

# 养分管理 手册



养分管理手册

国际肥料工业协会、世界农民组织及气候智能型农业全球联盟

2016年11月第一版

2016版权所有，国际肥料工业协会、世界农民组织及气候智能型农业全球联盟。

该手册可于国际肥料工业协会及世界农民组织官网下载。

若需获取纸质版本，请联系国际肥料工业协会或世界农民组织。

翻译：宋晓桐（中国农业大学）

校对：巨晓棠（中国农业大学）



**国际肥料工业协会**

d'Iéna 大街49号

75116 巴黎

法国

Tel: + 33 1 53 93 05 00

Fax: +33 1 53 93 05 45/47

publications@fertilizer.org

www.fertilizer.org



**世界农民组织**

Via del Tritone, 102 号

00187 罗马

意大利

Tel: +39 06 4274 1158

Fax: +39 06 4200 0750

info@wfo-oma.org

www.wfo-oma.com



**气候智能型农业全球联盟促进组织**

联合国粮食及农业组织

Viale delle Terme di Caracalla

00153 罗马

意大利

GACSA-Facilitation-Unit@fao.org

www.fao.org/gacsa

该指导手册旨在为解决备受关注的农业问题提供全面有效的实用信息，但其并不取代任何专业指导，也不代表其所表达观点为官方认可。

# 目录

<b>1. 作物养分与有机和无机肥概述</b> .....	<b>1</b>
1.1 作物健康生长必需的营养元素 .....	1
1.2 主要的养分来源有哪些? .....	2
1.3 为什么培育健康土壤和高产与高营养的作物需要肥料? .....	5
<b>2. 高效且有效的养分管理</b> .....	<b>7</b>
2.1 什么是养分利用率? .....	7
2.2 养分利用效率和效力目标是互补的 .....	9
<b>3. 农业养分循环与损失途径</b> .....	<b>11</b>
<b>4. 植物营养和土壤肥力综合管理的必要性</b> .....	<b>13</b>
4.1 无机肥和有机肥是互补的 .....	13
4.2 植物营养和土壤肥力综合管理方法的多重优点 .....	13
<b>5. 如何进行养分管理?</b> .....	<b>15</b>
5.1 最佳养分管理措施应遵从的基本原则 .....	15
5.2 合适的肥料品种 .....	17
5.3 合理的施肥量 .....	18
5.4 正确的施肥时间 .....	20
5.5 正确的施肥方法 .....	21
<b>6. 养分管理与几个关键可持续性因素的关系</b> .....	<b>23</b>
6.1 养分管理与粮食和营养安全 .....	23
6.2 养分管理与土壤健康 .....	24
6.3 养分与水分的交互作用 .....	26
6.4 养分管理与气候变化 .....	27
6.5 养分管理与环境 .....	30
<b>7. 要点回顾</b> .....	<b>33</b>
<b>参考文献</b> .....	<b>35</b>



# 序 言

中国石油和化学工业联合会会长 李寿生

“庄家一枝花，全靠肥当家”，中国农民从几千年来农业实践中总结出来的真理，充分说明了肥料在农业发展中的重要作用。新中国成立以来，特别是改革开放以来，中国化肥工业取得了迅猛发展，化肥也在为农业增产增收中发挥了重要作用。但我们也清醒地看到，随着化肥工业的发展，随着农业施肥量的增加，过度施肥、不合理施肥的问题日益突出，不仅造成了肥效利用低下的矛盾，而且还造成了大量的面源污染。合理施肥、科学施肥已经成为摆在中国农业面前一个无法回避的大问题。

国际肥料工业协会，世界农民组织和气候智能型农业全球联盟在中国农业和化肥工业最需要的时候，为中国农业和化肥工业提供了一本难得的好书——《养分管理手册》。这本书以浅显易懂的道理、科学的观点、实用的方法，全面介绍了农作物养分管理的重要性，高效且有效养分管理的科学观点，正确实施养分管理的具体方法，特别是从最佳养分管理的基本原则，合适的肥料品种，合理的施肥量，正确的施肥时间和正确的施肥方法，用“手把手”的方式直接为农民提供了最正确、最权威、最有效的农化服务。我们为这本书在中国的出版喝彩，我们更愿意为这本书在中国的发行宣传作出积极的贡献。

目前中国农业和中国化肥工业正处在一个现代化发展和转型升级的关键时刻，正面临着一个到2020年化肥施肥总量零增长的新形势，科学施肥、合理施肥、不断提高肥料使用效率，是中国农业和中国化肥工业一项长期的艰巨任务。在全面推进科学施肥、合理施肥、不断提高肥料使用效率的过程中我们愿意同国际肥料工业协会，世界农民组织和气候智能型农业全球联盟长期保持合作关系，加强联系，密切合作，努力为中国农业、为世界农业的科学施肥，合理施肥，不断提高肥料使用效率作出我们中国的贡献！

二〇一七年十一月十日

# 前言

平衡精确地给作物施肥，包括有机肥和无机肥，是实现第二个“可持续发展目标”即消除饥饿、保障粮食安全和改善营养以及促进可持续农业发展的先决条件。同时，这也是气候智能型农业的关键组成部分。针对土壤和作物的养分管理不仅可以提高农业生产力，保证到2050年全球预期100亿人口的粮食安全，同时能保证作物对养分最大吸收，从而减少损失到环境中的养分，包括氧化亚氮排放。由于高效及有效施肥能够可持续地提高耕地生产力，也可以保护世界各地的森林不被侵占，同时有助于维持或增加土壤有机质含量，从而有利于保持这两个巨大的碳汇。另外，气候变化的长期效应将导致气温升高、水分胁迫增加，合理的作物养分管理将有助于增强农作物对未来气候变化的适应能力。

世界各地农民正处于农业所面临的巨大挑战的最前方。随着全球许多地区农业推广服务减少，在作物养分管理方面，我们必须努力将知识转化为切实可行的最佳管理措施。为此，世界农民组织（WFO）、国际肥料工业协会（IFA）及气候智能型农业全球联盟（GACSA）联合发表该手册，概述平衡精确施肥的关键原则，以协助农民为养活不断增长的世界人口所做出的重要贡献，同时改善和保护气候变化下的土壤健康。

基于气候智能型农业和土壤肥力综合管理的原则，施用有机和无机肥时需要配合恰当的土壤管理措施，并选择合适的作物品种；同时，根据养分管理的“4Rs”原则，即基于作物和土壤研究，确定合适的肥料品种（选择能够满足作物需求的肥料品种）、合理的施肥量（按作物需求确定施肥量）、正确的施肥时间（使有效养分供应与作物需求相匹配）以及正确的施肥方式（使养分处于作物能够最佳吸收的位置），该手册为农业人员提供了作物高效养分管理的实用性信息。

这本养分管理手册结合肥料及其对作物生长和土壤的影响，为农民和农民组织提供了简单实用的信息，包括根据不同作物、土壤—气候条件制定的高效养分管理技术指导。

世界农民组织（WFO）、国际肥料工业协会（IFA）及气候智能型农业全球联盟（GACSA）的共同努力，为多方合作实现第二个“可持续发展目标”和促进气候智能型农业发展起到了良好的示范作用，同时三者将共同致力于向全球农民群体推广他们提出的养分管理建议。

# 1.

## 作物养分与肥料概述 (有机肥和无机肥)

### 1.1

#### 作物健康生长必需的营养元素

作物能够健康生长，同时生产出高营养食物的前提条件是摄取足够量的必需元素（大量和微量元素）。

以下17种元素是作物生长所必需的：碳（C）、氢（H）、氧（O）、氮（N）、磷（P）、钾（K）、硫（S）、镁（Mg）、钙（Ca）、铁（Fe）、锰（Mn）、锌（Zn）、铜（Cu）、硼（B）、钼（Mo）、氯（Cl）、镍（Ni）。另外，某些植物除上述必需元素外，还需要其它元素如钠（Na）和钴（Co）。

碳、氢、氧可以从空气和水中获取，不属于矿质元素。其它的必需元素可按照在植株体内的平均浓度分为三类：大量元素（氮、磷、钾）、中量元素（硫、镁、钙）及微量元素（铁、锰、锌、铜、硼、钼、氯、镍）。

一种作物必需元素短缺，就会影响作物正常生长进而影响产量。低于最适量最多的必需元素将成为作物生长的

限制因子。一般来说，氮、磷、钾是最短缺的营养元素，但现在土壤和作物中的硫、锌、硼也越来越不足，逐渐成为世界各地作物生长的新限制因子。



李比希最小养分律示意图：作物产量受土壤中相对含量最少的养分因子所控制

## 主要的养分来源有哪些？

养分可从多种来源获取：

- **岩石风化**是一个逐年释放少量营养元素的缓慢过程。该过程是不足以实现中产至高产目标的。
- **上季施入的肥料**没有被前茬作物吸收，也没有损失到环境中或固持于土壤中的部分，可被后茬作物利用。有些养分如氮和硫，在潮湿环境中，施入当年就易出现大量损失。还有一些养分如磷和钾，可以在土壤中存留较长时间，通常为数年，但具体存留时间取决于土壤类型、降雨及管理措施。
- **大气沉降**在某些地区是很重要的养分来源，尤其是氮沉降和硫沉降。为响应减少硫排放以控制酸雨问题的管理规定，硫沉降投入逐渐减少，硫逐渐成为限制性因子，目前施用硫肥已经成为发达国家的常见措施，在新兴和发展经济体中，也变得越来越普遍。
- **灌溉水**也包含可被作物利用的养分。
- **作物残茬**，如叶片、茎和根，遗留在土壤表面或土壤中时，会分解释放其所含的养分。作物残茬主要富含钾元素。因此秸秆还田一直是这些年土壤中钾元素的主要来源。然

而，秸秆大量焚烧或者用作牲畜饲料已经使土壤中持留的钾被逐渐耗竭。作物残茬的养分含量差异很大，在某一具体时间段内释放的作物有效养分的多少也由当地条件决定。

- **堆肥**（被分解的有机质）可被施入土壤以供应养分，并起到土壤调理剂的作用。堆肥的质量因采用的原材料和发酵过程而异。
- **家畜粪肥**是一种重要的养分来源。不同来源及管理措施下的粪肥养分含量差异极大。人们普遍认为低品质的牲畜饲料会降低家畜粪便中的养分含量。因此，粪肥施用前应分析其养分含量。

营养元素	作物秸秆	家禽粪便	家畜粪便
N	10-15	25-30	20-30
P	1-2	20-25	4-10
K	10-15	11-20	15-20
Ca	2-5	40-45	5-20
Mg	1-3	6-8	3-4
S	1-2	5-15	4-50

作物秸秆及畜禽粪便中主要营养元素的一般含量(g/kg)(引用 Barker et. al., 2000)

- **污泥**（城市污水处理残渣）可被回收利用，提供大量作物养分。由于来源、加工方式、储存方式和处理过程不同，污泥中的养分在含量和形态上差异很大。污泥中作物养分及可能的污染物含量应被定期分析。
- **生物固氮**（BNF）是将大气中的惰性氮气转化为可被植物利用的活性态氮的过程。生物固氮存在于许多作物-细菌共生体中。在豆科作物（如大豆、豌豆、苜蓿）和根瘤菌的共生系统中，生物固氮最强。生物固氮量通常为20–400 kg N ha<sup>-1</sup>yr<sup>-1</sup>，依作物品种、生长季长短和气候条件不同而不同。
- **化肥**是由肥料工业生产的，农民可购买到一系列供应一种或多种必需矿质元素的产品。全世界农民平均每年施用大约1.8亿吨肥料（以纯养分计）以补充农田养分来源，进而实现可持续的作物产量和品质目标。

只包含一种大量元素的肥料称为单质肥料，包含两种或三种大量元素的肥料称为复合肥料。复合肥包括化合物（所有营养元素在同一化学结构的颗粒中）和混合物（不同肥料颗粒的物理混合）。每种肥料产品都有其优缺点，这通常取决于当地的农业生态及经济条件（详见 Reetz 2016）。

值得注意的是作物可以响应所有来源的养分，但它们主要以无机态吸收养分。有机养分必需经过矿化（从有机态转化为无机态）才能被作物吸收。不同种类的肥料在不同农业生态系统之间及一个系统内部提供的养分差异较大。可持续的作物养分管理要做到能识别并利用所有来源的有效养分。

通用名称	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	S	物理状态
氨气	82	0	0	0	气体
尿素	45-46	0	0	0	固体
硫磺铵	21	0	0	24	固体
硝酸铵	33.0-34.5	0	0	0	固体
硝酸钙铵	20.4-27.0	0	0	0	固体
尿素硝铵	28-32	0	0	0	液体
磷酸一铵	11	52	0	0	固体
磷酸二铵	18	46	0	0	固体
硝酸钾	13	0	44	0	固体
磷矿石	0	20-40	0	0	固体
普通过磷酸钙	0	16-20	0	12	固体
重过磷酸钙	0	46	0	0	固体
氯化钾	0	0	60	0	固体
硫酸钾	0	0	50	18	固体

部分主要肥料品种的养分平均含量（养分含量占肥料产品总量的百分比，%）

## 碳 肥

光合作用是指含有叶绿体的绿色植物和某些细菌，利用光能将二氧化碳(CO<sub>2</sub>)和水转化为有机物(碳水化合物)的过程。在这些过程中，CO<sub>2</sub>是合成所有有机物的唯一碳源，且大约一半有机物都包含碳元素。这一特点使CO<sub>2</sub>从数量看成为了生命体中最重要的物质，但光合作用的高效运行还需要所有其他的必需元素。

据统计，大气中的CO<sub>2</sub>自工业化以来增长了0.03%–0.04%，对提高

全球农业的水分利用率和作物产量起了重要作用。每年人为CO<sub>2</sub>排放引起的全球碳肥施入价值平均可达1400亿美元。

对于设施农业来说，比如现代温室，增加CO<sub>2</sub>浓度是提高产量的一种常见措施。然而，为了避免快速生长的植物组织中其它元素被稀释及由此造成的营养价值损失，足量且平衡地供应所有必需矿物质元素是至关重要的。

### 1.3

## 为什么培育健康土壤和高产与高营养的作物需要肥料？

养分随作物收获从田间移出，称为土壤养分消耗。收获时带走的养分量与产量成比例，且不同作物和同一作物不同部位养分移出量都不同。为了保持土壤肥力，实现作物产量和品质的可持续发展，随收获物从田间移出的养分及损失到环境中的养分必需通过有机肥和（或）无机肥补充。

在土壤肥力不佳且施肥具有经济效益的地区，采用较高的施肥量，并结合其它必要的土壤肥力管理措施，对减少养分限制因

子、提高养分对作物的有效性和改善土壤健康状况是必要的。

为了实现长期中产至高产以提高粮食安全和农民收入，仅仅依靠本底养分投入，如土壤养分供应、大气沉降、生物固氮和畜禽粪便回田是不够的。为保持高产，农民通常需要以化肥或者其它可购买到的有机肥的形式，投入额外的养分。不足的养分可以通过无机和（或）有机肥投入来补充。在施用化肥的情况下，则可以通过复合肥料或多种肥料混合的形式来补充。



养分输入与输出必需平衡以达到最佳产量，保持较高生产力并将损失到环境中的养分降到最少（正平衡会增加养分损失的风险，负平衡会消耗土壤养分）。

### 合理施肥以提高作物产品的营养价值

我们还可以从提高作物产品营养价值的角度来合理施肥，进而改善动物和人体健康。例如，氮肥和硫肥会影响籽粒蛋白质含量和品质；钾肥能提高作物抗氧化物含量；锌肥可以增加籽粒锌含量。

# 2.

## 高效且有效的养分管理

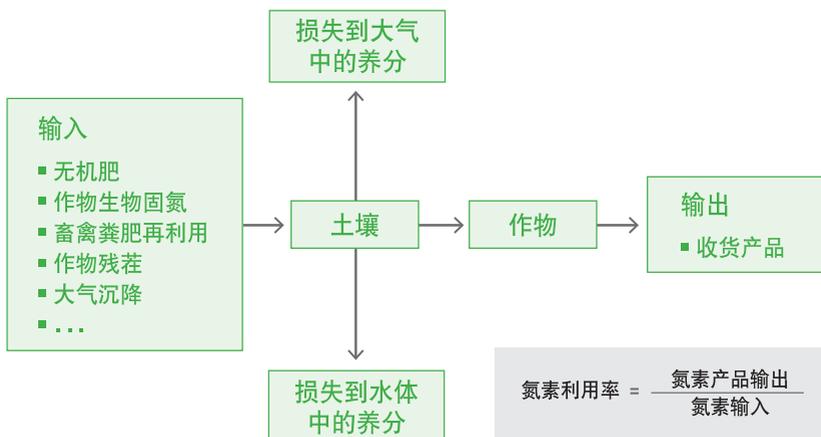
### 2.1

#### 什么是养分利用率?

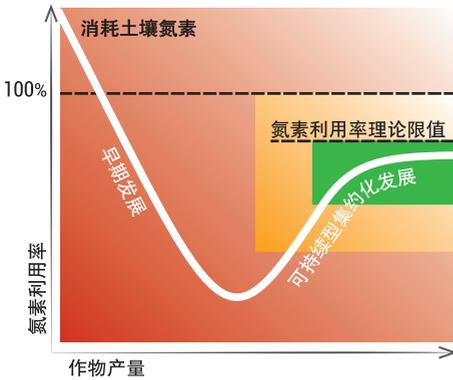
从农户角度看，养分利用率被定义为施入养分（所有来源的）被作物吸收的比例，即如何从养分投入获得最大收益。从养分管理角度看，养分利用率即养分输出占输入的比率，也就是投入的养分最终以产品收获形式输出的比例。

较低的输出输入比（如低于50%）通

常意味着养分有损失到环境的风险，反之较高的输出输入比（如高于90%）意味着当前措施是消耗土壤养分，也就是说多年如此管理后会造成土壤肥力下降。这两种情景都是不可持续的。下图中“绿色区域”代表作物生产力很高同时养分的输出输入比接近最优，其所处的位置对于每种作物和养分都不同。



氮素利用率 (NUE)的计算



氮素利用率（NUE）随产量变化的典型发展趋势。

作物体系逐渐从红色区域转变至橙色区域，最终将转变至代表高产和最佳氮肥利用率的绿色区域（引自zhang et al., 2015）。

养分利用率受化肥施用方式、其它养分来源、作物和土壤管理方式的极大影响。近三十年来，发达国家的养分利用率不断提高，这些地区

农民有机会获取现代技术和信息。这也说明了向可持续集约化农业转型的可行性，即农民可以在提高农业生产力的同时，保护了本底资源并降低了环境影响风险，即降低了单位产品输出的养分盈余。与此相反，大部分发展中国家的情况仍在不断恶化。发展中国家想要扭转这种趋势，则需要有机会接触并实施最佳管理措施（即综合养分管理方法）。

由于各种养分之间存在交互作用，我们可以通过优化管理某种养分来提高其利用率，或通过优化管理与其有交互作用的其它养分（平衡施肥）提高其利用率。例如，硫元素可以促进蛋白质合成，从而提高氮素利用率。

### 养分利用效率和效力目标是互补的

虽然提高养分利用率是一个很重要的目标，但其它反映作物系统效力的关键指标，如作物产量<sup>1</sup>、土壤肥力、水分生产率等也不容忽视。例如，可以通过消耗土壤养分库来提高养分利用率，但此举是不可持续的，因为长此以往会影响土壤肥力。

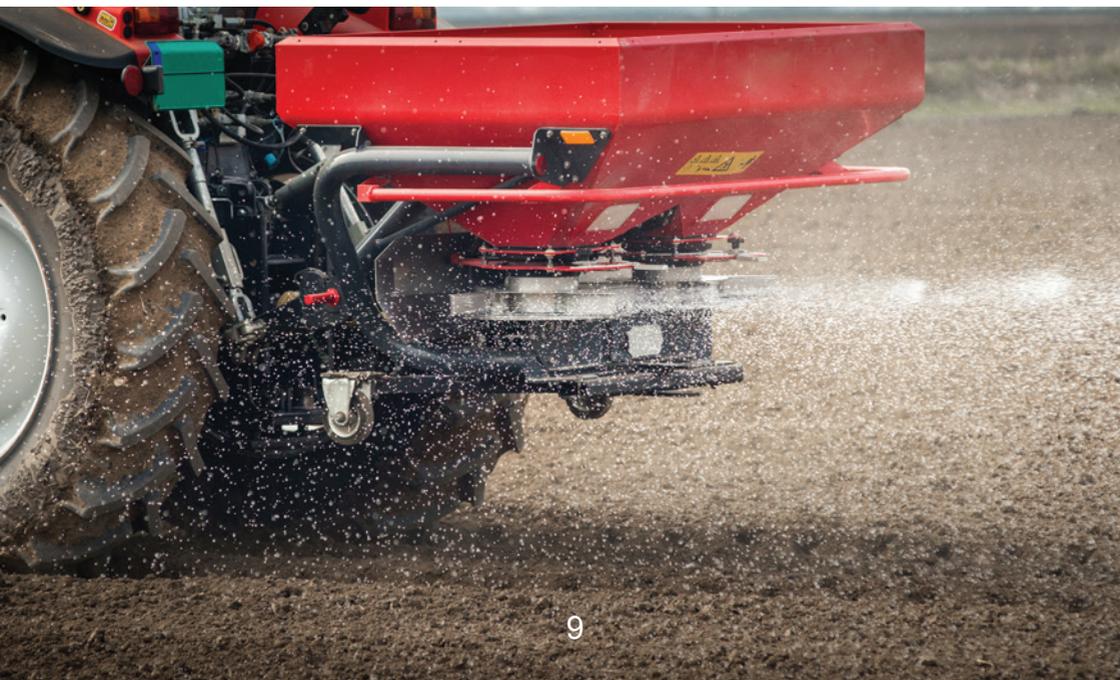
同样，也可以通过减少施肥量以提高养分利用率，但可能会造成作物产

量下降。虽然追踪养分利用率变化可以提供一些有用信息，但需结合一系列其它互补指标才能做出有意义的判断。

针对农民具体耕作地点和作物条件推荐的最佳管理措施，应提供一些能够提高作物系统整体效力和可持续性的选择，同时应考虑公众制定的经济、社会与环境发展目标。

---

<sup>1</sup>养分利用率（以养分输出输入比度量的）在施肥量非常低的时候通常是最高的，但较低的施肥量会导致较低的作物产量。



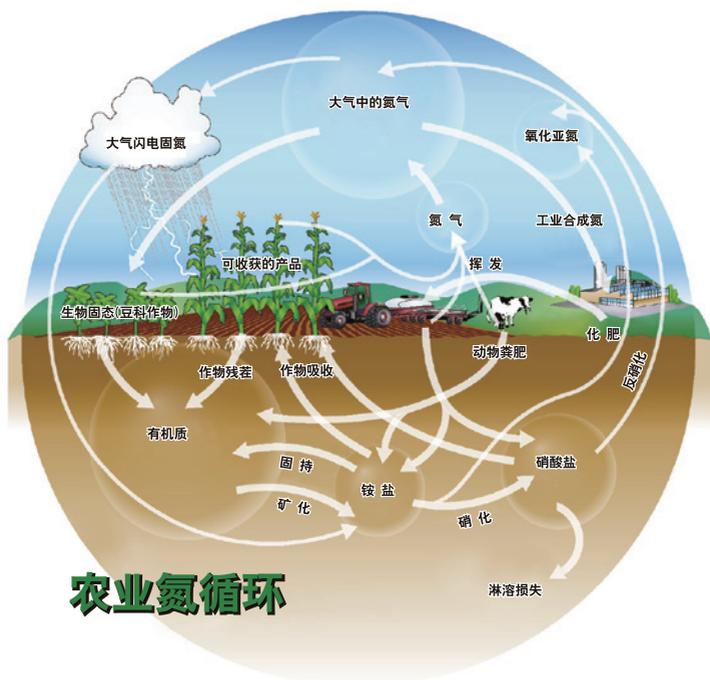


# 3.

## 农业养分循环与损失途径

土壤中氮素的主要形态是有机氮化合物以及以铵盐 ( $\text{NH}_4^+$ ) 和硝酸盐 ( $\text{NO}_3^-$ ) 存在的无机氮。无机氮只是全部土壤氮库的一小部分。土壤表层

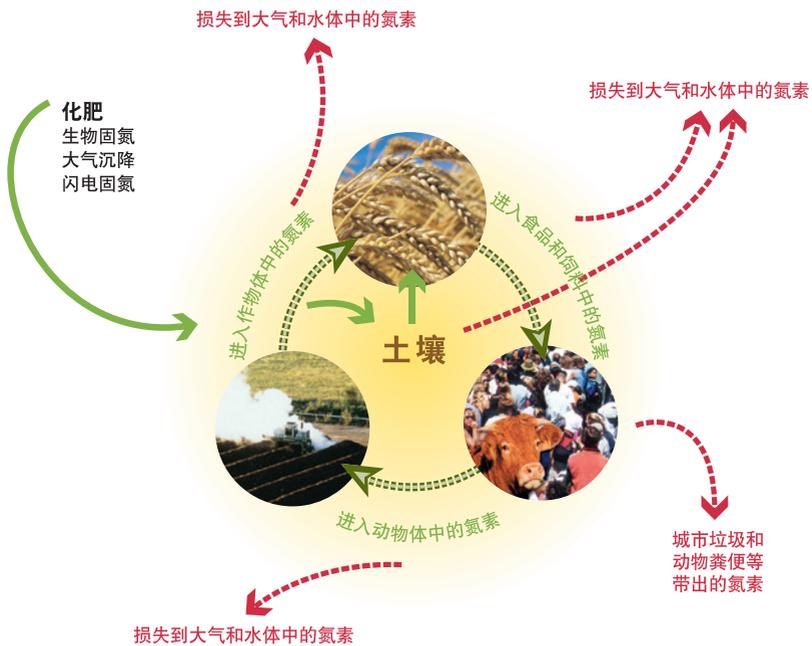
氮素主要以有机氮形态存在。这些不同的氮素形态进行着多种转化过程，可能引起不同途径损失到空气和水体中。



就磷而言，主要损失通过土壤颗粒的侵蚀和径流发生。由于磷在土壤中不易迁移，其淋洗损失相比于氮素是较小的。钾也可通过侵蚀、径流和淋洗损失。由于钾在土壤中可迁移性大，其淋洗损失与磷相比也会相应增加。此外，与氮相似，由于硫既可损失到大气中又可损失到水体中，硫循环也较为复杂。

由于农业养分循环是一个不断损失养分的过程，可持续农业生产依靠有机

肥（如果易得的话）、无机肥和生物固氮等外源养分投入，来弥补作物收获时移走的养分及养分循环不同阶段的养分损失造成的差额。如何选择正确的肥料品种，以合理的施肥量，在正确的时间，采用正确的施肥方法施入土壤，来维持最佳产量同时减少对环境的影响，是农民一直面临的挑战。养分不足和过量都会对人体健康、环境及农民收入造成不利影响。



实际的农业氮循环：是一个开放的系统，且具有不可避免的损失

# 4.

## 植物营养和土壤肥力综合管理的必要性

### 4.1

#### 无机肥和有机肥是互补的

无机肥比有机肥养分含量高，具有明确的养分组成，且其所含养分通常是易被作物吸收利用的。顾名思义，有机肥是富含有机质的，有利于改善土壤性质，如土壤结构、水分入渗和持

留能力。鉴于上述它们各自的优点，无机肥和有机肥是互补的。最佳的管理措施应充分利用这种协同增效作用。

### 4.2

#### 植物营养和土壤肥力综合管理方法的多重优点

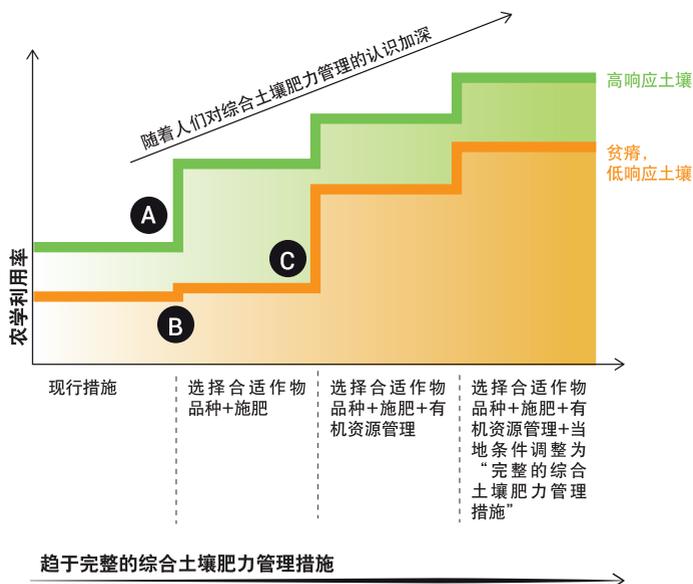
从营养的角度来看，综合管理涉及两个不同层面：

综合植物养分管理（IPNM）旨在基于有机肥和无机肥各自的优点，将两者配合施用。在综合植物养分管理下，农民施入其农场或邻近地区提供的有机肥，并补充化肥以实现产量和品质目标，同时在土壤测试表示有效养分含量较低的地区恢复土壤肥力。

综合植物养分管理方法只针对作物生产的养分供应方面，而综合土壤肥力管理（ISFM）方法则涵盖了与植物养分吸收相关的所有方面，包括作物品种选择，及土壤生物物理健康，这两方面均可以促进植物养分吸收。例如，在干旱条件下，覆盖有机物的土壤比不覆盖的能持留更多土壤水分，多持留的这部分水分则会促进作物对施入肥料养分的吸收并提高产量。

综合植物养分和土壤肥力管理致力于相同目标，即确保植物高效吸收养分

和生长的同时，将环境危害降到最低限度。



- A** 根据当地条件调整管理措施时要注意不同地区土壤肥力的差异性，对于高响应土壤，其肥料农业利用率具有较大的提升空间。
- B** 对于贫瘠，低响应土壤，只通过施肥措施是不能提高肥料农业利用率的。
- C** 无机肥最好与有机肥或者其它有机资源配合施入。

当一个农业系统的管理从现行的措施逐渐转变为一套“完整的综合土壤肥力管理措施”时，肥料农业利用率与有机资源管理之间的概念图。在施肥量不变的情况下，产量与肥料农业利用率呈线性相关。注：每一项管理措施的执行无需按照如图所示的组合顺序展开。

# 5.

## 如何进行养分管理？

### 5.1

#### 最佳养分管理措施应遵从的基本原则

研究和实践中所提出的那些更高产、获利更多、对环境更加友好以及更为社会接受的措施被统称为肥料（或养分）最佳管理措施（BMPs）。肥料最佳管理措施的目标是将养分供应与作物需求相匹配以实现最佳产量同时将损失到环

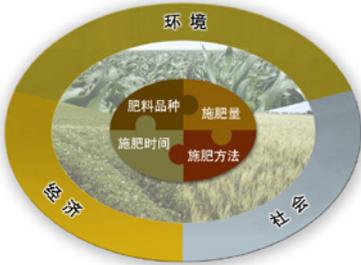
境中的养分减到最少。肥料最佳管理措施在养分管理四个方面（肥料品种、施肥量、施肥时间、施肥方法）的应用提供了相应的养分管理基本原则，即高效利用植物养分以获取经济、社会和环境最大效益的体系。



一项单独的最佳管理措施只能改善一两方面的表现。由于四个管理方面都值得关注，所以养分管理需要采用一系列针对这四个方面的相辅

相成的最佳管理措施。如果这其中的任一方面被忽视，都不可能实现高效的农田养分管理。管理最薄弱的一方面将会产生最大的影响。

最佳管理措施需根据地理位置选择，对于一个给定的农田，与当地土壤-气候条件、作物类型、管理体系及其它具体实地条件相匹配的管理措施才是最有效的。



4R养分管理方法的整体框架示意图

此概念强调养分管理环环相扣的四个方面，这四个方面将影响作物体系对环境、经济和社会可持续发展的贡献（IFA, 2009; IPNI, 2012）

以下五条具有普遍性的科学原则适用于肥料最佳管理措施：

### >遵从已知的农学原理。

综合考虑相关的科学知识，包括土壤肥力、植物营养、土壤物理化学、水文以及农业气象。例如，由于水分胁迫，导致的作物萎蔫现象在干旱条件下可能会加剧，因为根部高养分浓度可通过渗透压从作物体中吸收水分。在这种情况下，施肥要与土壤水分有效性在时间上相契合。

### >注意施肥与其他管理措施的交互作用。

比如栽培品种、播种时间、播种密度、作物轮作等。

### >注意肥料品种、施肥量、施肥时间和施肥方法的相互影响。

例如，控释肥与水溶性肥的施用时期可能不一致。

### >避免施肥对植物根系、叶片及幼苗的不利影响

例如，条施肥需与种子保持一定的安全距离以免损害幼苗。

### >注意施肥对作物品质和产量的影响。

例如，氮素既影响产量也影响籽粒蛋白质含量。蛋白质是一种重要的动物和人体营养成分，同时还会影响用小麦制作的面包品质。虽然超过最佳产量施氮量会增加一定的籽粒蛋白质含量，但过量施氮对植物健康、作物产量和品质及环境的可持续性都有不利影响。氮高效作物品种的使用值得注意。适当选择作物品种和合理调整施肥策略是至关重要的。许多品种在高氮环境中生长过于迅速，会导致作物营养器官生长过于旺盛而可收获部分减少。

### 合适的肥料品种

选择能够平衡且同步地供应作物所有必需养分的肥料品种。

养分管理体系中所选的肥料品种必须确保在整个生长季根据作物需要能够以有效态平衡供应所有必需养分。选择肥料品种（包括有机肥）时还要考虑养分发生损失的可能性、不同养分之间的相互作用和共存性、作物对该肥料潜在的敏感性，以及该肥料含有的非营养元素所带来的风险。合理肥料品种因作物、气候和土壤性质、可用肥料产品、经济效益以及施肥方法的而确定。

选择合理肥料品种应遵循的科学原则包括：

#### >供应作物有效态养分。

供应的养分应是水溶性且作物可直接利用的，或者是在土壤中易转化为作物有效态的形式。

#### >与土壤物理化学性质匹配。

比如避免在淹水土壤中施入硝态氮肥或者在不施加脲酶抑制剂的情况下向高pH值土壤中表施尿素。某些肥料会使土壤酸化，所以只能将它们施入碱性土壤，或配合石灰一起施入。

#### >注意不同营养元素或肥料品种之间的相互作用。

比如磷-锌相互作用，氮素可提高磷有效性，以及化肥对有机肥的补充作用。

#### >注意混合物的相容性。

某些不同肥料品种或产品混在一起时会吸水集聚，导致组分分离而不能均匀地施入这些混合肥料。类似地，颗粒肥料也要避免不同产品之间的离析现象。某些液体肥料在低温下会发生盐析，或者与其它组分发生化学反应生成胶体或沉淀。

#### >注意作物对某些营养元素的敏感性。

大多数肥料都包含一个对某些作物有益、有害或中性的伴随离子。例如，氯化钾中与钾离子结合的氯离子利于玉米生长，但也会对某些水果和蔬菜的品质造成不利影响。

#### >控制非营养性元素的影响。

例如，肥料生产使用的原材料可能会包含一些非营养性的痕量金属元素。这些元素的施加量都应保持在安全限度以内。

## 合理施肥量

确保所有限制性养分的施入量能够满足作物实现目标产量和品质的需求。

合理施肥量是将所有来源作物有效养分的供应量与作物的养分需求量相匹配。了解不同生长阶段作物的养分需求是确定合理施肥量的第一步。施肥量应根据整个生长季养分供应与作物需求之间的平衡来确定，以免造成养分不足或过量。如果施肥量过低，作物产量和品质都会受限；然而过量的投入又会危害作物和环境。过量或不足的养分投入都会降低经济收益。

### >估算土壤养分供应。

采用土壤与植物测试、响应试验、缺素小区或饱和参考带（作为对照）等一系列方法进行估算。

### >估算所有可利用的养分来源。

包括作物秸秆、绿肥、畜禽粪便、堆肥、污泥、灌溉水、大气沉降以及化肥所有养分数量及作物有效性。

### >估算作物需求。

一季作物的养分吸收量取决于作物产量和养分含量。精准估算目标产量非常重要，从而可以设计出能够实现目标产量的综合作物生产计划。

### >预测肥料利用率。

许多损失是不可避免的。虽然要把损失降到最低，但当确定能够满足作物需求的施肥量时，还是要考虑一些不可避免的损失。

### >考虑养分需求的季节变异性。

受气候和其它管理因素的影响，作物产量潜力和养分需求会随季节变化，这就为实时养分管理来调整施肥量（如采用叶绿素仪、叶色卡和其它测定作物体内养分含量的方法）提供了契机。

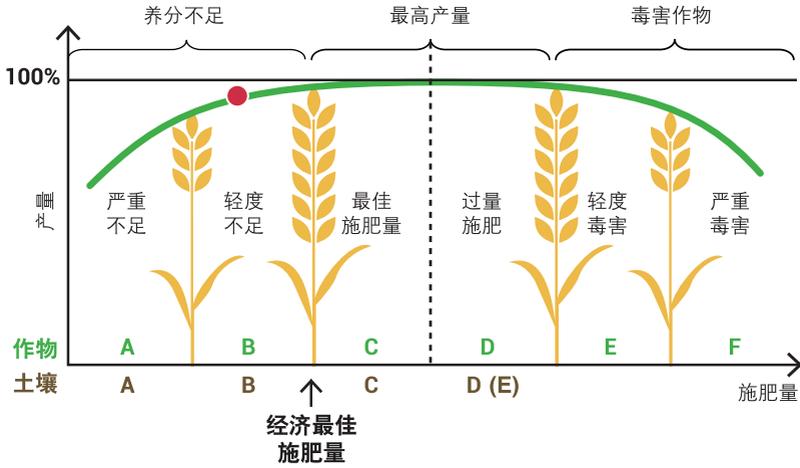
### >考虑养分收支。

如果一个作物体系的养分输出超过输入，那它的土壤肥力长期会下降。与此相反，如果有盈余养分而且损失掉了，那么环境质量和经济收益都会受到影响。

### >考虑不同施肥量的经济收益

考虑到产量具有空间和时间变异性，对于不能持留于土壤中的养分来说，经济最佳施肥量是指其连续等量的投入恰好等于其预期能增加的收益（即边际报酬递减规律），也就是边际收益等于边际投入时的养分投入量。土壤残留养分对后季作物的供应也应被考虑。

● 施肥对作物产量影响临界值，即经济最佳施肥量的90%



施肥量对作物产量的影响，表明了施肥量不合理可能导致的养分缺乏或毒害作用。

## 正确的施肥时间

确定正确的施肥时间需考虑作物养分吸收、土壤养分供应、环境风险及田间操作的相互影响。

从种子萌发到营养生长再到生殖生长最后成熟的过程中，作物整个生长季的养分吸收率不断变化。为了达到最高生产力，在作物能够接触到的部位必需有充足的作物有效态养分供应以满足作物在整个生长季不同阶段的养分需求。如果某养分在被植物吸收利用之前，就已在土壤中长期存在，那它很可能被移出根区或转化为不可利用态。正确的施肥时间可以提高产量，改善品质，降低养分损失。

### >评估作物吸收养分的时间

作物吸收养分的时间由播种日期、作物生长特点、不同生长阶段对养分缺乏的敏感度等因素决定。养分供应必须与作物对养分的需求保持同步，通常呈“S”型曲线。

### >评估土壤养分供应的动态变化。

土壤有机质的矿化可以大量地提供多种养分，但如果作物对养分的吸收需求先于矿化释放的养分，则会导致养分缺乏而限制其生产力。

### >评估肥料产品的养分释放及有效性。

肥料中养分的释放速率和有效性受施肥时的天气和土壤湿度影响，如果与作物需求不同步，就可能导致严重的养分和产量损失。

### >注意根据影响养分损失的天气因素安排时间。

一种养分的特殊形态在某些气候条件或某些季节效果更佳。例如，在温带地区，淋溶损失在春季和秋季会更频繁发生。

### >评估田间操作可行性。

例如，多元养分投入可能需要也可能不需要与农药配合施用。但施肥时不应耽搁那些对时间敏感的管理活动如播种或病虫害防治。在这些限制条件下，可以叶面喷施与大多数农药都相容的肥料。

## 正确的施肥方法

充分利用根际土壤的动态变化，同时考虑养分流动、田间空间变异及降低田间养分损失，来确定正确的施肥方法。

将养分施入正确的位置（在垂直和水平方向上都处于最佳位置）能够确保作物根系在生长季所有时期都可以足量地吸收到每种养分。可以利用先进的施肥设备将肥料施入正在生长的根部周围。近年来，精准农业技术的应用使我们可以精确调整养分投入，按需改变同一田块不同区域的施肥量，考虑不同区域土壤测试和产量潜力的差异。

### >注意根际土壤动态变化。

一年生作物根系整个生长季会逐渐从周围土壤摄取养分。施肥措施需确保养分在作物需要时能够被截取。玉米季条施磷肥就是一个例子，这样做既可以确保幼苗有足够的养分，还可以在施肥量和作物吸收量都较少的情况下增加产量。

### >考虑同一田块内或不同田块之间土壤的空间变异性。

土壤会影响作物产量潜力，且不同土壤的养分供应能力或养分损失潜力也不同。

### >与耕作体系的需求相匹配。

注重播前整地措施。在保护性耕作体系中，要确保肥料深施，保持作物秸秆覆盖土壤，且不能损害苗床质量。

### >降低养分移出田块的风险。

找出最易发生养分损失的田块或田块内某些区域。将它们的侵蚀、径流、淋洗、挥发、硝化和反硝化损失控制在一个可接受的范围内。

### >降低养分毒害幼苗的风险。

避免种子内或种子周围养分浓度过高而毒害幼苗。

### >通过叶面施肥解决养分严重不足的问题。

在干旱或生长旺盛时期，叶面施肥可以解决暂时性的镁、硫元素缺乏症。叶面喷施锌肥、硼肥、锰肥等完全可以满足作物对这些微量元素的需求。



# 6.

## 养分管理与几个关键可持续性因素的关系

### 6.1

---

#### 养分管理与粮食和营养安全

土壤有效养分缺乏会限制作物产量。为了生产出足够的粮食，以满足迅速增加且越来越富足的世界人口对于食品、饲料、纤维和生物质能越来越多的需求，同时减少农业对环境的影响，改善养分管理至关重要。氮素是全球最具限制性的养分。如果没有肥料，特别是氮肥，估计我们只能生产出目前世界粮食产量的一半(Erisman et al., 2008)。到2050年，世界人口预计将超过90亿，且人们的饮食结构逐渐向畜牧产品为主转变，高效使用肥料将在未来几十年养活世界人口的重任中发挥关键作用。因此，需要更加平

衡地施肥，包括对中量元素和微量元素合理利用。

最近认识到，施肥已成为解决动物和人体微量元素缺乏症的手段。就锌元素而言，虽然每个地区面临缺锌风险的人口所占比例都不同，但估计整体上占全球人口的21%(Hotz and Brown, 2004)。土壤中锌含量较低是人体缺锌的根源，施锌肥有助于提高作物产量和籽粒锌含量，从而提高在这些土壤上种植作物的人口的锌摄入量（详见[www.harvestzinc.com](http://www.harvestzinc.com)）。

## 养分管理与土壤健康

许多因素会影响土壤质量与健康。土壤足量且以合适比例为作物生长供应所有必需养分的能力，即通常所说的土壤肥力，是衡量土壤健康的关键特性。增加养分投入以弥补养分输出和损失可以维持土壤肥力。土壤质地和结构等物理因素也是反映土壤质量的重要因素。虽然人为干预可以改变土壤结构，但土壤质地大多是难以改变的。土壤有机质是反映土壤质量的一个关键因素，虽然含量较少，但对土壤结构和土壤整体健康及其有益功能都有较大影响。

土壤有机质控制着土壤微生物种群和它们在土壤中的许多功能，如有机质分解和养分循环。有机质有助于提高土壤团聚体稳定性，从而提升土壤水分入渗和持留能力，有利于提高土壤对侵蚀和退化作用的抵御能力。

当实施最佳管理措施时，肥料施用有利于土壤健康；而不恰当地使用肥料会对许多土壤性质产生不利影响。依据耕作措施的不同，定期施肥可以促进根系生长和作物残体增加，从而提高土壤有机质含量。对于热带农业生态条件下无机肥施用对土壤有机质的影响，即施用无机肥是否会促进土壤有机质转化从而加速有机质分解，一直存在争议。然而，世界各地长期定位试验结果表明，与不施肥田块相比，适量且平衡地施用无机肥增加了土壤有机质含量。

如果施用了错误的肥料产品或错误地掺混肥料，例如氮肥与其它必需养分之间的不平衡施用，将加速土壤中那些未施入养分的消耗而破坏土壤健康。一些肥料产品可能会导致土壤酸化，这对碱性或石灰性土壤或许是有益的；但在低pH值土壤上，如果不施加石灰来抵消这种酸化效应，可能对土壤产生负面影响。

## 施肥处理比不施肥处理土壤有机碳增加的百分比



104个长期定位试验  
(6–158年)  
(Ladha *et al.*, 2011)



64个长期定位试验  
(不包括水稻, 5–130年)  
(Geiseller and Scow, 2014)



20个长期定位试验  
(位于欧洲, 16–108年)  
(Körschens *et al.*, 2013)

肥料对土壤微生物种群的影响取决于肥料品种、施肥量和施肥方法、土壤pH及时间周期。其不利影响通常都是局部且短期的。例如，在邻近肥料颗粒的地方，几周内微生物总活性可能会降低，之后又恢复到正常水平。长

期定位试验表明，长期施肥通常会增加土壤微生物量（还可能伴随着微生物多样性的改变），有机肥和无机肥配合施用通常会进一步提高微生物活性。

	数据库数量	土壤微生物量碳(mg kg <sup>-1</sup> )	
		- N	+ N
全部数据库	107	238	268
pH <5 的施肥处理	17	240	213
5 ≤ pH <7 的施肥处理	39	234	253
pH ≥ 7 的施肥处理	17	139	205
5-10 年的长期定位试验	18	300	239
10-20 年的长期定位试验	34	227	270
20 年或更久的长期定位试验	55	224	276

施肥 (+N) 与不施肥 (-N) 处理的土壤微生物量。

由全球64个不包含水稻的长期定位试验的107个数据库计算得到（未加权平均值）。

（引自Geiseller and Scow, 2014）

## 养分和水分的交互作用

肥料最佳管理措施可以提高水分生产率，就像适量水分供应可以提高养分利用率一样。通常，水分和养分的管理是分开的，但两者实际是紧密相关的。提高养分利用率不应被视为只与肥料管理有关，还与水分管理有关，而提高水分生产率也是如此。

水分胁迫会阻碍养分从土壤运输到作物根系，以及土壤中的生物化学过程，而这些过程都是作物摄取养分必需的。养分缺乏会阻碍根系发

展而降低作物利用水分的能力。改进农艺措施对提高单位面积土地，单位水分和养分的产出至关重要，将促进可持续集约化农业的发展。

养分对产量的影响取决于有效水分的供应，这两者是相互促进的，它们彼此的重要性视每个因素的胁迫程度而不同。通常，养分和水分的交互作用对产量的影响要大于每个因素单独的作用。因此，这两个因素应同时管理。



## 养分管理与气候变化

通过高效且有效地管理养分，农民可以：

- 提高作物体系对气候变化的适应性；
- 阻止进一步扩张耕地而侵占那些脆弱宝贵的生物栖息地；
- 降低氧化亚氮 ( $N_2O$ ) 排放强度；
- 增加土壤碳 (C) 吸收。

农用地向森林、草地和湿地的扩张造成了二氧化碳 ( $CO_2$ ) 的大量排放，因为燃烧了大量砍伐的树木，破坏了碳汇。由于施肥可以增加产量，肥料可以阻止耕地扩张和由此造成的温室

气体排放，以及生物多样性丧失。

氮肥施入土壤后，一部分被作物吸收，一部分留在土壤中，其中一部分与土壤中的有机质结合，其余部分则损失到环境。其中一种损失途径为反硝化作用，以 $N_2$ 和 $N_2O$ 形式释放。氧化亚氮是一种温室气体，其全球增温潜势是 $CO_2$ 的300倍。

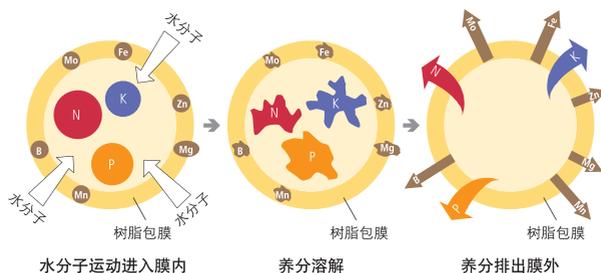
一些最佳管理措施（例如，避免在淹水土壤中施用氮肥；施用缓控释肥或添加了硝化抑制剂的稳定肥料）能够将 $N_2O$ 形式的氮素损失降到最低，同时提高整体氮素利用率和效果。

### 人为管理的生态系统和氮肥投入引起的 $N_2O$ 排放

联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 计算农业土壤 $N_2O$ 直接排放量的第一层级方法，假定施入的氮肥（有机态和无机态）最终有1%以 $N_2O$ 形式排放到环境中。虽然这个方法过于简化，它确是以广泛的氮肥施入引起 $N_2O$ 排放的观测数据为依据。由此看来，如果农业系统集约化程度进一步加强，减少 $N_2O$ 总排放量还是比较困难的。

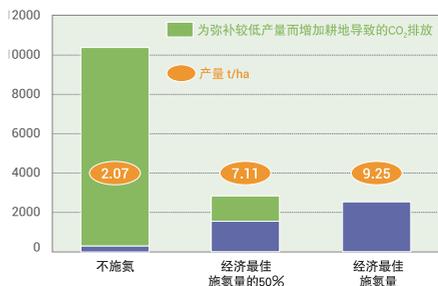
## 缓控释肥和稳定肥料

目前，市面上有一些肥料产品含有添加剂或改性加工用来改善养分释放性，包括逐渐释放作物有效养分的“缓释肥”（如脲醛化肥），保护性包膜物理包裹的“控释肥”（如聚合物包膜肥料），以及减缓氮素转化的“稳定肥料”（如添加了脲酶抑制剂或硝化抑制剂的肥料）。这些产品主要是延长肥料产品中养分的释放时间，来更好地满足作物需求。



包膜/胶囊控释肥作用模式图

除此之外，这些措施还能降低排放强度，即每吨收获产品所引起的温室气体排放总量（以CO<sub>2</sub>当量计）。即使N<sub>2</sub>O排放量增加，当其增量比作物产量的增加量小时，即前者除以后者的比值减小，也就降低了排放强度。通过降低排放强度同时限制耕地扩张，未来粮食生产可以减少温室气体相对排放。



英国三种不同氮肥管理下生产9.25吨冬小麦引起的温室气体排放量（kg CO<sub>2</sub>-eq/ha）。来自洛桑试验站长期定位试验1996至2000年结果的平均值（引自Brentrup and Pallière, 2008）

如果我们将作物残茬归还土壤（秸秆还田），施肥则可以通过促进作物和根系生长提高土壤有机质含量。由于土壤碳、氮循环是紧密相联的，秸秆还田所增加的碳投入可能会固持土壤氮素，降低其对作物的有效性。另一方面，施入过量氮肥可能会加速土壤有机质的分解。全球长期定位试验表明，与不施肥田块相比，适量且平衡地施用无机肥会增加土壤有机质含量。有机肥和无机肥配施通常会显著增加土壤有机质。

人工造林可以固持大量碳，特别是在发展中国家。在这些国家中，恢复碳固持同时不威胁粮食安全的唯一选择就是通过增加肥料投入，种植优良品种以及采取适当的作物和土壤管理措

施，在一些条件较好的土地上，实现农业生产的集约化。计算表明碳固持要远远大于农业生产以及施肥引起的碳排放（Vlek et al., 2004）。

土壤管理，特别是改变耕作措施，对土壤有机质含量有较大影响。适当的施肥措施通常能够在土壤中固持碳、提高土壤肥力、减缓气候变化、促进粮食安全。

气候变化会使气温升高并增加水分胁迫。养分管理是缓解这些环境效应的选项之一。施磷肥可以促进根系生长，提高作物对干旱的抵抗能力。许多阳离子，如钾离子和锌离子，也可以通过一些不同的机制来提高作物的抗性。因此平衡施肥是农民适应气候变化可以采取的一个重要措施。

## 养分管理与环境

除了 $N_2O$ 的全球增温效应以外，施肥（无机肥和有机肥）还可通过以下几种方式影响环境：

- 人为排放二氧化硫（ $SO_2$ ）、氮氧化物（ $NO_x$ ）和氨气（ $NH_3$ ）引起的酸沉降；
- 农田向水生（陆地）生态系统排放的氮、磷增加引起这些生态系统富营养化；
- $N_2O$ 排放破坏平流层臭氧；
- 氨排放促进大气颗粒物的形成；
- 地下水中硝酸盐（ $NO_3^-$ ）累积。

考虑到这些环境效应此消彼长的关系，农学家一直致力于发展肥料最佳

管理措施，将整体环境效应降到最低限度的同时，使利益最大化。虽然发展和推广了一系列能够满足农业生态条件和种植体系多样化的最佳管理措施（针对养分管理四个方面），但对于不同尺度的养分利用效率和效力仍有巨大的提升空间。

下表结合北美伊利湖流域玉米-大豆轮作体系的肥料品种、施肥量、施肥时间及施肥方法，列出了一系列可供选择的磷肥管理措施的优缺点（Bruulsema et al., 2012）。

磷肥管理措施	优点	局限性
<b>方案1</b> 肥料品种—MAP或DAP 施肥量—轮作过程中磷移出量 施肥时间—收获大豆之后种植玉米之前的秋季 施肥方法—撒施	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 土壤压实程度最小</li> <li>• 有便于春季按时播种</li> <li>• 肥料品种最便宜</li> <li>• 施肥方式花费较低</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 在深秋和冬季，存在高磷风险径流</li> <li>• 氮肥利用率较低</li> </ul>
<b>方案2</b> 肥料品种—MAP或DAP 施肥量—轮作过程中磷移出量 施肥时间—种植玉米之前的春季 施肥方法—撒施	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 土壤压实程度最小</li> <li>• 氮肥利用率较高</li> <li>• 肥料品种最便宜</li> <li>• 施肥方式花费较低</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 耕作前，春季存在高磷风险径流</li> <li>• 可能会延误播种</li> <li>• 降低春季磷运输能力</li> </ul>
<b>方案3</b> 肥料品种—MAP或DAP 施肥量—磷的作物携出量 施肥时间—春季 施肥方法—条施	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 氮肥利用率较高</li> <li>• 降低径流中高磷风险</li> <li>• 减少土壤中磷分层</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 具有施肥功能的播种设备实用性不高，但花费较高</li> <li>• 可能会延误播种</li> <li>• 降低磷运输能力</li> <li>• 液态磷肥比颗粒态磷肥贵</li> </ul>
<b>方案4</b> 肥料品种—MAP或DAP 施肥量—磷的作物携出量或轮作移出量 施肥时间—收获大豆之后种植玉米之前的秋季 施肥方法—区域定点条施	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 降低径流中高磷风险</li> <li>• 氮、磷肥利用率较高</li> <li>• 保持一些作物残茬覆盖</li> <li>• 有便于春季按时播种</li> <li>• 减少土壤中磷分层</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 实时动态全球定位系统花费较高</li> <li>• 新设备花费较高</li> <li>• 比撒施需要更多时间</li> </ul>
<b>方案5</b> 肥料品种—APP 施肥量—磷的作物携出量或轮作移出量 施肥时间—收获大豆之后种植玉米之前的秋季 施肥方法—点状或放射状注射	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 降低径流中高磷风险</li> <li>• 氮、磷肥利用率较高</li> <li>• 保持较好的作物残茬覆盖</li> <li>• 有便于春季按时播种</li> <li>• 减少土壤中磷分层</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 实时动态全球定位系统花费较高</li> <li>• 新设备花费较高</li> <li>• 液态磷肥比颗粒态磷肥贵</li> <li>• 比撒施需要更多时间</li> </ul>

MAP = 磷酸一铵颗粒

DAP = 磷酸二铵颗粒

APP = 聚磷酸铵溶液

RTK GPS = 基于载波相位观测值的实时动态全球定位系统



# 7.

## 要点回顾

种植健康、高产高营养的作物，供应必需养分是不可少的。

农业养分循环是一个开放的系统，存在不可避免的养分损失，对作物生产力、农业经济收益和环境服务功能都有不利影响。进行养分管理的目的在于稳定增产的同时减少这些损失。通过实施最佳养分管理措施，可以更高效地利用养分，使收益最大化并降低人为干预农业养分循环所带来的风险。

已有一系列肥料最佳管理措施可供农民采用。这些措施针对养分管理的四个方面（肥料品种、施肥量、施肥时间、施肥方法），并提供一些能够满足地域条件和作物体系多样性的选择，从而提高作物体系整体的经济、社会及环境可持续性（“4R养分管理”方法）。

无机肥不应单独施用。为了使施肥的可持续性和效果最佳，无机肥应与有机肥配合施用，同时选择合适的作物品种及作物、水分和土壤管理措施（“土壤肥力综合管理”方法）。

除了粮食安全和农业收入外，作物养分管理还会影响许多可持续发展目标，如人体营养、土壤健康、水分生产率、减缓和适应气候变化与环境健康。合理的养分管理则会促进这些目标的实现。



# 参考文献

- Barker, A.V., M.L. Stratton and J.E. Rechcigl (2000). p. 169-213. In J.M. Bartels (ed.) Land Application of Agricultural, Industrial, and Municipal By-Products. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, USA.
- Brentrup, F. and C. Pallière (2008). GHG emissions and energy efficiency in European nitrogen fertiliser production and use. Proceedings 639, International Fertiliser Society, York, UK.
- Bruulsema, T.W., R. Mullen, I.P. O'Halloran and H. Watters (2012). Reducing loss of fertilizer phosphorus to Lake Erie with the 4Rs. IPNI Insights, International Plant Nutrition Institute, Norcross, GA, USA.
- Erismann, J.W., M.A. Sutton, J. Galloway, Z. Klimont and W. Winiwarter (2008). How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature Geoscience* 1, 636 – 639.
- Geiseller, D. and K.M. Scow (2014). Long-term effects of mineral fertilizers on soil microorganisms – A review. *Soil Biol. Biochem.* 75: 54-63.
- Glatzle, A. (2014). Severe Methodological Deficiencies Associated with Claims of Domestic Livestock Driving Climate Change. *Journal of Environmental Science and Engineering B* 2: 586-601.
- Hotz, C. and K.H. Brown (2004). Assessment of the risk of zinc deficiency in populations and options for its control. *Food Nutr. Bull.* 25: 94–204.
- IFA (2009). The Global “4R” Nutrient Stewardship Framework for Developing and Delivering Fertilizer Best Management Practices. International Fertilizer Industry Association, Paris, France.
- IPNI (2012). 4R Plant Nutrition Manual: A Manual for Improving the Management of Plant Nutrition, metric version. Bruulsema, T.W., P.E. Fixen and G.D. Sulewski (eds.), International Plant Nutrition Institute, Norcross, GA, USA.
- Körschens, M., E. Albert, M. Armbruster, D. Barkusky, M. Baumecker, L. Behle-Schalk, R. Bischoff, Z. Čergan, F. Ellmer, F. Herbst, S. Hoffmann, B. Hofmann, T. Kismanyoky, J. Kubat, E. Kunzova, C. Lopez-Fando, I. Merbach, W. Merbach, M.T. Pardor, J. Rogasik, J. Rühlmann, H. Spiegel, E. Schulz, A. Tajnsek, Z. Toth, H. Wegener and W. Zorn (2013). Effect of mineral and organic fertilization on crop yield, nitrogen uptake, carbon and nitrogen balances, as well as soil organic carbon content and dynamics: results from 20 European long-term field experiments of the twenty-first century. *Arch. Agron. Soil Sci.* 59: 1017-1040.
- Ladha, J.K., C. Kesava Reddy, A.T. Padre and C. van Kessel (2011). Role of nitrogen fertilization in sustaining organic matter in cultivated soils. *J. Environ. Qual.* 40: 1756-1766.
- Reetz, H.F. Jr. (2016). Fertilizers and their Efficient Use. International Fertilizer Industry Association, Paris, France.
- Vlek, P.L., G. Rodriguez-Kuhl and R. Sommer (2004). Energy use and CO<sub>2</sub> production in tropical agriculture and means and strategies for reduction or mitigation. *Environment, Development and Sustainability* 6: 213-233.
- Zhang X., E.A. Davidson, D.L. Mauzerall, T.D. Searchinger, P. Dumas and Y. Shen (2015). Managing nitrogen for sustainable development. *Nature*, doi: 10.1038/nature15743.

