 独特的合作和稳健的方法论

在 OCP 集团的工业园区中，从磷酸盐生产磷酸的过程中产生了副产品磷石膏²⁵。同时，在其矿山和化学加工设施中，有大量的磷矿尾矿可供回收和再利用。磷石膏和尾矿都可以单独或与其他材料一起成为技术上可行且经济上有吸引力的建筑材料，特别是用于道路建设。

OCP 集团现对磷石膏和尾矿的使用采用这种观点。它们既容易获得又廉价，但也可以被归类

²³ 请参考 <https://www.ocpgroup.ma/en/our-strategy/our-environmental-and-societal-strategy>

²⁴ 请参考《2018年可持续发展报告》，
<https://www.ocpgroup.ma/sites/default/files/2019-07/Sustainability%20report%202018%20OCP.pdf>

²⁵ 有关将磷石膏副产品的分类，请参考国际原子能机构的《第78号安全报告2013。》
https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1582_web.pdf

为“生态材料”。这有望填补一些快速增长的原生原材料供应的缺口。同时，将这种资源进行有益的使用，在实践中展示了一种在传统材料流的线性模型中关闭资源损失点的示例性方法，那就是用循环资源流代替传统原生资源。除非严格基于可靠的科学和技术方法，否则无法改变这方面的传统观点和操作做法。

为了实现这一转变，OCP 集团于 2013 年初启动了其副产品资源利用计划的第一阶段。这导致了 OCP 与一系列受尊重的机构之间建立了合作，以实现创新的道路建设。基于循环经济和资源节约原则，OCP 计划与这些机构合作在其萨菲工厂用磷石膏试点建造一条道路。现在，这种合作利用了 OCP、摩洛哥哈萨尼亚公共工程学院、巴黎技术大学桥梁工程学院、摩洛哥国家道路研究中心（摩洛哥设备、运输、物流和水利部的一个研究机构）以及道路建设专家法国主要道路项目/ COLAS 的综合专业知识和资源。在人们努力实现联合国可持续发展目标的背景下，这种形式的合作可以很好地诠释“可持续发展目标17”，那就是合作。在萨菲启动的磷石膏道路项目的作用和职责分配如下（表 18）：

表 18. 道路项目的角色和职责

	EHTP	ENPC	CNER	GTR
有关潜在用途的当前知识状态	参与者	牵头人/负责人		
磷石膏及其相关副产物的理化特性	牵头人/负责人	参与者	参与者	参与者
基于磷石膏的筑路材料的配方、力学和工程特性	参与者	参与者	参与者	牵头人/负责人
选定配方的环境影响评估/潜在污染	牵头人/负责人	参与者	参与者	参与者
使用监控工具建设试验道路（测试路段）	参与者	参与者	参与者	牵头人/负责人
现场监控试点路段的机械性能	共同牵头人/负责人	参与者	共同牵头人/负责人	
现场监测试点路段的环境绩效	牵头人/负责人	参与者	参与者	参与者
技术经济生命周期分析和可能的性能限制评估		牵头人/负责人		参与者

3.2.5.2 有关潜在用途的最新知识状态

详尽的文献综述可以更好地评估磷石膏作为道路施工材料的潜在用途，无论是“按原样”使用还是以某种方式进行预处理（例如中和），还可以评估此类用途的限制和局限性。此初步步骤是必不可少的第一步，使团队能够更好地确定目标并优化项目的后续阶段。

3.2.5.3 磷石膏及其相关联产品的理化特性

接下来，进行了广泛的测试，以获得在萨菲生产的磷石膏类型的详细物理化学特性，包括粒度、密度、在水中的行为、化学成分、pH 值和痕量元素含量。理化性能测试的结果列于表 19 中：

表 19. 磷石膏（萨菲生产）的主要成分和微量元素

Al ₂ O ₃	0.32%
CaO	30.34%
Fe ₂ O ₃	0.02%
K ₂ O	0.01%
MgO	0.19%
SiO ₂	1.69%
Na ₂ O	0.67%
SO ₃	40.71%
Density	2.59 g/cm ³

还表征了用于处理/或与磷石膏（水泥、特殊粘合剂、粉煤灰）一起用于处理或与磷石膏（碎砂、矿山尾矿）²⁶混合使用的其他材料和副产品。

3.2.5.4 基于磷石膏的道路建筑材料的配方、力学和工程特性

根据在道路建筑中使用此类材料所需的规格, 在实验室中测试了许多用水泥处理过的基于磷石膏的配方, 不论是否加入各种添加剂。根据这些配方在短期和中期的机械和工程性能, 从中选择看起来适合在实际道路施工条件下使用的四个配方。表 20 列出了根据法国国家标准（NF）测试的响应值（参考了相应的摩洛哥国家标准）:

表 20. 性能数值和标准 - 基于磷石膏的道路材料实验室测试

指标	测试类型	标准
ρ d	使用 Proctor 压实试验的最佳密度	NF P 94-093
IBI	即时承载指数（适用于即时运输的指标 - 施工后立即进行渗透测试）	NF P 94 078
CBR	加利福尼亚承载比（浸泡 4 天和载重增加后的渗透测试）	NF P 94 078
SV	膨胀体积（浸泡 4 天和载重增加后）	NF P 94 078
DCS	径向抗压强度（分别在 7 天、28 天和 90 天）	NF P 98-232-3
E	杨氏模量（分别在 7 天、28 天和 90 天）	NF P 98-232-3
CS	简单抗压强度（分别在 7 天、28 天和 90 天）	NF P 98-232-1

用于试点建筑工地的配方（混合物）包括磷石膏和水泥，以及不同百分比的沙子或尾矿。混合物中磷石膏的百分比范围为 57-93%（表 21）:

²⁶ https://ec.europa.eu/environment/waste/mining/pdf/guidance_extractive_waste.pdf

表 21. 三种基于磷石膏的不同配方的性能数据

PG %	IBI (W_{OPM})	CBR (W_{OPM})	SV	DCS 7 d (MPa)	DCS 28 d (MPa)	DCS 90 d (MPa)	E 7 d (MPa)	E 28 d (MPa)	E 90 d (MPa)
93%	57	49	0.08%	0.09	0.27	0.35	1,100	3,400	5,000
65%	81	86	0.56%	0.28	0.66	0.85	6,070	7,100	10,400
57%	52	89	0.18%	0.28	0.71	0.90	5,700	7,200	10,500

3.2.5.5 环境影响评估：所选配方的污染潜力

为了评估其对环境的污染潜力，根据法国标准 NF X 31-211，对混合物进行了各种苛刻的污染潜力测试，重点是水径流、溢出或通过路基材料浸出到环境中的污染风险。这些测试主要是在与其他国家/地区的适用法规相比较的基础上进行的，并进行了评估，尤其是来自欧盟²⁷和印度²⁸的法规。

3.2.6 试点项目的执行

从工程和环境角度对实验室测试进行验证后，2017 年该项目进入了执行阶段 - 在萨菲生产基地周边建造试点路段，使用四种选定的配方用于建设该路段并对路段进行了测试。由于试点设在生产基地范围内，因此不需要其他许可。

3.2.6.1 试点道路建造过程中使用监测仪器（试验路段）

为了确定四种选定配方中每种配方的道路施工技术可行性并表征每种配方的现场机械性能和环境性能，建造了一条长约 1 公里的直路。将试点道路分为五个长度相等的路段，前 4 个路段分别使用根据实验室测试结果选择的四种磷石膏配方建设，而第五个路段用作对照路段，用于与前 4 个路段进行比较。使用磷石膏建造的试点路段的截面轮廓如图 104 所示。然后，使用动态载重（进攻型）系数为 1.9 的重型油罐车（HGV）将试点道路的交通密度提高到相当高的水平，以加速道路的磨损（在强度等级 TPL3-TPL4 上进行交通测试。这是摩洛哥道路上最重的卡车类别）。

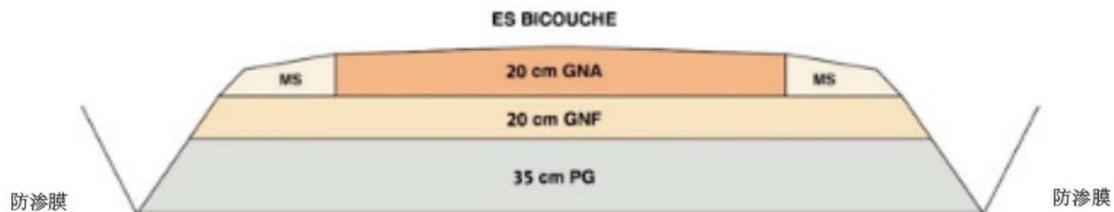


图 104. 萨菲试点磷石膏路的横截面图（图片由 OCP 提供）

²⁷ 有关欧洲法规，请参考 <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000032275960&categorieLien=id>

²⁸ 有关印度的法规，请参考 http://www.indiaenvironmentportal.org.in/files/file/Final_Draft_Guidelines_for_Phosphogypsum.pdf

将防渗膜（请看图 104 和图 105 的边缘）放在磷石膏层的下面，以避免任何水渗透到基土层中。横向排水系统放置在路边，通向五个集水盆以收集径流水。这些水通过内置在路体中的专用设备从路基排出。



图 105. 在萨菲道路建设中，使用防渗膜覆盖在天然土壤层和用于收集径流水的排水系统上（图片序列由 OCP 提供）



图 106. 位于萨菲工厂内的试点磷石膏路（图片序列由 OCP 提供）

3.2.6.2 对试点道路的机械性能进行现场监控

试点道路的工程性能，部分是通过对其流量进行计数和称重来现场测量的，部分是通过使用预编程的 LACROIX 偏转仪²⁹进行测量的。这些测量是由摩洛哥国家道路研究中心(CNER)做的。

根据迄今获得的结果，试点路段的预期寿命为 25 年。根据在试点道路上测得的挠度数据，使用 ALIZE 软件工具对道路寿命进行计算。这表明该道路的性能与使用传统材料建造的道路相似，甚至更高。20 年的生命周期是在需要进行大修或重铺路面之前所测量的道路寿命的标准指标（请参阅“报告 1”第 5 节的参考案例 - 磷石膏路。该路于 1985 年建在佛罗里达州波克县帕里什路。使用 21 年后，此路在 2006 年重铺路面）。因此，具有一个 25 年的生命周期将会显著降低道路在整个生命周期内的使用成本。



图 107. 使用偏转仪对道路性能（承重和抗压强度）进行测量（图片由 OCP 提供）

3.2.6.3 对试点道路的环境性能进行现场监控

对在试点道路中使用的四种不同配方进行的“污染潜能”测试，在本质上可以与欧盟和印度的标准相媲美，其结果列于表 22：

表 22. 根据摩洛哥、欧盟（法国）和印度等参考标准在径流洗脱液中检测到的重金属含量

元素	洗脱液中测得的最大浓度	摩洛哥标准	法国标准	印度标准（磷石膏）
Cr	0.016 mg/l	2 mg/l	0.1 mg/l	0.1 mg/l
Cd	0.032 mg/l	0.25 mg/l	0.2 mg/l	2 mg/l
Pb	<0.005 mg/l	1 mg/l	0.5 mg/l	2 mg/l
Hg	0.0001 mg/l	0.05 mg/l	0.05 mg/l	0.1 mg/l
As	<0.005 mg/l	0.1 mg/l	0.1 mg/l	1 mg/l

计划再继续监测道路对环境的影响，为期 3 年，对水的径流进行采样，以进行化学分析，用以评估长期的环境性能以及可能会造成污染的流动元素的聚集或集中。

假设工人在现场的暴露时间等于标准规定的工作时间（8h/d x 5d/w），通过对工人辐射剂量的监测（有效剂量）可以补充以上测量结果。监测结果是，最大年度剂量率为 0.7 mSv/y，

²⁹ <http://www.infralab.ch/wp-content/uploads/2016/10/Article-RT-Comparaison-HWD-et-Lacroix.pdf>

这远低于法国监管机构 IRSN 制定的暴露极限。

3.2.6.4 考虑技术经济性能限制的生命周期分析和评估

目前正在对试点道路的不同部分进行生命周期（LCA）分析和评估³⁰。该过程完成后，将可以对道路的整体性能进行多参数评估，并预测在 20-25 年寿命内道路的“全部拥有成本”。反过来，这不仅可以对使用磷石膏建造的道路与使用常规材料建造的道路进行有意义的比较，而且可以更好地理解磷石膏在类似项目中的使用限制和约束。

3.2.7 在道路建设中使用磷石膏的试点研究从萨菲扩展到乔夫拉菲尔

（Jorf Lasfar）

在 2019 年，乔夫拉菲尔（Jorf Lasfar）工厂上建造了第二个 200m 长的试点路段。该项目使用了乔夫拉菲尔工厂自己生产的磷石膏，并由同一批合作伙伴实施。在此项目中，使用的磷石膏比例为 65%。



图 108. 乔夫拉菲尔的试点路段（图片序列由 OCP 提供）

³⁰ “替代路基材料的生命周期评估：磷石膏案例”，在 2019 年 9 月举行的 SBE19 Graz 会议上发表的演讲

3.2.8 未来发展和规模化前景

鉴于所获得的令人鼓舞的结果，使用磷石膏的新试点道路正在全国道路网中进行规划和设计试验。

新的试点道路将考虑将磷石膏与各地当地可用的工业副产品相结合来获得更具野心的道路横截面和新配方。这一计划从乔夫拉菲尔开始实施。最初的参与机构将继续参与这些新的试点项目，并且摩洛哥设备、运输、物流和水务部道路局的工作人员也将参加这些试点项目。

4. 案例研究：综合方法

4.1 磷石膏的生产和使用平衡：巴西

作者们

Paulo Pavinato - 圣保罗大学土壤科学系

Salvador Gullo Nancy Case - 美盛公司 (Mosaic)

4.1.1 概述

根据巴西国家肥料开发局 (ANDA) 发布的数据，近年来，由于全国磷矿开采量下降，巴西的磷酸产量有所下降，也是由于国际投资者收购了巴西磷酸盐生产商 (例如，在 2018 年收购了淡水河谷肥料公司 (Vale Fertilizantes))。2018 年，巴西磷酸盐行业生产了 215 万吨磷酸，主要用于生产三重过磷酸钙 (TSP) 和磷酸一铵 (MAP)。该产量水平相当于年产 800-1000 万吨磷石膏副产品 (湿度约 20%)。

4.1.2 从渣堆到矿山：遗留的磷石膏被重新利用

巴西从 1970 年代开始生产磷肥。经过多年的磷肥生产，产生了大量的磷石膏。到巴西开始把大量磷石膏用于农业之前，巴西仍有大量的磷石膏遗留库存。但是据估计，这种遗留的磷石膏堆将在 2026-27 年被开采利用，因为截至 2019 年巴西每年用在农业上磷石膏已达 1000 万吨，超过了目前的国内产量。这将使巴西成为世界上第一个磷石膏生产大国，不仅达到磷石膏生产与消费之间的平衡点，而且还能满足日益增长的需求。巴西正在使磷石膏“渣堆”成为磷石膏“矿山”。

4.1.3 塞拉多地区的酸性土壤

巴西土壤主要是酸性的，在整个土壤剖面的溶液中都呈现出高水平的游离 Al^{3+} 。塞拉多 (Cerrado) 地区是一个广阔的热带稀树草原生态系统，覆盖了巴西 21% 的表面积。因此，在巴西的众多生态系统中，它的规模和重要性仅次于亚马逊。该地区的磷酸盐生产中心位于

米纳斯吉拉斯 (Minas Gerais) 州的乌贝拉巴市 (Uberaba)。

在巴西, 磷石膏用于在更深的土层中络合 Al 离子并将 Ca 穿过土壤剖面输送至石灰施用不到的地方 (20 cm 以下)。在大多数巴西土壤中, 特别是在塞拉多地区, 这被证明是替代在土壤中施用石灰进行土壤改良的最佳方法。

4.1.3.1 硫缺乏

通常, 由于几乎没有有机物含量, 大多数巴西土壤同样缺乏硫(S)。因此, 考虑到 10 mg/kg 的临界阈值水平 (萃取剂 CaHPO_4 500mg/L), 这些土壤没有能力将硫酸盐 (SO_4^{2-}) 保留在矿物相中。这意味着, 许多作物都需要每年添加硫才能健康发展并获得高产, 不管是通过施用富含硫的肥料还是施用磷石膏。

4.1.4 大豆

大豆最需要富硫肥料的农作物之一。大豆是目前巴西种植最广泛的经济作物, 占地约 3.6 千万公顷 (相当于巴西总耕地面积的 50% 以上)。此外, 园艺和水果生产也对硫有很高的需求, 尽管它们的规模较小。巴西目前使用的主要含硫肥料是单一的过磷酸钙 (SSP) 和硫酸铵。磷石膏既可以用作土壤改良剂 (最多 3 吨/公顷), 又可以用作 S 的增强剂, 但后者的剂量要低得多 (300-500 kg /公顷)。

作为磷石膏的竞争者, 或者说是磷石膏的补充者, 在巴西东北地区 (主要在伯南布哥州) 拥有一些天然石膏矿 (土石膏矿)。2018 年开采出来的天然石膏产量为 380 万吨, 反映出自 2013 年以来需求的持续增长, 当时年产量约为 340 万吨 (来源: DNPM³¹)。

天然石膏主要用于制造水泥, 仅少量 (少于 20%) 用于农业。原因是把天然石膏运到塞拉多等高消费农业区的长途运输成本是不经济的。通常, 当天然石膏运到农场的价格很高 (> 50 美元/吨) 时, 农艺学家建议施用, 农民也会放弃施用它。马托格罗索州 (巴西中西部) 和距磷酸盐行业很远的其他州就是这种情况。在全国范围内, 对于天然石膏和磷石膏而言, 50 美元/吨运输成本价格是限制需求的经济门槛。

4.1.5 作为副产品的磷石膏

巴西的磷酸和磷石膏生产位于两个特定的地方: 在圣保罗州海岸, 加工从其他国家运来的磷酸盐岩 (RP); 以及在乌贝拉巴市 (米纳斯吉拉斯州), 所需的大部分磷矿石都在巴西国内开采的, 然后通过火车或卡车从矿山运到加工厂。这些工厂把其生产的磷石膏的加工和销售外包给独立公司。这些公司从存储区 (山堆) 收集磷石膏, 然后干燥和筛分这些磷石膏, 以确保其具有良好的性能, 可用于田间施肥和随后的作物吸收。

按照自己的配方, 一些公司正在使用磷石膏开发肥料, 把磷石膏和元素 S 的颗粒制粒或制成

³¹ 国家矿业部 (DNPM), <http://www.anm.gov.br/>

复合材料。粒状产品的颗粒大小与已经出售给商业农业的肥料颗粒大小相同，因此可以使用现有设备进行制备。这是一个新产品，但比粗磷石膏要贵得多，因此农民可能不接受这样额外的费用。在数量上，它仅占巴西农业目前消费的磷石膏的很小一部分。

就农业需求而言，在巴西农业中增加使用磷石膏的潜力仍然很大，但是需求对价格高度敏感。直到“报告 2”发布之时，农民还是无法获得政府对化肥或土壤改良剂的补贴，因此需求完全取决于商品和化肥/土壤改良剂的市场价格。目前，在巴西磷石膏包括遗留的储备被农业基本上或甚至完全消化，这种趋势可能会持续下去。它的使用不仅对土壤环境友好，而且可用于存储遗留磷石膏的地区恢复其他更有益的用途。磷石膏的用途在经济上可行，并且在农艺学上非常适合为该国人们的主要农作物提供必需的营养素，特别是钙和硫，而且以有利于植物可利用的形式提供营养素给这些作物。

4.1.6 主要生产商：美盛公司（Mosaic）

与上述趋势一致的是，美国美盛公司（Mosaic）最近收购³²了位于乌贝拉巴和卡哈蒂（Cajati）³³的淡水河谷公司的磷酸盐生产设施。磷石膏生产和使用数据来自美盛公司³⁴（表 23）。

表 23. 美盛公司乌贝拉巴和卡哈蒂工厂的磷石膏生产和消费趋势

UBERABA					
年份	磷石膏产生量 吨 干基	磷石膏产生量 吨 湿基	船运 吨 湿基	农业 吨 湿基	水泥厂 吨 湿基
2017	4,005,328	5,340,437	2,132,412	1,993,174	139,238
2018	4,109,299	5,479,065	2,734,338	2,571,142	163,196
2019(至 10 月)	2,843,810	3,791,747	3,053,753	2,926,487	127,266
2017-2019 合计	10,958,437	14,611,249	7,920,503	7,490,803	429,700
CAJATI					
2017	1,111,383	1,389,229	965,928	221,639	744,290
2018	1,262,841	1,578,551	1,001,748	213,477	788,271
2019(至 10 月)	678,023	847,529	950,838	277,516	673,322
2017-2019 合计	3,052,248	3,815,310	2,918,514	712,631	2,205,883

在乌贝拉巴，引人注目的特征是农业在磷石膏使用中占很高的权重。考虑到上述农业效益和

³² 收购于 2018 年 1 月 8 日完成，请参考 http://www.mosaicco.com/Who_We_Are/4213.htm

³³ 对于美盛公司在全世界的 P 生产，请参考 http://www.mosaicco.com/Who_We_Are/locations_directory_locations_by_facility_type_phosphate_production.htm

³⁴ 对于美盛全球工厂的位置，包括乌贝拉巴和卡哈蒂，请参考 Google Maps https://www.google.com/maps/d/viewer?hl=en&ie=UTF8&msa=0&ll=27.37176700000007%2C0.703125&spn=0.004764%2C0.007929&z=2&source=embed&mid=1mzd2Xi1gb270-710bzZokc_B_IU

紧邻主要塞拉多市场，这是可以理解的。从 2017 年到 2019 年，磷石膏在农业中的使用的 50% 增长率可能会持续下去，但仍将对价格敏感，因为运输成本是关键因素。

对于卡哈蒂，这样高的权重同样引人注目，但是与乌贝拉巴市相反，在卡哈蒂，磷石膏主要用于水泥行业，而不是农业。地理因素再一次成为一个关键因素，因为圣保罗州的卡卡哈蒂靠近海岸，并且与乌贝拉巴相比，距主要的塞拉多市场更远。在印度也看到了类似的现象，那里对磷石膏的市场需求与一个或多个水泥厂的临近紧密相关。

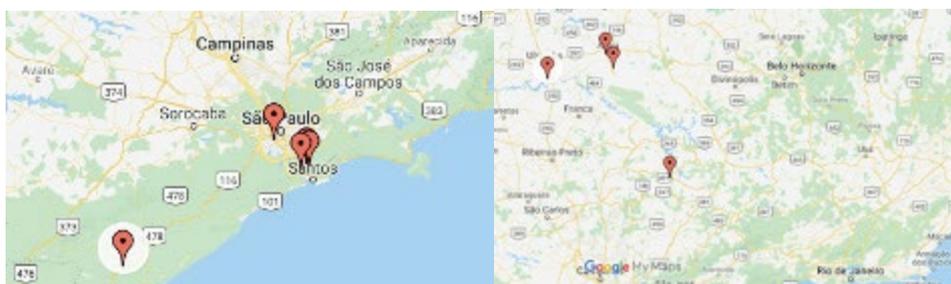


图 109. 美盛公司卡哈蒂（左）和乌贝拉巴市（右）磷石膏厂的位置

4.1.7 背景 - 巴西的磷石膏研发

截止本报告发布之日，磷石膏在农业和水泥生产中的应用目前已占据巴西磷石膏使用的主导地位。从历史上看，巴西一直是有关磷石膏使用的“建设性法规”方法的领导者，尤其是在监管机构、运营商、生产商和大学或独立的卓越科学中心之间的积极合作的基础上。一个主要成果是国家原子核监管机构核能国家委员会（CNEN）于 2014 年 11 月发布了第 179/14 号决议，该决议涉及在农业和水泥工业中使用磷石膏。第二个成果是淡水河谷公司管理层决定开发磷石膏使用而不是堆放磷石膏的“业务案例”。这起源于 2006 年在贝洛奥里藏特（Belo Horizonte）举行的有关磷石膏用途的国际会议。这不仅使磷石膏使用达到了商业规模，而且也许同样重要的是，淡水河谷于 2012 年发布的可持续发展报告，这是全球磷肥生产商发表的第一份可持续发展报告，并首次定量地报告了该公司的磷石膏使用量。

在国际原子能机构 SR78 第 10.5.2 节和“报告 1”第 4 和 7 节中，概述了巴西有关创新型磷石膏应用所开展的非常广泛的研究工作，例如经济适用房³⁵、高强度石膏板和其他建筑用途³⁶、城市废物管理、在渣堆种植植被³⁷和环境影响评估。如在“报告 2”中所重申的那样，允许大学或科研中心与生产商（例如比利时、加拿大、印度、摩洛哥案例所提到的生产商）之间进行富有成果的互动（几乎普遍），为商业成功打开了大门。

35

<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85131/tde-10072009-104349/publico/FreddyLazoVillaverde.pdf>

36 <http://livros01.livrosgratis.com.br/cp004818.pdf>

37 <http://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/272M.PDF>

4.2 磷石膏的用途 - 农业、水泥和道路：印度

作者

印度化肥工业协会，印度德里³⁸

4.2.1 磷酸和磷石膏的生产和使用概述

由于一些工厂的关闭，印度的磷酸产量在过去两年中有所下降。在 2017-18 化肥年度，印度的磷酸产量为 147 万吨，相当于生产 780 万吨磷石膏。在 2018-19 化肥年度，印度生产了约 800 万吨磷石膏（PG）（表24）。在该国各地，有约 5600 万吨的遗留磷石膏。

表 24. 印度磷石膏的产生及其利用（10 工厂的数据）

年份	磷石膏生产量 (百万吨)	磷石膏的利用（百万吨）*			
		水泥	农业	其他	合计
2017-18	7.79	2.67	0.42	2.21	5.30
2018-19	8.27	3.96	0.59	1.82	6.37

4.2.2 水泥和农业

在印度，磷石膏的主要用途是制造水泥，在 2018-19 年度，水泥行业消费约占 400 万吨磷石膏，比上年增长 30%。印度还拥有大量的天然石膏资源，可用于农业和水泥生产。在 2017-18 年度，开采的天然石膏产量为 205 万吨。

通常，在距一个磷酸生产厂数百公里范围内的水泥厂会发现使用磷石膏作为阻燃剂是经济的（请参考 CPCB 规格）。在 2018-19 年度，约有 59 万吨磷石膏用于农业，需求也增长了约 30%。但运输成本限制了磷石膏在更广泛区域的使用。

4.2.3 在建筑材料和道路中的使用

在印度，磷石膏也被有限地用作建筑材料。尽管该行业的努力，但石膏板在民用建筑中的利用仍未达到商业规模。正在试验在道路建设中使用磷石膏。在未来 2-3 年内就能知道这种使用的扩展。

³⁸ 印度化肥工业协会, <https://www.faidelhi.org>

4.3 磷石膏肥料和道路施工材料：帕拉迪普磷酸盐有限公司 的两种磷石膏使用措施

作者

Ranjit Misra，帕拉迪普磷酸盐有限公司

4.3.1 帕拉迪普磷酸盐有限公司在磷石膏使用中的综合举措

该案例研究提出了位于印度奥里萨邦帕拉迪普市的帕拉迪普磷酸盐有限公司（简称“帕拉迪普公司”或 PPL）⁸⁹ 采取的两项创新和综合举措，来增加磷石膏的增值用途，并增加磷石膏在印度和周边市场的使用量。这两项举措是实施一个有关在道路建造中使用磷石膏的新的重大试点项目，以及开发新的富含 S 的磷石膏基肥料 Zypmite。在合作伙伴关系方面，探讨了帕拉迪普公司领导力的作用以及帕拉迪普公司与中央道路研究所作为合作伙伴和监管机构之间的合作。

4.3.2 帕拉迪普公司的主要运营特点

帕拉迪普公司是印度最大的磷酸生产厂之一。它的主要运营特征是：

- 目前的磷酸产量为 300,000 吨/年
- 磷矿石的来源：摩洛哥、约旦、埃及等
- 磷石膏的产量：150万吨/年
- 当前磷石膏的平均增加值使用量：80万吨/年

磷石膏增值用途的突出领域：

- 水泥（当地制造商）
在 2011 年至 2012 年期间，将约 509,000 吨的磷石膏出售给水泥厂和其他用途。
主要消费者是 Odisha 水泥有限公司和 Orrisa 农业公司。
- 内部生产 Zypmite（低成本、富硫肥料（请参考图 117））
- 出售给孟加拉国和尼泊尔等邻国（显然用于农业和水泥制造）。

增加磷石膏使用的挑战：

- 运输瓶颈
- 铁路货车现不可用 - 正在探索水运方式。

4.3.3 中央道路研究所（CRRI）：项目概述和最终报告摘要

帕拉迪普公司和中央道路研究所（CRRI）的工程师和科学家合作了一年多，进行了关于“利用磷石膏作为道路建筑材料的可行性研究”。该项目由位于印度奥里萨邦的帕拉迪普公司委托给中央道路研究所做的。

为了评估磷石膏是否适合用作道路建筑材料，进行了一项实验室研究，其广泛的工作范围如下：

- 磷石膏的表征
- 土壤/粉煤灰的表征
- 磷石膏在路堤和路基中的使用
- 在混凝土道路中使用磷石膏
- 在柔性路面的沥青混合料中使用磷石膏。

研究人员还表征磷石膏的物理和工程特性，并评估了在道路路堤和路基中使用这种材料的可能性。还进行了相关研究，以确定添加磷石膏后当地土壤和粉煤灰的强度增加情况。除上述以外，还研究了通过添加石灰和磷石膏来提高当地土壤的强度。

为了进行这项研究，从植物园收集了当地可用的土壤。在与客户协商后，决定了收集当地可用土壤的地点。选择用于研究的土壤是细粒土壤和自然界中的黏土。

为了将磷石膏与粉煤灰一起使用，在实验室中制备了几种粉煤灰和磷石膏的混合物，以评估添加磷石膏后粉煤灰的强度特性。

开始工作时，按照 BIS 标准对磷石膏和土壤样品进行了详细表征。确定的特性包括物理特性，例如比重、粒度分布、稠度限值（即液体和塑料的粘度限值）、自然水分含量等。除上述以外，还评估了样品压实到其最大干密度（MDD）时的最佳水分含量（OMC），以便进一步浇筑样品以确定其强度。根据其剪切强度（ c, ϕ ）、无侧限抗压强度（UCS）和加利福尼亚承载比（CBR），确定了单独使用时磷石膏的强度和工程特性以及它与当地的土壤、石灰和粉煤灰等混合使用时混合物的强度和工程特性。

为了评估磷石膏的稳定化效果，分别用磷石膏和磷石膏+石灰使土壤稳定。强度增加是根据无侧限抗压强度（UCS）和 CBR 确定的。还进行了耐用性测试，以评估经过润湿和干燥的稳定土壤的性能，以模拟现场的水涝和洪水情况。

根据实验室数据，发现当磷石膏在最佳水分含量（OMC）和最大干密度（MDD）情况下被压实时，会产生很高的强度。磷石膏有比较高的 UCS 值，足以在不同的路面层中使用。然而，当将该样品浸入水中以测定耐久性时，发现其损失了一些强度，但仍具有足够的强度以用于底基层或用作软基上的覆盖层。

使用不同比例的磷石膏（甚至高达 50%）也可以稳定当地的土壤。强度的增加是根据无侧限抗压强度（UCS）确定的。结果发现，随着磷石膏的添加，UCS 有所增加；但磷石膏的添加比例最多仅为 20%，超过 20%时，UCS 反而降低。通过添加 4%和 6%的石灰，UCS 在 14 天和 28 天的固化期内均增加了。但是，当对土壤-磷石膏混合物以及土壤-磷石膏-石灰混合物进行耐久性测试时，经过几次湿润和干燥循环后都失败了，因此所有稳定化的样品都无法达到耐久性测试标准。

通过添加不同百分比的磷石膏（甚至高达 50%），粉煤灰也被稳定了。强度的增加是根据无侧限抗压强度（UCS）确定的。结果发现，随着磷石膏的添加，UCS 有所增加；但磷石膏的添加比例最多仅为 40%，超过 40%时，UCS 反而降低。然而，当将粉煤灰和磷石膏的混合

物进行耐久性测试时，没有一个样品能够达到耐久性测试标准。在测定无侧限抗压强度时，观察到压实的磷石膏样品表现为半刚性材料。从以下事实可以明显看出，当压实的块体逐渐承载负荷时，在极限强度下表现为脆性材料。

根据实验室研究，得出的结论是，磷石膏本身可用作填充材料，并可用于道路的路基/底基层中。用 20%磷石膏稳定的当地土壤可用作路基/覆盖层。用 20%磷石膏和 2%或 4%石灰稳定的当地土壤也可用作路基/覆盖层。用 40%磷石膏稳定的粉煤灰可用作路基/封盖层和底基层。但是，在建议大规模应用之前，应建造一条试验道路并在一段时间内监测它，以评估道路的性能。

4.3.3.1 建议：

1. 当磷石膏在最佳水分含量（OMC）和最大干密度（MDD）情况下被压实时，会具有很高的强度。磷石膏有比较高的无侧限抗压强度（UCS）值，足以在不同的路面层中使用。然而，当将该样品浸入水中以测定耐久性时，发现其损失了一些强度，但仍具有足够的强度以用于底基层或用作软基上的覆盖层。

2. 使用不同比例的磷石膏（甚至高达 50%）也可以稳定当地的土壤。强度的增加是根据无侧限抗压强度（UCS）确定的。结果发现，随着磷石膏的添加，UCS 有所增加；但磷石膏的添加比例最多仅为 20%，超过 20%时，UCS 反而降低。

通过添加 4%和 6%的石灰，UCS 在 14 天和 28 天的固化期内均增加了。但是，当对土壤-磷石膏混合物以及土壤-磷石膏-石灰混合物进行耐久性测试时，没有一个样品可以达到耐久性测试标准。在热带地区，使用磷石膏/磷石膏+4%和 6%石灰稳定的当地土壤可用作覆盖层/底基层。

3. 通过添加不同百分比的磷石膏（甚至高达 50%），粉煤灰也被稳定了。强度的增加是根据无侧限抗压强度（UCS）确定的。结果发现，随着磷石膏的添加，UCS 有所增加；但磷石膏的添加比例最多仅为 40%，超过 40%时，UCS 反而降低。然而，当将粉煤灰和磷石膏的混合物进行耐久性测试时，没有一个样品能够达到耐久性测试标准。用 40%磷石膏稳定的粉煤灰可用于覆盖层/底基层。

4. 在测定无侧限抗压强度时，观察到压实的磷石膏样品表现为半刚性材料。从以下事实可以明显看出，当压实的块体逐渐承载负荷时，在极限强度下表现为脆性材料。因此，它可用于路面的下层。

5. 根据实验室研究，得出的结论是，磷石膏本身可用作填充材料，并可用于道路的路基/底基层中。用 20%磷石膏稳定的当地土壤可用作路基/覆盖层。用 20%磷石膏和 2%或 4%石灰稳定的当地土壤也可用作路基/覆盖层。用 40%磷石膏稳定的粉煤灰可用作路基/封盖层和底基层。但是，在建议大规模应用之前，应建造一条试验道路并在一段时间内监测它，以评估道路的性能。

6. 7%磷石膏可用于沥青混凝土混合料。发现含 7%磷石膏和不含磷石膏的沥青混凝土（BC）的最佳粘合剂含量（OBC）为骨料重量的 5.8%或混合料重量的 5.5%。7%磷石膏的使用增加了混合料的强度，还增加了混合料的保留稳定性，表明减少了由水引起的沥青路面破坏。

7. 磷石膏可用于半致密沥青混凝土（SDBC）混合料中。与不含磷石膏的 SDBC 相比，在 SDBC 混合料中掺入 7%磷石膏可提供更高的保留稳定性。发现含有 7%磷石膏的 SDBC 的最佳粘合剂含量为骨料重量的 5.4%或混合料重量的 5.1%。发现含有磷石膏作为填料的 SDBC 混合料的稳定性、流量值、最佳粘合剂含量、空隙和 VFB 都处在 MOSRTH 的规定范围内，

8. 7%磷石膏可用于沥青碎石（BM）混合料。发现以 7%磷石膏作为填料的 BM 的 OBC 为骨

料重量的 3.6% 或混合料重量的 3.5%。发现以 7% 磷石膏作为填料的 BM 混合料的最佳结合剂含量 (OBC) 均处于 MOSRTH 规定的 3.3 至 3.5 范围内。

9. 7% 磷石膏可用于稠密的沥青碎石 (DBM) 混合料中。发现含有 5.5% 磷石膏作为填料的 DBM 的 OBC 为骨料重量的 5.4% 或混合料重量的 5.1%。发现含有不纯白垩作为填料的 DBM 混合料的稳定性、流量值、最佳结合剂含量、空气空隙和 VFB 均处于 MOSRTH 的指定范围内。

10. 磷石膏可用作沥青混合料的填料。在底基层如沥青碎石 (BM) 层和密集的沥青碎石 (DBM) 层, 以及在磨损层如半致密沥青混凝土 (SDBC) 层和沥青混凝土 (BC) 层, 都可以在不同沥青混合料中添加 7% 的磷石膏 (按骨料的重量计)。磷石膏可与乳液一起用于 SDBC 和 BM 中。乳液可使混合料无需加热即可施工, 并且在潮湿条件下也可使用磷石膏。需要进行现场试验来验证初步的实验室研究结果。在磷石膏用于实际道路建设之前, 需要进行现场试验。

11. 在路面质量混凝土 (PQC) 和干贫混凝土 (DLC) 中, 以 10%、20% 和 30% 的磷石膏按不同的 w/c 比例代替水泥, 没有发现混凝土的强度有显著提高。在水/结合剂比为 0.40 和 0.45 的情况下, 用 10% 磷石膏部分替代水泥的 PQC 混合料的强度特性与原 PQC 混合料相比是相当的, 甚至几乎相等。

12. 发现添加较高剂量的磷石膏 (即 20% 和 30%) 会降低 PQC 混合料的强度特性。

13. 在干贫混凝土 (DLC) 混合料中, 也观察到了相同的趋势。

14. 当制备等级为 M-40、M-35、M-30 和 M-25 (根据 IS 456-2000) 的标准混凝土时, 在适当的水/结合剂比 (如 0.40 或 0.45) 的情况下, 可以用磷石膏代替 10% 的水泥。在最佳水分含量 (OMC) 和最大干密度 (MDD) 情况下, 在干贫混凝土 (DLC) 混合料中, 可用磷石膏代替 10% 的水泥。

15. 建议在使用磷石膏之前, 先用 ~1% 的商品石灰处理磷石膏以中和它。

4.3.3.2 工地清理和施工

> 道路长度: 500 m (5 x 100m 路段)

> 道路宽度: 5.75 m

> 工地施工开始时间: 2017 年 2 月

> 施工完成时间: 2018 年 4 月

请参考下面的图 110、111、112、113 和 114, 以直观方式了解道路的工地清理和施工情况。



图 110. 清理 (左) 和去土 (右) 现场 (图片由帕拉迪普公司提供)



图 111. 沙层的铺设（图片由帕拉迪普公司提供）



图 112. 使用中和磷石膏（NPG）建造路堤（图片由帕拉迪普公司提供）



图 113. 使用黏土修建道路的侧面和外坡（图片由帕拉迪普公司提供）



图 114. 中央道路研究所和帕拉迪普公司的科学家和工程师在道路施工期间进行测试（图片由帕拉迪普公司提供）

4.3.4 新产品开发 - ZYPMITE

诸如磷酸氢二铵（DAP）、尿素和钾肥（MOP）的化学肥料在成功实施印度的绿色革命中发挥了重要作用，从而使印度的粮食生产实现了自给自足。在随后的几十年中，作物营养政策的重点是增加对主要养分 N、P 和 K 的施用。这是印度政府采取协调一致的政策支持的重点。印度政府为农民提供大量补贴，来鼓励农民获得这些养分。

在全球范围内，尿素、DAP 和 MOP 是三种主要的化肥产品，也分别是氮、磷和钾成本效益最高的矿物肥料来源。但是，这种主要养分的优势有时是以忽略镁和硼等微量养分在植物生长和产量中的关键作用为代价的。在制定肥料规格和施用政策时相对忽视微量营养素，导致土壤中微量营养素的逐渐消耗。这一趋势已被越来越多地理解为是农业产量停滞趋势的主要原因，尽管总体上增加了 NPK 肥料的使用量。作为植物吸收 NPK 的调节剂，微量营养素发挥着至关重要的作用，因此，当没有足够的微量元素以植物可用形式存在于土壤时，即使施用更多的氮、磷和钾，作物产量也不会增加。

帕拉迪普公司主要经营氮肥、磷肥和钾肥，尤其是磷肥。其“NAVARATNA”品牌在其经营范围内的大多数市场中都享有良好的声誉。但是，帕拉迪普公司现在认为，由于作物产量停滞和作物对 NPK 的反应变慢，因此人们已经开始寻找 NPK 之外的肥料，并开始关注农民的不同需求。作为一家致力于履行企业社会责任的公司，帕拉迪普公司决心推广和普及对农民具有成本效益并有利可图的含微量营养素的肥料产品。

因此，帕拉迪普公司开发了一种新产品叫 Zypmite。该产品是通过将磷石膏和白云石以不同的配方进行混合而制成的，从而创造了一种经济高效的包含硫（S）、钙（Ca）和镁（Mg）的肥料。在把 Zypmite 投放到市场之前，公司在 Zypmite 的开发试点阶段将产品样品提供给合作伙伴奥里萨邦农业科技大学进行独立的科学试验。这些试验都取得了令人满意的结果。同时，帕拉迪普公司成功地在其所有销售地区的各种土壤和农作物上进行了 408 次田间试验。

这使帕拉迪普公司能够选择出能使作物产量以最快速度持续增长的具有最佳组成的产品。然后进行了推广活动，把 Zypmite 投放到市场上。

4.3.4.1 产品功能和优点

手工混合肥料的制备需要确切地了解单一营养或主营养肥料的营养配方、它们的混合特性以及最佳的混合方法，而农民则可能不具备这些知识。即使可以获得此类知识，农民也可能难以获得有效混合和掺混肥料所需的空间和设备。因此，帕拉迪普公司已选择以粒状形式销售 Zypmite。与手工混合肥料产品相比，粒状产品具有以下优势：

- > 每个颗粒都包含与产品规定的相同的大量和微量营养素配方
- > 颗粒自由流动，易于使用
- > 在运输、搬运和存储过程中不会因粉尘而导致产品损失
- > 降低了不必要地混合多余营养素的风险
- > 养分的“浸出”和“分离”降至最低
- > 养分向土壤的释放是可控的和可预测的。

根据营养成分和所需的平衡，产品配方可以被制成各种等级。

4.3.4.2 制造技术

在生产过程中，会存储各种固态的磷石膏、白云石等，并按比例抽取它们进行中和和处理。将它们充分混合（图 115）并送入转鼓式制粒机，并向转鼓里加入约 10-12% 的水。由于制粒机中物料的润湿以及搅动和翻滚作用，物料形成了颗粒（图 116）。

材料中多余的水分在干燥机中去除。从干燥机出来的热颗粒被送入冷却器进行冷却。筛选干燥和冷却后的颗粒以分离出过大颗粒、过小颗粒和成品颗粒。粉碎后，过大的颗粒会返回造粒机里。然后包装粒度在 1 - 4 毫米范围内的成品。

此后，该产品用硼和锌强化，产生了富含 S 的产品，该产品还通过添加磷石膏来向作物提供了必要的微量营养素³⁹。Zypmite 工厂的产能为 200 吨/天。最终产品以 25 公斤袋装出售（图 117）。帕拉迪普公司也以袋装和散装形式出售磷石膏。



图 115. 与微量营养素混合后中和磷石膏粉（图片由阿莱夫集团提供）

³⁹ Zypmite <https://www.paradeepphosphates.com/what-we-do/products/>



图 116. 造粒后的混合粉末（Zypmite）（图片由阿莱夫集团提供）



图 117. 出售前的 Zypmite Plus 包装（右）和新鲜装袋的 Zypmite（左）（图片由帕拉迪普公司（左）和阿莱夫集团（右）提供）

4.3.5 ZYPMITE 在鹰嘴豆农田中的应用

为了说明磷石膏在印度磷缺乏土壤中的广泛应用潜力，同时也进一步说明了在磷石膏价值途径不断被发现的情况下学术界和工业界之间知识共享和合作的好处，本文简要地参考了一篇最近发表的有关为鹰嘴豆施用 Zypmite 的田间试验的论文。鹰嘴豆是印度许多地方的主粮 [65]。

“在研究中，我们进行了田间试验，以评估 Zypmite 肥料和磷酸二铵（DAP）一起施用的效果。Zypmite 施用的效果表现出作物的生长、产量、养分吸收以及土壤中养分的有效性。[...] 在施用 Zypmite 期间，土壤中的硫可利用量受到显著影响。通过施用 Zypmite，发现土壤中最高硫含量由 23.0 千克/公顷提高到 40 千克硫/公顷。观察到施用 Zypmite 和化肥可提高作

物产量，增加养分吸收并改善土壤肥力。”

这项研究的背景与其田间试验结果一样重要。对于磷石膏问题，长期解决方案的关键是大量使用磷石膏。鉴于 Zypmite 对在印度土壤上种植的主要农作物具有广泛的适用性，因此，在印度以及在鹰嘴豆也具有主食地位的类似文化中，创新产品（如 Zypmite）具有被大量使用的潜力。

4.3.5.1 蛋白质的来源

鹰嘴豆（*Cicer arietinum* L.）是印度最重要的豆类作物。豆类作物可以在不同的土壤系列和气候环境中生长，并在作物轮作、混作和间作中起重要作用，并通过在土壤中固氮来保持土壤肥力。豆类作物是印度所有素食者的主要蛋白质来源，并具有必需的氨基酸、维生素和矿物质。[66] 它含有 22% 至 24% 的蛋白质，约为小麦的两倍，水稻的三倍。[67] 它是全国种植系统的组成部分，因为这种作物非常适合轮作和混作。它具有多种用途，并具有在低肥力以及不同土壤和气候条件下生长的能力。

4.3.5.2 与谷物相比的成本效益

一项 2014 年的研究认为，由于具有良好的农艺管理规范、病虫害综合治理（IPM）意识和高产品种（HYV）的种植，与谷物相比，豆类作物更具经济性[68]。在印度，旱地面积实际上占耕地总面积的 64%，并生产了印度粮食总产量的 42%。在恰蒂斯加尔邦，鹰嘴豆种植面积约为 803.03 公顷（ICRISAT 2011-12 年度进度报告）。

4.3.5.3 作为关键营养素的硫

如今，硫与氮（N）、磷（P）和钾（K）一起被视为主要的植物营养素。营养管理不善是鹰嘴豆减产的重要理由。磷肥是鹰嘴豆生产中的重要肥料[69] [70] [71]。磷对豆类作物的根瘤形成和固氮有积极作用⁴⁰。

硫是半胱氨酸和蛋氨酸等氨基酸的主要元素。这些氨基酸具有重要的营养价值。除这些功能外，铁硫蛋白在固氮中也起着重要作用。该元素尤其对豆类作物的根瘤产生积极影响。毫无疑问，这对于所有农作物的生长和发育至关重要。植物要求的大部分硫以硫酸根（ SO_4^{2-} ）的形式通过根吸收。硫的缺乏与日俱增，这严重限制了农作物的产量、农产品质量、养分利用效率以及数百万农场的经济回报。像任何必需营养素一样，硫在植物中也具有某些特定功能。因此，只能通过施用硫肥来纠正硫缺乏症。由于连续种植和肥料使用不平衡，次生养分的缺乏也在增加。在印度持续使用无硫肥料也加剧了印度土壤普遍存在的缺硫问题。Zypmite 是一种新的硫源，含 15% 的硫，对不同农作物有利。” [65]

⁴⁰ Deo, C. Khaldelwal, R.B. 磷和硫营养对鹰嘴豆产量和品质的影响 (*Cicer arietinum* L.) [2009] <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=IN2011000199>

4.4 各种磷石膏价值增值应用的法规状况 - 印度监管机构

作者

TK Haldar, 印度阿莱夫集团 (Aleff Group)

本案例研究是基于以下经历和资料: a) 应邀参观帕拉迪普公司的试点道路和 Zypmite 工厂; b) 作者在为印度政府工作时与监管机构和磷酸盐行业合作解决有关磷石膏使用法规问题的经验; 以及 c) Ranjit Misra (帕拉迪普公司经理) 在 2019 年 4 月 8 日 IFA 新奥尔良会议上的演讲。

4.4.1 印度磷石膏的当前处理状况

目前, 印度的大多数磷酸工厂都在工厂附近的存储设施中堆放磷石膏。根据市场需求, 磷酸厂出售用于不同用途的磷石膏, 其中包括: (i) 用作土壤改良剂 (用于碱性土壤); (ii) 用作农业中的富硫肥料; (iii) 用于水泥生产中, 用以控制水泥的沉降时间 (即作为缓凝剂); (iv) 用于生产灰泥、石膏板、石膏纤维板和石膏砖 (请参考表 24)。

需要通过铁路或公路 (主要是卡车/拖拉机) 运输磷石膏到用户手里。在 2013-16 年, 印度的化肥消费一直保持较低水平, 仅为 1500 万吨/年, 而同期水泥产量从 320 万吨/年增长到 380 万吨/年[72]。

磷石膏的使用取决于它的杂质含量水平, 例如氟化物、磷酸和放射性。而这些杂质的含量又取决于 (i) 所使用的进口磷矿石类型, (ii) 所采用的酸化工艺或 (iii) 对磷石膏进行的预处理, 例如中和 (请参考上面的道路和 Zypmite 研究), 以及 (iv) 运输成本。当磷酸厂靠近水泥厂时, 这会使磷石膏成为一种经济上有吸引力的原料。但当从磷酸厂到水泥厂的运输距离较长时, 运输就会成为瓶颈, 磷酸厂只能将磷石膏存放在附近的堆放场。但是, 现在显然存在扩大磷石膏用途的市场机会, 那就是把磷石膏用于土壤改良和道路建设中。

4.4.2 印度监管机构对磷石膏增值应用的规定

在印度, 磷酸工厂的运营及其残渣 (尤其是磷石膏) 的管理由两个独立的国家机构进行监控。常规物理和化学污染及其排放方面的风险由中央污染控制委员会 (CPCB) 进行监管和监测, 而放射性污染和辐射防护方面的风险则由原子能监管委员会 (AERB)⁴¹ 进行监管和监测。

4.4.2.1 原子能监管委员会的一般原则

1. 出售磷石膏用于建筑和建筑材料时, 则无需获得原子能监管委员会批准, 前提是其中 Ra-226 的活度浓度小于或等于 1 Bq/g。 [如果磷石膏中的 Ra-226 浓度大于 1Bq/g, 则应与其他组分混合, 以使散装物料中 Ra-226 的活性浓度小于或等于 1.0 Bq/g]

⁴¹ 有关原子能监管委员会的第 01/09 号指令, 请参考 <https://www.aerb.gov.in/english/acts-regulations/safety-directives>

2. 制造和使用石膏板或砖块时，无需获得原子能监管委员会批准，前提是任何板/砖块表面的 Ra-226 活性小于 40 kBq /平方米。
3. 从放射安全考虑，在农业应用中使用磷石膏没有限制。

4.4.2.2 肥料厂出售磷石膏

出售磷石膏用于建筑和建筑材料时，则无需获得原子能监管委员会批准，前提是其中 Ra-226 的活度浓度小于或等于 1 Bq/g。[如果磷石膏中的 Ra-226 浓度大于 1Bq/g，则应与其他组分混合，以使散装物料中 Ra-226 的活性浓度小于或等于 1.0 Bq/g]

4.4.2.3 石膏板和砖块的制造和使用

制造和使用石膏板或砖块时，无需获得原子能监管委员会批准，前提是任何板/砖块表面的 Ra-226 活性小于 40 kBq /平方米。

4.4.2.4 在农业中的使用

从放射安全考虑，在农业应用中使用磷石膏没有限制。

4.4.3 中央污染控制委员会

中央污染控制委员会（CPCB）决定将磷石膏重新分类为非危险废物，而不是象以前那样将其分类为危险废物。此决定使磷石膏使用在印度取得了很大的进步，但是，使用磷石膏须遵守 CPCB 规范和以下一系列国家标准：

磷酸工厂应尽可能将产生的磷石膏用于有益目的，例如用于石膏板制造，用于在水泥制造中替代天然磷石膏，并用于回收副产品如硫酸铵、硫酸等。以及用于碱性土壤的复垦。为了使用磷石膏，必须遵循以下准则：

(i) 所有磷酸厂都可以建立自己的灰泥/石膏板制造设施，来探索把磷石膏用于制造灰泥/石膏板的可能性，这些设施可以作为磷酸厂不可或缺的一部分或任何其他小型工厂。

(ii) 所有灰泥、砖块或石膏板制造行业均应使用磷石膏废料（规格：放射性低，有机物和钠含量低）作为原料，用于生产灰泥、砖块或石膏板，但在生产此类产品前，必须把原料中杂质含量降低到符合印度标准 IS: 12679-1989（2010 年重新修订）（《对用于灰泥、砖块和石膏板的副产品磷石膏的要求》）所规定的规格。⁴²

(iii) 水泥生产厂应尽可能使用磷石膏（规格：含小于 0.05% 共结晶和可溶性 P₂O₅ 和小于 0.05% 可溶性 F）代替天然磷石膏，作为水泥凝结时间的调节剂（即缓凝剂），磷石膏应占水泥组成的 4% 至 5%。用于制造水泥缓凝剂的磷石膏（表 25）必须符合以下规格：

表 25. 用作水泥缓凝剂的磷石膏规格

序列号	参数	推荐限值 %
1	不溶性 P ₂ O ₅	0.50 至 1.00

⁴² <https://law.resource.org/pub/in/bis/S03/is.12679.1989.pdf>

2	不溶性氟化物	0.40 至 0.65
3	不溶性 P ₂ O ₅	0.02 至 0.10
4	可溶性氟化物	最高 0.02
5	水分	小于 15%

(iv) 任何希望按照以下反应从磷石膏废料中生产硫酸铵的企业家，都可以向有关的国家污染控制委员会 (SPCB) / 污染控制委员会 (PCC) 获得建立此类回收企业所需的批文。



(v) 任何希望从磷石膏废料中回收或生产硫酸的企业家，都可以向有关的国家污染控制委员会 (SPCB) / 污染控制委员会 (PCC) 获得建立此类回收企业所需的批文。

(vi) 低品位磷石膏可用于开垦具有高钠离子浓度的碱土和盐碱土。考虑到其营养价值，国家肥料控制委员会 (FCO) 还批准了使用磷石膏作为肥料，因此肥料工业可能会最大限度地使用磷石膏作为“肥料”。为此，需要遵循印度标准 IS:10170-1982 (1999 年重新修订)⁴³ 所规定的副产品磷石膏规范。对于使用品位磷石膏来调理碱性土壤，主要作用于改良黑色碱性土壤的农业肥料，应遵循 BIS 规定的用于农业的磷石膏规格 (即 IS: 6046-1982 (1982 年首次修订; 2008 年重新修订))。

(vii) 经与相应 SPCB 或 PCC 协商后，以下规格的磷石膏应被允许用于公路和通路的建设 (位于住宅区的除外): 经中和、稳定或适当处理的磷石膏 (不超过……………% 待确定)，并且不含氟、镉、铅、砷和汞或它们的含量在以下建议的限值内，以及与合适的粘结材料以及膨润土和硅酸盐混合后，且渗透率不小于 10⁻⁷ cm/sec。

此外，在将磷石膏用作筑路路基/路基时，应满足以下规格 (表 26):

表 26. 用于路基的磷石膏规范 — 重金属含量

参数	测试方法	推荐限值 (不超过)
氟化物	毒性特征浸出程序 (TCLP)	150 mg/l
镉	TCLP	1 mg/l
铅	TCLP	5 mg/l
砷	TCLP	5 mg/l
汞	TCLP	0.2 mg/l
水分	无水分	15%

这些规格要满足有关行业定期监测磷石膏使用情况的一般要求，例如对土壤进行采样和检查，以确保不会出现不可预见的重金属或放射性核素积累。

4.4.4 前景和趋势

对主要磷酸工厂产生的磷石膏进行系统表征，并对其增值应用潜力进行客观评估 - 需要与其表征数据、相应的监管准则和当地市场情况相适应，以加快对更多磷石膏的使用。印度有相关专门技术。这些技术可以通过与学术机构和著名的政府机构合作来获得。在任何需要的地方，也可以寻求国际专家的帮助。

⁴³ http://www.questin.org/sites/default/files/standards/is.10170.1982_0.pdf

印度的监管框架鼓励磷石膏的增值应用，从而促进在适当的应用中增加磷石膏的使用。国际机构和组织如国际原子能机构、欧盟和 IFA 的积极回应以及最近在不同国家大规模使用磷石膏的结果，为扩大应用领域创造了可喜的背景。

帕拉迪普公司把磷石膏用于道路建设的经验以及在三个季风时期内的环境监测/性能分析结果需要被广泛宣传，并鼓励主要磷石膏制造商针对本地和区域应用启动类似计划。这不仅有可能在基础设施项目中大规模使用磷石膏，而且还可能符合联合国可持续发展目标，保护原生/自然资源。

需要集中研究使用其他工业残渣，例如粉煤灰和赤泥，来中和和稳定磷石膏。固定资产投资以及相关政府机构可以在其中发挥重要作用。

印度在农业应用中具有大量使用磷石膏的潜力。需要鼓励将磷石膏用作土壤改良剂或低成本肥料（与帕拉迪普公司发起的“Zypmite”目标相一致）：

- (i) 具有高碱或高钠土壤的现有农田
- (ii) 在印度农村地区，目前有许多被用作填埋场的土地。这些土地尚不能用于农业生产，可在上面植树发展林业，以创造就业和创收；以及
- (iii) 对因表土流失而受荒漠化影响的土地进行开垦和重新造林。

第 3 部分 合作

导言：磷石膏增值和综合使用之路的关键步骤

在第 1 部分中提到的磷石膏从“废物”变到“资源”和“副产品”的 40 年历程可以按以下顺序进行跟踪。

阶段 1：佛罗里达 - 系统地科学地探索磷石膏利用的开始

1978 年，佛罗里达州立法机构成立佛罗里达磷酸盐研究所（FIPR），并由该州磷酸盐开采业缴纳的遣散税为该研究所提供资金。当时，佛州是全球磷酸盐生产的中心，而该研究所是世界上唯一由政府资助的致力于满足磷酸盐行业需求的研究中心。

在创始董事戴维·鲍里斯（David Borris）和现在仍然活跃的研究总监迈克·劳埃德（Mike Lloyd）的带领下，该研究所很快着手赞助一整套研究、科学会议和出版物，致力于将磷石膏增值为磷酸生产的“副产品”（请参考图 118）。FIPR 图书馆在 1980 年代和 1990 年代收集的证据库在深度和覆盖范围上均无与伦比。其中的一些开创性证据被加里·阿尔巴雷利（Gary Albarelli）列在其下面的文章里。此证据库反映了 FIPR 及其利益相关者之间的多种多样的合作，无论是大学、咨询公司、磷酸盐生产者、环保主义者还是教育工作者。很高兴看到 FIPR 现已成为佛罗里达理工大学的一部分，以新的姿态重新出现在磷石膏事业中。

第二阶段：西班牙西南部 - 评估磷石膏在农业中的已有用途

1990 年代末在西班牙西南部，由于环境原因，当局停止了将磷石膏排放到 Odiel 和 Rio Tinto 河流的作法。在那里，这两条河流开始合流，然后一起流入大西洋。FIPR 当时不知道那里发生的事。从 1950 年代初期开始，磷石膏就被用作土壤改良剂而被施用到邻近瓜达尔基维尔河三角洲的盐渍湿地上。这就使环保主义者对西班牙的长期做法提出了挑战。

在 1950 年代，当地农民开始使用大量磷石膏对该三角洲的沼泽地进行处理，以创造新的土壤。自那以来，这些土地已成为欧盟耕种最密集和最肥沃的土壤之一，向整个欧洲供应高价值农作物，例如草莓和西红柿。当地农民定期向这些土壤补充磷石膏，以中和土壤的 pH 值，维持其物理状况，并减低土壤中盐分积累。

2000 年，法院下达了禁止这种做法。然后，在司法监督下，拉斐尔·加西亚·特诺里奥（Rafael Garcia Tenorio）教授组建和领导了一支来自塞维利亚大学和韦尔瓦大学的专家团队，进行了为期 3 年的田间试验，对这种做法是否有害进行了独立的 5 年科学评估。从农民的角度来看，该评估结果是积极的。根据西班牙法律，磷石膏在 2005 年被正式授予肥料地位，允许在农业中继续使用磷石膏。一个同行评审的出版物总结了磷石膏作为土壤改良剂的优势，认为磷石膏是无价的。

阶段 3：哈萨克斯坦 - 磷石膏用作退化土壤的改良剂

在 2000 年代中期，基于环保原因，哈萨克斯坦环境监管机构下令清除堆放在该国磷酸生产厂附近的磷石膏。当时总部位于阿勒颇的独立研究机构 ICARDA 被委托寻找这种材料在农业中的用途。ICARDA 证实，磷石膏可能对哈萨克斯坦西部严重退化的土壤起着极好的土壤改

良剂的作用。在苏联时期，那里的土地因集约化棉花种植而严重耗尽了营养。由亚洲开发银行资助的一项为期三年协议驱动的、经过同行评审的试验取得了非常积极的结果，作物产量最高可提高 270%。同时，这也为 Tenorio 教授及其团队在西班牙西南部所取得的工作成果提供了独立的确认，因为在当时西班牙塞维利亚大学和 ICARDA 都不了解彼此的工作。此项目的经理是 Manzoor Qadir 博士，他现在在联合国大学工作。

第 4 阶段：印度 - 政府和监管机构的领导力

大约在同一时间，在 FAI 技术总监 S. Nand 博士的指导下，印度化肥工业协会先与印度原子能委员会，后与中央污染控制委员会合作制定政策和法规框架，以消除在印度使用磷石膏不必要的市场障碍，特别是把磷石膏用于在水泥生产中。随着一份声明，此过程于 2008 年正式启动。该声明指出没有放射学理由可阻止磷石膏的使用，并使磷石膏从危险品重新分类为非危险品。随着《磷石膏管理和处理指南》的发布，2015 年印度开始不再监管磷石膏中的重金属含量。

第 5 阶段：维也纳 - 国际原子能机构评估磷石膏的放射性风险和安全

同时，受 FIPR 资助的“灭堆计划”（2005-2011 年）启发，国际原子能机构开始编写一个有关把磷酸盐行业（包括磷石膏）作为 NORM 行业的报告，后来称为《安全报告 78》（简称“SR 78”）。2013 年，该报告被发表，Tenorio 教授是报告的首席顾问之一。SR 78 对以前所有不相关的工作进行了全面综合，这是人类在方面的首次尝试。参与 SR 78 审查和编辑的国际原子能机构官员中有 Hari Tulsidas，他现在在联合国日内瓦办事处欧洲经济委员会工作。

第 6 阶段：智利圣地亚哥和伊斯坦布尔 - IFA 参与

IFA 决定将 IFA NORM/PG (自然发生的放射性物质/磷石膏)特别小组正式组建为 IFA NORM/PG 工作小组。IFA NORM/PG 工作小组向 IFA 技术委员会报告。其成立大会于 2013 年 4 月在圣地亚哥举行。

由托洛斯农业公司（Toros Agri）于 2013 年 9 月在伊斯坦布尔主办的 IFA 特设会议，将制定和发布 IFA “报告 1”的目的定为对国际原子能机构《安全报告 78》的行业回应。

第 7 阶段：新德里和巴黎 - IFA 发布“报告 1”

在 2016 年 3 月在印度新德里举行的 IFA 年度技术研讨会上，IFA 发布了“报告 1”。

阶段 8：日内瓦 - 磷石膏被归类为人为资源

2018 年，联合国欧洲经济委员会正式将磷石膏归类为“人为资源”，并根据联合国框架分类发布了重新使用此类资源的规范。

阶段 9：北京 - 中国设定 100%磷石膏使用的目标

为响应中国主要磷酸盐生产省的省级政府提出的“综合利用”磷石膏政策，IFA-中国咨询小组于 2019 年 8 月在北京决定将磷石膏列为目前中国化肥行业所面临的所有问题的重中之重。

阶段 10：巴黎 - IFA 发布“报告 2”

由于新冠疫情大流行，计划于 2020 年 4 月份在德里发布的“报告 2”被推迟到 7 月份线上发布。该活动标志着首次 IFA 磷石膏网络研讨会。

愿景寄语

愿景寄语是作者们对磷石膏作为资源的未来以及过去相关方面的个人观点。作者们都是磷石膏探路者网络中的领袖人物，并且在形成、领导和资助该领域中一些最重要的项目中发挥指导作用。



迈克·劳埃德 (Mike Lloyd):
完全消除全球所有遗留和新产磷石膏

作者

迈克·劳埃德 (G. Michael “Mike” Lloyd Jr)，佛罗里达工业和磷酸盐研究所 前研究总监

2019年4月8日，正值其诞辰90周年之际，迈克·劳埃德在新奥尔良举行的 IFA 磷石膏工作组年会上被誉为磷石膏领域的“巨人”。正是引以自豪地站在他强大的肩膀上，IFA 磷石膏工作组完成了许多工作，包括本报告。那天，在 Yasser Albassi 先生的主持下，整个 IFA 技术委员会在会议上都认可了这一荣誉。

我的磷石膏之旅和未来展望

作为 1950 年代初刚毕业的化学工程师，像大多数新专业人员一样，我的主要动机是参与有意义、有趣和有酬的工作。我父母在化肥行业工作，在这样一个家庭里长大，使我认识到化肥行业对人类福祉至关重要。但是，在我从事该行业的早年，非常清楚的是，我所选择的领域将使我终身关注如何减轻世界饥饿。到目前为止，这一直是我的主要动力。

我曾管理磷酸盐肥料生产设施多年。那时，磷石膏问题从来都不是问题。在佛罗里达州，直到 1960 年代开始扩大化肥生产时，湿法磷酸生产才开始普及。磷石膏被堆放在地上，而这被认为是磷酸生产的一部分。直到 1970 年代，随着环境运动的发展以及大量人口涌入佛罗里达，人们逐渐认识到磷石膏的迅速积累将成为该行业向前发展的现实障碍。

为了应对与佛罗里达州磷酸盐业活动有关的日益增长的环境关注，1978 年佛罗里达州立法机构成立了佛罗里达磷酸盐研究所 (FIPR)⁴⁴ (佛罗里达工业和磷酸盐研究所的前身)，以研究和开发解决这些问题的技术。法律指定给该研究所的任务之一是解决“磷石膏的处置和利用”问题。当我 1980 年加入 FIPR 并担任该所的第一任化学加工研究总监时，我很快意识到为快速增长的磷石膏库存寻找用途将是我工作的主要重点[73]。我感谢 FIPR 的第一任执行主任戴维·鲍里斯 (David Borris) 博士，让我自由地进行了这些调查研究。从一开始，对我来说，磷石膏作为制造磷肥的副产品就具有巨大的潜力。我的任务是寻找磷石膏的广泛用途，从而可以完全消耗所有新产的磷石膏和遗留的磷石膏库存，从而可以完全消除磷石膏山堆。

⁴⁴ 有关 FIPR，请参考 <http://www.fipr.state.fl.us/>

最终，这促使我支持并参与了由 FIPR 赞助的 2005-2011 年的“灭堆计划”。该计划仍然是本报告和“报告 1”中所描述的许多成功的主要因素。

当我到 FIPR 工作时，戴维·鲍里斯博士正在组织于 1980 年 11 月举行的第一届国际磷石膏研讨会，以汇集世界各地有关磷石膏的利用和处置的专业知识[74]。这次研讨会将为 FIPR 的磷石膏研究计划定义框架，并帮助 FIPR 寻找合作伙伴。作为一个资助机构，FIPR 将与它们签订合同，资助它们完成研究计划。该研讨会是一个理想的营销论坛，将 FIPR 展示为该领域应用研究的主要资金来源。它也加强了我坚定的信念，即与特定领域的专业人员和专家直接互动是最有价值的知识交流和发展知识体系的场所，甚至比出版物更有效。

最初的接触使迈阿密大学的张雯（Wen Chang）博士来到了 FIPR。作为道路施工技术专家，张博士坚信磷石膏将被证明是一种理想的具有成本效益的路基材料。FIPR 资助了张博士的工作，该工作导致出版了广为引用的著作“磷石膏的工程特性和建筑应用” [75]，并促使了在佛罗里达州建造了两条示范道路。一条路位于佛罗里达州中部波克县的帕里什路，另一条示范路紧靠北佛罗里达州白泉市的磷酸生产设施。那时这些设施由 PCS 公司（现为 Nutrien 公司）负责运营。由于张博士的研究成果，磷石膏的应用取得了重要进展。自修建以来的 30 多年来，这些道路的使用情况非常好。有关照片及详情，请参见“报告 1”的第 5 节以及国际原子能机构的“安全报告 78”（SR78）。⁴⁵

下一个开发的磷石膏应用是硫的回收。当时（1980 年代初），由于供需失衡导致的硫价上涨，这导致磷酸盐行业考虑使用弗雷施工艺（Frasch process）之外其他硫源。当时，弗雷施工艺主要用于从硫矿床中提取硫[76]。我与 Davy McKee 紧密合作，开发了一种新颖的专利工艺，与以前的 Müller-Kühne 工艺相比，该工艺显示出了巨大的希望，Müller-Kühne 工艺因效率低下和成本高昂而不受青睐。我们的新工艺，叫“圆炉排法”，能产生 9% 的硫酸，远高于 Müller-Kühne 工艺的 6%。它也能生产骨料，而不是 Müller-Kühne 工艺所生产的有问题的碳酸钙。然而，虽然成功地展示了圆炉排法的优点，但炼油厂从石油和天然气中脱硫的新要求导致硫的供应急剧增加，导致硫价格急剧下跌，这使得圆排炉工艺变得不经济。

化石燃料脱硫要求的另一个意外后果是对农业的影响。由于硫不再从大气中沉积下来，可耕作的土壤已变得缺乏这种关键养分。在英国，被称为“煤矿中的金丝雀”油菜籽作物是一种对硫的需求量很高的作物，在这时开始急剧减产。因此，人们开始研究在农业中利用磷石膏，来补偿大气中硫的减少。目前，磷石膏已在全球范围内被广泛用于农业。

到 1990 年，在第三届国际磷石膏专题讨论会[77]上，在会上发表的几乎所有演讲和报告都来自 FIPR 或来自 FIPR 赞助的研究团队，因此 FIPR 已牢固地确立了其作为磷石膏研究的全球领导者的地位。但不幸的是，随着美国环境保护署（EPA）NESHAPs 法规的发布，FIPR 在此领域的工作陷入了停顿。该法规要求将磷石膏进行堆放，并禁止几乎所有磷石膏的用途，并对磷石膏研究活动进行了严格限制。

在整个 1990 年代，我一直致力于提供证据，以使美国环境保护署（EPA）确信其制定此磷石膏法规的依据被高估了并且是错误的。我多次与 EPA 代表会谈，参加公开听证会和为各种项

⁴⁵ 请参 考 <https://patents.google.com/patent/US5049198A/en/>
<https://patentimages.storage.googleapis.com/e4/e9/e1/e63a512e096681/US5049198.pdf>

目申请赦免此磷石膏法规，但这些努力都没有取得多大成果。

同时，在 1990 年代佛罗里达磷石膏山堆发生的环境事件也很明显地表明，堆放不是可持续的情况。2002 年 Mulberry 磷酸盐公司破产，导致其磷石膏储存设施被抛弃，因此该州对该公司的磷石膏堆及其池塘水系统进行了紧急补救，这引起了人们的极大关注。通过 FIPR，我牵头成立了池塘水咨询委员会，来寻找方法解决有关磷石膏堆池塘水最终处理的巨大潜在长期责任问题。

大约在这个时候，阿莱夫集团的朱利安·希尔顿（Julian Hilton）向 FIPR 提出了一项建议，评估全球磷石膏的监管状况、生产和利用情况，以期在 50 年内消除地球上的磷石膏山堆。由 FIPR 资助的所谓的“灭堆计划”将是一项多年项目，旨在确定是否可以通过收集有关全世界安全、无害使用磷石膏的证据来改变监管机构的顽固法规。

我很高兴听到，这种努力在促进人们接受磷石膏作为一种商品方面取得了巨大成功。我欣慰地知道，一群热情而有能力的专家正在继续做我未竟的工作。2012 年从 FIPR 退休后，我感到非常欣慰地得知，在我努力建立的知识库的基础上，他人能够在全球范围内开发广泛使用磷石膏的技术。我将继续在 FIPR 兼职，以使我的经验有助于他们的工作，尤其是在磷石膏方面的工作。

我坚信，越来越多的证据以及磷石膏从废物变为资产的实际价值波动，不可避免地会导致美国环境保护署转而支持利用磷石膏而不是堆放它。衷心希望我能看到我 30 多年的职业生涯成果，能有助于磷石膏的使用在美国得到广泛接受。

尽管可能是司法干预为这种有价值的副产品的广泛使用提供了初步动力，但通过我们的努力工作提供的证据将证明磷石膏作为一种商品具有商业可行性。正是这种可行性将导致全球所有遗留和新产磷石膏的完全消费。



图 118. FIPR 磷石膏出版物的展示（1980 年代） - FIPR I 图书馆（图片由 FIPR I 提供）



图 119. FIPR 磷石膏出版物的展示（1990 年代至 2000 年代）- FIPR I 图书馆（图片由 FIPR I 提供）

加里·阿尔巴莱利（Gary Albarelli）：

1979 年以来 FIPR 作为全球磷石膏知识和信息中心的历史

作者

加里·阿尔巴雷利（Gary Albarelli）是佛罗里达理工大学佛罗里达工业和磷酸盐研究所的通讯总监。

《1978 年佛罗里达州法令》创建了佛罗里达磷酸盐研究所。该法令明确规定，该研究所的主要任务之一是寻找磷石膏的可接受用途。从成立伊始，磷石膏利用研究一直是该研究所使命的基石（图 118、119）。该研究所进行并资助的研究为该领域的全球知识库奠定了坚实的基础。它也是进一步研究全球磷石膏利用的跳板。

有关磷石膏的开创性出版物和报告

该研究所有关磷石膏的开创性出版物和报告包括：

- 磷石膏用于二次道路建设，Wen F. Chang，1989 年
- 磷石膏的工程特性和施工应用，Wen F. Chang 和 Murray I. Mantell，1990 年
- 磷石膏作为底土酸度综合症的改良剂，Malcolm E. Sumner，1990 年
- 波克县和哥伦比亚县实验性磷石膏道路的环境监测，Gordon D. Nifong 和 Jon K. Harris，1993 年
- 磷石膏的氨碳酸化过程中放射性核素的行为，William C Burnett 等，1995
- 磷石膏的微生物学和放射化学，William C. Burnett 等，1995
- 磷石膏实况调查论坛论文集，1996 年
- 美国东南部农业中使用磷石膏的经济利益，Greg Traxler，1996 年
- 开发用于盐水的经济稳定的磷石膏复合材料，Kelly A. Rusch 和 Roger K. Seals，2005 年

为了支持该研究所的磷石膏研究计划，其图书馆已积累并索引了有关磷石膏的世界范围内大量文献。该资料库构成了 FIPR 资助的“灭堆计划”的工作的基线。“灭堆计划”在获得人们对磷石膏作为一种有价值的商品的认可方面取得了广泛的成功。该资料库继续担当此角色。该研究所随时准备支持国际努力和研究，以实现“灭堆”目标。

除了涉及各种磷石膏应用的科学、技术和工程外，该研究所还开展了有关这些应用的放射学

和风险方面的研究并提供了资金。需要信息来解决任何此类问题的任何司法管辖区都可以确信此信息是权威且基于科学的。该知识库还准备支持安全使用此有价值的副产品的工作。

该研究所目前更名为佛罗里达工业和磷酸盐研究所，是佛罗里达理工大学的组成部分。该研究所将是该新生大学的研究计划发展的核心，而它也将利用大学的教职员、学生和设施（反之亦然）来振兴和扩展其作为世界知名的磷石膏研究中心的工作。

拉斐尔·特诺里奥（Rafael Tenorio）： 欧洲...为什么这么晚？

作者

拉斐尔·加西亚·特诺里奥（Rafael García-Tenorio）是西班牙国家加速器中心主任兼西班牙塞维利亚大学应用物理教授

大约 20 年前，我的研究小组，即塞维利亚大学的应用核物理研究室，当时受安大路西亚（Andalusia）政府委托，在五年期间内进行了一些非常详细和结构化的科学实地研究，以评估使用磷石膏作为盐碱土壤改良剂对环境和社会的影响。当地农民把磷石膏作为盐碱土壤改良剂，以增加盐碱土壤当地农业的使用，增加作物产量和单产。由于一些当地利益相关者反对该做法，当地政府委托我们进行了这项研究。自 1950 年代以来，当地农民一直使用韦尔瓦（Huelva）生产的磷石膏作为他们的盐渍盐沼土地的改良剂，以恢复土壤的肥力，但在 1990 年代后期，由于当地利益集团的压力和阻扰，他们开始很难获得磷石膏。这种压力是在欧盟于 1996 年 5 月 13 日颁布欧盟理事会 96/29/Euratom 指令后不久开始出现的。该指令规定了保护工人和公众健康免受电离辐射危害的基本安全标准⁴⁶。其监管范围包括监管自然发生的放射性物质（NORM）行业。在我们今天看来，该指令最初以一种非常保守的方式实施，导致了监管机构对 NORM 行业采取了不合理的谨慎态度，引起公众对 NORM 行业（包括磷石膏行业）产生了负面看法。同样，监管过程也没有考虑使用磷石膏的实际现行做法。就西班牙的农业而言，磷石膏已经使用了大约 50 年。磷石膏在建筑和工程领域中的其他用途也被忽略。

实际上，监管重点几乎全部集中在向大西洋排放磷石膏，这是 OSPAR 公约⁴⁷所禁止的做法。此指令迅速导致磷石膏被排放到地上，形成了许多“磷石膏山堆”，或者导致磷酸盐生产设施在法国、荷兰和英国等许多国家/地区的关闭。

我们的研究结果发表在领先的同行评审期刊上。经过大量研究，我们发现磷石膏无论对环境、农民本身还是对广大公众的风险都可以忽略不计，并且使用磷石膏所带来的好处远大于这些风险。政府和地方法院接受了我们的研究结果，农民又重新获得了使用磷石膏的权利。我们对磷石膏在农业和环境中的使用进行了很全面和系统的研究。虽然当时世界上还没有其他人在做这方面的研究，但我们也从世界上其他研究小组获得了类似的发现。在某种程度上，这仅仅是因为在 1996 年之前没有人对这种把磷石膏施于土壤的做法感到担忧，因此没有必要从科学的角度对其进行辩护。随着禁止向海里排放磷石膏的 OSPAR 公约的广泛影响，欧洲

⁴⁶ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1414575518651&uri=CELEX:31996L0029>

⁴⁷ 关于 OSPAR 公约，请参考 https://www.ospar.org/site/assets/files/1290/ospar_convention_e_updated_text_in_2007_no_revs.pdf

的磷酸盐行业整体上大大减少了。因此，对于少数继续生产磷酸的国家来说，磷石膏问题实际上已不再是一个泛欧问题，而已成为一个地方问题。在西班牙，尽管继续生产磷肥，但由于当地利益相关者的持续压力，在 2010 年停止了磷酸生产。

但是，总体而言，全世界的磷酸生产量正在增长，因此我们所面临的问题以及我们的各种出版物引起了国际原子能机构的注意。该机构开展了一个广泛的项目，以提供有关自然发生的放射性物质（NORM）方面的安全报告。NORM 涉及许多行业，包括磷酸盐行业。由于其国际职权，国际原子能机构能够召集来自许多国家的成员参加相关工作小组，这些成员可以开会分享有关 NORM 在当时还是相对未知的、很少探索的领域里的知识和经验。

国际原子能机构组织了不同的技术协调和专家咨询会议，首先评估包括我们的研究在内的现有证据，然后在结论变得明确之后，准备有关在全世界按“分级方法”生产的磷石膏的安全、有益用途的明确信息。这些文件首先经过同行评审，然后由国际原子能机构通过其正常渠道传播。然后，在其成员国批准后，该过程以专门针对磷酸盐行业的国际原子能机构安全报告 78 [2]的发布而告终。在“安全报告 78”（SR 78）中，整整一章专门讨论磷石膏，将其定义为磷酸生产的“副产品”，其中也有专门讨论健康、安全和环境等方面的章节。这为监管机构提供了指导。该参考了许多的案例研究，列出了磷石膏的使用选项，特别是在农业、道路建设和建筑中的使用选项。

这份 2013 年国际原子能机构安全报告[2]是一个非常重要的里程碑。它为国际肥料协会近年来对磷石膏课题的明确参与和支持铺平了道路。该协会在 2016 年发布了自己的里程碑报告 - “报告 1”。但是，也许是因为在此报告发布之时，大部分欧洲磷酸盐工厂已经关闭，因此欧洲监管机构并不急于修改它们以前执行美国环境保护署于 1989 年对磷酸盐行业施加的非常严格的限制条件的做法，主要是因为它们没有紧迫的需要。

如今，欧洲的局势已发生根本变化。政策制定者已经意识到，面对许多关键材料供应安全的不确定性，包括目前被归类为“关键材料”的磷矿石，欧洲经济是何等的脆弱。而且，根据循环经济行动计划，现在越来越需要保存原生资源，并在尽可能的情况下使用磷石膏等“可重复使用的原材料”，而不是使用原生资源。自 1990 年代以来，有关磷石膏的误导政策已导致一系列事件，这些事件对我们现在意识到需要保护的行业造成了很多不必要的、基本上可以避免的损害。但是，事后了解这些知识为时已晚。我的反思集中在我自己和我的团队在欧洲的经历，原因很明显，因为我们的科学、文化和社会生活都生活在欧洲社会中……但是我希望我们能传达我们通过艰难方法已了解的一些教训，以防止其他国家犯同样的错误。在磷酸盐工业是经济的主要支柱之一的国家中，这尤其重要。我们许多地中海沿岸邻国的情况就是如此。在这些国家里，磷石膏作为一种可重复使用的资源在农业和建筑中有许多应用。科学总是试图保持平衡和中立，但我了解到有时它必须传达一些尖酸的、批评的信息，而不仅仅是公正的信息。

曼祖尔·卡迪尔（Manzoor Qadir）：

2070 年磷石膏的状况

一个没有磷石膏山堆的世界

作者

曼祖尔·卡迪尔（Manzoor Qadir）博士是联合国大学水、环境与健康研究所副所长

通过对磷石膏的命运进行具有里程碑意义的科学风险评估，《磷酸盐工业安全报告》[2]不再将磷石膏视为废物，而是将其归类为磷酸生产的副产品。这为磷石膏在不同行业里使用清除了主要障碍。

随着磷石膏被重新分类为副产品，人们越来越多地将磷石膏视为一种资源，可以为当前的全球可持续发展进程提供各种有价值的用途和贡献，如《2030年可持续发展议程》、旨在解决气候变化威胁的《巴黎协定》、《联合国防治荒漠化公约》和旨在保护和维持生物多样性的《生物多样性公约》。

尽管整个世界都在将磷石膏应用于不同部门（尤其是农业）方面取得了进展，但我们仍然远远没有完全消费每年生产的所有磷石膏，更不要说那些遗留下来的磷石膏山堆了。目前，约有三分之一每年生产的磷石膏被使用，而其余的三分之二仍被堆放到磷石膏山堆上。但是，如 IFA “报告 1” [1]所示，磷酸盐行业使用了其生产的磷石膏的大部分，该行业也有亮点。展望未来，有两种主要管理磷石膏的途径。首先，最大限度地减少每单位磷酸生产所产生的磷石膏数量；第二，为最大限度地利用磷石膏进行规划和实施，使磷石膏使用量超过其年产量，随后开始清理遗留的磷石膏山堆。

据估计，到 2006 年，全世界磷石膏山堆中已经积累了大约 26-37 亿吨的磷石膏。随着每年生产的磷石膏的大部分（大约每年 1.09 亿吨 [1]）仍被扔到磷石膏山堆中，到今天磷石膏堆放的数量可能已增长到约 40 到 51 亿吨，平均可能约为 45 亿吨。

磷石膏在农业中的使用量仅占总使用量的 8%，而其主要用于建筑（40%）和其他领域（52%），例如用于建筑材料、垃圾填埋和道路建设。鉴于在农业和绿化中使用磷石膏具有明显的好处 [35] [39]，因此有必要增加在农业中使用磷石膏的比例。

磷石膏在农业和林业系统中的使用可以通过以下方式进行扩展：

- （1）用作土壤改良剂，用于盐碱化退化土地的修复，从而增加农业产量、碳、土地价值以及经济和生计收入
- （2）用作制造人造土的主要材料，用于培养高产人造林，隔离更多碳，产生更多绿色能源或木屑，以及促进生态系统多样性
- （3）用作盐水灌溉系统中的水质保护物质，以减轻作物生产和农林业系统中的盐分效应，从而节约用水，促进土壤固碳，增加可再生能源和农产品的生产，以及促进作物多样化
- （4）用作开发增值肥料的基础材料
- （5）用作农业土地保护材料，在易受侵蚀的土壤周围形成堤防和保护
- （6）用作许多其他部门提供益处的催化剂，例如磷肥行业、运输行业、营销企业、基础设施行业，以及涉及农业商品和农业机械的贸易行业等。

到 2070 年，看到一个无磷石膏山堆的世界是可能的，但是要看到这种情况真实地发生，有必要积极促进和实施一个在农业、农林业、土地开发和保护、建筑和建材、道路等领域使用磷石膏的商业上有益的模式。

S.NAND:

磷石膏的机会

作者

S. Nand 博士是印度化肥工业协会技术总监

土壤中的硫缺乏

印度土壤普遍缺乏硫。根据 2019 年 5 月发布的最新估计，印度 40% 的土壤缺硫[78]。

硫对油料种子和豆类作物的重要性是众所周知的。在印度，硫的施用是通过施用各种含硫肥料进行的。其中最突出的含硫肥料是单一的超磷酸盐（SSP）、磷酸铵（APS）复合物和硫酸铵（AS）。矿物石膏和磷石膏既可用作土壤改良剂，又用作硫的来源。在 2018-19 肥料年度，印度农业中的硫施用量约为 75 万吨。对硫的市场需求中仍有很大的增长空间。即使通过磷石膏将所需的 50% 的硫提供给印度土壤，每年在农业上的磷石膏需求量也将超过 200 万吨。

目前化肥享受政府补贴。化肥产品中每公斤硫享受 3.56 卢比的补贴。磷石膏每吨至少含 150 公斤硫。磷石膏的等价补贴将有助于支付造粒成本。粒状磷石膏（参见 Zypmite，第 4.2.5 节）将易于运输并易于应用于田间。

印度政府临时批准了以下用于农业的磷石膏规格（表 27），供应商和农民每三年进行一次定期监测。

表 27. 磷石膏（颗粒状）

1.	水分含量，重量百分比，最大值	15.0%
2.	钠含量（以 Na 计），重量百分比，以干基计的最大值	0.75%
3.	颜色	浅绿色
4.	粒度	不少于 90% 的材料应通过 4 毫米 IS 筛，并应留在 1 毫米 IS 筛上。不多于 5% 应通过 1 mm IS 筛
5.	硫含量（以 S 计），重量百分比，以干基计的最低值	13.0%
6.	硫酸钙脱水含量，重量百分比，以干基计的最低值	70.0%
7.	氟化物含量（以 F 计），重量百分比，最大值	1.0
8.	重金属含量（以 mg/kg 计）最大值	
	铅（Pb）	100.0
	镉（Cd）	5.0
	铬（Cr）	50.0
	镍（Ni）	50.0
	砷（As ₂ O ₃ ）	10.0
	汞（Hg）	0.15

位置和物流

除一厂外，印度所有磷酸厂均位于沿海。消费区远离生产设施，因此在搬运、存储和成本方面，磷石膏运输都是一个挑战，阻碍了磷石膏市场的增长。磷石膏的制粒可方便它的运输和

在农业中应用。Zypmite 就是这方面的一个例子。它也含有植物所需的微量营养素，但同时也增加了成本。成本的增加使农民可能不容易接受它。原因之一是主要的含硫肥料由印度中央政府补贴。几个州政府将补贴范围扩大到天然石膏的使用。但是中央或州政府都没有为用于农业的磷石膏提供补贴。

市场和监管约束

任何进口材料都将面临同样的问题。印度各地的磷石膏库存已经很高。因此，进口磷石膏在经济上可能并不可行。此外，可能需要获得特定许可才能将磷石膏进口到印度。此外，任何打算在农业中用作肥料的产品都必须事先获得批准，并包含在肥料控制令（FCO）中。目前，进口的磷石膏不允许用于农业。因此，在进口磷石膏或任何含磷石膏的增值产品之前，必须先对弄清楚相关监管法规。

政策杠杆

磷石膏在农业和建筑材料中的利用潜力正在增加。中央/州政府的政策支持可以加快此自然资源的利用，并鼓励循环经济。

Hari Tulsidas:

价值创造和对联合国可持续目标的遵守：100%使用磷石膏的途径？

作者

Hari Tulsidas 是日内瓦联合国欧洲经济委员会的技术官员

背景

我对人为资源（例如磷石膏）的分类和管理特别感兴趣，因为在移居日内瓦之前，我曾担任国际原子能机构维也纳办事处的技术官员 7 年，并且是国际原子能机构负责编写“安全报告 78”的团队成员之一，包括负责编写有关磷石膏的章节[2]。

我的国际原子能机构同事 Shaun Guy 出席了在 2012 年塔什干举行的 IFA PG/NORM 工作小组的里程碑式会议，并在那次会议上向与会者介绍了预出版形式的“安全报告 78”（简称“SR 78”）。当时，我担任国际原子能机构的技术官员，并且是负责该报告最终审阅和发布的内部团队成员之一。鉴于 SR 78 强烈鼓励对磷石膏的有益使用，我特别高兴能够为这份最新的 IFA 报告做出一点贡献，因为它显示了自 2013 年 SR 78 发布以来行业朝着“目标”所取得的进步。这个目标就是 100%使用当前和未来生产的磷石膏，而且还完全消费遗留的磷石膏。

我也钦佩看到，埃辛·米特女士 2014 年 1 月在沙姆沙伊赫的的讲话发挥领导力的方式受到了关注，尤其是从联合国的角度来看，她为在即将到来的可持续发展目标的背景下为达到磷石膏使用的目标设定了框架。因此，在这种背景下，我强烈鼓励该行业继续朝着充分利用磷石膏的宏伟目标迈进。联合国将尽其所能协助它去实现这个目标，包括寻找适当的方式与行业合作实施适当的大型项目。

磷石膏和井底之见

磷石膏之所以不能正常地用于数百种生产性用途，是因为人们因磷石膏含有极少量自然发生的放射性物质（NORM）而井底之见地夸大了磷石膏的使用风险。在大多数情况下，磷石膏

的放射性水平等于或有时甚至小于天然土壤。如果始终采用有关风险的推理，我们将不得不对自然状态下的大片土壤进行补救，或者干脆完全放弃农业。我在加入联合国欧洲经济委员会之前曾为之工作的国际原子能机构提倡对自然发生的放射性物质进行分级管理，并将任何低于 1Bq/g 的物质不作任何监管要求。监管机构可以简单地将此类磷石膏宣布为“不在监管范围之内”。即使一种物质的放射性略高于 1 Bq/g，也并不应视其不适合用于生产性应用，因为 1Bq/g 仅仅是监管机构可以考虑进行监管的一个阈值。在世界上任何地方，只有一小部分的磷石膏的放射性超过 1 Bq/g，并且即使具有更高的放射性水平（例如 1.1 Bq/g 或 1.2 Bq/g）时，按照国际原子能机构基本安全标准，此类材料也可以获得监管豁免[6]。

发现磷石膏的长期价值

我们的星球面临许多挑战，例如气候变化、生态系统退化、水体退缩和不平等加剧。但是，所有这些中最重大的困难都围绕着食物-能源-水（FEW）关系。我们如何才能确保地球上每个居民以及所有相互依赖的生态系统的食物、水和能源供应的安全性和可及性？能否将磷石膏作为一种丰富的人为资源⁴⁸投入使用，以解决其中一些基本问题？

到 2050 年，要确保约 100 亿人的食物和数万亿只动物的生存是一项巨大的挑战。其中，磷石膏肯定会发挥作用。磷石膏不仅提供植物营养，还可以修复或替代土壤。

磷石膏可以用作土壤改良剂，以增加某些土壤的生产力，也可以用作土壤替代品，以恢复受到严重土壤侵蚀影响的地区。

气候变暖是否可以通过昂贵地转向可再生能源或栽种一万亿棵树来解决？⁴⁹印度和埃塞俄比亚最近证明一天可以种植几亿棵树。如果可以用磷石膏开垦荒地，那么植树运动就可以抢先了，使用磷石膏养育的绿化带和公园可以在城市和市心出现。全球气温上升蒸发了土壤里的水分，因此促进了沙漠化。而磷石膏具有更好的保水能力，可用于阻止沙漠化。它被用于大规模的生态系统恢复，以重建水体和沼泽。通过巧妙地使用磷石膏可以实现水的净化和储存。不易获得清洁能源仍然困扰着世界上的大量人口。增加基于化石燃料的能源生产可能不利于减缓气候变化，而基于磷石膏的生物能源生产可能会减少碳排放。

用于价值创造的创新资源管理工具

当联合国欧洲经济委员会在为磷石膏寻找可持续解决方案做出贡献时，与 IFA 成员一样它也遵循如下三项核心原则：引领、创新和合作。通过创新的公私合作伙伴关系进行合作，为联合国资源管理系统（UNRMS）的发展提供了支持，以满足在战略方案级别或战术项目级别建立更好的全球资源管理框架的需要，包括诸如磷石膏等次要资源。该框架适用于所有资源，可以轻松地适应磷酸盐的生命周期管理。表 28 显示了重新设计的磷石膏路径的示例。

⁴⁸ 联合国欧洲经济委员会在联合国框架分类中将磷石膏分类为“人为/二次资源”，

https://www.unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pdfs/UNFC/Anthropogenic_Resources/UNFC_Antropogenic_Resource_Specifications.pdf.

⁴⁹ 想应对气候变化吗？种植 1 万亿棵树。 <https://www.livescience.com/topics/climate>

表 28 中提供的途径可以同时是决策和资源管理的框架，也可以是资本分配的工具。在资本市场上，投资者正在从传统工具中撤出，越来越多地转向有影响力的投资，例如“绿色债券”或“气候债券”。磷石膏利用的重点是将其应用于食物-能源-水（FEW）关系，这可能是吸引此类资金的机会。联合国和行业需要高层合作，以量化磷石膏利用的商业机会并确定其社会和环境效益。这包括对全世界所有可用的磷石膏进行准确的清点，分析在解决 FEW 挑战时可能面临的使用场景，以及关于可能结果的信息。这项研究将有助于该行业重新发现磷石膏，并从积极利用磷石膏中创造财富。

表 28.已签署的磷石膏途径[79]

步骤	市场参与途径	核心工具	商业评估	PPP 项目的原则和目标
1.	技术可行性	在食物-能源-水关系领域的磷石膏利用率范围研究	破坏性或增值（优化）潜力；初始实验室评估和单次或批测试	提高可持续性，和/或遵守可持续发展目标（SDG），例如减少二氧化碳排放量以实现绿色经济；防治荒漠化；推进食物-能源-水关系目标
2.	法规和社会的可接受性	符合针对风险的“分级方法”的生命周期管理流程图和相关材料的流量分析，尤其是来自放射性核素和重金属的风险	深入的实验室评估 - 可复制性/标准化、符合安全限值的可靠表征、连续测试	与所有利益相关者互动 ，不管他们直接参与 PPP 项目还是可能直接或间接地受到《经营的社会许可或知情同意》影响
3.	商业可行性/工业能力	项目准备清单/具有资源进度和资本投资决策流程，包括符合可持续发展目标（SDG）的市场研究（例如可行性）和业务模型创新	概念验证 - 商业规模：在高级或最终状态下，可扩展级别（4,000 小时）的试点项目，可以满足定义的性能标准	具有可复制性，因此可以扩大 PPP 项目并实现《2030 年议程》要求的转型影响。此标准还需要考虑到当地员工和政府是否已经接受了必要的培训以进行类似的项目
4.	政治愿望	详细的可行性研究 - 新商业规模项目的计划和实施	经验证的商业潜力；RD3 第 4 阶段，工程和采购规范到位；可提供施工合同招标；有投资保证，可衡量的潜在价值（资本支出（资产）和运营支出（现金流量））；第 4 个决策门	增加获得机会并促进公平 ，这意味着应增加人民，特别是社会和经济上的弱势群体获得基本服务的机会，例如水和卫生、能源等。此外，以人为本的公私合作应旨在促进社会正义，并在任何情况（无论什么种族、信仰等）下使基本服务无障碍获取。
5.	市场参与	行业基准、可复制的项目和最佳实践	在市场（可持续业务）中；客户群/可靠的承购协议；实际价值释放；资产回报率（股权增长）和/或投资回报率（正现金流量）	提高（证明）项目的经济效率 。通过消除障碍或通过将团体整合到全球市场来建立新的机制，使项目必须获得成功，实现物有所值并产生可衡量的影响

隐藏的宝藏：重新设计磷石膏途径

短期主义，或过分关注即时收益，可能是过去生命进化所形成的一个范式。由于没有出色的大脑记忆能力来记住过去或展望遥远的未来，因此为生存而立即采取行动变得至关重要。当

面临威胁时，逃避威胁是理想的捷径，而不是对威胁产生根本原因的长期思索。促使立即采取行动的基因逐渐增多并占主导地位。现代人的大脑有能力做得更好，例如研究一般模式，查看因果关系，并进行规划以获得预期的收益。作为工具制造者本身标志着未来主义思维的开始。但是，短期主义的进化伪影仍然主导着人类的行动。

短期线性到长期循环

在许多情况下都需要争取快速结果。但是，它们通常会留下需要很长时间才能展现出来的问题。系统思考方法将拖延作为必要部分。使用达到所需目标的最快路径，而这可能需要花费更多的精力。从长远来看，当无数次重复执行此任务时，额外的能量需求可能会危及生命。工业废物的生产是捷径的一个例子。自工业革命开始以来，它就已经蒙蔽了我们的文明。我们今天面临的所有问题，无论是环境污染还是全球变暖，都是短期思想的结果，这种思想忽略了微小的后果，也没有考虑到拖延。

将磷矿石制成可被植物迅速吸收的水溶性产品是工业革命的奇迹。有多种方法可以实现水溶性目标，其中最短、最具规模的是“湿法”硫酸消解。如果从一开始就将磷石膏的地位正式确定并用作副产品，那么生成的 1:5 比例的磷酸和磷石膏可能不会给该行业带来任何困难。

但是磷石膏被丢弃了。通常一开始它被丢弃在水里，但最终被丢弃在陆地上。在陆地上它迅速积累，从而成为问题。如果资源管理系统中内置了“暂挂存储，有待最终使用”的概念，那么即使这可能也不是问题。但是事实并非如此。磷石膏堆积在堆场里，或者被抽到海洋里。

但是，天然物料流中没有废物。一个周期的产品和副产品成为另一个周期的资源。未吃的食物会变成肥料，为进一步的食物生产提供营养。什么都不会丢失，一切都会进入另一个循环，这是循环性的基本设计。

迈向 100% 磷石膏使用：下一步？

满足联合国可持续发展目标 - 磷石膏在 2020-2030 年及以后的关键作用

在 2015 年末，193 个国家元首同意将《2030 年可持续发展议程》（2030 年议程）付诸行动，其中包括“联合国可持续发展目标 17”。《2030 年议程》起源于著名的布伦特兰委员会的报告《我们的共同未来》（1987 年）[81]、《21 世纪议程》（1992 年）和《里约宣言》（1992 年），是《千年发展目标》（2000-2015 年）的延续。

正如 IFA 主席埃辛·米特（Esin Mete）女士在 2014 年提到的那样，“联合国可持续发展目标”为化肥行业提供通过提高资源利用效率和获得经营的社会许可证参与可持续发展运动的绝佳机会。在很大程度上，这是通过使用磷石膏而不是堆积它而实现的，这表明矿物肥料行业更普遍向可持续发展过渡。

在意识到为 100% 磷石膏使用寻找解决方案方面存在明显挑战的同时，不容忽视的是，只有与行业和公共机构的整个合作伙伴关系进行一致而持续的努力，才有可能实现这一目标。联合国系统现在将《2030 年议程》作为其核心使命，这也是呼吁所有利益相关者、决策者、监管机构、行业、民间社会组织和社区一起采取行动。联合国系统随时准备支持利用磷石膏的所有举措，特别是那些有助于粮食生产、脱碳和防治荒漠化的举措。随着世界朝着“联合国可持续发展目标”迈进最后一步，当务之急是行业和公共机构共同采取大胆的步骤，以达

成一项承诺的路线图，以在 2030 年前实现磷石膏的全部使用。历史将是判断行业领袖和政府将如何致力于今天的这一转型步骤。

行业与联合国之间的合作项目？

在全球范围内，越来越多的政策和法规压力促使人们去计划和执行 100% 磷石膏的使用，最终实现了循环经济目标，即零废物排放和对人类或地球零伤害。这种项目的范围将如何制定和实施？

从磷酸盐生产者的角度来看，人们也许很容易忘记，实际上有不止一种工业废渣石膏。其中最广泛生产的工业废渣石膏是一种煤基能源生产的副产品，即通过烟气脱硫（FGD）获得的烟气磷石膏。仅在中国，燃烧化石燃料以生产能源每年就产生将近一亿吨的 FGD 石膏（参见案例研究），相比之下，在中国每年生产的约 8000 万吨磷石膏看起来不那么多了。在中国，磷石膏将如何在二次资源石膏市场中占据一席之地？它在某些市场是否具有优势？例如它含有 P_2O_5 。这些优势能否可能为它带来竞争优势？

磷石膏虽然在某些加工形式仍被作为废物进行管理，但无论是来自磷酸盐行业还是燃煤能源行业的石膏都是海量的，并且有潜力在当今世界面临的一些最大挑战中发挥作用。例如利用石膏将广泛的荒漠化或退化的土壤转变成可耕种作物的肥沃土壤或造林的生长介质（案例研究 1.1、1.2、1.3、1.4）。

施用磷石膏可以改良土壤和修复受损的钠质土壤，以用于农业生产（参见案例研究 1.4）。磷石膏还有其他许多应用，包括道路建设（案例研究 3.1、3.2、4.2.2）、建筑材料（案例研究 2.1、2.2）、创新肥料（案例研究 4.2.2），以及墙板、硫磺回收、海洋屏障建筑和陶瓷（案例研究 2.2）。

在使用任何工业所产生的二次磷石膏资源（特别是磷石膏和 FGD 石膏）时，必须要参考经验证的方法进行妥善管理，以优化社会、经济和环境效益。在许多地区，人们不知道或忽视这种科学的、循证的管理方法；而在其他地区，人们最多部分使用它。尤其是在全球范围内来看，人们很少使用这种方法来管理二次磷石膏资源。“报告2”旨在使生产商及其客户知道哪些方面可行、什么是安全的以及什么可以被视为一种良好实践，从而提高人们意识的一致性。

填补知识空白

关于当代科学和技术的知识鸿沟不仅仅是生产者和消费者所面临的挑战。监管机构通常不了解情况，因此往往会过度监管。这违反了国际原子能机构在“基本安全标准（BSS）” [82] 中所规定的核心比例原则。地方/地区政府与国际咨询或监管机构（例如国际原子能机构）之间的不一致和不和谐已成为大问题。但迄今为止，不同行业生产商往往把他们生产的不同类型石膏存放在地下储存室，部分原因是这些石膏副产品与他们的核心业务缺乏互动，部分原因是因为担心磷石膏有放射性（含有自然发生的放射性物质）。正是这种担心促使人们把磷石膏不公正地归为危险品。这些障碍很难克服。

每种来源的石膏都有其缺点。FGD 石膏来自化石燃料的燃烧，并且还含有残留的重金属。甚至天然石膏也无法摆脱类似的恶名。天然石膏被亚硫酸盐污染，这在美国引起广泛的有关石膏墙板的争议，涉及结构和健康后果。

全部石膏资源的综合管理

理想情况下，天然和二次石膏资源应作为一个资源连续体进行管理。适当使用石膏的决定将基于石膏的特性和分级方法，并取决于来自每个天然矿床或矿山、每个能源生产厂或化学加工厂的石膏的独特特性。可持续性规划应基于对石膏存储和生产数量的准确量化，以及与适当的应用和运输物流能力相匹配的区域石膏需求。有效的管理要求不断更新石膏连续体的物理、化学和放射学特征数据库；石膏数量、剂量和规格（按应用划分）；以及基于石膏使用的石膏生产地的空间数据。

数据库必须随附详细石膏应用质量协议和适用于最常见的大规模石膏应用的最佳可用技术的同行评审手册。例如，可以把现有库存的或新产的磷石膏与来自其他行业的石膏相混合，以生产用于特定用途的最佳石膏。也可以修改原来的生产工艺流程，以生产更适合一种或多种应用的石膏，就像普瑞昂集团在磷酸盐行业所做的那样（案例研究 2.1）。磷石膏和其他副产品的混合物，例如来自铝土矿和氧化铝加工所产生的赤泥，将在新的循环经济中找到一席之地。

一个好的第一步是召集一个行业协会代表大会，讨论与石膏生产和使用有关的问题，提高对每年生产的石膏种类和数量的认识，并让各石膏生产商有机会表达他们的担忧。预计主要石膏生产商为天然石膏开采企业、能源生产企业和磷肥生产企业。

以下是根据分级方法将石膏源与适当的应用和使用地点进行匹配所需的一些信息示例。

年度石膏产量和预测

所有石膏资源的全球清单应每年更新。

1. 各国家和公司生产的石膏类型（天然石膏、FGD 石膏、磷石膏）
 - a. 吨/年（按国家和公司）
 - i. 当前
 - ii. 十年期的预测供应/需求。

库存清单

通过列出可用磷石膏的详细清单，将极大地促进石膏生产企业采用泛系统管理程序来管理他们生产的磷石膏。在循环经济中，这些磷石膏可用作可重复使用原料。此类清单的数据参数包括：

1. 全面的基于协议的采样和表征
2. 应按石膏类型和位置盘点储存设施/库存中的石膏数量（吨）
3. 通过取心和分析，绘出封闭的遗留石膏堆的空间剖面。

物理特性

1. 石膏的晶体结构（使用扫描电子显微镜）
2. 溶解度
3. 稻草覆盖、过滤。

化学和放射学性质

1. 放射性概况

- a. Ra-226、Th-232、K-40 放射水平，以 Bq/g 表示
- b. 使用 HPGe 进行测量
2. 痕量金属和准金属
 - a. Pb、Cd、As、Mg、Hg、Cr 等，以 ppm、ppb 或 ppt 表示
 - b. 使用 ICP-MS 进行测量
 - c. 感兴趣的化合物，例如磷酸盐或亚硫酸盐。

主要应用

1. 钠质土修复（特别适用于 P_2O_5 含量高（即 0.5% 以上）的磷石膏）
2. 道路修建
3. 建筑材料（特别适用于 P_2O_5 含量不超过 0.5% 的磷石膏）。

区域需求

1. 与应用匹配的命名区域
2. 接近所需量的适当石膏源
3. 应用人工智能技术根据应用、使用地点和物流优化石膏源和混合方法：
 - a. 为应用优化石膏特性
 - b. 优化运输成本
 - c. 根据社会、经济和环境标准优化收益。

所需的信息资源

编写后，就可以为所有类型石膏和相关资源的全球用户开发和维护一个数据库、手册和应用工具“活”网站。

如果从整体上考虑石膏的全球社会、经济和环境利益，很明显应该考虑建立和维护一个全球石膏资源管理系统。根据本报告的核心原则，应采取各相关方之间的协作和创新伙伴关系的形式，其中各相关方包括主要利益相关者、行业、联合国有关机构、国际卓越科技中心，以及与标准和石膏使用最佳做法的一个或多个方面有关的监管机构/政策制定者。出发点在决策和监管趋势中是显而易见，如以上表 1 以及本报告所有案例研究所示。

第 4 部分 结论

直接或间接影响磷石膏的政策和法规框架的重大变化,例如“可持续发展目标”的遵守情况、过渡到循环经济、气候行动或零废物排放,都能使“100%磷石膏利用”目标变得更容易实现,无论从市场需求角度还是作为法规要求。但是,要想为实现此目标规划一条切实可行的、商业上可持续发展的途径,就需要政府(决策者和监管机构)和工业界做出持续不懈的努力,以在不给运营商造成过渡压力的情况下及时实现此目标。没有地方比中国更如此了。中国是世界最大的磷石膏生产国。中国现在也要求完全实现“100%磷石膏利用”目标,但目前仍处于不确定的运营框架内。

但是,监管机构不仅从安全、健康和环境的角度开始学习如何监管磷石膏的使用,而且还开始将磷石膏视为循环经济中的一种可重复使用的主要资源,并与磷石膏运营商建立合作伙伴关系。如果要从 1980 年代和 1990 年代大多数欧洲磷酸盐生产商的倒闭中吸取什么教训,那么此教训也许是基于有缺陷的理论和与行业缺乏协商的监管制度可能会导致不必要的工作流失。现在的结果是显而易见的:创造必要的经济条件,来使磷酸盐资源归类为对欧盟经济来说“关键的材料”。这样的结果应该避免在其他地方出现。随着欧盟监管机构对《2019 年循环经济行动计划》的认可,在新的“循环”经济模型中,甚至监管的目的都需要重新思考。这意味着首先要与所有利益相关方合作,询问如何在充分遵守零废物排放和零危害的法规的前提下最好地实现循环经济。答案必须基于共同的价值观以及在零废物排放和零伤害情况下给人类、地球和繁荣带来透明、公平利益的实施过程。

答案还必须基于事实和证据。为此,运营商应首先与独立的科技卓越中心合作对他们的磷石膏产品进行的彻底采样、表征和分析,以建立技术和科学证据基础,然后在此基础上制定 100%利用磷石膏的计划。这投资能产生相关的《安全数据表》和《质量协议》,表明行业及其合作伙伴具有提供和维持磷石膏 100%安全、有益使用的能力和技术。运营商还应认识到,他们必须无限期地继续监视他们所做工作对环境和社会的影响。“报告 2”中有关磷石膏在农业/林业、建筑材料和道路建设中应用的案例研究,展示了用于评估磷石膏大规模应用机会的成熟知识和方法,以及成功的合作策略。这无疑使这些案例具有适当的参考示范价值。

现在,所有采矿和加工业已经达成广泛共识,他们需要编写一份新报告,来讲述他们的磷石膏使用案例和成功故事。负责编写“报告 2”的国际肥料协会磷石膏工作组已经在 2018 年 4 月于马德里举行的年度会议上达到了这一意向。创造这样一个报告的第一步是让行业以一种新的方式来谈论磷石膏。“报告 2”表明它正在这样做,重新定义了磷石膏的未来,并本着信任、信心和现实主义的精神这样做。

此过程仍在进行中。在“报告 2”发布之前的 40 年中,已经进行了大量的智力和金融资本投资。现在,如“报告 2”所示,该投资的多重收益的规模和性质正在明显显现。磷石膏作为副产品和资源的固有用途和价值得以确立。磷石膏利用所提供的更大机会是将长期用于堆放磷石膏的珍贵土地重新恢复为生产性用途的土地。

如果考虑到如果我们现在不采取这些行动我们将给子孙后代所造成的外部成本,那么现在只有一个选项来定义未来 - 抓住综合利用磷石膏的机会。

缩写和缩略语

缩写和缩略语	英文	中文
AFA	Arab Fertilizer Association (http://www.arabfertilizer.org/)	阿拉伯化肥工业协会 (http://www.arabfertilizer.org/)
ALARA	As Low as Reasonably Achievable	合理可行的最低限度
Bq	Becquerel	贝可勒尔 (放射性活度单位)
BSS	Basic Safety Standards (IAEA) (https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1578_web-57265295.pdf)	基本安全标准 (IAEA) (https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1578_web-57265295.pdf)
Ca	Calcium	钙
CaCO ₃	Calcite	碳酸钙, 方解石
CBA	Cost-Benefit Analysis	成本效益分析
CBR	California Bearing Ratio	加利福尼亚承载比
CEC	Cation Exchange Capacity	阳离子交换能力
CO ₂	Carbon dioxide	二氧化碳
CPCB	(India) Central Pollution Control Board	(印度) 中央污染控制委员会
CRRI	(India) Central Road Research Institute	(印度) 中央道路研究所
CSR	Corporate social responsibility	企业社会责任
CRR	Comprehensive Resource Recovery	综合资源回收
CX	Comprehensive extraction	综合提取
DAP	Diammonium phosphate	磷酸二铵
EC	Electrical conductivity	电导率
EC	European Commission	欧洲委员会
EFCA	Environmental Full Cost Accounting	环境全成本核算
EMP	Exchangeable magnesium percentage	可交换镁百分比
EOL	End of Life	寿命终止
EOW	End of Waste	废物终结
ESIA	Environmental and Social Impact Assessment	环境与社会影响评估
EU	European Union	欧盟
FA	Fly ash	粉煤灰
FAI	Fertilizer Association of India (https://www.faidelhi.org/)	印度化肥工业协会 (https://www.faidelhi.org/)
FAO	Food and Agriculture Organization (http://www.fao.org/home/en/)	联合国粮农组织 (http://www.fao.org/home/zh/)
FE	Fertilizers Europe (https://www.fertilizerseurope.com)	欧洲肥料协会 (https://www.fertilizerseurope.com)
FEW	Food-Energy-Water Nexus	食物-能源-水关系
FGD	Flue-gas desulphurization (of coal to make gypsum)	烟气脱硫 (燃煤烟气脱硫所得的石膏)

FIPR	Florida Industrial and Phosphate Research Institute (http://www.fipr.state.fl.us)	佛罗里达工业和磷酸盐研究所(http://www.fipr.state.fl.us)
FSA	Fluosilicic acid	氟硅酸
FSP	Fundamental Safety Principles	基本安全原则
GHG	Greenhouse Gas	温室气体
H3PO4	Phosphoric acid	磷酸
HAP	Hazardous air pollutant	有害空气污染物
HDPE	High density polyethylene	高密度聚乙烯
HF	Hydrogen fluoride	氟化氢
HSE	Health, safety and environment	健康、安全和环境
IAEA	International Atomic Energy Agency (https://www.iaea.org)	国际原子能机构 (https://www.iaea.org)
ICRP	International Commission on Radiological Protection (http://www.icrp.org)	国际放射防护委员会 (http://www.icrp.org)
IFA	International Fertilizer Industry Association (https://www.fertilizer.org)	国际肥料协会 (https://www.fertilizer.org)
IMO	International Maritime Organisation (http://www.imo.org/en/Pages/Default.aspx)	国际海事组织 (http://www.imo.org/en/Pages/Default.aspx)
IPCC	International Panel on Climate Change (https://www.ipcc.ch)	国际气候变化专门委员会 (https://www.ipcc.ch)
IRP	International Resource Panel (https://www.resourcepanel.org)	IRP 国际资源小组 (https://www.resourcepanel.org)
ISA	Interim Storage Area	临时存储区
ISF	Interim Storage Facility	临时存储设施
K	Potassium	钾
LCA	Life-cycle Analysis	生命周期分析
LNT	Linear No-Threshold	线性无阈值
MAP	Monoammonium phosphate	磷酸一铵
MDD	Maximum dry density	最大干密度
MFA	Materials Flow Analysis	物料流分析
Mg	Magnesium	镁
MOP	Muriate of potash	钾肥
MSDS	Materials Safety Data Sheet (see SDS)	材料安全数据表 (请参阅 SDS)
mt	Million (metric) tonnes	百万吨
NORM	Naturally Occurring Radioactive Material	自然发生的放射性物质
ODT	Oven dried tonnes	烘干吨
OHS	Occupational health and safety	职业健康与安全
OMC	Optimum moisture content	最优水分含量
P	Phosphorus	磷
P2O5	Phosphorus pentoxide (phosphoric acid) industry term for H3PO4	五氧化二磷 (磷酸) 磷酸的行业术语
PA	Phosphoric acid	磷酸
Pb	Lead	铅
PG	Phosphogypsum (calcium sulphate CaSO4•nH2O)	磷石膏 (硫酸钙 CaSO4•nH2O)
PGWG	Phosphogypsum Working Group	磷石膏工作小组

Po	Polonium	钋
PR	Phosphate rock	磷矿石
QP	Quality Protocol	质量协议
Ra	Radium	镭
REE	Rare earth elements	稀土元素
S	Sulphur	硫
SD	Sustainable development	可持续发展
SDE	Sustainable Development Equilibrium	可持续发展均衡
SDG	Sustainable development goal	可持续发展目标
SDS	Safety data sheet	安全数据表
SFA	Substance flow analysis	物质流分析
SO2	Sulphur dioxide	二氧化硫
Sv	Sievert	希沃特（辐射效果单位，简称希）
TBL	Triple Bottom Line	三重底线
TFI	The Fertilizer Institute (https://www.tfi.org)	肥料研究所（ https://www.tfi.org ）
Th	Thorium	钍
TSP	Triple superphosphate	三重过磷酸钙
U	Uranium	铀
UCS	Unconfined Compressive Strength	无侧限抗压强度
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe (http://www.unece.org/info/ece-homepage.html)	联合国欧洲经济委员会（ http://www.unece.org/info/ece-homepage.html ）
UNFC	United Nations Framework Classification (https://www.unece.org/energy/welcome/areas-of-work/unfc-and-sustainable-resourcemanagement/unfc-documents.html)	联合国框架分类(https://www.unece.org/energy/welcome/areas-of-work/unfc-and-sustainable-resourcemanagement/unfc-documents.html)
UNRMS	United Nations Resource Management System	联合国资源管理系统
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (https://www.unscear.org)	联合国原子辐射影响科学委员会（ https://www.unscear.org ）
UNEP	United Nations Environment Programme (https://www.unenvironment.org)	联合国环境规划署（ https://www.unenvironment.org ）
USEPA	United States Environmental Protection Agency (https://www.epa.gov)	美国环境保护署（ https://www.epa.gov ）

词汇表

放射活性: 给定时间处于给定能量状态的一定数量放射性核素的数量 A , 定义为: $A(t) = dN/dt$, 其中 dN 是时间区间 dt 中给定能量状态自发核转化数的期望值。活性的 SI 单位是秒的倒数 (s^{-1}), 称为贝可勒尔或 Bq [82]。

放射活性浓度: 单位质量或体积的放射活性, 通常以 Bq/g 或 Bq/l 计量。该术语用于放射活性是在材料内或材料上以污染的形式存在的任何情况[82]。

人造土: 从字面上看是“人造土壤”或“设计土壤”。“具有人类活动所造成的突出特征的土壤”(粮农组织)。

致残剂: 在工业操作中形成次品、残渣或废品的材料。

有益用途: 将废物分类体系应用于正在考虑处置的物料的理想结果是找到它的有益用途。这就要求此用途在技术上应该是可行的, 对环境无害或对环境友好且在成本上相称。还需要通过进一步处理或加工来考虑此用途是否“本来有用”或“变得有用”。

副产品: 在制造或合成其他东西时制成的附带或辅助产品。

钙积土: 在土壤剖面一定深度处含有一层易位(迁移)的碳酸钙(无论是软粉状的还是硬质板结的)的土壤。它们通常是湿排水的土壤, 质地细密至中等, 并且由于钙含量高而相对肥沃。它们的主要用途是用于动物放牧。

石灰土: 1.含有钙质或石膏层的土壤, 其上边界在矿质土壤表面 150 厘米之内; 2.在钙质或石膏层以上的所有部分中, 将表层土壤混合至 18 cm 深度后, 要么含钙质的, 要么具有壤土细沙或更粗的质地。

碳信用额: 可交易的许可证或证明书, 授予信用证持有人排放一吨二氧化碳(CO_2)或等价物的权利。

碳足迹: 由个人、事件、组织或产品引起的总排放量, 以当量二氧化碳(CO_2)表示。

固碳: 一种自然或人工过程, 可将二氧化碳(CO_2)从大气中清除并保持为固体或液体形式。

碳交易: 有时被称为排放权交易, 是限制温室气体排放的一种基于市场的工具。

阳离子交换能力: 衡量土壤保持带正电的离子的能力的量度。它是影响土壤结构稳定性、养分利用率、土壤 pH 值以及土壤对肥料和其他改良剂的反应的非常重要的土壤特性。

阳离子交换机制: 当把磷石膏用作土壤改良剂时, 阳离子交换机理将土壤里的钠离子替代为钙离子, 从而降低了土壤中的酸化水平, 并弥补通常与灌溉的不良影响相关的产量损失。

表征：确定磷石膏（PG）是否适合特定类型的再利用或再循环的决策过程中的强制性第一步是表征。表征要求从预定的一系列位置（无论是在过滤器还是在磷石膏堆）取样，并对磷石膏样品的生物学、化学、物理和放射学性质进行合适的分析，以充分表征用于预定用途的磷石膏。

循环经济：传统线性经济（制造、使用、处置）的替代方法，在这种经济中，我们将尽可能长时间地使用资源，在使用过程中从中获取最大价值，然后在每次服务结束时回收和再生此产品和材料。

放射性污染：在表面上或在固体、液体或气体（包括人体）中存在不希望的或不想要的放射性物质，或会导致这样的放射性物质在此类场所中的存在的工艺。

- 放射性污染不包括含放射性的装置拆除后遗留在现场的残留放射性物质[82]。

副产品：单一化学反应的结果，通过该反应可形成两种不同的产物，例如磷酸和磷石膏。（请参考国际原子能机构将磷石膏定义为通过“湿法”生产磷酸的“副产品”。）

成本效益分析：政府、企业和一系列组织用于分析决策的过程。分析人员将情况或行动的收益相加，然后减去与采取该行动相关的成本。

去污：通过有意的物理、化学或生物过程完全或部分去除污染物。

- 该定义旨在包括各种从人、设备和建筑物中清除污染物的过程，但不包括从人体内部清除放射性核素或通过自然风化或迁移过程清除放射性核素的过程，这未被认为是去污[82]。

环境全成本核算：一种成本核算方法，它通过收集和提供有关每种拟议的替代方案的可能的环境、社会和经济成本以及收益或优势（简称为“三重底线”）的信息来跟踪直接成本并分配间接成本。

豁免：监管机构决定某来源或做法无需受制于监管控制的某些或所有方面，因为该来源或做法造成的风险太小而不能保证适用这些方面[82]。

暴露：受辐照的行为或条件。（国际原子能机构注：不应将暴露用作剂量的代名词。剂量是衡量暴露影响的量度。）

根据暴露的性质和持续时间（请参考暴露情况）或根据暴露源、被暴露的人群和/或他们被暴露的环境，可以将暴露分为几类。

暴露情况：暴露情况分类如下：

- **急性暴露：**在短时间内受到了暴露。通常用于表示持续时间足够短的暴露，以致所产生的剂量可以被视为瞬时（例如，少于一个小时）
- **慢性暴露：**持续的暴露
- **已有暴露：**在做出控制决定之前已经存在暴露。（回顾性）
- **计划暴露：**作为有意的、计划的或受控情况或过程的一部分。（预期）
- **意外暴露：**意外的、无法被控制的或不能控制的情况。（反应性）。

食物-能源-水关系: 在“2030年愿景”呼吁平衡资源综合管理的背景下, 食品-能源-水之间的关系得到了越来越多的关注。磷石膏作为一种二次资源触及了所有这三个方面, 在联合国文件中被引用为一种典型案例[79]。

烟气脱硫: 烟气脱硫技术基于一种化学反应, 当燃煤锅炉的热废气与石灰石接触时会发生化学反应。该反应从烟道气中去除了 92% 的二氧化硫, 并将石灰石转化为亚硫酸钙。

分级方法: 一种结构化方法, 通过该结构化方法, 对产品或过程施加严格的控制与失去控制相关的风险[3] (请参考图 5)。

绿色化学/绿色工程: 发明、设计和应用化学产品和工艺, 以减少或消除有害物质的使用和产生。

临时存储区域: 由监管机构指定或同意的区域, 用于长期存放磷石膏, 通常不需要衬垫和低强度环境影响监测。这可能包括使用存储的磷石膏资源作为人造土的选择, 以促进生物多样性以及商业植树。

临时存储设施: 磷石膏管理中“磷石膏山堆”的一个替代术语。存放在山堆中磷石膏将被利用而不是被处置。

干预: 指任何行动, 其旨在减少或避免暴露, 或旨在减少或避免可能暴露于不是受控做法(或豁免做法)的一部分的源或由于事故而失控的源。

生命周期评估: 一种环境核算和管理方法, 考虑了与从摇篮到坟墓的整个工业系统相关的资源使用和环境影响的所有方面。具体而言, 它是环境相互作用的整体视图, 涵盖了一系列活动, 从地球提取原材料到能源的生产和分配, 再到产品的使用, 再利用和最终处置。生命周期评估是一种旨在进行比较而不是绝对评估的相对工具, 从而可以帮助决策者在替代措施之间进行选择时比较所有主要的环境影响。

伦敦公约: 国际海事组织(IMO)发布的《防止通过倾倒废物和其他方式污染海洋的公约 1972年》(简称《伦敦公约》), 是保护海洋环境免受人类活动侵害的首批全球公约之一, 自 1975年起生效。

- **伦敦议定书:** 1996年, 国际海事组织发布的《伦敦议定书》被批准。它进一步使《伦敦公约》现代化, 并最终取代该公约。根据《伦敦议定书》, 禁止将所有废物倾倒入海, 但所谓的“反向清单”中可能可接受的废物除外。

www.imo.org/OurWork/Environment/LCLP/Pages/default.aspx

- **OSPAR 公约:** 《保护东北大西洋海洋环境公约》, 包括对向东北大西洋水域倾倒磷石膏的规定。 <https://www.ospar.org/convention>

- **巴塞罗那公约和议定书:** 《保护地中海海洋环境和沿岸地区公约》原为《保护地中海免受污染公约》, 通常简称为《巴塞罗那公约》, 是 1976年通过的一项旨在预防和减轻来自船舶、

飞机和陆基资源的污染的区域公约。该公约禁止了向地中海排放磷石膏。

<https://web.unep.org/unepmap/>

材料流动分析：一种定量方法，用于量化已定义系统中材料或物质的流量和储备，也称为物质流分析（SFA）：（图 3）。对于磷石膏而言，它具有特殊意义，因为它说明了需要改变磷石膏作为一种“废物”长期排放到系统边界之外的线性经济惯例，而是将这些资源作为副产品[2]、可重复使用的原材料或二次资源保留在循环经济系统的边界内，不浪费它们。

自然发生的放射性物质（NORM）：除天然存在的放射性核素（通常为 ^{238}U 和 ^{226}Ra ）以外，不含大量放射性核素的放射性物质。

- “大量”的确切定义将是一项监管决定。
- 自然发生的放射性物质中包含通过工艺改变了天然放射性核素活性浓度的物质。
- 除非明确提及各种材料，否则应以单数形式使用自然发生的放射性物质（NORM）[82]。

途经（暴露）：辐射或放射性核素可以到达人体并引起暴露的途径。

磷石膏：硫酸钙，一种在磷肥行业用湿法生产磷酸的副产品。

磷石膏规则：于 1989 年颁布并于 1992 年进行了修订。美国环境保护局根据《磷石膏规则》[13]监管磷石膏的生产、处置和使用。

实践：会引起如下后果的任何人类活动：引入其他暴露源或暴露途径，或者将暴露扩展给其他人，或者改变现有来源的暴露途径网络，从而增加人们的暴露或暴露的可能性或暴露的人数。

质量协议：一份技术和科学参考文件，用于解释了为何、如何以及何时将废料视为非废品，并且在给定的监管制度下不再被作为废物而进行控制。在根据国际原子能机构的建议把磷石膏作为副产品（即不是废物）而对磷石膏进行分类的监管制度中，《质量协议》可能仍然非常可取，因为该协议将根据用途类型以及根据所使用的磷石膏或磷石膏衍生产品的具体特征进行阐述。

放射性：由于不稳定元素的原子核的衰变而散发的微粒或电磁辐射，这是原子序数大于 83 的所有化学元素的特性。从科学上讲，如果某种物质表现出放射性现象或包含任何放射性，则被描述为具有放射性 具有放射性的物质。因此，从科学上讲，几乎所有物质（包括被视为废物的物质）都是放射性的。但是，通常的监管惯例是对术语（例如放射性物质和放射性废物）进行定义，以仅包括由于其表现出的放射特性或任何放射性风险或危害而受到管制的物质或废物。姿势[82]。

氡：一种放射性、无色、无味、无味的稀有气体，与磷酸盐矿开采和磷石膏的堆放有关。

补救措施：可以采取任何措施来减少由于土地本身的污染而导致的辐射暴露，方法是对污染本身（源）或对人类的暴露途径采取行动。

- 不暗示完全清除污染物[82]。

可重复使用的（二次）原始材料：“二次原材料”是可在生产制造过程中代替原始原材料或与原始原材料一起使用的再生材料。

资源：具有合理的经济使用价值前景的自然发生的材料，例如：

- 原生资源
- 二次资源
- 人为资源
- 保护的资源。

资源利用效率（肥料、水等）是指在特定的土壤和气候条件下，每单位施用的资源所引起的作物或任何其他植物的产出。

堆放：磷石膏在过滤器中与磷酸分离及其在堆放在“堆”中的过程

- **干式堆放：**在过滤器中从磷酸中分离磷石膏作为“干”（低水分含量）残渣并通过皮带输送机将所得残渣运输到存储或处置点的过程。

- **湿式堆放：**在过滤器中从磷酸中分离磷石膏作为“湿”浆残渣并通过管道将所得残渣运输到存储或处置点的过程。在存储或处置点，悬浮液中的磷石膏可从工艺水中沉降出来以便堆放，而工艺水被回收并返回到生产回路中。

土壤：用于植物生长的天然介质[...], 由风化的矿物质、有机物质、空气和水所组成的不同层（土壤层）构成（FAO）。

- **土壤改良剂：**一种矿物或有机物质，用于改善土壤的质量和结构，从而改善植物的生长。

- **土壤改善剂：**一种添加到土壤中以改善土壤的物理性质（例如保水性、渗透性、水渗入、排水、曝气和结构）的物质。目的是为植物根部提供更好的环境。为了实现这一点，必须将改善剂彻底混入土壤中。如果仅将其掩埋在土里，则会降低其有效性，并且会干扰水和空气的流动以及根的生长。

- **土壤封盖：**位于土壤表面的、严重限制土壤渗透性的硬壳

- **土壤肥力：**在适当的、可衡量的投入下，土壤在给定的时间和给定的生长条件下从给定作物产生所需或最佳水平的产量和质量的能力。

- **土壤盐分：**土壤溶液（土壤中的水相）中溶解的盐量。在土壤中积累可溶性盐的过程称为盐渍化。土壤中的盐对土壤功能和管理有重要作用。土壤盐分是一个术语，用来描述土壤中的可溶性盐含量达到对农作物有害的水平的条件[83]。

- **土壤碱度：**一个描述土壤中所含钠的量的术语。钠是一种阳离子（正离子），被松散地固定在土壤中的粘土颗粒上 127。

源：任何可能引起辐射暴露（例如，通过发射电离辐射或释放放射性物质或材料）并且出于保护和安全管理目的可以被视为一个整体的事物。

- **自然源：**自然发生的辐射源，例如太阳和星星（宇宙辐射源），以及岩石和土壤（地面辐射源）。

可持续性：保持环境满足当前和未来需求的能力。

可持续发展：在不损害子孙后代满足其自身需求的能力的前提下，满足当前需求的发展。它

包含两个关键概念：

- 需求概念，特别是世界穷人的基本需求，应予以优先考虑；和
- 有关技术和社会组织的现状对环境满足当前和未来需求的能力所施加限制的想法[81]。

利用：资源在整个生命周期中的经济使用。

变性土：指含黏土的土壤，在一年中的某些情况下，它们具有深而宽的裂缝，并在土壤表面 100 厘米之内有光滑层。它们在干燥时收缩，在润湿时膨胀。由于土壤中有很多粘土种类和数量，变性土构成了相对均一的土壤。

废物（欧盟）：“持有人丢弃或打算丢弃的任何物质或物体”。

废物（国际原子能机构）：“预计不会进一步使用的材料”。

- **豁免废物：**根据豁免原则从监管控制中释放的废物。
- **混合废物：**还含有非放射性有毒或有害物质的放射性废物。
- **NORM 废物：**自然发生的放射性物质，预计不会进一步使用。

废物分类：《欧盟废物框架指令》（2008 年发布，2018 年修订）制定了一种策略，用于以如下所示的分层形式优先管理“废物”（图 120）：

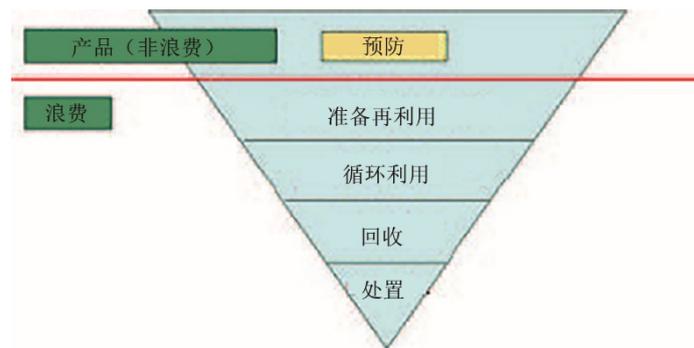


图 120. 欧盟废物分类

1. 防止
2. 再利用
3. 循环利用
4. 回收（或再处理，包括从废物中回收能源）
5. 处置

其中最不受欢迎的选项是处置。

用水效率：通过测量特定目的所需的水量以及使用或输送的水量来减少水浪费的方法。用水效率不同于节水，其重点在于减少浪费而不是限制使用。

附录 1:

IFA 磷石膏/自然发生的放射性物质工作小组 (IFA PG NORM WORKING GROUP)

2012 年前，国际肥料协会（IFA）成员本身并没有将磷石膏（PG）视为一个问题，而是让一个叫做 NORM 特别工作组（NORM Task Force）的部门来专门处理它。NORM 是“自然发生的放射性物质”的英文缩写。NORM 特别工作组的成员并不经常聚在一起。考虑到磷石膏的放射性问题，IFA 成员公司之间公开讨论磷石膏问题也是可以理解的。磷石膏的放射性问题是美国环境保护署在 1989 年强制实施磷石膏堆放做法并使其基本上无法使用的原因。

但是，当国际原子能机构《安全报告 78》(简称“SR78”)[2]的初步研究结果在 2011 年由 SR78 起草小组的成员传达给 IFA 时，当时的 IFA 总干事 Luc Maene 建议主办 IFA NORM 特别工作组特别会议。该会议议程的重点是根据 SR78 的新研究结果发现专门讨论磷石膏问题。这次会议是作为塔什干 2012 年 IFA 年度技术研讨会的附加专题会的形式举办的。参加者非常多，其中包括来自国际原子能机构代表。后者在会上做有关 SR78 的演讲。

会议成功吸引了 IFA 成员企业的参与和兴趣。考虑到 SR78 在改变磷石膏为副产品方面具有改变游戏规则的性质，因此 NORM 特别工作组在其职权和名称中加上了磷石膏 (PG)，并成为常设工作小组。这样它的名称就从 NORM 特别工作组 (NORM Task Force) 变成了 **PG NORM 工作小组 (PG NORM Working Group)**，即**磷石膏/自然发生的放射性物质工作小组**。因此，在年度技术研讨会开始前一天，就进行了一系列年度会议。自 2013 年以来 IFA 举行了以下年度会议：

1. 2013 年 - 智利圣地亚哥
2. 2014 年 - 荷兰阿姆斯特丹
3. 2015 年 - 加拿大温哥华
4. 2016 年 - 印度新德里
5. 2017 年 - 约旦安曼
6. 2018 年 - 西班牙马德里
7. 2019 年 - 美国新奥尔良
8. 2020 年 - 美国纽约

除年度会议外，还举行了许多关于磷石膏的重要特别会议，如以下所列。在 2007 年和 2008 年，国际原子能机构赞助了在佛罗里达工业和磷酸盐研究所（FIPR）举行的两次会议，其中一次会议审查了 SR78 的范围，另一次会议讨论了道路施工中磷石膏的特殊使用。在 2007 年，决定将内容涉及磷石膏的一章纳入在 SR78 的范围内，而该章直到那时仍未纳入该报告的职权范围。在 2008 年，会议有机会参观了使用当地磷石膏在佛罗里达州中部修建的一条试点道路，并亲自检查了道路的性能以及自 1986 年修建以来 FIPR 工作人员一直在进行的所有环境监测。

特别会议

2007 年 - 国际原子能机构 SR78 范围审查；国际原子能机构（出资人）和 FIPR（主办人，包括“灭堆计划”团队）的联合会议；会议地点：美国佛罗里达州巴托

2008 年 - 磷石膏和道路；国际原子能机构（出资人）和 FIPR（主办人，包括“灭堆计划”团队）的联合会议；会议地点：美国佛罗里达州巴托

2013 年 - PG NORM 工作小组的 IFA 磷石膏报告范围讨论会议；托洛斯农业公司主办；会议地点：土耳其伊斯坦布尔

2014 年 - 阿拉伯化肥工业协会 - 首届磷石膏专题研讨会；会议地点：突尼斯突尼斯

2018 年 - 磷石膏和循环经济；普瑞昂集团主办；会议地点：比利时恩吉斯

每一次特别会议都对行业为磷石膏寻找可持续的、环境和经济上可行的解决方案的承诺的性质和水平产生了决定性的影响。但是，从行业角度看，最令人震惊的是，尽管前两次特别会议（2007 年和 2008 年）是由国际原子能机构和 FIPR 牵头的，但此后一直是行业本身牵头举办特别会议，从在 2013 年 9 月在伊斯坦布尔举行的会议开始。这次会议是在埃辛·米特女士作为托洛斯农业公司首席执行官的慷慨赞助下举行的。这并非偶然。这也是她在 2014 年 1 月所做的具有里程碑意义的演讲的序幕。同样，普瑞昂集团和阿莱夫集团在 2018 年 3 月举办的特别会议达到了第二个转折点。此次会议明确地确定了行业在未来将把磷石膏视作一种资源与行业如何开始向循环经济的过渡过程之间的联系。

附录 2：磷石膏样品材料安全数据表

加拿大加阳化肥制造公司 (Agrium) 材料安全数据表

NFPA 分类	DOT/TDG 象形图	WHMIS 分类	防护服
 健康			

第 1 部分：化学产品和公司标识

产品名称/货物名称： 65 型 - 佛罗里达磷石膏

名称	佛罗里达磷石膏	MSDS 号： 1400
化学名称	二水合硫酸钙	版本号： 4.5
化学家族	一种硫酸盐，主要由硫酸钙和痕量的硫酸钡、氟化钙以及铝和硅的氧化物组成。（盐。）	环境、健康与安全部在以下日期制定的 MSDS： 2001 年 3 月 28 日
化学式	CaSO ₄ ·2H ₂ O	24 小时紧急联系电话号码： 运输： 1-800-792-8311 医疗： 1-888-670-8123
材料用途	农业：土壤改良剂。 工业应用：波特兰水泥的缓凝剂。 土壤中和剂。 采矿业：矿山尾矿絮凝剂。	

制造商	供应商
加拿大加阳化肥制造公司 (Agrium Inc.) 北美批发 弗雷泽湖道 13131 号 加拿大艾伯塔省卡尔加里 T2J 7E8	加拿大加阳化肥制造公司 (Agrium Inc.) 北美批发 弗雷泽湖道 13131 号 加拿大艾伯塔省卡尔加里 T2J 7E8 加阳美国公司 南阿尔斯特街 4582 号 1700 套房 美国科罗拉多州丹佛市 80237

第 2 部分：有害成分

名称	CAS #	暴露限值 (ACGIH)						% by Weight
		TLVTWA mg/m ³	TLVTWA ppm	STEL mg/m ³	STEL ppm	CEIL mg/m ³	CEIL ppm	
结晶硅	14808-60-7	0.1						0.24
二水合硫酸钙	10101-41-4	10						86-92
氟化钙	7789-75-5	2.5						0.9

成分的毒理学数据	<p>尚未确定人类对本产品的最小或最大耐受暴露值。</p> <p>毒性值 - 石膏</p> <p>A. 二水合物:</p> <p>TDL_o - (IP) 大鼠: 450 mg/kg</p> <p>TCL_o - (INHL) (人类): 194 g/m³</p>
----------	---

第 3 部分：危害识别

潜在的急性健康影响	长期或反复接触本产品可能会刺激眼睛和皮肤。吸入的粉尘可能会刺激呼吸道。
潜在的慢性健康影响	本产品包含结晶二氧化硅（石英）。吸入长期或反复过度接触它可能引起进行性和永久性肺损伤。晶体二氧化硅被 IARC 认为是人类致癌物，被 NTP 合理地认为是致癌物，而 ACGIH 则怀疑其为人类致癌物。本产品也包含痕量的天然放射性物质（Ra-226）。有关此主题的更多信息，请参阅第 16 部分“其他信息 - 特殊考虑因素”。

第 4 部分：急救措施

眼镜接触	可能由于机械作用引起眼睛刺激。立即用流水冲洗眼睛至少 15 分钟，并保持眼睑张开。如果刺激持续存在，请就医。
轻微皮肤接触	可能引起皮肤刺激。用肥皂和水清洗受污染的皮肤。使用优质护肤霜遮盖干燥或受刺激的皮肤。如果刺激持续存在，请就医。
密切皮肤接触	没有其他信息。
轻微吸入	吸入粉尘可能会引起呼吸道刺激，其特征是发燃、打喷嚏和咳嗽。将吸入者移到新鲜空气处，让其休息。如果仍然呼吸困难，请寻求医疗帮助。
严重吸入	在紧急情况下，请采取适当的呼吸防护措施，将受影响的人员尽快撤离到安全区域。松开人脖子和腰部的紧身衣物。如果呼吸困难，可以使用氧气。如果该人没有呼吸，请进行人工呼吸。立即就医。
轻微摄入	让仍有意识的人喝几杯水或牛奶。引起呕吐。低头，勿让呕吐物再次进入口腔和咽喉。切勿给失去知觉的人喝任何东西。寻求医疗救助。
大量摄入	没有其他信息。

第 5 部分：火灾和爆炸数据

本产品是	不可燃的。
自燃温度	不适用。
闪点	不适用。
易燃性限值	不适用。
燃烧产品	不适用。
存在各种物质时的火灾危险	不适用。
存在各种物质的爆炸危险	不存在爆炸危险。
消防介质和说明	不可燃的。
火灾危险的特别说明	暴露在高温下，磷石膏会失去水合水，形成半水合硫酸钙（熟石膏）。
爆炸危险的特别说明	没有其他说明。

第 6 部分：意外泄漏措施

小泄漏	使用适当的工具将泄露出来的固体放入合适的容器中，以备使用或处置。确保处置符合当地法规。
大泄漏	防止材料的额外排放，如果可能的话，避免任何危险。防止泄露物进入下水道、水井、河道等。该产品可促进藻类生长，并可能降低水质和味道。通知下游用水者。饮用水中的硫酸盐应保持在 500mg/L 以下（加拿大）。回收泄漏物并把它放入合适的容器中以进行回收、再利用或处置。确保处置符合当地法规。本产品会溶解并分散在水中。回收材料可能不能用。

第 7 部分：搬运和储存

预防措施	避免与皮肤和眼睛接触。请勿吸入浓度超过规定的职业接触限值的粉尘。搬运本产品后，在进食、喝水或使用吸烟材料之前，请始终用肥皂和水把手彻底洗干净。使用工艺外壳、局部排气通风设施或其他工程控制措施，以将空气中的粉尘浓度保持在建议的暴露限值以下。
储存	保持通风良好。请将本品放在儿童不能接触的地方。

第 8 部分：接触控制/个人防护

工程控制	只能在通风良好的地方存储和使用本品。如果用户操作产生粉尘，请提供足够的常规通风，以使暴露于空气中的污染物保持在适用的暴露限值以下。
个人防护	个人防护装备的选择取决于使用条件。通风不良时，应佩戴适当的呼吸保护装置以防灰尘/雾气。在空气中粉尘浓度可能超过职业接触限值的条件下，可以使用经 NIOSH/MSHA 批准的带 P-100 滤芯的粉尘呼吸器。空气净化呼吸器提供的保护可能会是有限的。如果粉尘浓度未知或在空气净化呼吸器可能不能满足要求的任何其他情况下，应使用正压空气呼吸器。当短暂的定期暴露可能导致皮肤和眼睛接触，请穿着长袖衣服、工作服、耐化学品的手套和带侧罩的安全眼镜。
大量发放情况下的个人保护	暂无其他说明。
接触限值	ACGIH TLV-TWA: 10 mg/m ³ ，未作其他分类的颗粒（有害颗粒）。联邦和省级标准可能会因司法管辖区而异。请向当局咨询当地可接受的接触限值。

第 9 部分：物理和化学特性

物理状态和外观	固体（固体结晶粉末）		
分子量	136.14	颜色	白色至淡黄色
pH（10%溶液/水）	4	气味	无味
沸点	分解	气味阈值	不适用
熔点	1450°C (2642°F)	味道	咸（轻微）
临界温度	不适用	挥发性	非挥发性固体，但含有 6-12 wt% 的水分
比重 g/cc	2.96 (水 = 1)	溶解度	微溶于冷水、热水
表观密度	松散的: 888 kg/m ³ ; 55.4 lbs/ft ³ ; kg/m ³ ; lbs/ft ³ 压实的: 1130 kg/m ³ ; 70.5 lbs/ft ³ ;	分散特性	容易以任何比例分散在冷水和热水中。
蒸汽压力	不适用	水/油分配系数	无相关数据
蒸气密度	不适用		

第 10 部分：稳定性和反应性数据	
稳定性	本产品是稳定的
不稳定温度	不适用
不稳定条件	无另外说明
各种物质的不相容性	与金属、碱有极微反应或微小反应。 与氧化剂、还原剂、可燃材料、有机材料、酸、水汽无反应。
腐蚀性	对铜、钢、铝、锌略有腐蚀。 对玻璃纤维、不锈钢（304 或 316）无腐蚀。
关于反应性的特别说明	无另外说明
关于腐蚀性的特别说明	长期接触对黑色金属略有腐蚀。 请联系您的销售代表或冶金专家，以确保与系统设备的兼容性。

第 11 部分：毒理学资料	
重要的暴露途径	摄取； 吸入
对动物的毒性	LD50： 无 LC50： 无
关于动物毒性的特别说明	无另外说明
对人类的其他影响	眼睛或皮肤接触有轻微危险（刺激性）。 通过食入或吸入方式的过度接触有危险。
关于人类慢性影响的特别说明	无另外说明
关于人类其他影响的特别说明	硫酸钙的 ACGIH TLV 值，基于不包含石棉和<1%结晶二氧化硅的总粉尘。

第 12 部分：生态信息	
生态毒性	无另外说明
BOD 和 COD	无
降解产物	一些金属氧化物
降解产物的毒性	降解产物的毒性低于产物本身
关于降解产品的特别说明	无另外说明

第 13 部分： 处置注意事项	
废物处理或回收	回收材料并将其放在合适的容器中以备使用或处置。 要求协助处置。

第 14 部分： 运输信息	
DOT/TDG 分类	不受控制 TDG（加拿大）。
PIN	不适用
特殊运输规定	不适用
DOT（美国）（象形图）	

第 15 部分：其他法规信息和象形图	
其他法规	加拿大环境保护法（CEPA）：此产品在《国内物质目录》（DSL）上，

	可以根据 CEPA 的规定使用。	
其他分类	HCS (美国)	不受 HCS 控制 (美国)
	DSCL (EEC)	不受 DSCL 控制 (欧洲)
国家消防协会 (美国)	仅在紧急情况下出现的危险:	 火灾 反应性 特殊危害
TDG (象形图 - 加拿大)		
DSCL (欧洲) (象形图)		
ADR (欧洲) (象形图)		

第 16 部分：其他信息

参考

- 美国政府工业卫生学家会议，化学物质阈值限值，2000 年。
- 加拿大职业健康与安全中心 CCInfo 磁盘。
- 腐蚀数据调查，第六版，1985 年，美国腐蚀工程师协会。
- 《加拿大西部放射性物质处理指南》，1995 年，加拿大西部 NORM 委员会。
- 《加拿大自然发生的放射性物质 (NORM) 管理指南》，第一版。2000 年 1 月

特殊考虑因素

佛罗里达磷石膏含有微量但可测量的放射性物质 (典型分析: 铀 238: 0.14 Bq/g, 镭 226: 0.84 Bq/g)。联邦省领土辐射防护委员会的加拿大 NORM 工作组确定了含有 Ra-226 的材料的调查阈值为 0.3 Bq/g。使用 PATHRAE 和 RESRAD 风险评估方法对剂量进行了评估。根据国际放射防护委员会 (ICRP) 的最新标准, 评估结果表明该材料符合适用于土壤修复、尾矿絮凝和粪便处理的无限制使用标准。路易斯安那州认为磷石膏中的这样放射性水平无需担心, 并且美国环保署也认为出于研究目的这样的放射性水平是可以接受的。

产生的放射性衰变产物之一是氡气。该气体可能在密闭存储容器的顶部空间或通风不良的区域积聚。因此, 磷石膏的处理和使用应在良好的一般通风条件下进行 (最低建议值: 每小时换气 2 次)。有关安全处理磷石膏的更多信息, 可从加拿大西部 NORM 委员会编写的《加拿大西部放射性物质处理指南》文件中获得, 也可通过不列颠哥伦比亚卫生辐射防护服务部的艾伯特省劳工职业健康与安全局或萨斯喀彻温省劳工职业健康与安全局获得。

有关此产品的进一步安全、健康或环境信息, 请联系
加拿大加阳化肥制造公司 (Agrium Inc.)
环境、卫生安全部
电话 (780) 998-6134 或传真 (780) 998-6143

读者须知

买方承担与使用此材料有关的一切风险。买方承担所有责任, 以确保按照适用的环境、健康和法律、政策和指南以安全方式使用此材料。加拿大加阳化肥制造公司 (Agrium Inc.) 对本表上提供的信息, 包括由此造成的任何损害或伤害, 不承担任何责任。加阳公司不保证该材料适合任何特定用途, 对于因使用该材

料而直接或间接造成的伤害或损害，概不负责。本表中包含的信息是根据加阳公司认为是准确可靠的信息源而编写的，并且基于在编写日期可用的观点和事实。