

高效施肥

BETTER CROPS CHINA

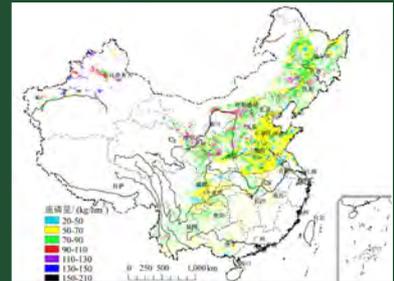
2018年5月总第40期

本期文章……

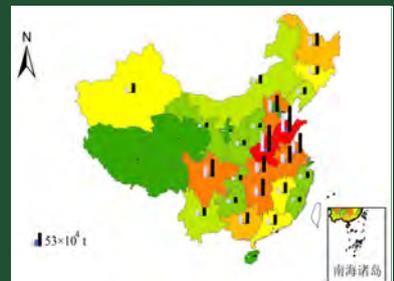
美盛美可辛复合肥与养分专家系统在湖北水稻上的应用效果研究



区域尺度中国玉米可获得产量和肥料需求空间变异研究



中国秸秆养分资源及有效还田的时空分布



更多文章 敬请关注

高效施肥

国际植物营养研究所系列期刊
《BETTER CROPS》中文版专刊

2018年5月总第40期

主 编 何 萍
编 辑 陈 防 李书田 赵蓉蓉

国际项目部

Saskatoon, Saskatchewan, Canada
Kaushik Majumdar, Vice President, IPNI
Asia, Africa, and Middle East Group

理事会

Tony Will, Chairman (CF Industries)
Svein Tore Holsether, Vice Chair (Yara)
Joc O'Rourke, Finance Chair (The Mosaic Company)

IPNI 总部

Peachtree Corners, Georgia, USA
Terry L. Roberts,
President, IPNI

美洲和大洋洲项目部

Guelph, Ontario, Canada
Tom W. Bruulsema, Vice President
Americas / Oceania Group

东欧/中亚项目部

Moscow, Russia
Svetlana Ivanova, Vice President, IPNI Eastern Europe
/ Central Asia

中国项目部

何 萍 主 任 北京办事处 phe@ipni.net
李书田 副主任 北京办事处 sli@ipni.net
赵蓉蓉 女 士 北京办事处 rzhao@ipni.net
陈 防 副主任 武汉办事处 fchen@ipni.net

会员公司：

BHP Billiton • CF Industries Holdings, Inc. •
International Raw Materials LTD • K+S KALI GmbH •
Kingenta Ecological Engineering Group Co. Ltd. •
Nutrien • OCP S. A. • PhosAgro • Shell Sulphur
Solutions • Simplot • Sinofert Holdings Limited •
The Mosaic Company • Yara International ASA .

CONTENTS

目录

肥料养分利用率的计算、现状和趋势 Paul Fixen, Frank Brentrup, Tom Bruulsema, Fernando Garcia, Rob Norton, Shamie Zingore 刘迎夏 译 赵蓉蓉 校	3
基于农田养分管理的杂草生态防控对策研究 潘俊峰 陈 防 校	15
硝硫基螯合肥在大棚苦瓜的高效施用技术研究 李 娟 章明清 李 焯	20
美盛美可辛复合肥与养分专家系统在湖北水稻上的 应用效果研究 汪 霄 鲁君民 李志国 张润琴 陈 防	22
区域尺度中国玉米可获得产量和肥料需求空间变异研究 徐新朋 何 萍 张佳佳 Pampolino M.F. Johnston A.M. 周 卫	26
我国玉米产量差、土壤基础养分供应和养分利用率 徐新朋 刘晓燕 何 萍 Adrian M. Johnston 赵士诚 仇少君 周 卫	32
预估中国大豆养分需求研究 杨富强 徐新朋 王 伟 马进川 魏 丹 何 萍	37
当前我国农业生产中的养分需求分析 李书田 刘晓永 何 萍	42
中国小麦的生产及平衡施肥效果和技术 陈 防 汪 霄	48
中国畜禽粪尿养分资源及其还田的时空分布特征 刘晓永 李书田	51
中国秸秆养分资源及有效还田的时空分布 刘晓永 李书田	58
国家重点研发计划项目“肥料养分推荐方法与限量标准” 暨 IPNI 中国项目 2017 年度学术年会在京召开	64

网页 : <http://www.ipni.net>
<http://china-zh.ipni.net>

The Government of Saskatchewan helps make this publication possible through its resource tax funding. We thank them for their support of this important educational project.

此刊物由加拿大萨斯喀彻温省政府资助。
特此致谢!

《高效施肥》为 IPNI 中国项目部的出版物，每年五月及十月各一期。
本刊物以推动科学化的合理施肥为目标。
可免费从网上直接下载和打印。

肥料养分利用率的计算、现状和趋势

Paul Fixen, Frank Brentrup, Tom Bruulsema, Fernando Garcia, Rob Norton, Shamie Zingore

刘迎夏 译 赵蓉蓉 校

(国际植物营养研究所北京办事处)

摘要：评价作物生产体系时，养分利用率 (NUE) 是一个极为重要的概念，受施肥管理、土壤-水分管理和作物-水分管理的影响很大。施用养分的目标是通过提供经济合理的养分需求，同时使田间养分流失最小化，以提高作物种植体系的整体表现。通过养分利用率评价种植体系对养分利用的部分作用，但不是全部的效果。因此，整个作物体系优化的目标必须同时包括生产力和养分利用率。本章中，我们提出了粮食作物采用推荐的管理措施条件下特定的养分利用率；然而，这些养分利用率基准最好设置在适宜的种植制度、土壤、温度和管理环境条件下。全球养分利用率的时间变化趋势因地区而异。对于氮、磷和钾而言，偏因子养分平衡（作物收获所移走养分与施肥中所含养分之比）和偏生产力（单位施用某种养分的作物产量）在非洲、北美、欧洲和欧盟 15 国有上升趋势，而在拉丁美洲、印度和中国则有下降趋势。虽然基于时间因子可将全球区域分为两组，但是每组趋势背后仍存在很大的可变性因素。许多管理方式和环境因素（包括植物水分状态）的交互作用影响养分利用率。同时，植物养分状况也以类似的方式显著影响水分利用率。这些关系在本书中其他章节有详细介绍。

养分利用率的定义和重要性

满足社会对食物的需求是全球性的挑战，最近的调查报告显示：全球作物需求自 2005–2050 年将增加 100–110% (Tilman 等, 2011)。据估计，2000–2050 年，世界粮食需求将增加 60% (联合国粮农组织, 2009)，其他研究预测粮食需求将在 30 年内翻一番 (Glenn 等, 2008)，相当于每年的增长率维持在 2.4% 以上。持续满足粮食需求是一项巨大的挑战，尤其是与历来粮食产量趋势相比，近半个世纪以来一直呈线性增加 (联合国粮农组织, 2009)。如何提高养分利用率和水分利用率 (WUE) 已被列为当今最重要和艰巨的研究课题 (Thompson, 2012)。

养分利用率是评估作物生产体系的一个非常重要的概念，很大程度上受肥料管理、土壤-水和植物-水关系的影响。当农田管理者努力满足社会对食物、纤维和燃料日益增长的需求时，养分利用率表征了从作物种植体系损失到环境中的养分的潜在可能性。测定养分利用率不是测定养分损失，因为养分可能被固定在土壤中，所以养分利用率相对较低的种植体系不一定对环境有害，相反地，养分利用率较高的体系不一定对环境无害。我们将在本章后面提供这些情况的例子，来阐明为什么必须在一个已知的环境中解释养分利用率的测定。

可持续养分管理必须快速有效地实现预期的经济、社会和环境效益。随着养分成本的增加，更加突出养分高效利用的重要性，然而越高产的作物移走养分量越大，这就

意味着需要投入更多的养分，系统中就有养分损失的风险。以可承受的价格为社会提供足够数量和食物的食物，就要求生产成本保持在较低水平，同时需要提高生产力以满足预期要求。因此，生产力和养分利用率都必须增加。这些因素都刺激肥料企业努力推广肥料最佳管理措施的方法，例如 4R 养分管理策略，强调施肥应该选用正确的肥料品种、正确的施肥量、正确的位置和正确的时间 (IPNI, 2012b)，或者肥料产品管理计划 (Fertilizers Europe, 2011)。这些方法考虑了经济、社会和环境多重因素，对可持续农业系统至关重要，因此为特定的养分利用率指标提供了合适的背景条件。

养分利用率表面上是一个简单的术语。然而，由于潜在养分来源（土壤、肥料、粪便、大气（大气沉降）等）的多样性以及影响作物养分需求的多种因素（作物管理、遗传学、天气），有意义并且具有实用性地定义养分利用率这一概念相当复杂。同时，各种不同的养分利用率表达形式也进一步限定了这一概念的表达，因为那些表达式受限于数据的可用性，而不是能够做出合理解释的数据。

养分利用和养分利用率的目标

养分利用的目标是通过为作物提供经济上的最佳养分来增加种植体系的整体性能，并通过提升土壤肥力或者其他土壤质量因子使田间养分损失最小化，从而支持农业可持续性发展。养分利用率仅体现了种植体系的部分性能，

但不是所有性能 (Mikkelsen 等, 2012)。提高养分利用率最有意义的方面就是提升种植体系的整体性能。

因此, 在不降低生产力或不影响未来生产潜力增加的前提下提高养分利用率的管理措施可能是最有意义的。如果单一追求改善养分利用率降低了当前或未来生产力, 那么对脆弱的土地的种植需求可能会增加。脆弱的土地通常是养分利用率较低的系统, 对水分的利用率也较低。与此同时, 随着养分施用量增加至最优, 作物生产力会持续增加, 但增速下降, 养分利用率通常也会下降 (Barbieri 等, 2008)。养分利用率下降的程度取决于肥料种类、施肥时间、施肥位置因素、其他栽培技术以及土壤和气候条件。

养分利用率表达式的预期用途和可用数据

最恰当的养分利用率表达方式取决于被提问的问题, 并且通常取决于所研究的时空尺度上可靠数据的有效性。对植物育种者或遗传学家来说, 研究的尺度可能小到个体植株; 而就政策目的、教育家或市场营销人员而言, 研究的尺度可能大至一个国家或多个国家。研究的话题可能集中于单季或几十年的种植体系中单一的管理措施或产品。可用的数据可能相对完整, 涉及密集型研究项目中所有主要的养分输入和特定的养分损失, 或仅限于养分管理者通常可获得的数据。

众多的表达式和测定方法已经进化到可以满足不同研究背景的需求, 并且通常都被称为“养分利用率”。为了更恰当地解释养分利用率, 必须说明所使用的特定方法。

养分利用率的常用测定方法及其应用

Dobermann (2007) 撰写了一篇关于测定和计算养分利用率的优秀综述。表 1 总结了 Dobermann 定义的常用养分利用率术语, 以及它们的应用与局限。同时列出了每个术语主要解决的问题和典型用法。

偏生产力 (PFP) 是一个简单地描述生产效率的表达式, 以单位施用某种养分的作物产量来计算。有养分输入和产量记录的农场都可以很容易地算出偏生产力, 如果养分输入量和作物产量的统计数据是可靠且可用的, 地区和国家水平的偏生产力也很容易可以算出来。然而, 由于作物所需的养分和水分不同, 所以偏生产力的数值随不同种植体系的作物而不同。如果基于作物鲜重, 那么单作和轮作之间的对比尤其困难, 因为这些差异很大程度上取决于作物含水量 (例如, 马铃薯和谷物)。因此, 种植体系不同的地区很难用这个指标比较。

农学效率 (AE) 以单位施用某种养分的作物籽粒产量增量来计算。它更准确地反映了施肥对生产的直接影响, 并且直接与经济收益相关。农学效率的计算需要不施肥情况下的产量信息, 因此只有在农场实施了不施肥处理的田块时才能得到。如果使用一年的试验数据, 而不是长期试验数据来计算, 那么施入肥料的农学效率通常会被低估, 因为施肥对下茬作物有残留影响。预估肥料对作物产量的长期贡献需要长期试验。

偏因子养分平衡 (PNB) 是养分回收率最简单的表达式形式, 为单位养分输入与养分移走的比值 (即 “移走和利

表 1 养分利用率的常用术语及其应用 (Dobermann, 2007 之后)

术语	计算公式 *	解决的问题	典型应用
偏生产力	$PFP=Y/F$	相对于养分输入来说, 该种植体系的生产效率?	衡量趋势的一个长期指标。
农学效率 **	$AE=(Y-Y_0)/F$	通过养分输入, 生产力提高了多少?	作为施入养分对生产力影响的短期指标。也用作基于缺素区产量养分推荐的输入数据。
偏因子养分平衡	$PNB=U_H/F$	施入养分与从系统移走养分的关系?	衡量趋势的一个长期指标; 结合土壤肥力信息时更有用。
表观回收率 **	$RE=(U-U_0)/F$	施入养分中作物吸收了多少?	作为种植体系养分损失潜力和获取管理措施效率的指标。
内在利用效率	$IE=Y/U$	植物将从所有来源获得的养分转化为经济产量 (籽粒等等) 的能力?	在育种项目中评估基因型; 粮食作物中氮的内在利用效率值通常在 30-90, 55-65 之间更佳。
生理效率 **	$PE=(Y-Y_0)/(U-U_0)$	植物将从施入肥料品种获得的养分转化为经济产量的能力?	研究评估了栽培品种与其他栽培技术之间的养分生理效率; 值通常在 40-60 之间。

*Y= 施肥情况下作物收获的产量; Y₀= 未施肥情况下的产量; F= 养分施入量; U_H= 作物收获部分的养分含量; U= 施肥条件下作物地上部生物量中养分总吸收量; U₀= 未施肥条件下作物地上部生物量中养分吸收量; 表中未列出单位, 因为这些表达式都是以质量为基础的比率, 所以它们的标准形式都是无单位的。磷和钾要么以元素表示 (常见于科学文献中), 要么以氧化物表示, 如 P₂O₅ 或 K₂O (常见于工业)。

** 由于施入养分的残留效应, 短期缺素区经常导致长期的农学效率、表观回收率或生理效率被低估。

用”之比)。也有少数报道为“输出减去输入”。粮食生产者可以在地区或国家水平测定或预估偏因子养分平衡。假设偏因子养分平衡接近 1, 表明土壤肥力维持在一个稳定状态。然而, 由于偏因子养分平衡计算的是部分平衡, 养分移走过程如侵蚀和淋洗过程中的养分不包含在内, 所以把偏因子养分平衡 等于 1 作为衡量土壤肥力可持续性的指标可能会令人误解, 尤其是在基础土壤肥力较低、投入与产出低的地区, 如撒哈拉以南的非洲地区。而且, 偏因子养分平衡的计算中也很少包括所有养分输入, 因此术语中以“偏因子”作为修订。除了肥料外, 生物氮固定、可回收的粪肥养分、生物污泥、灌溉水和大气都是养分的来源。偏因子养分平衡的数值远低于 1, 说明养分输入远超过了养分移走, 表明超出移走部分的养分损失可以避免, 因此需要提高养分利用率 (Snyder and Bruulsema, 2007); 然而, 可获取的数值取决于特定的种植体系和土壤类型。偏因子养分平衡大于 1 说明作物收获移走的养分比施入的肥料和粪肥还多, 相当于养分的“土壤矿化”。如果已知土壤中的有效养分含量高于推荐值, 可能需要分析上述的情况。然而, 在土壤养分浓度处于或低于推荐值, 偏因子养分平衡大于 1 的情况一定是不可持续的 (Brentrup and Palliere, 2010)。由于资金流和市场状况的影响, 个体农场的偏因子养分平衡在短期内可能会出现大幅波动, 尤其是 P 和 K。因此, 对多年偏因子养分平衡的长期评估更为有用。

表观养分回收率 (RE) 是养分利用率表达式中较为复杂的一种, 通常定义为施用单位某种养分的作物地上部养分吸收量增量, 通常是科学家研究作物养分反应时首选的养分利用率表达式。像农学效率一样, 只有在田块进行过缺素处理的情况下才能测量, 除此之外, 还需要测定作

物的养分浓度。像农学效率一样, 如果只计算一年的数据时, 往往会低估长期的表观养分回收率。

养分内在效率 (IE) 被定义为地上部吸收单位养分所生产的籽粒产量。它随基因型、环境和管理措施的变化而变化。养分内在效率高表明养分缺乏。养分内在效率低表明由于其他胁迫 (其他养分缺乏、干旱胁迫、高温胁迫、矿物毒性、虫害等) 导致内部养分转化性较差。

生理效率 (PE) 被定义植物施用某种养分所生产的籽粒产量增量与地上部养分吸收增量的关系。像农学效率和表观养分回收率一样, 测定生理效率需要缺素处理的田块, 还需要测定作物的养分浓度, 生理效率广泛应用于科学研究。

养分利用率的应用和基准

多数情况下, 评估任何一种管理措施时, 使用多种养分利用率很有帮助, 能更好地了解 and 量化作物对施入养分的反应。各种不同的指标应同时使用。通常, 评算的农学效率最高时, 施肥量也最低, 这与偏因子养分平衡高有关。最近的研究发现, 通过基因修饰如磷饥饿耐受基因有助于水稻获取更多土壤磷 (IRRI, 2012), 将增加收获时作物的偏生产力和磷移走量。这样的发现对农民具有很大的短期价值, 可以在土壤磷素较低的水平下应用。但是, 如果施入的磷小于移走水平, 则会发生土壤磷素耗竭 (PNB 大于 1)。因此, 即使有这种遗传变化, 为了系统的可持续性也必须获得恰当的偏因子养分平衡。尽管每个养分利用率概念都可以用于描述施肥效率, 但对养分管理的完整分析还应包括其他的养分利用率概念, 粮食产量、施肥量和当地的土壤肥力 (Olk 等, 1999)。例如, 在土壤速效

表 2 粮食作物 (主要指玉米、水稻和小麦) 常规的养分利用率水平 (采用推荐的管理方法时, 当前土壤速效磷和有效钾含量在推荐范围内)

测定项	氮	磷 (P ₂ O ₅)	K (K ₂ O)	解释
偏生产力 (千克籽粒 / 千克养分)	40-90	100-250 (45-110)	75-200 (60-165)	较低水平表明土壤反应较低或养分施用过, 而较高水平表明养分供应可能限制了生产力。
农学效率* (千克籽粒 / 千克养分)	15-30	15-40 (7-15)	8-20 (7-15)	较低水平表明变化管理措施可以增加作物反应或降低输入成本。
回收率* (%)	40-65	15-25	30-50	较低水平表明变化管理措施可以提高效率或养分在土壤中的累积。
偏因子养分平衡** (千克养分 / 千克养分)	0.7-0.9	0.7-0.9	0.7-0.9	较低水平表明变化管理措施可以提高效率或增加土壤肥力。较高水平表明土壤肥力可能有所下降。

* 基于第一年的反应。

** 输入包括肥料、施入的粪肥养分和来自灌溉水的养分。

*** 作者根据已发表文献中的报告值选择范围, 并遵循该地区推荐措施的常规水平进行最佳判断。应尽可能根据当地的研究和经验进行相应的调整。

磷低的情况下，施磷量低的土壤中磷的农学效率可能非常高；然而，在这种条件下，磷素的偏因子养分平衡可能远高于1，耗竭了本身已经很低的土壤磷库，如图8所示。

在这种情况下，农学效率较高的地块磷肥施用量低，尽管比不施用磷肥要好，但仍然不是最佳管理措施（BMP）。

本章将阐述主要的养分利用率测定和趋势存在的巨大变异及其主要影响因素。通过确定研究领域相关的养分利用率的测定项目、为这些测定项目收集数据，进而为评价收集的数据建立基准，来促进养分管理方法的改善。基准应设置在适当的种植体系、土壤、气候和管理环境下，并充分了解测定养分利用率的计算方法。然而，本章的重点是为解释养分利用率测定提供通用的准则。表2为粮食作物氮、磷和钾最常见的养分利用率测定项提供广义的指导准则。这些基准应该基于当地的研究和经验水平做出适当的调整。

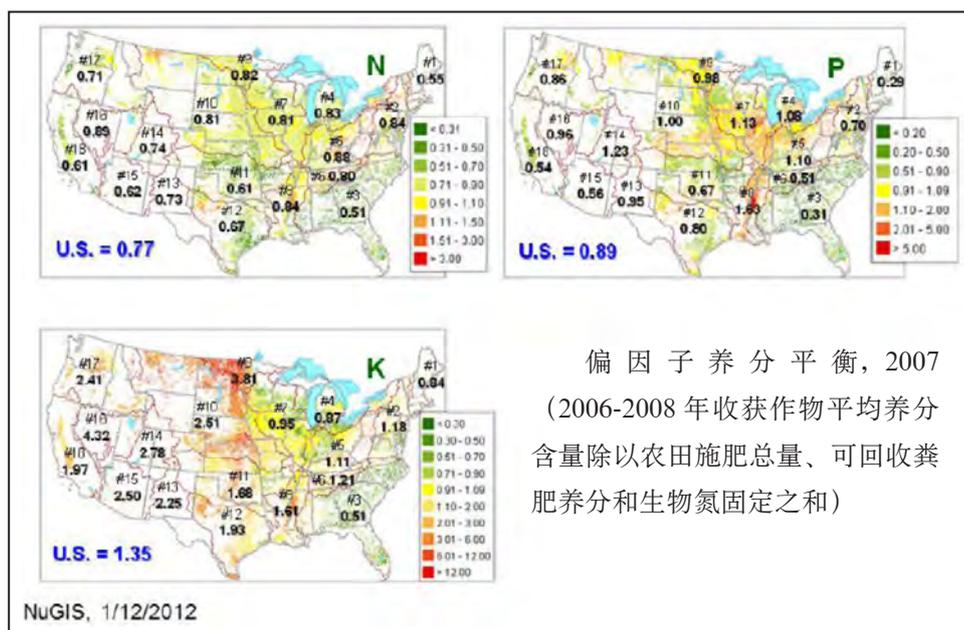
不同尺度下的养分利用率

表1中的养分利用率术语可以预估全球尺度以及个别小范围单一田块的养分利用率。延展性是养分利用率指标不可或缺的属性，因为它使当地的管理措施与较大地域尺度带来的影响之间的联系更加清晰。然而，评估特定地点的准确性和可靠性随尺度的增加而降低。在任何情况下，这些预估都取决于用于计算的数据质量。如偏生产力等

简单的指标相比回收率和生理效率等复杂的指标更容易，以下是在不同尺度应用养分利用率术语的具体示例。

地区尺度

表3预估了全球各地区粮食作物的氮素偏生产力和偏因子养分平衡（按照施氮量从低到高的顺序）。地区间这两个效率的测定差异很大，在非洲和东欧/中亚施氮量最低的地区出现两个最高值。这些地区的平均产量最低，并且偏因子养分平衡值远大于1，表明土壤中含有从有机质矿化而来的氮，并且该地区的种植体系是不可持续的（豆类轮作中产生了大量的氮素的影响除外，并且偏因子养分平衡或偏生产力值不考虑豆科作物固氮）。



偏因子养分平衡，2007
(2006-2008年收获作物平均养分含量除以农田施肥总量、可回收粪肥养分和生物氮固定之和)

图1 美国流域地区的偏因子养分平衡 (IPNI, 2012a)

表3 全球各地施氮作物的偏生产力和偏因子养分平衡及平均施氮量和作物产量

地区	施氮量 (千克/公顷)	粮食作物 (吨/公顷)	籽粒氮* (千克/公顷)	偏生产力 (千克籽粒/千克氮)	偏因子养分平衡 (千克籽粒氮/千克氮)
撒哈拉以南非洲	9	1.1	17	122	1.8
东欧、中亚	25	2.1	32	84	1.3
大洋洲	48	1.9	29	40	0.59
拉丁美洲	55	2.9	44	53	0.79
南亚	58	2.4	36	41	0.62
东南亚	65	3.2	48	49	0.74
西亚、北非	68	2.3	35	34	0.51
亚洲东北部 (日本、南韩)	89	6.1	92	69	1.03
北美	112	5.1	77	46	0.68
西欧	113	5.5	83	49	0.73
东亚 (中国、越南、朝鲜人民共和国)	155	4.8	72	31	0.46
全球	70	3.1	47	44	0.66

* 假定粮食籽粒 15 千克氮 / 吨。

1999-2002/03 年间施氮量和粮食产量，Dobermann 和 Cassman 2005 年报道。

表 3 中的值代表非常大区域的平均值，具有较大变异性。撒哈拉以南的非洲地区 (SSA)，平均偏因子养分平衡极高，国家间具有很大的差异性，通常东部数值较高，而大陆中部和西部数值较低 (Smaling 等, 1997)。我们也必须认识到撒哈拉以南的非洲地区不同国家之间农场偏因子养分平衡的高度变异性。表 3 的总体数据显示，可以获取良好资源的农场通常偏因子养分平衡值小于 1 (养分输入超过移走)，而资源量较少的农场则大于 1 (Zingore 等, 2007)。获取较少资源的农场通常更多地依赖豆科作物固氮，表 3 中没有体现这一效应。东亚是氮输入量最高的地区，而偏因子养分平衡 (0.46) 最低。这表明保持生产力的同时提高养分利用率的潜在可能性。在如此大尺度下，表 3 中其他地区之间的差异可能是由于一系列复杂因素引起的，包括作物轮作、土壤特性、气候、政府政策和管理强度。

一个国家偏因子养分平衡的区域差异说明了这一系列复杂因素对养分利用率的影响。例如，美国流域地区偏因子养分平衡的变化呈现出一定可预测的趋势 (图 1)。图 1 中的偏因子养分平衡值没有表 3 中的“偏”，因为图 1 中的偏因子养分平衡值包括氮固定和施用的粪肥养分。氮、磷和钾的偏因子养分平衡范围通常在美国东南部较低 (3 区)，由于该地区结构粗糙、土壤有机质含量较低，所以蓄水能力和阳离子交换能力非常低。该地区大多生产经济作物，其中多为养分利用率低的作物。另一个极端情况出现在美国的西半部，由于土壤基础钾素含量普遍较高，偏因子养分平衡水平极高，导致对钾肥没有反应。在解释区域尺度上养分利用率的数据时，需要考虑这些因素。

农场或田块尺度

偏生产力和偏因子养分平衡可为种植者提供有用信息，也可为有输入和输出记录的农场计算用。图 2 显示了巴西农场每公顷农田和每吨粮食的肥料用量趋势，并说明了农场尺度通常可用的数据。在这种情况下，尽管每公顷肥料用量增加，但随着农作物产量的增加，偏生产力也增加 (图中为其倒数，每吨作物产量的氮磷钾用量千克)。种植体系农艺措施的改良可显著影响养分利用率，当增加养分量时，施肥量、作物产量和偏生产力也会同时增加 (“可持续集约化”)。

偏生产力和偏因子养分平衡指标都不考虑土壤固有的养分供应；因此它们不能充分反映肥料提供养分的真实效率。农学效率、表观回收率和生理效率可以很好的估算施

入养分的短期养分利用率，但是农场通常没有这些指标需要的数据。

传统上对照区或缺素区仅限于研究设置，但如果种植者有兴趣，也可以在农场设置。建立常年对照区 (同一地区多年不施肥，这反映了施入养分对生产力和土壤质量的长期贡献) 和年际对照区 (可以评估单作对施用养分的影响) 是有价值的。但由于低产和收获产品质量不一致的原因，对照区对种植者来说成本昂贵，所以这样的农场研究最好在合作组织中进行。是养分匮乏地区建立对照区重要的限制条件，如撒哈拉以南的非洲地区。此外，在整个产区进行农场研究结果的共享比单次观察的更有意义。

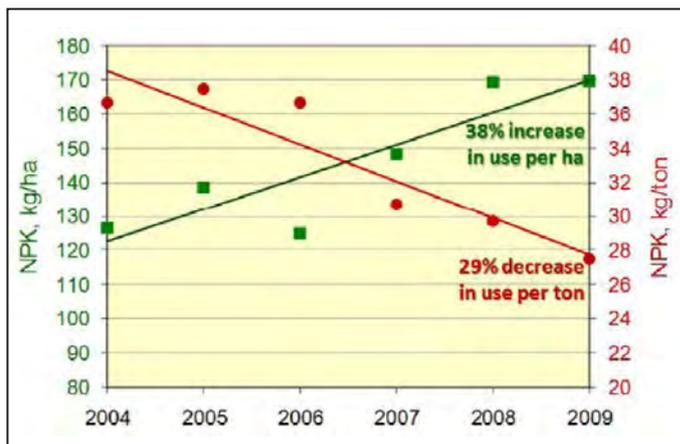


图 2 巴西马托格罗索州伊蒂基拉附近的农场，每公顷农田和每吨作物产量的肥料用量的变化 (L.Prochnow, 个人交流, 2012)。

研究区域尺度

研究小区通常提供施肥和未施肥小区作物收获时养分吸收和移走的完整数据补充，可以计算所有常见的养分利用率 (表 1)。由于每个术语解决不同的问题，且具有不同的解释，所以研究报告通常包括多个养分利用率表达式的测定 (Dobermann, 2007)。中国水稻、小麦和玉米等多个田间试验的养分利用率测定结果如表 4 所示，中国三大地区的小麦田间试验总结如表 5 所示。区域尺度上小麦数据显示，由于气候、土壤特性和种植体系的差异，同一国家地区间养分利用率存在巨大差异。

在相同措施下，从试验站研究小区估算的养分利用率值通常大于农民大田生产的养分利用率值 (Cassman 等, 2002; Dobermann, 2007)。研究小区与整个大田之间肥料措施、耕作、播种、病虫害管理、灌溉和收获的规模不同导致了这些差异。

研究小区回收率的测定通常通过表 1 所述的差减法计算来完成。氮素回收率的另一种方法是使用 ^{15}N 同位素作为肥料中的示踪剂，以确定肥料中提供的养分被作物吸收

表 4 2002–2006 年中国田间试验平均产量反应和养分利用率 (Jin, 2012)

作物	养分	试验数	平均施肥量 (千克/公顷)	增产率 (%)	农学效率 AE (千克/千克)	回收率 (%)
水稻	N	51	187	40	12	25
小麦	N	30	181	43	11	36
玉米	N	70	219	38	12	31
水稻	P	62	41	13	26	10
小麦	P	39	52	24	21	16
玉米	P	71	49	15	26	15
水稻	K	67	122	21	11	25
小麦	K	51	100	18	8	26
玉米	K	84	118	17	13	32

表 5 基于 2000–2008 年中国三大地区小麦试验最佳处理的养分利用率表达式对比 (Liu 等, 2011)

地区	养分	观测数 **	平均施肥量 (千克/公顷)	偏生产力 *** (千克/千克)	农学效率 AE (千克/千克)	回收率 (%)	偏生产力 PNB**** (千克/千克)
华北 NC	N	122–210	199	38 (518)	9.5	35.2	1.10
长江下游 LY	N	60–155	220	34 (234)	11.3	48.1	0.81
西北 NW	N	13–34	169	37 (108)	6.5	17.0	0.70
平均 Avg	N	195–363		36 (860)	9.8	37.9	0.95 (0.73)
华北 NC	P	46–137	56	142 (506)	23.0	17.8	1.07
长江下游 LY	P	26–51	47	146 (220)	18.4	25.9	0.91
西北 NW	P	11–40	47	142 (108)	7.0	7.4	0.43
平均 Avg	P	83–223		143 (834)	19.2	19.0	0.96 (0.81)
华北 NC	K	70–374	111	71 (481)	7.6	23.7	1.67
长江下游 LY	K	26–69	96	76 (234)	8.3	34.2	1.73
西北 NW	K	14–77	70	66 (102)	4.2	30.0	2.73
平均 Avg	K	110–517		72 (817)	7.2	27.0	1.82 (0.60)

* 华北 NC: 温带气候, 冬小麦-玉米年际轮作; 长江下游 LY: 温带、亚热带湿润气候, 主要稻麦轮作; 西北 NW: 大陆性气候, 春小麦连作体系;
** 农学效率 AE、回收率 RE 和偏因子养分平衡 PNB 观测数范围;
*** 括号中 PFP 的观测数;
**** 由籽粒和秸秆移走量除以施肥量计算, 括号中只包括籽粒移走。中国平均 44% 的小麦秸秆养分还田。

的比例。这两种方法通常是相关的, 然而, 由于 ^{15}N 通过微生物介导的土壤过程循环, 所以 ^{15}N 方法确定的回收率通常低于差减法估计 (Cassman 等, 2002)。在土壤中用示踪剂测定回收率通常比在植物中更有用, 特别针对研究长期效应。Ladha 等人 (2005) 总结了几项研究的结果, 其中 ^{15}N 用于估算五种后续作物的氮素回收率, 报告范围为 5.7–7.1%, 第一季除外。在第一个生长季, 总回收率为 35–60%。

氮素养分利用率的现状和趋势

氮素养分利用率的现状

Ladha 等人 (2005) 对 93 项已发表研究小区的测定养分利用率进行了深入的综述 (表 6)。该综述评价了玉米、

小麦和水稻养分利用率表达式的主要趋势。玉米和水稻的偏生产力和农学效率一般高于小麦, 至少部分原因是因为小麦籽粒含氮量较高。不同区域和作物的回收率值差异很大, 第 10 个百分位数值为 0.2, 第 90 个百分位数值为 0.9 (籽粒加秸秆)。数值范围大多取决于研究中土壤、气候和管理条件的差异。55% 的总体平均回收率与其他发表的文献相吻合, Smil (1999) 和 Sheldrick (2002) 等人预估的全球回收率值分别为 50 和 57%, Ladha 等人 (2005) 总结了美国和加拿大的回收率值分别为 56% (Howarth 等, 2002) 和 52% (Janzen 等, 2003)。

如前所述, 生产领域中测定的养分利用率通常小于研究小区, 如表 6。Cassman 等 (2002) 举例说, 四个亚洲国家主要水稻产区农民施氮的平均回收率为 0.31 (179 个农场), 而田间特定管理 (112 个农场) 的回收率为 0.40, 管理良

好的田间试验的回收率为 0.50–0.80。Balasubramanian 等 (2004) 报道, 现行耕作方式下, 粮食作物中氮素回收率为 0.17–0.33, 研究小区为 0.25–0.49, 研究小区最大值为 0.55–0.96。在印度, 恶劣天气条件下, 种植小麦的 23 个农场的回收率平均值为 0.18; 而在良好天气条件下, 21 个农场的平均回收率为 0.49 (Cassman 等, 2002)。

无论试验是在农场还是在试验站, 高产粮食体系的农学效率往往比低产系统更高。这并不令人惊讶, 因为高产作物养分需求较高, 使其比低产作物更有可能利用超过未施肥土壤的养分供应能力。这增加了施肥作物与未施肥作物的产量差异。此外, 具有较快养分积累速率的作物具备降低产区养分损失的潜力。如图 3 数据集, 是由世界各地的粮食养分利用率的总结组成, 氮素农学效率的变异性中大约三分之一可以简单地由粮食平均产量来解释。数据集的产量变化是由于气候、种植体系、土壤特性和系统管理等众多因素造成的。

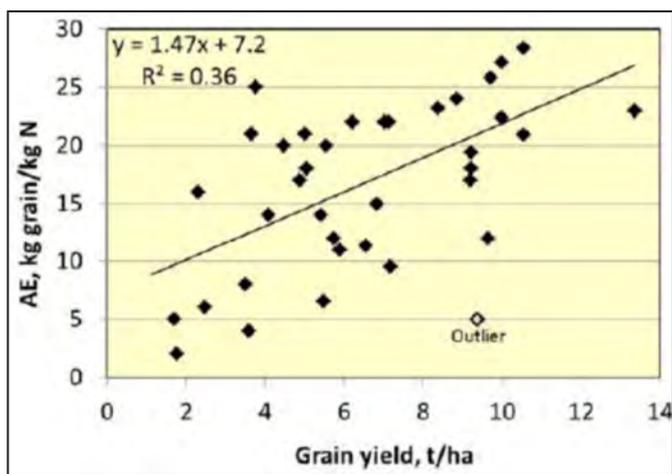


图 3 农场和试验站试验的养分利用率总结中施肥处理的产量水平对特定氮素农学效率的影响 (n=37; 数据来源: Dobermann, 2007; Ladha 等, 2005; Lester 等, 2010; Liu 等, 2011; Iowa State U. Agronomy Extension, 2011; Norton, R.M., 根据澳大利亚长期 NxP 试验的数据 -Dahlen, 个人交流, 2011; Singh 等, 2007)。

氮素养分利用率的趋势

不同区域和种植体系间的养分利用率存在相当大的变异性, 时间趋势上也有很大变异性。农业密集型国家 - 如美国、德国、英国和日本 - 养分利用率增加是基于不断增加的作物产量和长期保持不变甚至有所下降氮用量 (Dobermann 和 Cassman, 2004)。然而, 这些国家

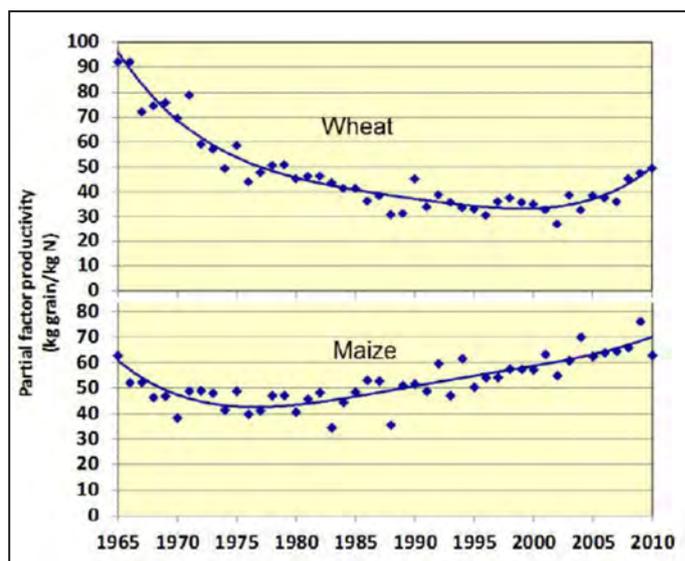


图 4 美国 1965-2010 年间玉米和小麦肥料氮素偏生产力 (摘自 USDA-ERS 和 USDA-NASS, 2011)。

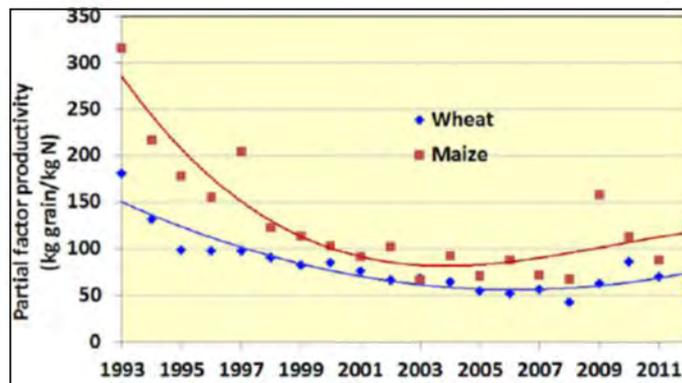


图 5 1993 年至 2011 年阿根廷玉米和小麦的肥料氮素偏生产力 (改编自 Garcia 和 Salvagiotti, 2009)。

表 6 Ladha 等整理全球各地的玉米、小麦和水稻研究小区进行的 93 篇已发表研究中氮素的常见养分利用率值

作物或地区	观测数 *	平均施肥量 (千克 / 公顷)	偏生产力 ** (千克 / 千克)	农学效率 ** (千克 / 千克)	回收率 ** %	生理效率 ** (千克 / 千克)
玉米	35–62	123	72 (6)	24 (7)	65 (5)	37 (5)
小麦	145–444	112	45 (3)	18 (4)	57 (4)	29 (4)
水稻	117–187	115	62 (3)	22 (3)	46 (2)	53 (3)
非洲	2–24	139	37 (11)	14 (6)	63 (5)	23 (3)
欧洲	12–69	100	50 (6)	21 (9)	68 (6)	28 (6)
美洲	119–231	111	50 (5)	20 (7)	52 (6)	28 (8)
亚洲	161–283	115	54 (3)	22 (2)	50 (2)	47 (3)
平均 / 总量	411		52 (2)	20 (2)	55 (2)	41 (3)

* 养分利用率指标的观测数范围。

** 见表 1 中每个术语的定义; 括号中的值为平均值的相对标准差 (SEM/mean*100)。

表 7 1987-2007 年伊利诺斯州和蒙大拿州氮素偏因子养分平衡情况 (IPNI, 2012a)

州名	主要种植体系	年际偏因子养分平衡*				
		1987	1992	1997	2002	2007
伊利诺斯州	玉米-大豆	0.71	0.76	0.76	0.86	0.87
蒙大拿州	小麦	1.35	1.33	1	1.04	1.01

* (收获移走) / (肥料氮 + 回收的粪肥氮 + 生物氮固定)

的种植体系随着时间变化很大。了解养分利用率趋势的整个体系背景对于正确解释这些趋势至关重要。美国玉米和小麦氮素偏生产力的趋势比较证明了这一点(图4)。1975-2005年玉米的偏生产力增加了约50%，而小麦的偏生产力同期下降了30%，但2005-2010年增加了30%。玉米偏生产力的增加主要是基于遗传学和作物、土壤和养分管理的改善，30年间使产量提高了80%以上。偏生产力的净效益在过去25年以0.9千克籽粒/千克N的增长率线性增长。

那么，同一国家种植者获得技术和创新能力的途径相同，为什么小麦生产却没有出现相似的趋势？答案可能在于玉米和小麦主产区种植、耕作和施肥历史的差异。小麦主产区正从耕作和休耕时以土壤有机质矿化为主要氮源的

管理系统向保护或建立土壤有机质的少耕、更集约化的系统转型(Clay等, 2012)。在转型期间，由于土壤有机氮的开采减少，小麦生产变得更加依赖肥料作为氮源，这导致表观偏生产力和偏因子养分平衡的下降(接近1)。伊利诺斯州(玉米占主导地位)和蒙大拿州(小麦占主导地位)之间偏因子养分平衡的比较显示，过去20年来蒙大拿州氮平衡一直处于下降趋势，已不能保持过去较高的氮平衡，而伊利诺斯州有缩小氮平衡差距的可能性(表7)。最近，小麦偏生产力的趋势已经逆转，可能与导致玉米系统偏生产力增加的因素相同(图4)。

在农业普遍处于集约化的国家，偏生产力往往呈下降趋势，因为尽管产量也在增加(收益递减)，但氮肥用量的增长速度高于作物产量。阿根廷的小麦和玉米就属于这种情况(图5)。如上述美国小麦的例子，偏生产力的这种下降往往伴随着更加可持续的偏因子养分平衡关系，即土壤养分矿化程度的减少。如果氮平衡不包括生物氮固定，且轮作中豆类的种植随时间变化，则这种转变可能会引起错误的认识。

描绘一幅全球养分利用率的区域趋势图需要一种系统的方法，这就意味着所有区域都按照一致的规则方法预估养分利用率。我们使用这种方法描绘出了氮(图6-7)、磷和钾的趋势图(图11-14)。这些数字显示了1983-2007年养分利用率的趋势，每个点代表5年的平均值。数据的有效性(粮农组织, 2012; IFA, 2012)限制了预估偏生产力和偏因子养分平衡这两个指标。对于养分投入，仅考虑无机肥料消耗，不包括家畜粪肥、大气沉降、生物氮固定和城市废物。粮农组织数据库中的作物包括38种水果和蔬菜、9种粮食作物、9种油料作物、6种豆类作物、5种根类或块茎作物和5种其他作物。不包括饲料作物，其中有青贮玉米、苜蓿和其他干草等。在严重限制牲畜饲养的地区，这部分可能是生产力和养分移走的主要部分。例如，美国苜蓿和“其他干草”中的磷素占全国磷素移走总量的比例超过15%，其中所含钾素占全国钾素移走总量的比例超过40%(PPI/PPIC/FAR, 2002)。然而，饲料作物中所含养分将作为动物粪肥还田，但由于饲料作物作为输出、粪肥作为投入都不包括在这些养分利用率的预估中，所以

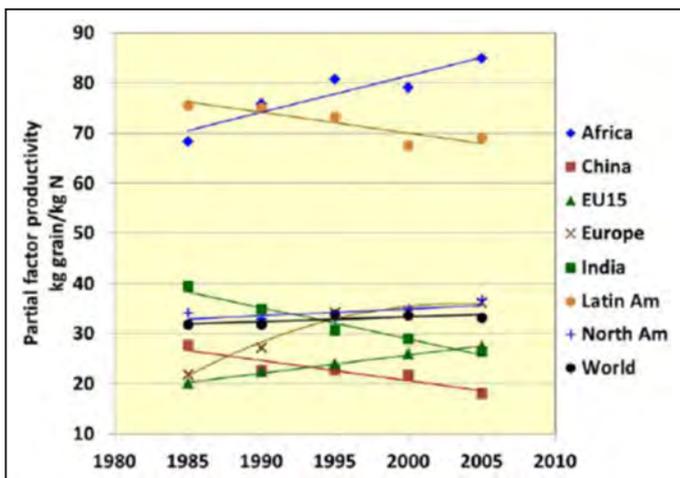


图 6 全球各地氮素的偏生产力，1983-2007。

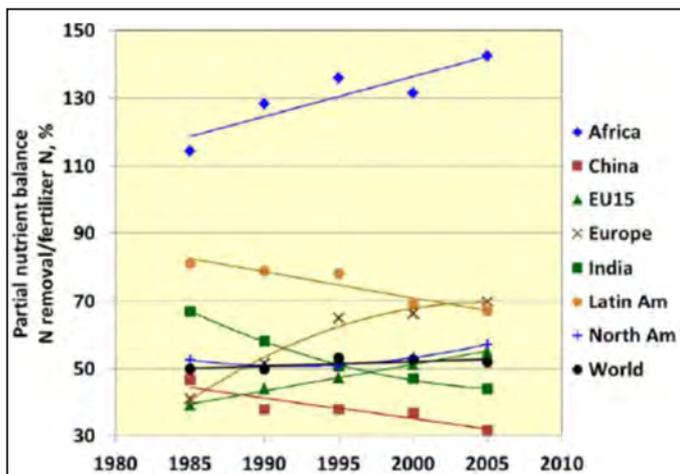


图 7 全球各地氮素的偏因子养分平衡，1983-2007。

多数情况下,在这个广泛的区域尺度引入的误差不会很大。由于输入预估部分不包括生物氮固定,偏因子养分平衡计算也不包括豆类氮移走量。这可能使具有更多豆类轮作的地区偏因子养分平衡估计偏高。收获作物的养分含量是基于文献值或研究试验数据(J.Kuesters (Yara), 个人交流, 2012)。

在这 25 年间,全球偏生产力和偏因子养分平衡水平已显示出小幅度的增长。地区间氮素偏生产力的时间趋势在多数情况下与偏因子养分平衡类似,但全球不同区域间的趋势明显不同(图 6 和图 7)。1985 年非洲和拉丁美洲出现迄今为止最高的偏生产力和偏因子养分平衡值,但两地区呈相反趋势。偏生产力数据显示,这两个地区的单位施氮量都有极高的生产力。然而,非洲的偏因子养分平衡值过高,这表明非洲更加依赖非肥料资源来平衡氮的作物移走,这种状况不稳定且不可持续。相反,拉丁美洲的单位氮素生产力保持非常高的水平,同时也实现了可持续的养分平衡。

总体来说,非洲、北美、欧洲和欧盟 15 国的偏因子养分平衡和偏生产力有上升的趋势,而拉丁美洲、印度和中国有下降的趋势。值得注意的是,过去十年欧洲的偏因子养分平衡似乎已经稳定在 70% 左右,而拉丁美洲、印度和中国的偏因子养分平衡在 25 年间则以相同的速度下降。

磷素和钾素养分利用率的趋势

土壤特性的影响和前茬作物管理带来的典型残留效应决定了磷素和钾素的养分利用率关系。施氮对当季作物有诸多好处,并且氮素的回收也主要发生在施肥当季。而由于磷素和钾素对土壤肥力的影响,施肥后对土壤的好处主要发生在随后的几年(Syers 等, 2008)。对磷素和钾素的养分利用率的现状和长期趋势的合理评估需要考虑这些残留效应。如果当前偏因子养分平衡保持不变,在当前土壤肥力状况和表征未来的土壤肥力状态相关的偏因子养分平衡的背景下通常能很好的解释磷素和钾素的短期农学效率、回收率和偏生产力。

养分效率的测定受施入养分量和土壤肥力的影响很大。图 8 中总结的磷素数据来自南美洲锥状地区农民田块的研究。所有田间测试的速效磷都低于临界值,所以作物对施入磷素的反应是值得期待的。施磷量低的农学效率最高,该地区大豆种植体系通常施磷量最低(10 公斤/公顷)。这一用量导致偏因子养分平衡平均为 1.85,土壤磷素水平

随时间出现耗竭-不可持续的情况,但好于不施磷肥的情况。较高的施磷用量导致了较低的农学效率值,但偏因子养分平衡值小于 1,土壤磷素将保持不变或随时间增加。这些数据说明了评估磷素管理时需要考虑多个养分利用率指标的重要性。

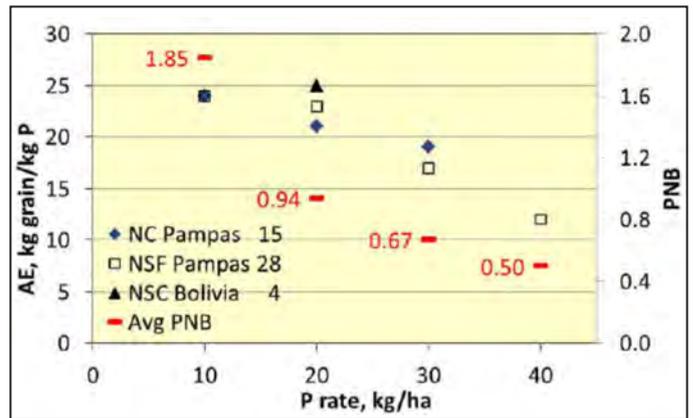


图 8 磷素用量对南美洲锥状地区大豆农学效率和偏因子养分平衡的影响(改编自 Ferrari 等, 2005; H.Fontanetto, pers. comm. 和 Terrazas 等, 2011)。图例中每个组的数字表示田间试验的数目(n)。

阿根廷的小麦试验表明土壤磷素肥力对农学效率和回收率的影响(图 9)。当土壤肥力远低于临界水平时,会得到非常高的农学效率和回收率,并随着土壤肥力的增加而迅速下降。可持续性施入量接近移走量、土壤肥力维持在临界水平附近时观察到的农学效率和回收率中间值有关。

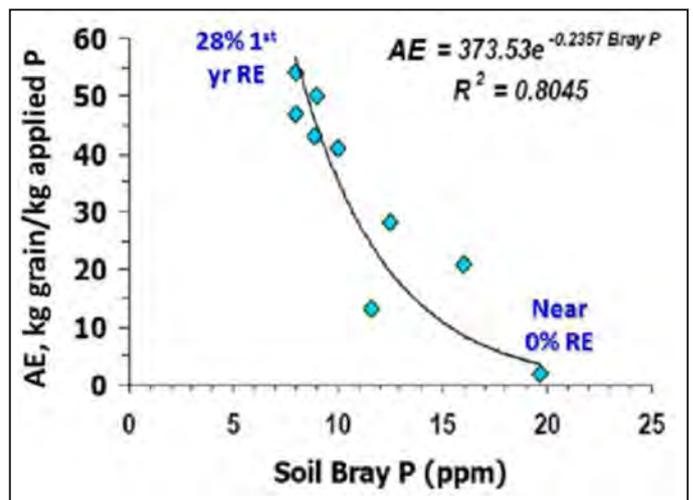


图 9 阿根廷小麦试验中土壤肥力对磷肥农学效率的影响(Garcia, 2004)。

在亚洲进行的田间试验的第一年回收率表明,按照磷肥推荐量施用,该地区特定的磷素回收率接近 25%(表 8)。这些研究结果主要集中于磷素固定能力差的土壤,且气候和管理适宜。Dobermann (2007)指出,虽然研究结果中的平均回收率值是相似的,但回收率值从 0 到近 100% 变化很大,不过 50% 的数据都在 10-35% 的范围内。预计这种变异性是由于上述土壤肥力和肥料用量的影响。

区域综合数据可用于评估磷素利用现状及其对土壤肥力时间趋势的影响，并测试磷素平衡对土壤肥力的影响。国际植物营养研究所（IPNI）对北美私立与公立土壤测试实验室 2005–2010 年作物进行的土壤测试结果进行了总结。从图 10 中可以看出 12 个玉米带五年间土壤中等磷素含量的变化与同期偏因子养分平衡的关系。偏因子养分平衡高于 0.94 时导致土壤磷素含量下降，磷素平衡亏缺最严重的州土壤磷素含量显著下降。这些数据表明，长期偏因子养分平衡是衡量非磷素固定土壤磷素肥力的未来指向一个非常好的指标。通常对于施用磷素具有高吸附或“固定”能力的含磷量低的氧化土和火山灰土，土壤磷含量与偏因子养分平衡的关系可能会不同；这类土壤中，最初需要相当低的偏因子养分平衡来增加土壤磷素肥力，直到满足高亲和力吸附位点。具有大量游离碳酸钙的土壤，通过沉淀反应固定了溶液中的磷素，例如澳大利亚南部，但也有在增加土壤肥力时磷肥的有效性仍然很低的例外（McLaughlin, 2012）。

生产力在过去五年（2003–2007 年）中接近每公斤磷素生产 195 公斤作物，偏因子养分平衡接近 70%。在区域上，非洲在偏生产力和偏因子养分平衡方面与其他所有地区明显不同。1983–1987 年间，非洲、印度和中国的偏因子养分平衡水平几乎相当，都在 90% 左右，然而经过 25 年，情况则完全相反，偏因子养分平衡在非洲翻了一番，达到 180% 以上，而中国和印度下降到约 50%。非洲的偏因子养分平衡值表明土壤磷的过度矿化，而中国和印度的偏因子养分平衡值则表明应该不断增加土壤磷素含量。这些数字并没有考虑到当地磷矿石的施用，但没有证据表明这很重要。非洲直接把磷矿石作为肥料施用的可靠信息很少，但各种信息来源表明即使施用磷矿石，本身施用量也很低。以国家尺度来说，平均施用量低于 0.5 公斤 / 公顷，即使在施用量最高的国家，也表明磷矿石中磷素的贡献不大。

一般来说，非洲、北美、欧洲和欧盟 15 国磷素的偏因子养分平衡和偏生产力有上升趋势，而拉丁美洲、印度和中国有下降趋势，正如氮素所示。这些养分利用率估

表 8 亚洲水稻、小麦和玉米田间试验中来自无机肥料的磷素和钾素的平均回收率值。
显示的值是指推荐肥料量或目前农民习惯的水稻施肥量（Dobermann, 2007; Liu 等, 2006）

作物、地区 或管理	田间试验 数目	时间段	磷素回收率 (%)	钾素回收率 (%)
* 亚洲水稻；农民习惯	179	1997–1998	24	38
* 亚洲水稻；因地制宜的管理	179	1997–1999	25	44
印度小麦	22	1970–1998	27	51
中国小麦	744	1985–1995	22	47
中国玉米	592	1985–1995	24	44

* 中国、印度、印度尼西亚、菲律宾、泰国和越南。

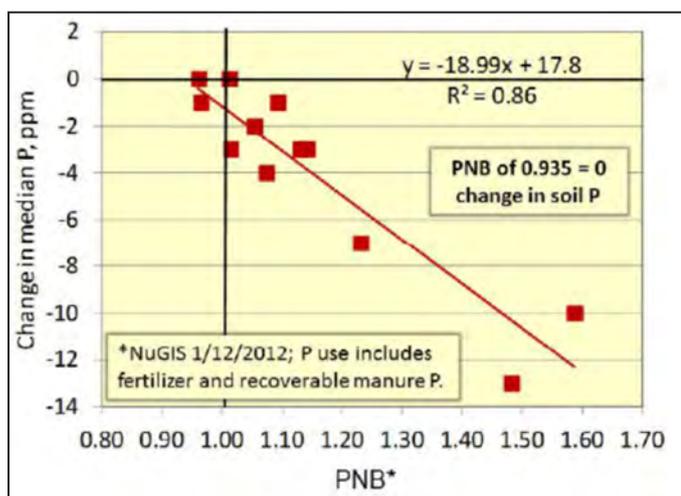


图 10 2005–2009 年与偏因子养分平衡有关的 12 个美国玉米带州土壤中等磷素水平的变化（更新自 Fixen 等, 2010）。

磷素的世界各地养分利用率区域趋势图采用与氮素相同的方法（图 11–12）。与氮素一样，全球磷素的偏生产力和偏因子养分平衡在过去 25 年间有所增加，其中偏

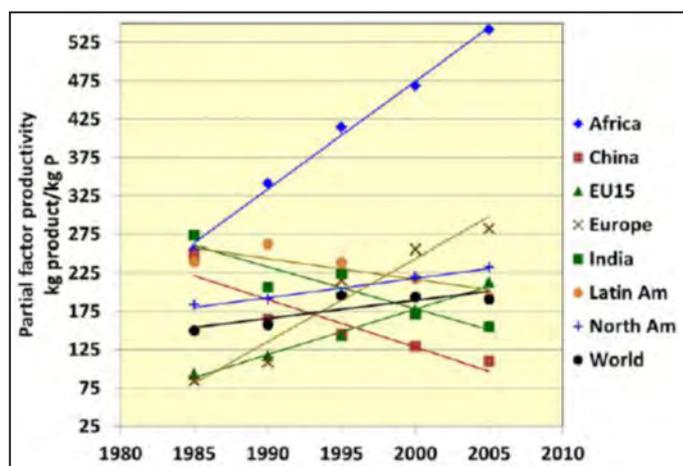


图 11 全球各地磷素的偏生产力，1983–2007。

算中没有考虑粪肥投入对不同地区的影响差异很大这一情况，在对比养分利用率表达的绝对值时应予以牢记。时间趋势的差异（线的斜率）可能更可靠。

钾素利用率的信息比氮素或磷素更有限。部分原因是由于钾素的环境友好特性，其利用效率主要由农学或

经济学因素驱动。导致对钾素有效利用的研究和教育的提高的支持较少。一般认为，除了一些强固性粘土外，钾素的第一年回收率高于磷素。施用钾素的第一年回收率已有报道，在 20%–60% 的范围内 (Baligar 和 Bennet, 1986)。Dobermann(2007) 总结了 1998 年之前在亚洲进行的田间试验的平均回收率，其范围为 38–51% (表 8)。Jin (2012) 总结了 2002–2006 年在中国进行的粮食作物田间试验，采用缺素小区设计，得出钾素的回收率在 25–32% 范围内，平均农学效率值为 8–12(表 4)。在中国中北部地区冬小麦田间试验的一组最新情况，钾素的回收率值偏高，在 34–44% 的范围内，但农学效率值仍在 8–10 范围内 (表 9; He 等, 2012)。研究人员指出，较低的农学效率可能是由于施钾量超过了个别地点或年份的最佳土壤钾素供应量。Dobermann(2007) 提出，10–20 的钾素农学效率水平是作物在可用钾储量低的土壤上的合理目标。

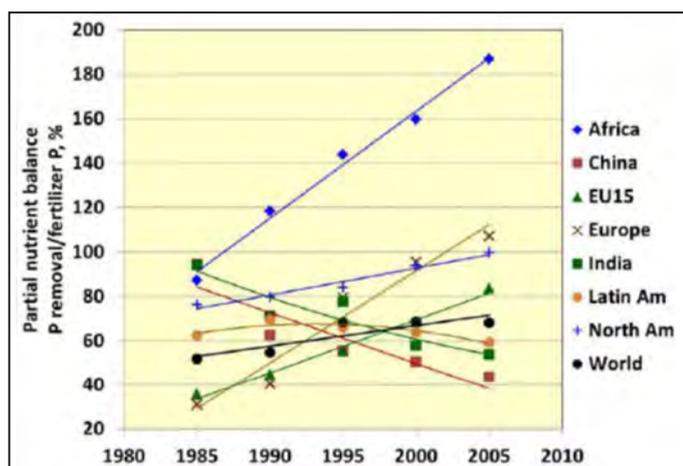


图 12 全球各地磷素的偏因子养分平衡，1983–2007。

钾素的全球各地养分利用率区域趋势图采用与氮素和磷素相同的方法 (图 13–14)。与氮素和磷素一样，全球钾素的偏生产力和偏因子养分平衡在这 25 年中有所增加，偏生产力在过去五年 (2003–2007 年) 达到每公斤钾素生产接近 145 公斤作物，偏因子养分平衡接近 140%。在全球范围内，非饲料作物在这 5 年间移走的钾素比商品肥施入钾素还多 40%。从区域来看，25 年间中国的偏因子养分平衡变化最大，移走钾素比施入钾素多了 5 倍以上，偏因子养分平衡接近 100%，也就是钾素移走量与施钾量相当。对于非洲来说，偏生产力和偏因子养分平衡在 25 年间显著增加，2003–2007 年间偏因子养分平衡表明作物移走量是施钾量的 6 倍之多。

一般来说，非洲、北美、欧洲和欧盟 15 国钾素的偏因子养分平衡和偏生产力有上升趋势，而拉丁美洲、印度和中国有下降趋势，正如氮素和磷素的情况一样。在

这些养分利用率估算中，饲料作物生产和钾素移走对不同地区的影响差异很大的情况不予考虑，在对比养分利用率表达的绝对值时应予以牢记。时间趋势的差异 (线的斜率) 可能更可靠。

省份	平均值 (千克 K/公顷)	回收率 (%)	农学效率 (千克/千克 K)
河北	81	43	10.2
山东	75	44	9.9
山西	100	34	8.1

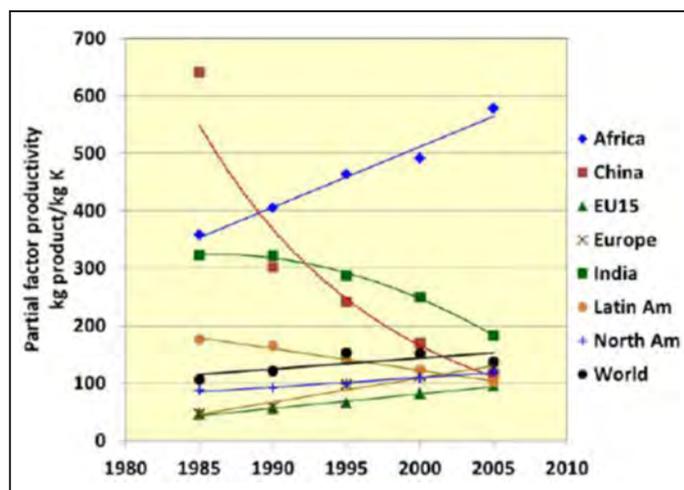


图 13 全球各地钾素的偏生产力，1983–2007。

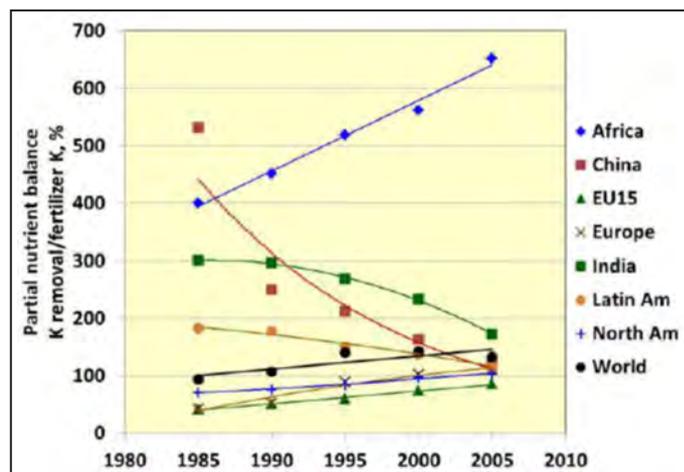


图 14 全球各地钾素的偏因子养分平衡，1983–2007。

养分利用率、水分利用率及展望

许多管理和环境因素相互作用会影响养分利用率，包括植物水分状况。以类似的方式，植物养分状况可以显著影响水分利用率 (WUE)。本书的其余部分将探讨这两个关键的作物生长因子之间的相互作用。通过养分管理可以提高水分利用效率 (Hatfield 等, 2001)，然而在干旱环境中平衡开花前后生长以确保足够的水分储存供给籽

粒十分重要 (van Herwaarden 等, 1998)。养分有效性影响地上部生物量、冠层覆盖 (减少土壤蒸发)、作物残留生物量、土壤中的养分动力学, 从而改善作物生长和水分利用率 (Maskina 等, 1993; Halvorson 等, 1999; Norton 和 Wachsmann, 2006)。足够的养分供应可以改善多种作物的水分利用率 (Smika 等, 1965; Corak 等, 1991; Campbell 等, 1992; Varvel, 1994; Payne 等, 1995; Davis and Quick, 1998; Correndo 等, 2012)。

加拿大春小麦蒸渗仪控制试验的数据提供了在一定氮素水平范围内养分利用率测定值与水分利用率之间关系的范例 (图 15)。该研究包括雨养 (dry) 和灌溉 (irr) 处理, 并显示出水分状态对氮素产量反应的极大影响和由此产生的农学效率和偏因子养分平衡。图 15 的下图显示, 水分缺乏显著降低了所有氮素水平的农学效率和偏因子养分平衡, 但是在较低的氮素水平下, 氮肥利用效率下降幅度明显更大。图 15 中的上图显示, 旱地和灌溉处理中水分利用率随氮素增加都有所改善。灌溉处理的产量和水分利用率的表观最佳氮素量较低, 反映了下图中所显示的灌溉处理的养分利用率更高。

我们编写这一章更加巩固了前面提到的观点即养分利用的目标是提高种植体系的整体性能。图 15 中的数据说明, 尽管养分利用率通常随着氮用量的增加而降低, 但是在达到最佳氮用量之前, 水分利用率和产量同时增加提高了整个体系性能。水分和作物养分的有效利用都需要特定体系下的最佳管理。

种植体系性能的持续改善是可持续集约化的根本目标。这种改善是每个农民对每个地块管理变化的结果。许多提高效率和生产力的养分管理技术和措施已然存在, 在

本书的其他章节也有描述, 但很多未被充分利用。展望未来, 制定针对特定的养分、土壤和种植制度并且易被农民确定的, 适合当地的养分利用率指标的指导准则是十分必要的。这样的指导准则将有助于农民确定要测定的内容, 以及最需要改进的地方, 并且易于改进。指导准则将有助于确定管理方式的变化对体系性能的需求和影响。

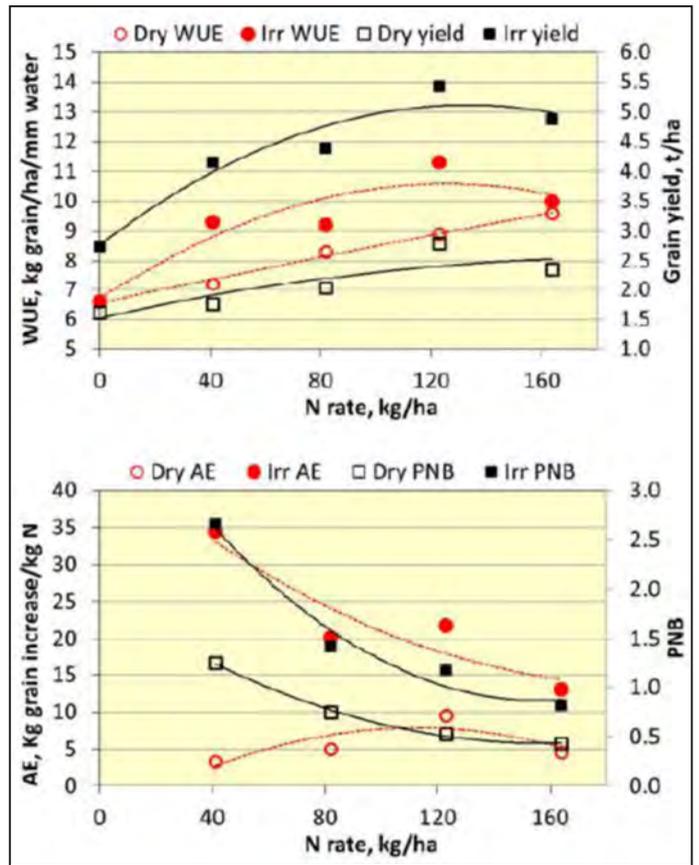


图 15 加拿大萨斯喀彻温省蒸渗仪控制试验的水分状况及氮肥施用对春小麦产量、水分利用率和氮素利用率的影响 (改编自 Krobel 等, 2011 和 Krobel 等, 2012, 基于 Campbell 等, 1977a, b 的原始数据,)。

基于农田养分管理的杂草生态防控对策研究

潘俊峰¹ 陈防^{1,2*} 校

(1. 中国科学院武汉植物园, 武汉, 430074; 2. 国际植物营养研究所 (IPNI) 武汉代表处, 武汉, 430074)

摘要: 农田杂草是农田生态系统的重要组成部分, 揭示杂草种群对养分管理模式的响应及其机制是进一步通过科学的养分管理来实现防控农田杂草和保持农田杂草生物多样性及农田生态系统平衡的关键。为此, 作者总结了农田养分管理与农田杂草群落特征关系的研究进展、指出了存在的问题, 并从农田杂草的重点防控对象、农田优势杂草种群和竞争临界期的确定以及杂草的生态化学计量学特征等方面对杂草生态防控对策进行了分析评价。在此基础上, 作者提出了土壤营养调控假设, 期望为制定农田杂草综合管理策略以及保护农田生态环境提供新的思路。

关键词: 养分管理; 农田杂草; 土壤杂草种子库; 生物多样性; 生态化学计量学

农田杂草作为农业生态系统的重要组成部分, 是长期适应气候、土壤等因素, 以及与作物竞争的结果^[1]。它与作物竞争水、肥、光、生长空间等资源^[2], 影响作物产量与品质^[3], 而且其防除过程中使用的一些高毒高残留农药也会对农业生态环境造成污染。杂草潜种群阶段的土壤种子库, 规模巨大, 是发生杂草危害的根源^[4], 其大小、种类组成以及结构特点决定了未来田间杂草的发生状况。据张朝贤^[5]统计, 在现有防治水平下, 我国农田中每年由于杂草危害造成的直接经济损失高达978亿元。例如, 直播稻田的杂草稻、千金子等发生严重; 小麦主产区的日本看麦娘、猪殃殃等杂草对麦田主要除草剂已产生了抗药性。我国目前面临着农田杂草发生面积不断扩大以及抗药性杂草大量发生的严峻形势。因此, 在进行农业生产时必须准确了解杂草种群及其变化规律, 以便于对其进行有效管理, 避免杂草的恶性化。

需要指出的是, 传统的农业管理观念和技术注重杂草防除而忽视了其对生态环境的积极作用, 在目标上追求经济效益而忽视生态效益, 因此, 以往人们较多关注杂草的负面影响, 相关的研究也主要集中在农田杂草的防控, 而农田杂草的防控又主要依靠化学防治, 即除草剂的使用。然而, 在除草剂残留问题的日益突出、杂草抗药性不断增强以及农田生态环境的持续恶化的现实下, 有效维持农田杂草的生物多样性逐渐为人们所重视^[6-8]。研究证实, 丰富的农田杂草多样性对于促进土壤养分循环、提高化肥利用率, 保持土壤动物、微生物的数量, 减少土壤流失、减轻酸化, 调节农田土壤生态系统具有重要作用^[6-9]。Tilman等^[10]提出的生物多样性越高, 生态系统越稳定、生产力越高的假说逐渐得到大多数生态学家的认可。冯伟等^[11]认为农田杂草土壤种子库多样性可能与农田生态系

统的生产力及其稳定性相关联。那么, 在人为驱动下向单一化方向发展的农田生态系统中, 如何协调杂草生物多样性与杂草危害的关系, 达到农田生态系统高生产力与高稳定性的平衡, 就成了研究的热点。

农田生态系统是陆地生态系统的重要组成部分, 占全球陆地面积的10.5%, 且受到强烈的人为干扰, 其中养分管理是一项重要的干扰因素。合理的养分管理可以改善土壤养分状况, 不仅影响作物植株养分的吸收与分配, 同时也能作用于杂草, 影响农田杂草种群的变化。国内外的研究发现, 农田养分管理可显著影响农田杂草生长以及其土壤种子库的密度、物种组成以及多样性等特征^[2, 3, 8, 9, 11-13]。因此, 如何科学进行农田养分管理, 使之既能维持较高的土壤肥力以满足作物优质高产的需求, 又能调控农田杂草种群, 保持一定的杂草生物多样性, 维持农田生态系统的平衡, 已成为实现农业可持续发展需要关注的问题。为此, 作者初步总结了农田养分管理与杂草的关系的相关研究进展, 讨论了存在的问题, 并从农田杂草的重点防控对象、农田优势杂草种群和竞争临界期的确定以及杂草的生态化学计量学特征等方面对杂草生态防控对策进行了分析; 在此基础上, 作者提出了营养调控假设, 期望为制定农田杂草综合管理策略以及保护农田生态环境提供新的思路。

1 养分管理与农田杂草的关系

1.1 优势杂草物种组成

农田养分管理可以改变杂草生长的自然环境以及养分、光照、空间等资源的可利用形式, 影响杂草种群自然演变和迁移过程, 形成不同优势杂草物种组合的杂草群

落。尹力初等^[14]的田间试验结果表明，P素是影响杂草种类发生的关键营养因素，而N素是决定优势杂草群落的主要营养因素，在NPK配施和未施肥处理中仅发现止血马唐（*Digitaria ischaemum* Muhlenb）为优势杂草；在NP和PK配施处理中香附子（*Rhizoma Cyperi*）为优势杂草；在NK处理中止血马唐与芦苇（*Phragmites communis* Trin）为优势杂草。Bittman等^[15]研究认为N、P对牧场草类组成影响较大，S对其组成及产量影响也很大，而K的影响则较小或几乎没影响。Davis等^[16]研究表明长期施全量氮肥田块的土壤种子库以洋野黍（*Panicum dichotomiflorum*）等禾本科杂草为优势杂草，而施减量氮肥田块的土壤种子库以藜（*Chenopodium album*）为优势杂草。Blackshaw^[17-18]的研究指出杂草对养分响应差异及因此导致的竞争力差异将直接导致群落结构发生变异，养分管理模式可以改变物种组成和减少杂草密度。

目前，虽然某种具体土壤养分对杂草种群物种组成的影响尚无定论，但可以肯定的是农田养分管理可以影响田间优势杂草的物种组成，而优势杂草的组成又决定了杂草防除时间、防除手段、防除技术的选择。因此，只有了解优势杂草对养分管理的响应规律及其机制，才能有效进行农田施肥，科学制定杂草综合管理策略。

1.2 杂草种群密度

通过合理的农田养分管理可以改善杂草与作物之间的相互关系，形成杂草生境的多样化，限制对某一生境有着良好适应性杂草种类的生长，可以降低杂草的密度。Everaats等^[19]指出土壤中的N和K素是诱发杂草种子发芽并影响高杂草密度的关键因素。赵锋等^[20]的研究表明长期不同施肥模式下红壤稻田施P素是导致农田杂草总密度变化的原因之一。施林林等^[21]研究表明N、P养分的丰缺决定了太湖地区稻麦轮作田间杂草密度和优势种群，典型表现为缺N提高了豆科杂草的种群密度，富P提高了禾本科杂草密度。Blackshaw等^[22]指出冬小麦地农田杂草土壤种子库以堆肥和撒播化肥处理中最大，其次为新鲜粪肥，以地下N肥深施处理的杂草种子库最小。万开元等^[12]研究显示冬小麦地杂草土壤种子库的密度按NP>NPK>NK>CK>PK顺序依次递减。可以看出，土壤中的N、P、K等养分含量影响杂草的密度，虽然这些结论并不完全一致，但至少可以反映出具体地点上杂草种群变化过程中的某个阶段性特征。

1.3 杂草生物量

杂草种群的总生物量与杂草个体生物量以及密度关系密切。不同种类杂草的耐瘠薄能力不同，各自需肥特性也存在差异^[23]。Kandasamy等^[24]研究认为仅施N处理时杂草干物质量最高，其次为N、P配施处理，NPK（无论是有机肥或无机肥配施）处理和未施肥处理时杂草干物质量则相对较低。Blackshaw等^[22]认为撒施无机肥或施堆肥处理的杂草密度及干物质量均较高，其次为新鲜粪肥，未施肥处理的杂草密度和干物质量最低。侯红乾等^[25]研究指出在冬小麦全育生长期，与不施肥处理相比，单施N肥增加了杂草的密度和生物量，单施P肥也使得田间杂草生物量的增加了约44%。娄群峰等^[26]研究指出N肥施用量的多少在作物生长前期不会影响杂草的种类和密度，而在后期将影响杂草的密度与生物量。不同养分管理模式下杂草的总生物量差异明显，而杂草的生物量直接影响作物生长。因此，准确了解杂草生物量对养分管理的响应将有利于对农田杂草的科学管理。

1.4 生物多样性

多样性是生物群落的重要特征之一，杂草群落的生物多样性影响着农田生态系统的稳定，逐渐引起专家和学者的关注。Wan等^[9]认为，土壤的N、P、K营养都能同时影响杂草种群的物种多样性和种群均匀度；随着N肥施用量的增加，杂草种群物种丰富度、物种多样性以及种群均匀度显著下降，而种群优势度显著上升。冯伟^[24]等在太湖地区对稻-油轮作田表层（0-15厘米）杂草土壤种子库进行调查，发现不同施肥措施下杂草群落中的物种数不同，单施化肥区杂草种类最少；无肥区和秸秆区的杂草种子库物种丰富度和Shannon-Wiener多样性指数均显著高于常规区和化肥区，但其Simpson多样性指数显著低于后者。潘俊峰等^[27]研究表明，长期有机-无机肥配施处理的物种多样性和均匀度指数维持在休闲与纯化肥处理区之间。而Bakker^[28]在研究中发现杂草物种多样性与土壤能提供的肥力资源相关，通过杂草对土壤肥力的竞争可以有效控制一些恶性杂草的发生。因此，研究不同养分管理模式下杂草种群的生物多样性特征及其变化机制，可以为农田杂草的多样性保护提供参考。

从上面分析可以看出，国内外以往的研究重点是不同养分管理模式下农田杂草的种群动态特征^[12, 14, 15, 19, 24, 29]。结果表明，农田杂草种群在不同养分管理模式下具有明显的差异性，土壤N、P、K是影响农田杂草的主要因素^[9, 14, 19, 22, 23]。这些研究主要从施肥与轮作、耕作等结

合的角度来考察农田杂草的响应,很少涉及影响机制,由于研究环境条件的差异,国内外得出的研究结论也并不统一。事实上作物、土壤、气候、除草剂等都可能影响或者掩盖养分管理对农田杂草的作用,因此,仍有许多问题需要进一步探讨。主要包括:(1)竞争理论与杂草防控。物种竞争是塑造植物形态和生活史的主要动力之一,也是决定种群组成、结构与动态的重要因素。如何在资源竞争理论的指导下研究提出合理的杂草防控措施已成为杂草学家和生态学家需要共同面对的难题之一。(2)杂草的生态化学计量学。生态化学计量学研究植物的C、N、P计量关系与植物个体生长发育、种群增长、群落动态和生态系统过程的联系,它已成为生态学研究的前沿领域之一,但目前很少应用于杂草学的相关研究。(3)杂草种群变化的连续性。关于养分管理引起农田杂草种群特征变化的规律及其形成机制目前尚无一致的结论。最主要原因是未能获得种群变化的连续性资料数据,现有资料往往只能反映具体地点上杂草变化过程中某个阶段的特征。

2 农田杂草防控对策分析

2.1 农田杂草防控的重点对象是优势杂草

杂草群落演替已经成为我国杂草成灾的主要原因^[30],而农田杂草防控的重点对象是优势杂草,杂草综合管理亦主要针对田间优势杂草^[31]。农田的优势杂草不仅在生长、繁殖、成熟、传播等生物学特性方面有着广泛的适应性,还可能向周围环境释放化感物质以影响其他植物种子萌发,抑制或排斥其他植物的生长发育,从而使自身迅速蔓延生长。优势杂草在杂草种群中占据绝对的竞争优势,必然会妨碍其他杂草的生长,特别是影响作物的产量和品质。例如,旱地优势杂草之一的豚草(*Ambrosia artemisiifolia*),其吸水吸肥能力和再生能力极强,消耗大量的养分,导致作物大幅度减产。张葵等^[32]发现在玉米地豚草密度达30-50株/平方米时,玉米减产30%-40%,当豚草数量增加到50-100株/平方米时,玉米几乎是颗粒无收。在大豆田中,当豚草数量增加到116株/平方米时,大豆减产12%。

2.2 农田优势杂草种群和竞争临界期的确定

研究杂草与作物竞争关系的目的是确定农田优势杂草种群和竞争临界期,为有效防控杂草提供依据。当杂草生长存留对作物产量的损失和无草状态下作物产量增加量相等时即为杂草竞争临界期。作物与杂草竞争临界期的确定

一般是在试验时设计有草、无草、在作物不同生长期除草后保持无草等处理,测定不同除草时间与作物损失率的关系,从而确定临界期。杂草危害经济阈值是指作物增收效益与防除费用相等时的草害状况。只有当作物因杂草而产生的减产损失率高于杂草防治成本和杂草所提供的生态利益的总和时,除草才显得必要^[33]。竞争临界期的不同导致了经济阈值的差异,据此可划分主要与次要杂草种群,确定不同杂草的最佳防治时间,为有效防治杂草提供理论根据,在杂草防治中具有重要的实践指导意义。

2.3 杂草的生态化学计量学特征

植物的C、N、P生态化学计量关系与植物个体生长发育、种群增长、群落动态和生态系统过程联系紧密。研究表明,非生物环境可利用的N和P通常是限制植物生长的决定性因子,植物种群生产力(C的积累)在一定程度上也是由关键养分N、P的可利用量所决定的^[34-35]。土壤N和P含量在一定程度上调节着植物C:N和C:P比的大小^[36]。研究认为,N、P稀缺意味着C的相对过量,反之,N、P充裕意味着C的相对不足^[37]。植物体的N:P可用来表征植物受N、P养分的限制格局^[38-39]。土壤养分限制和植物群落物种组成更替的关系非常密切,在养分梯度上任何一点的养分限制大小,不仅依赖于物种的生物学特征,还依赖于为满足植物最大的潜在生长率所需要养分的丰富程度^[40-41]。因此,同一区域上不同养分元素的限制作用,不但对植物种类的生态特征具有重要影响,也对群落的物种组成特征具有极强的选择作用^[42-43]。

目前植物生态化学计量学研究主要集中在区域性尺度的森林。例如,温带和北方森林生产力受N限制,而热带雨林和亚热带常绿林生产力普遍受到P的限制^[35, 38]。在同一区域的不同地点,由于生境差异、植被生活型不同、演替阶段的差别以及人类干扰强度的不同,N、P养分的限制格局也可能不同^[38, 44],不同功能类型的植物也会采取不同的适应策略^[45]。杂草的生态化学计量学研究刚刚起步,林新坚^[46]等研究表明杂草植株的C/N、C/P、N/P与土壤C/N、C/P、N/P及生物量呈一定的显著相关,施肥处理降低了杂草C/N与C/P,尤其是NPK+牛粪施肥处理。他同时也指出一定程度上也影响了冬闲期杂草的种群与C、N、P计量学特征,然而冬春季杂草C、N、P含量及其计量比能否作为表征农田土壤肥力的敏感指标,还有待进一步研究。这让我们有一些思考:不同养分管理模式下的农田杂草养分限制格局是怎么样的?优势杂草的生态化学计量学特征对养分管理的响应又是如何?准确回

答这些问题将有利于了解农田杂草种群的变化过程和科学制定杂草综合管理策略。

3 展望

基于不同的农田养分管理模式下杂草种群的优势杂草物种组成、密度、生物量及生物多样性有着显著性差异的认识,且综合考虑农田杂草的重点防治对象、作物与杂草的竞争关系,笔者提出土壤营养调控假设,即:通过农田养分管理来改善土壤肥力状况,调控农田杂草的种间和种内竞争关系,控制农田杂草种群结构与杂草生物量,同时

兼顾作物产量与杂草生物多样性,达到维持农田生态系统平衡的目标。

总之,当前对于不同养分管理下杂草以及杂草种群的变化过程知之甚少,而这些往往又与杂草的防控和农田生态系统的稳定密切相关。因此,通过以上的分析,作者认为应当在竞争理论和生态化学计量学方法的指导下,开展农田养分管理对农田杂草的影响及其作用机理研究,以期阐明农田养分管理对杂草种群变化过程的影响机制,为制定杂草综合管理策略以及保持农田杂草生物多样性、保护农田生态环境提供新的思路。

参考文献

- [1] [1] 强胜. 杂草学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- [2] 古巧珍, 杨学云, 孙本华, 等. 不同施肥条件下黄土麦地杂草生物多样性 [J]. 应用生态学报, 2007, 18(5):1038-1042.
- [3] 南维鸽, 李世清, 侯红乾, 等. 不同施氮水平和杂草清除时间对半湿润地区农田氮素利用及产量的影响 [J]. 西北农业学报, 2007, 16(5):124-130.
- [4] 魏守辉, 强胜, 马波, 等. 土壤杂草种子库与杂草综合管理 [J]. 土壤, 2005, 37(2):121-128.
- [5] 张朝贤. 农田杂草与防控 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2011.
- [6] Chen X, Tang J J, Fang Z G, et al. Effects of weed communities with various species numbers on soil features in a subtropical orchard ecosystem [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2004, 102(3):377-388.
- [7] Yang Y S, Wang H, Tang J J, et al. Effects of weed management practices on orchard soil biological and fertility properties in southeastern China [J]. Soil & Tillage Research, 2007, 93(1):179-185
- [8] 李儒海, 强胜, 邱多生, 等. 长期不同施肥方式对稻油两熟制油菜田杂草群落多样性的影响 [J]. 生物多样性, 2008, 16(2):118-125.
- [9] Wan K Y, Tao Y, Li R H, et al. Influences of long-term different types of fertilization on weed community biodiversity in rice paddy fields [J]. Weed biology and management, 2012, 12(1):12-21.
- [10] Tilman D, Reich P B, Knops J M H. Biodiversity and ecosystem stability in a decade long grassland experiment [J]. Nature, 2006, 441:629-632.
- [11] 冯伟, 潘根兴, 强胜, 等. 长期不同施肥方式对稻油轮作田土壤杂草种子库多样性的影响 [J]. 生物多样性, 2006, 14(6):461-469.
- [12] 万开元, 潘俊峰, 李儒海, 等. 长期施肥对旱地土壤杂草种子库生物多样性影响的研究 [J]. 生态环境学报, 2010, 19(4):836-842.
- [13] Cauwer B D, Berge K V, Cougnon M, et al. Weed seedbank responses to 12 years of applications of composts, animal slurries or mineral fertilizers [J]. Weed research, 2010, 50(5):425-435.
- [14] 尹力初, 蔡祖聪. 长期不同施肥对玉米田间杂草生物多样性的影响 [J]. 土壤通报, 2005, 36:77-79.
- [15] Bittman S, McCartney D H, Waddington J, et al. Long-term effects of fertilizer on yield and species composition of contrasting pasture swards in the Aspen Parkland of the Northern Great Plains [J]. Canadian Journal of Plant Science, 1997, 77:607-614.
- [16] Davis A S, Renner K A, Gross K L. Weed seed bank and community shifts in a long-term cropping systems experiment [J]. Weed Science, 2005, 53(3):296-306.
- [17] Blackshaw R E, Semach G, Janzen H H. Fertilizer application method affects nitrogen uptake in weeds and wheat. Weed Science, 2002, 50:634-641.
- [18] Blackshaw R E, Molnar L J, Janzen H H. Nitrogen fertilizer timing and application method affect weed growth and competition with spring wheat. Weed Science, 2004, 52:614-622.
- [19] Everaarts A D. Responses of weeds to application of nitrogen, phosphorus and potassium on low fertility acid soils in Suriname [J]. Weed Research, 1992, 32:385-390.
- [20] 赵锋, 董文军, 芮雯奕, 等. 不同施肥模式对南方红壤稻田冬春杂草群落特征的影响 [J]. 杂草科学, 2009, 1:7-12.
- [21] 施林林, 沈明星, 蒋敏, 等. 长期不同施肥方式对稻麦轮作田杂草群落的影响 [J]. 中国农业科学, 2013, 46(2):310-316.
- [22] Blackshaw R E, Molnar L J, Larney F J. Fertilizer, manure and compost effects on weed growth and competition with

- winter wheat in western Canada [J]. *Crop Protection*, 2005, 24(11):971–980.
- [23] 张学友, 金丽华, 陈柏森, 等. 氮磷钾对杂草生长影响的研究 [J]. *西北农林科技大学学报*, 2003, 31(2):109–111.
- [24] Kandasamy O S, bayan H C, Santhy P, et al. Long-term effects of fertilizers application and three crop rotations on changes in the weed species in the 68th cropping (after 26 years) [J]. *Acta Agronomica Hungarica*, 2000, 48:149–154.
- [25] 侯红乾, 李世清, 南维鸽. 冬小麦播种密度和施肥方式对麦田杂草群落组成及生长的影响 [J]. *西北植物学报*, 2007, 27:1849–1854.
- [26] 娄群峰, 张敦阳, 黄建中, 等. 肥用量对三种杂草与油菜间竞争关系的影响 [J]. *南京农业大学学报*, 2000, 23(1):23–26
- [27] 潘俊峰, 万开元, 章力干, 等. 长期有机–无机肥配施对农田杂草土壤种子库的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(2):488–496.
- [28] Bakker J P. *Nature Management by Grazing and Cutting*. Dordrecht, The Netherlands:Kluwer Academic Publishers, 1989.
- [29] 蒋敏, 沈明星, 施林林, 等. 长期定位施肥对稻麦轮作农田土壤杂草种子库的影响 [J]. *中国农业科学*, 2013, 46(3):555–563.
- [30] 强胜. 2010. 我国杂草学研究现状及其发展策略. *植物保护*, 36(6):1–5.
- [31] O’ Donovan JT, Blackshaw RE, Harker KN, et al. 2007. Integrated approaches to managing weeds in spring-sown crops in western Canada [J]. *Crop Protection*, 2007, 26(3):390–398.
- [32] 张葵. 恶性杂草—豚草 [J]. *生物学通报*, 2006, 41(2):25–26.
- [33] 李永丰, 娄群峰, 李宜慰等. 江苏省小麦田间杂草的生态经济防治阈期 [J]. *江苏农业学报*, 2001, 17(4):219–222.
- [34] Niklas K J, Owens T, Reich P B, et al. Nitrogen/phosphorus leaf stoichiometry and the scaling of plant growth [J]. *Ecology Letters*, 2005, 8:636–642.
- [35] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101:11001–11006.
- [36] Hogan E J, Minnullina G, Smith R I, et al. Effects of nitrogen enrichment on phosphatase activity and nitrogen:phosphorus relationships in *Cladonia portentosa* [J]. *New Phytologist*, 2010, 186:911–925.
- [37] Güsewell S, Koerselman W, Verhoeven J T A. Biomass N:P ratios as indicators of nutrient limitation for plant populations in wetlands [J]. *Ecological Applications*, 2003, 13:372–384.
- [38] Wardle D A, Walker L R, Bardgett R D. Ecosystem properties and forest decline in contrasting long-term chronosequences [J]. *Science*, 2004, 305:509–513.
- [39] He J S, Wang L, Flynn D F B, et al. Leaf nitrogen:phosphorus stoichiometry across Chinese grassland biomes [J]. *Oecologia*, 2008, 155:301–310.
- [40] Daufresne T, Hedin L O. Plant coexistence depends on ecosystem nutrient cycles:extension of the resource – ratio theory [J]. *PNAS*, 2005, 102:9212–9217.
- [41] Miller T E, Burns J H, Munguia P, et al. A critical review of twenty years:use of the resource – ratio theory [J]. *The American Naturalist*, 2005, 165:439–448.
- [42] Andersen T, Elser J J, Hessen D O. Stoichiometry and population dynamics [J]. *Ecology Letters*, 2004, 7(9):884–900.
- [43] Gsewell S, Bailey K M, Roem W J, et al. Nutrient limitation and botanical diversity in wetlands:can fertilization raise species richness? [J]. *Oikos*, 2005, 109(1):71–80.
- [44] Davidson E A, de Carvalho C J R, Figueira A M, et al. Recuperation of nitrogen cycling in Amazonian forests following agricultural abandonment [J]. *Nature*, 2007, 447:995–999.
- [45] Aerts R, Chapin F S. The mineral nutrition of wild plants revisited:a reevaluation of processes and patterns [J]. *Advances in Ecological Research*, 2000, 30:1–67.
- [46] 林新坚, 王飞, 王长方, 等. 长期施肥对南方黄泥田冬春季杂草群落及其 C、N、P 化学计量的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(5):573–577.

硝硫基螯合肥在大棚苦瓜的高效施用技术研究

李娟 章明清 李焯

(福建省农业科学院土壤肥料研究所, 福建, 福州, 350013)

摘要: 通过田间肥效试验研究大棚苦瓜的硝硫基螯合肥施用方法。结果表明, 在与习惯施肥等量氮磷钾养分的条件下, 硝硫基螯合肥做基肥和追肥分期施用是最佳施肥模式, 苦瓜产量达到 7004.3 千克/亩, 增产率达到 5.7%, 净增收提高 5.1%, 显著高于不施基肥的习惯施肥模式。

关键词: 苦瓜; 螯合肥; 施肥效应; 大棚试验

螯合复合肥是中化智胜开发生产的复合肥新产品, 是在普通复合肥料中利用螯合剂添加铜、锌、硼、钼等微量元素, 为作物提供全方位大量元素及微量元素的营养。螯合剂可以使微量元素形成螯合态, 解决了微量元素易在土壤中沉淀失效的问题, 有利于作物吸收。硝硫基螯合肥中的硝态氮避免了铵态氮对钙镁的拮抗, 可促进钙镁吸收, 提高肥料利用率和作物产量与品质。

福建省是我国苦瓜栽培和消费大省^[1], 种植大棚苦瓜已经成为产区菜农收入的重要来源之一。为探讨硝硫基螯合肥新型肥料在大棚苦瓜上的最佳施用方法, 2016年11月至2017年6月作者在平和县大棚蔬菜生产基地进行了田间肥效对比试验, 以期对苦瓜大田生产用肥提供参考。

1 材料与方 法

1.1 供试肥料

供试肥料为中化智胜开发生产的“钾先锋”(15-6-23)硝硫基螯合肥。

1.2 供试作物

供试苦瓜品种为翠玉。播种时间为2016年10月13日, 一个月后移栽, 试验于2017年6月1日结束。

1.3 试验设计

试验以等量氮磷钾养分为基础, 设3个处理, 即:
(1)“钾先锋”硝硫基螯合肥做追肥施用: 施用量180千克/亩和尿素(N 46%)31千克/亩, 不施基肥。定植5天后追施“钾先锋”螯合肥5千克/亩; 苗期及开花坐果初期, 每7天追施“钾先锋”螯合肥1次, 施肥量共20千克/亩和尿素31千克/亩。采果期每10-15天追施“钾先锋”螯合肥1次, 施肥量共120千克/亩, 兑水浇施。

(2)“钾先锋”做基、追肥施用, 施用“钾先锋”螯合肥180千克/亩和尿素(N 46%)31千克/亩。其中, 基肥: “钾先锋”螯合肥50千克/亩, 尿素16千克/亩, 全层深施; 苗期追肥: 每10天施1次肥, 施肥量共30千克/亩, 尿素15千克/亩。采果期追肥: 每10-15天追施“钾先锋”螯合肥1次, 施肥量共100千克/亩, 兑水浇施。(3)菜农习惯施肥: 通用复合肥(15-15-15)72千克/亩, 亩配施尿素(N 46%)66千克和氯化钾(K₂O 60%)51千克。不施基肥; 苗期追肥则为每10天施通用(15-15-15)复合肥1次, 共施用36千克/亩, 尿素15千克/亩; 采果期追肥则每10-15天追施通用(15-15-15)复合肥1次, 施肥量共36千克/亩, 同时配施尿素和氯化钾各51千克/亩, 兑水浇施。试验设3次重复, 小区面积15平方米。其他管理措施与大田相同。

1.3 样品采集与测定

选择当地土壤肥力水平具有代表性的田块作为试验地。供试菜地土壤为灰黄泥田, 试验在实施前, 取耕层混合基础土样。每次收获时, 每个小区单收单称, 分别记录每个小区苦瓜产量、苦瓜个数, 大小苦瓜分等数量、单瓜重量等。土壤样品用常规法^[2]测定土壤主要理化性状, 其中, pH5.37, 土壤有机质21.65克/千克, 碱解氮156.8毫克/千克, Olsen-P 70.6毫克/千克, 速效钾105.5毫克/千克。

2 结果与分析

2.1 不同施肥模式对苦瓜产量收获动态的影响

在供试苦瓜一个生育周期中, 共采收31次, 历次采收产量动态变化特征见图1。结果表明, “钾先锋”螯合肥做基肥和追肥施用, 在历次采收中大多有较高的小区产

作者简介: 李娟, 1977年出生, 女, 副研究员, 主要从事平衡施肥和施肥与环境研究, E-mail: lj-95@163.com

基金项目: 福建省属公益类科研院所专项(2015R1022-10)。

量，尤其是采收前期和后期更为明显。苦瓜产量水平与气温有明显关系。第 18 次采收后即在 4 月 12 日后，由于气温开始升高，三个处理的苦瓜小区产量都有明显增加。

“钾先锋”螯合肥做基肥和追肥施用，每次采收的平均产量为 5.20 ± 1.36 千克/小区，在 3 个处理中产量最高；

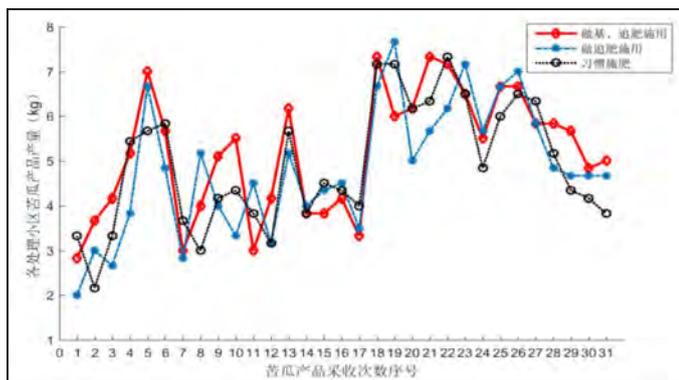


图 1 不同施肥方式对苦瓜历次采收产量动态的影响

而“钾先锋”螯合肥仅做追肥施用的处理平均产量最小，只有 4.83 ± 1.44 千克/小区。结果表明，“钾先锋”螯合肥做基肥和追肥施用的苦瓜产量最高，历次采收的产量水平波动最小，习惯施肥则居中，而“钾先锋”螯合肥仅做追肥施用，历次采收平均产量最低，产量水平波动最大。

2.2 不同施肥模式对苦瓜总产量及增产率的影响

累加每次采收的小区产量，计算相关试验各处理和重复的苦瓜总产量，结果见表 1。方差分析和 LSD 多重比较结果表明，试验整体达到显著差异水平，“钾先锋”螯合肥做基肥和追肥施用的苦瓜产量达到 7004.3 千克/亩，显著高于菜农习惯施肥，亩增产 378.2 千克，增产率达到

5.7%，但仅作追肥施用，其产量水平与菜农习惯施肥没有显著水平的差异。

2.3 不同处理的经济效益分析

以每公斤苦瓜 4.0 元的平均产地价格，以及每吨“钾先锋”螯合肥 3200 元，每吨尿素 1800 元、氯化钾 3000 元和国产通用复合肥（15-15-15）2300 元的平均肥料市场批发价为依据，计算相关肥效试验的经济效益，结果见表 2。

因“钾先锋”螯合肥定价明显高于国产通用复合肥，施用螯合肥的两个处理的肥料成本投入量明显高于菜农习惯施肥。苦瓜试验的两个螯合肥处理的成本为 631.8 元，菜农习惯施肥的成本投入为 437.4 元，每亩肥料成本提高了 194.4 元。但是，由于螯合肥对苦瓜都具有较好的增产效果，做基肥和追肥分期合理施用，扣除肥料成本后，每亩净产值达到 27385.4 元，比菜农习惯施肥提高了 1318.4 元，净产值增加了 5.1%。但是螯合肥仅做追肥施用，在相同养分施用量下净产值低于菜农习惯施肥。

3 结论

大棚苦瓜肥效试验表明，施用“钾先锋”硝硫基螯合肥具有显著的增产增收效果。“钾先锋”硝硫基螯合肥做基肥和追肥施用的处理，苦瓜亩产量达到 7004.3 千克，比习惯施肥亩增产 378.2 千克，增产率达到 5.7%，每亩净产值达到 27385.4 元，比习惯施肥提高了 1318.4 元，净产值增加了 5.2%。

表 1 “钾先锋”螯合肥对苦瓜产量的影响

处理	苦瓜产量 (千克/小区)				产量 千克/667 平方米	亩增产	
	重复 1	重复 2	重复 3	平均		(千克)	(%)
1、做追肥施用	146.4	149.6	153.5	149.8b	6513.0b	-113.1	-1.7
2、做基、追肥施用	157.8	161.5	164.0	161.1a	7004.3a	378.2	5.7
3、习惯施肥	155.6	157.9	142.8	152.4b	6626.1b	—	—

注：小区面积为 15 平方米。

表 2 “钾先锋”螯合肥的经济效益分析

处理	产值 (元/亩)	肥料成本 (元/亩)	净产	
			净增加 (元/亩)	增加 (%)
1、螯合肥做追肥施用	26052.0	631.8	25420.2	-2.5
2、螯合肥做基肥和追肥施用	28017.2	631.8	27385.4	5.1
3、习惯施肥	26504.4	437.4	26067.0	—

注：习惯施肥的复合肥为 15-15-15 通用复合肥。

参考文献

[1] 张武君, 林永胜, 黄贤贵, 张玉灿. 福建苦瓜品种选育及配套栽培研究进展, 福建农业科技, 2016, 5:67-70

[2] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.

美盛美可辛复合肥与养分专家系统在湖北水稻上的应用效果研究

汪 霄¹ 鲁君民² 李志国¹ 张润琴¹ 陈 防^{1,3*}

(1. 中国科学院武汉植物园, 湖北 武汉, 430074; 2. 湖北省洪湖市大同管理区农科所, 北京, 100049;

3. 国际植物营养研究所武汉代表处, 湖北 武汉, 430074)

摘要: 通过大田试验研究了美盛美可辛复合肥在湖北省江汉平原水稻上的应用效果, 结果表明: 与农民习惯施肥(对照处理)相比, 施等量的美可辛肥水稻增产 33.9 公斤/亩, 增产率 9.53%; 施等磷养分的美可辛肥水稻增产 15.8 公斤/亩, 增产率 4.44%, 经济效益增加 27.3 元/亩; 养分专家系统推荐施肥水稻增产 49.2 公斤/亩, 增产率为 13.83%, 经济效益增加 93.9 元/亩。由此可知, 在施用美可辛肥的基础上, 结合养分专家系统推荐施肥量具有显著的增产效果和经济效益, 值得大面积推广应用。

关键词: 美可辛复合肥; 养分专家系统; 水稻产量; 经济效益

前言

水稻是我国重要的粮食作物, 种植面积约 3×10^7 公顷^[1], 约占全国粮食总种植面积的 30%。湖北省是我国长江流域主要的水稻生产区, 水田面积占湖北耕地面积的 51%, 产量占湖北粮食总产量的 70% 以上, 商品粮占 80%, 是仅次于湖南、江西的第三大水稻大省^[2]。

“美可辛”是美国美盛公司历经 10 余年潜心研发的一款新型复合肥, 采用独特的分层造粒技术, 将氮、磷、硫、锌等多种养分融合于每一个肥料颗粒中, 呈洋葱状结构层层包裹, 使得养分缓慢释放, 肥效较为持久高效。目前, 大量的“美可辛”肥效试验已在中国北方农作物(小麦、玉米、棉花、花生等)及蔬菜、果树等经济作物中开展, 并取得显著的增产效果。研究结果表明, 美可辛复合肥具有促进作物根系生长, 提升作物长势, 增加作物高产潜力等效应^[3-5]。但是否在气候、土壤、作物以及耕作方式截然不同的南方地区, “美可辛”复合肥也可以收到同样的大田效果呢? 又该如何因地制宜才能获得最大的经济效益呢? 目前还未进行大量的田间验证试验。

为此, 中国科学院武汉植物园于 2016 年在湖北省洪湖大同湖农场开展了水稻美可辛肥效试验, 主要研究美可辛磷肥与普通磷肥的肥效、经济效率的差异, 以及专家系统推荐施肥方案与常规施肥方式的差异, 旨在为美可辛的合理使用及继续推广应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地选自湖北省洪湖市大同湖管理区江泗口新台队。该地区地处江汉平原, 属亚热带季风湿润气候, 雨热同期, 年均气温 16.2–16.6℃, 无霜期 250–267 d, 年均降雨量 1100–1300 毫米。2016 年有两次高温天气, 7 月 21 日–8 月 2 日, 以及 8 月 10 日–8 月 26 日高温为 37–39℃; 试验区抽穗期全为高温天气, 对水稻产量影响较大。

1.2 试验材料

水稻品种为金科优 651, 属于迟熟籼型中稻品种, 适于湖北省海拔 500 米以下的中等肥力田块。供试土壤为长江冲积物发育而来的潮土, 试验前采耕层土壤(0–20 厘米)进行养分测定, 其土壤基本农化性状为: pH7.74, 有机质 26.68 克/千克, 碱解氮 87.9 毫克/千克, 速效磷 18.4 毫克/千克, 速效钾 169.9 毫克/千克。

试验中所用肥料为尿素、普钙、美可辛、氯化钾。尿素含 N46%; 普钙含 P_2O_5 12%; 氯化钾含 K_2O 60%。美可辛由美国美盛有限公司(Mosaic)提供, 美可辛养分含量为 N12%– P_2O_5 40%–S10%–Zn1%。市场价尿素 2.2 元/公斤, 普钙 0.75 元/公斤, 氯化钾 3.3 元/公斤, 美可辛 4.6 元/公斤, 水稻 2.64 元/公斤。

1.3 试验方法

试验共设 4 个处理，分别为：

T1: FP (农民习惯施肥)，即按照当地农民施肥习惯，每亩基施复合肥 25 公斤 (15-15-15)，后期追施尿素 16.5 千克。施肥量为 N-P₂O₅-K₂O=11.3-3.75-3.75 公斤/亩。

T2: FPP (等量美可辛)，施肥量为 N-P₂O₅-K₂O=11.3-12.5-3.75 (公斤/亩)，其中磷肥全部为美可辛，用量同普钙，即每亩施美可辛 31.25 公斤。

T3: FPN (等养分美可辛)，施肥量为 N-P₂O₅-K₂O=11.3-3.75-3.75 (公斤/亩)，其中磷肥全部为美可辛，用量按等同养分量 (3.75 公斤 P₂O₅) 计算，即每亩施美可辛 9.375 公斤。

T4: NE (养分专家系统推荐施肥)，施肥量为 N-P₂O₅-K₂O=10.7-5.5-5 (公斤/亩)，其中 5.5 公斤磷肥全部为美可辛，即每亩施美可辛 13.75 公斤。

试验面积：每个处理小区面积 30 平方米 (长 6 米，宽 5 米)，每个小区分为 17 行，行间距平均为 35.7 厘米，行长 5 米 (即小区的宽度)。小区区组间随机排列，重复 4 次，共 16 个小区。具体施肥量和使用方法见表 1。

1.4 试验田间管理

2016 年 4 月 21 日和 5 月 7 日两次整理秧苗田，5 月 10 日播种，6 月 11 日施肥插秧，具体施肥量见表 1；6 月 16 日第一次打药 (米鲜胺 50 毫升 + 啊维毒 100 毫升)，主要用于防治纹枯病、卷叶螟、稻飞虱，之后每隔 15-20 天喷药一次；6 月 20 日施分蘖肥；7 月 7 日第二次打药 (米鲜胺 50 毫升 + 啊维毒 100 毫升)；7 月 17 日施穗肥；7 月 30 日第三次打药，清缴 100 毫升 (防稻曲病、二化螟、稻飞虱)；8 月 15 日第四次打药，用毒死蜱 100 毫升 + 吡蚜酮 10 克兑水 20 千克喷施防稻飞虱；8 月 22 日水稻齐穗；9 月 9 日开始排水准备收割，9 月 13 日取样调查，9 月 25 日收割，9 月 30 日脱粒，称重计产。其他日常田间管理方式按照常规栽培技术要求进行。

1.5 计算方法与公式

总收入 = 水稻产量 × 水稻价格。

净收入 = 总收入 - 肥料成本 - 种子成本。

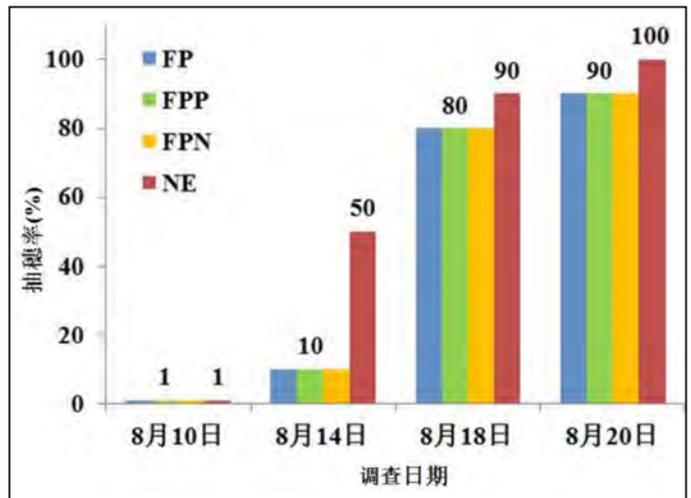
1.6 数据分析

所有数据采用 Spss 16.0 软件进行统计分析，最小显著极差法 (LSD) 进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 生长期不同处理水稻抽穗情况调查

水稻生长期，观察并记录水稻不同生长期不同处理水稻抽穗情况。图 1 调查结果显示：8 月 10 日为水稻孕穗期；8 月 14 日 T4 处理水稻抽穗 50%，其他处理水稻抽穗 10%；8 月 18 日 T4 处理水稻抽穗 90%，其他处理水稻抽穗 80%；8 月 20 日 T4 处理水稻抽穗 100%，其他处理水稻抽穗 90%。可见相比其他施肥处理，养分系统专家推荐施肥 (NE) 更加有利于水稻的抽穗和成熟。



2.2 不同处理水稻株高及营养性状的差异比较

2016 年 9 月 9 日，进行水稻株高的测量和比较。此时水稻株高已趋于稳定，不会有太大的生长变化。不同处理取 6 蔸进行水稻株高的测量，取其平均值。调查结果 (表

表 1 不同处理田间施肥量 (公斤/亩)

试验处理	氮磷钾养分施用量 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O	肥料品种及用量				尿素减施量
		尿素	普钙	氯化钾	美可辛	
T1 (FP)	11.3-3.75-3.75	24.57	31.25	6.25	0	—
T2 (FPP)	11.3-12.5-3.75	16.40	0	6.25	31.25	35%
T3 (FPN)	11.3-3.75-3.75	22.12	0	6.25	9.375	10%
T4 (NE)	10.7-5.5-5.0	19.67	0	8.33	13.75	20%

注：表中普钙、氯化钾、美可辛全部作基肥施用，尿素 60% 基肥，20% 分蘖肥，20% 穗肥。

表 2 不同处理水稻株高 (厘米) 的差异比较

处理	I	II	III	平均值 ± 标准差	LSD (0.05)
T1(FP)	126.5	130.0	130.6	129.0 ± 2.2	a
T2 (FPP)	126.5	131.0	129.4	129.0 ± 2.3	a
T3(FPN)	131.1	127.0	127.0	128.5 ± 2.4	a
T4(NE)	126.0	128.5	130.8	128.5 ± 2.4	a

表 3 不同处理水稻营养性状的差异比较

试验处理	亩穗数 (x10000)	15 厘米长穗数 (穗/亩)	每穗实粒数 (粒)	千粒重 (克)	结实率 (%)	实际产量	
						(公斤/亩)	
T1(FP)	12.2 a	1848.1	135 b	28 a	69 a	355.7 c	461.2 b
T2 (FPP)	12.3 a	1974.1	176 a	28 a	69 a	389.6 ab	606.2 a
T3(FPN)	12.1 a	1907.4	134 b	28 a	65 a	371.5 bc	454.0 b
T4(NE)	11.8 a	1848.1	178 a	28 a	69 a	404.9 a	588.1 a

2) 显示: 不同施肥处理下, 水稻株高差异不大。

水稻各营养性状差异比较结果显示 (表 3): 不同处理水稻亩穗数、结实率、千粒重等指标差异不大。但穗实粒数处理间差异显著, T2 和 T4 处理穗实粒数显著高于 T1 和 T3 处理穗实粒数。由此推测, 美可辛可以显著提高水稻产量。这可能与美可辛独特的制作工艺有关, 其独特的分层造粒技术有助于养分的缓慢持久释放, 可以保证水稻后期, 尤其是灌浆期养分的供给, 提高水稻的产量构成因子中的每穗实粒数, 这或许也是导致后期产量差异的主要原因。

2.3 不同处理水稻产量的差异比较

图 2 结果显示: T4 水稻产量最高, T1 水稻产量最低。最小显著差异法 LSD 分析结果表明, T4 (养分专家推荐施肥系统) 水稻产量与其他处理差异显著。图 2 和表 3 数据结果显示: T2、T3、T4 处理分别比 T1 处理水稻每亩

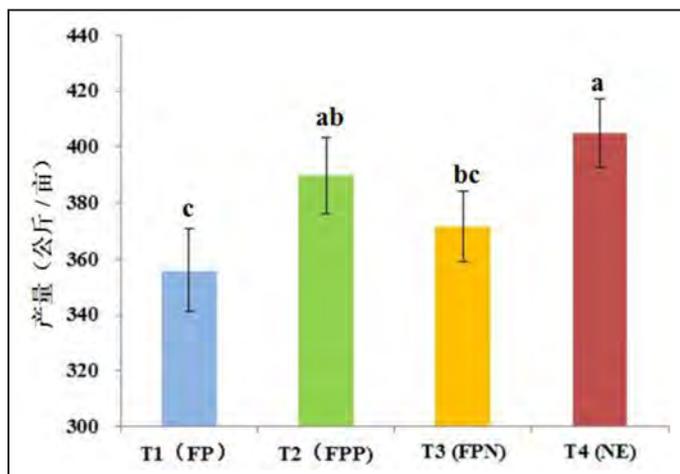


图 1 不同处理水稻产量差异比较 (公斤/亩)

增产 33.9 公斤, 15.8 公斤, 49.2 公斤, 分别增产 9.53%, 4.44%, 13.83%。

2.4 不同处理水稻经济效益的比较

结合水稻和肥料的市场价, 我们可以计算出不同施肥措施下每亩地的总收入和净收入。表 4 数据结果显示, T4 处理水稻产量最高, 每亩地水稻产量为 404.9 公斤, 净收入达 534.9 元/亩。与对照 T1 相比, T2, T3, T4 处理水稻每亩地增产 33.9 公斤, 15.8 公斤, 49.2 公斤; 每亩地净增收 -13 元, 27.3 元, 93.9 元。由此可见, 不同施肥方式下, T4 处理所获经济效益最大, 水稻产量最高。

此外, 由于美可辛肥料自身含有 12% 的氮素, 因此等 N 量施肥条件下, 在施用美可辛的同时, 可以达到减少尿素施用量的效果。从表 1 施用尿素量可以看出, 与 T1 对照相比, T2、T3、T4 处理相当于分别减少了 35%、10%、20% 的尿素施用量, 一定程度上可以减少尿素使用量, 降低了水田 N 素淋失的风险。但从 T3 处理 (等 P 养分使用量) 水稻增产并不显著, 与对照 T1 相比, 每亩地仅增产 15.8 公斤, 增产效果未达到显著差异 (表 4)。T2 处理 (等量美可辛) 尽管每亩地水稻增产 33.9 公斤, 但是由于目前美可辛肥料市场价格较高, 一定程度上增加了肥料成本, 每亩地净亏损 13.0 元。T4 处理, 减少了氮肥使用量, 适当地增加了磷钾肥用量, 水稻产量和经济收益均较高。因此, 在选择施用美可辛时, 要适量的增大美可辛的用量, 适当调整 N, P, K 肥的配比和用量。本试验处理中, T4 处理 (养分专家推荐施肥量) 施肥方式最优。因此, 施肥时选择好的肥料资源时应注意采用正确的施肥方法和用量, 提高施肥效益。

表4 不同处理间水稻经济效益的比较

处理	产值			成本		净收入 (元/亩)	净增产 (公斤/亩)	净增收 (元/亩)
	产量 (公斤/亩)	水稻 (元/公斤)	总收入 (元/亩)	肥料 (元/亩)	种籽 (元/亩)			
T1(FP)	355.7	2.64	939.1	98.1	400	441.0	0.0	0.0
T2 (FPP)	389.6	2.64	1028.5	200.5	400	428.0	33.9	-13.0
T3(FPN)	371.5	2.64	980.7	112.4	400	468.3	15.8	27.3
T4(NE)	404.9	2.64	1068.9	134.0	400	534.9	49.2	93.9

注：尿素 2.2 元/公斤，普钙 0.75 元/公斤，氯化钾 3.3 元/公斤，美可辛 4.6 元/公斤，水稻 2.64 元/公斤。

3 小结

3.1 不同施肥处理的差异比较

4 种不同施肥方式比较结果表明，养分专家推荐施肥方式（T4 处理）最优，与农民习惯施肥方式相比，适量增大了磷钾肥使用量，调整了 NPK 的施肥比例，一定程度上降低了氮肥使用量，具有很好的增产增收效果，每亩水稻增产 49.2 公斤，净增加收入 93.9 元。

3.2 美可辛与普通磷肥肥效、经济效益的差异比较

结果表明，尽管美可辛肥市场单价（4.6 元/公斤）显著高于普钙（0.75 元/公斤），可能农民一时难以接受。但是其含 P_2O_5 量高达 40%，相比普钙（12% 的 P_2O_5 ），每亩地可以减少大量的肥料用量，并且由于其独特的分层造粒技术，使得肥效更为持久有效。除此之外，美可辛还

特别添加了 10% 的硫和 1% 的锌。有效硫可以满足作物前期营养生长，单质硫转化后满足后期作物需求，促进籽粒的成熟。锌不仅提升水稻抵抗力，而且可以改善品质。



参考文献

- [1] FAO. Statistical databases, Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations[DB]. 2014: <http://www.fao.org>.
- [2] 程建平, 李阳, 等. 湖北省“早籼晚粳”双季稻机械插秧高产高效栽培技术[J]. 湖北农业科学, 2016, (23):6067-6069+6133.
- [3] 于琳. 玉米应用美盛化肥效果试验[J]. 现代化农业, 2013, (12):18-19.
- [4] 王浩然, 唐明玉. 新型肥料美可辛在玉米上的应用初报[J]. 杂粮作物, 2009, (05):354-355.
- [5] 王晓玲. 新型肥料美可辛在水稻上应用初报[J]. 北方水稻, 2009, (04):59+63.

区域尺度中国玉米可获得产量和肥料需求空间变异研究

徐新朋 何萍* 张佳佳 Pampolino M.F. Johnston A.M. 周卫*

了解中国当前玉米主产区在区域尺度和国家尺度上的可获得产量、土壤养分供应能力和肥料需求特征对政策、研究以及投资决策的制定至关重要。本研究收集了2001–2015年中国玉米主产区大量的田间试验 ($n=5893$), 结合地理信息系统和玉米养分专家系统研究可获得产量、相对产量 (RY) 和肥料需求的空间分布特征。结果得出, 就所有数据点而言, 可获得产量具有较强的空间变异性, 变异系数为 25.5%。绘制 RY 的空间变异性得出, 分别有 85.3%、79.3% 和 72.5% 的氮 (N)、磷 (P) 和钾 (K) 的 RY 分别位于 0.68–0.87、0.83–0.95 和 0.84–0.94 之间。华北平原的 RY 高于其他地区。RY 可以揭示土壤基础养分供应能力, 并且已应用到玉米养分专家系统中用于计算肥料需求。总体而言, N、P 和 K 的肥料需求有很强的空间异质性, 变异系数分别为 19.5%、31.6% 和 35.0%, 其中位于 150–210 千克 N / 公顷、50–90 千克 P_2O_5 / 公顷和 50–110 千克 K_2O / 公顷的分别占到了全部研究区域的 72.0%、81.7% 和 81.5%。2010–2014 年 10 省 605 个田间试验得出, 与农民习惯施肥相比, 玉米养分专家系统不仅降低了 31.6% 的氮肥和 15.5% 的磷肥, 而且提高了 3.3% 的产量。将推荐施肥系统和地理信息系统与大型数据库相结合对于研究和确定田块和区域尺度上肥料需求的变异性提供了一种有效的工具, 有助于更加有效的进行肥料养分管理。

1 前言

作物产量在过去几十年里随着施肥量的增加、作物品种的改善以及农业管理措施的提升在不断增加 (Mueller 等, 2012; Chen 等, 2014)。然而, 进一步增加潜在产量仍面临着诸多挑战, 如化肥成本增加、土壤质量退化、耕地面积减少、以及空气及水体污染增加等 (Ju 等, 2009; Guo 等, 2010)。过量或不平衡施肥导致了利用率降低及环境污染等, 并且对粮食安全、生态环境和农业可持续发展构成很大威胁 (Zhang 等, 2013; Chen 等, 2014)。

优化养分管理措施作为应对这些问题的有效方法之

一, 在提高肥料利用效率和增加作物产量方面发挥了重要作用。施肥量很大程度上依赖于土壤养分, 然而由于作物生长条件、土壤和作物管理措施以及气候的差异导致了土壤基础养分供应和作物对养分施入后的反应存在很大差异 (Simmonds 等, 2013; He 等, 2015), 这就要求发展基于土壤和作物信息管理技术去管理这种异质性, 从而增加作物产量和养分利用率。为应对这种挑战, 发展了基于土壤测试的优化养分管理技术 (He 等, 2009), 然而, 基于土壤测试的推荐施肥仍然存在一些局限性, 如需要消耗大量的人力、物力和财力, 且土壤测试值与土壤基础养分供应间的相关性不高 (Dobermann 等, 2003)。

施入土壤中的养分最终将被作物吸收并在作物产量上得到体现, 因此, 应用地上部作物反应来量作物养分需求的养分管理策略是有效的。许多作物产量反应模型已经用于估测最佳养分量, 如肥料效应函数法 (Greenwood 等, 2001; Sonar and Babhulkar, 2002), 基于产量反应和土壤养分关系推荐施肥 (Bélanger 等, 2000; Cui 等, 2008a) 等。土壤基础养分供应决定产量反应, 且二者呈负相关, 产量反应可以反应土壤养分供应状况, 并用于推荐施肥指导 (Xu 等, 2014a)。

玉米是我国种植面积最广的粮食作物, 在保证我国粮食安全上发挥了重要作用。然而, 集约化的玉米生产系统也面临着低生产力和低养分利用率等问题。过量和不平衡施肥导致了很多农户的氮肥回收率不足 30% (He 等, 2009; Xu 等, 2014b), 导致农民获得的产量往往低于应用当前优化的作物养分管理措施可以获得的产量 (Chen 等, 2011; Men 克等, 2013)。地毯式的大面积推荐施肥存在很大局限性, 这就需要一种新的综合养分管理方法。地统计学在土壤和作物实地养分管理方面发挥了重要作用 (Robertson 等, 2008; Simmonds 等, 2013), 基于半方差模型和克里格差值方法, 可以绘制空间变异图并分析土壤和作物产量的时空变异特征 (Wang 等, 2009; Tsirolev, 2010)。

从区域角度出发研究玉米养分需求将有助于避免资源浪费、保证粮食安全和保护生态环境。当前依据个别试验点进行地毯式的大面积推荐施肥已不能满足当前集约化农

业生产的需要。因此,迫切需要建立一种基于大量田间试验的区域推荐施肥方法。本研究的目标是:(1)分析当前玉米产量分布特征;(2)绘制相对产量空间分布;(3)建立区域尺度推荐施肥方法;并(4)进行田间验证。

2 材料与方 法

2.1 研究区域及数据

研究区域位于我国玉米主产区,根据地理特征、气候条件和试验点分布划分为五个区域,分别为:东北、西北、西南、华北以及长江中下游地区。春玉米和夏玉米在研究区域都有种植,春玉米主要是玉米单做,主要位于东北和西北地区,夏玉米主要位于其他区域,与小麦、油菜、玉米等作物轮作。春玉米数据主要包括吉林、辽宁、黑龙江、山西、甘肃、新疆等种植区,夏玉米数据主要包括河北、河南、山东、山西、安徽等种植区。试验点的分布几乎覆盖了中国主要玉米种植区域,遍布于22个省(自治区、直辖市),涵盖了不同气候类型和农艺措施。

收集和汇总2000–2015年中国玉米种植区的田间试验,这些试验来自于国际植物营养研究所(IPNI)中国项目部、同行在期刊中已发表的学术文章,以及博士和硕士学位论文共计5893个田间试验。试验点涵盖了我国玉米主产区春玉米和夏玉米不同种植类型。试验包括品种试验、肥料量级试验、养分限制因子试验及长期定位试验等。所收集的玉米数据处理包括优化养分管理处理、减氮处理、减磷处理、减钾处理、空白处理、农民习惯施肥措施处理,以及基于农民习惯施肥措施的减素处理等。数据点分布见图1。

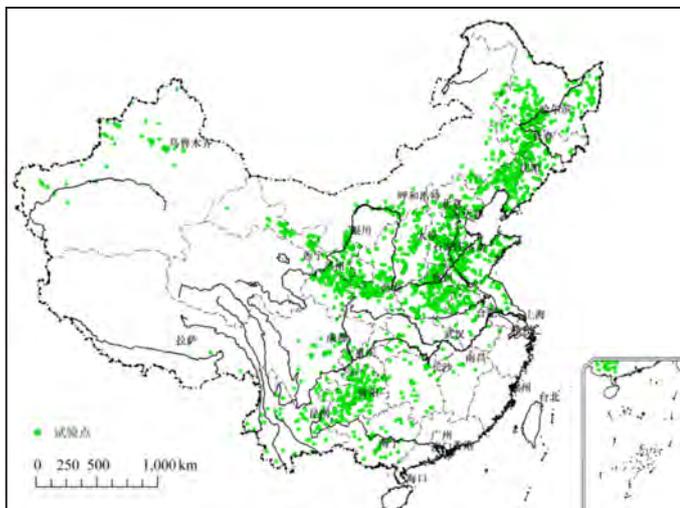


图1 玉米数据点分布

2.2 推荐施肥及数据分析

采用基于陆地生态系统的光学遥感影像确定土地覆盖分类系统,得出旱地、水浇地和水田种植田块。采用Nutrient Expert(NE)系统软件对每一个试验点进行推荐施肥,氮、磷和钾施用量分别为N、 P_2O_5 和 K_2O 施用量。NE系统是在汇总过去十几年在全国范围内开展的肥料田间试验的基础上,建立了包含作物产量反应、农学效率及养分吸收与利用信息的数据库,依据土壤基础养分供应、作物农学效率与产量反应的内在关系,以及具有普遍指导意义的作物最佳养分吸收和利用特征参数,建立了基于产量反应和农学效率的推荐施肥模型。对于氮肥推荐,主要依据作物产量反应和农学效率的相关关系获得,并根据地块具体信息进行适当调整;而对于磷肥和钾肥推荐,主要依据作物产量反应所需要的养分量及补充作物地上部移走量所需要的养分量求算。对于中微量元素,主要根据土壤丰缺状况进行适当补充。该方法还考虑了作物轮作体系、秸秆还田、上季作物养分残效、有机肥施用、大气沉降、灌溉水等土壤本身以外的其他来源养分。基于以上养分管理原则,应用计算机软件技术,把复杂的施肥原理研发成了方便科研人员和农技推广人员使用的养分专家系统。NE系统采用问答式界面,只需按照操作流程回答几个简单的问题,系统就能给出基于用户地点信息的个性化施肥方案。NE养分专家系统采用“4R”养分管理原则,可以帮助农户在施肥推荐中选择合适的肥料品种和适宜的用量,并在合适的施肥时间施在恰当的位置,并考虑了施肥的农学、经济和环境效应。该方法在有和没有土壤测试的条件下均可使用。

使用GS+5.3和ArcGIS 9.3软件,采用半方差模型和克里格插值法绘制产量反应、相对产量和肥料施用量分布图。半方差模型通过GS+软件进行交叉验证而确定,而ArcGIS 9.3软件则使用克里格插值对每一个参数进行空间插值。对于没有数据的位置则由附近位置观测值的加权平均值估算。

3 结果

3.1 可获得产量空间分布

对玉米试验可获得产量数据进行空间插值得出,产量具有明显的空间分布特征,从南到北呈逐步增加趋势,这主要与轮作系统有关。华北平原、长江中下游以及西南地区东南部主要以一年两熟的夏玉米为主,而东北以及西北

地区主要以一季春玉米为主。生长周期长、有效积温高和昼夜温差大是东北和西北地区玉米产量高的主要原因。

就平均值而言,所有试验点的可获得产量为 9.9 吨/公顷,变异系数为 25.5%。东北、华北、西北、西南和长江中下游地区的平均可获得产量分别为 10.7、9.6、10.5、8.7 和 8.6 吨/公顷,变异系数分别为 21.0%、22.6%、30.3%、25.7% 和 28.6% (图 2)。可获得产量位于 8–10 吨/公顷的占到了全部研究区域的 37.9%,主要位于华北地区、长江中下游地区北部以及东北地区北部。可获得产量位于 10–12 吨/公顷的占到了全部研究区域的 23.5%,主要分布于东北黑土带、华北地区中部以及西南地区的西南部。而在西北地区,例如甘肃中部和西北部、以及新疆大部分地区的可获得产量大于 12 吨/公顷,新疆部分区域的可获得产量甚至大于 15 吨/公顷。在所有研究区域中,有 8.8% 的研究区域的可获得产量位于 12–14 吨/公顷,可获得产量大于 14 吨/公顷的占到了全部研究区域的 5.7%。然而,可获得产量小于 8 吨/公顷的占到了全部研究区域的 24.1%,主要位于华北地区南部、长江中下游北部以及四川盆地。

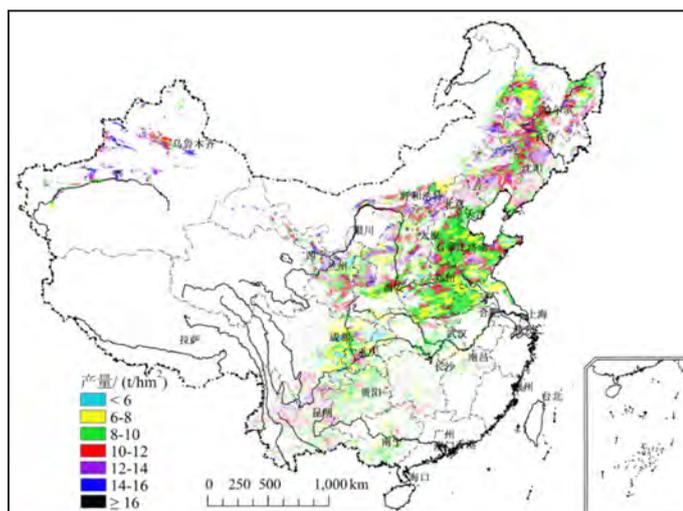


图 2 玉米可获得产量空间分布

3.2 相对产量空间分布

相对产量由产量反应和相对产量计算而得,并用于表征土壤养分供应能力或土壤肥力。高的相对产量意味着高的土壤养分供应能力。就全部研究区域而言,N、P 和 K 的平均相对产量分别为 0.77、0.88 和 0.88,变异系数分别为 17.0%、12.2% 和 12.0%。

东北、华北、西北、西南和长江中下游地区的 RYN 的变异系数分别为 8.3%、8.6%、12.5%、12.8% 和 8.9% (图 3)。大部分研究区域的 RYN 位于 0.68–0.79 之间,

占全部研究区域的 66.1%。而位于 0.79–0.87 间的 RYN 占到了全部研究区域的 19.2%,主要位于华北地区中部。RYN 位于 0.60–0.68 间的占到了全部研究区域的 11.7%,主要位于西北地区,如甘肃、青海和宁夏。而较低的 RYN (<0.60) 占到了全部研究的 2.3%,主要位于西南地区的东部。而 RYN 大于 0.87 的占到了全部研究区域的 0.7%。

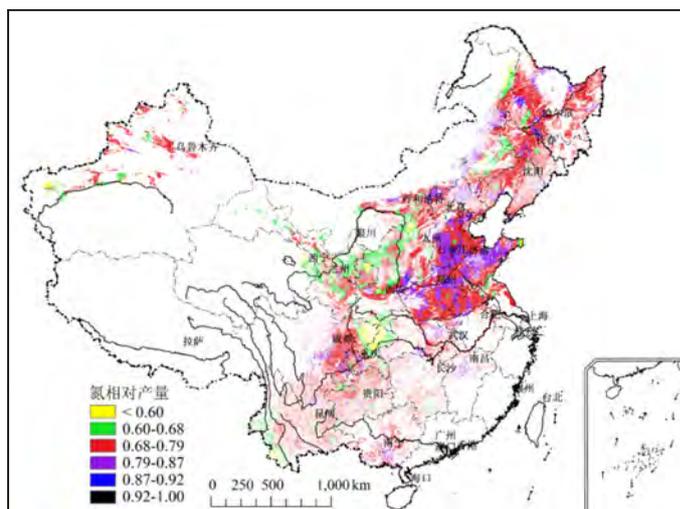


图 3 玉米氮相对产量空间分布

RYP 具有明显的空间分布特征(图 4)。RYP 位于 0.83–0.89 间的占到了全部研究区域的 44.8%,在各个区域都有分布。位于 0.89–0.95 间的占到了全部研究区域的 34.5%,主要位于东北和华北地区。高的磷肥施用历史导致了高的 RYP,大于 0.95 的占到了全部研究区域的 3.1%,主要位于华北地区中部。低的 RYP 主要位于西北地区 and 西南地区东部,其中有 15.0% 研究区域的 RYP 位于 0.75–0.83 之间,而 RYP 小于 0.75 的仅占到了全部研究区域的 2.6%。

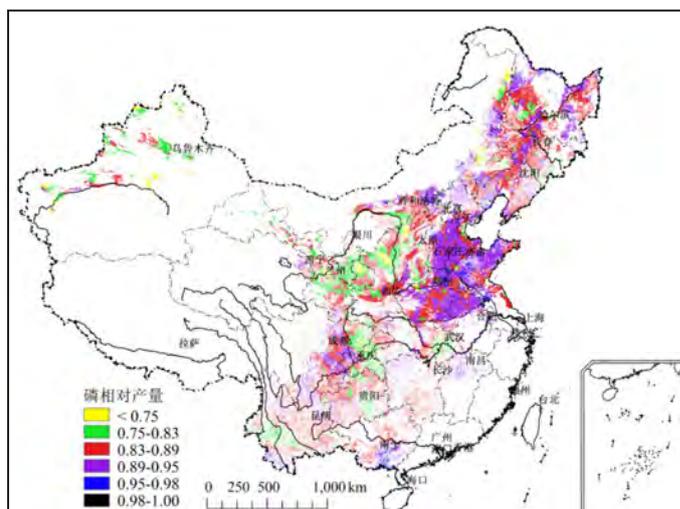


图 4 玉米磷相对产量空间分布

RYK具有明显的空间分布特征(图5),位于0.84–0.90间的占到了全部研究区域的49.5%,主要位于东北地区中部,华北大部分地区 and 西南地区。**RYK**位于0.90–0.94间的占到了全部研究区域的23.0%,而大于0.94的占到了全部研究区域的5.3%,主要位于华北中部地区。西北地区的大部分区域,钾肥施用效果超过15%。在所有研究区域中,钾肥施用效果大于16%(**RYK**小于0.84)的占到了22.2%。

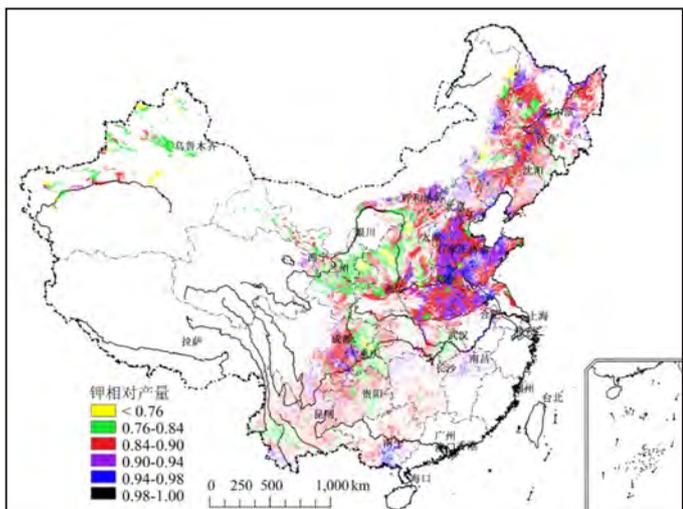


图5 玉米钾相对产量空间分布

3.3 施肥量空间分布

施氮量的空间分布显示,施氮量在地区间具有较强的空间变异性,变异系数为19.5%(图6)。在所有研究区域中,有42.9%的施氮量位于150–180千克/公顷,主要位于东北和华北地区、西南地区中部和西北地区东部。而施氮量位于180–210千克/公顷的占到了全部研究区域的29.1%。西北地区由于其具有较高的可获得产量和较低的氮相对产量使得该地区许多区域的施氮量大于210千克/公顷。而在一些地区施氮量小于150千克/公顷即可满足

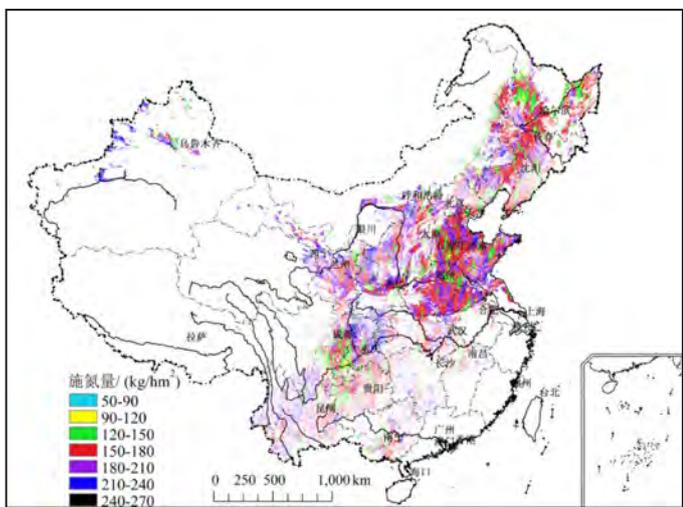


图6 玉米施氮量空间分布

作物需求,占到了全部研究区域的17.5%,主要位于华北地区中部,东北地区北部和西南地区的四川东部。然而在一些高产地区,需要较高的施氮量(>210 千克/公顷),主要位于华北中部和西北地区的新疆。

施磷量在地区间具有较强的空间分布特征,变异系数为31.6%(图7)。春玉米种植区的需磷量大于夏玉米种植区。施磷量位于50–70千克/公顷间的占到了全部研究区域的49.9%,主要位于华北地区、长江中下游地区、西南

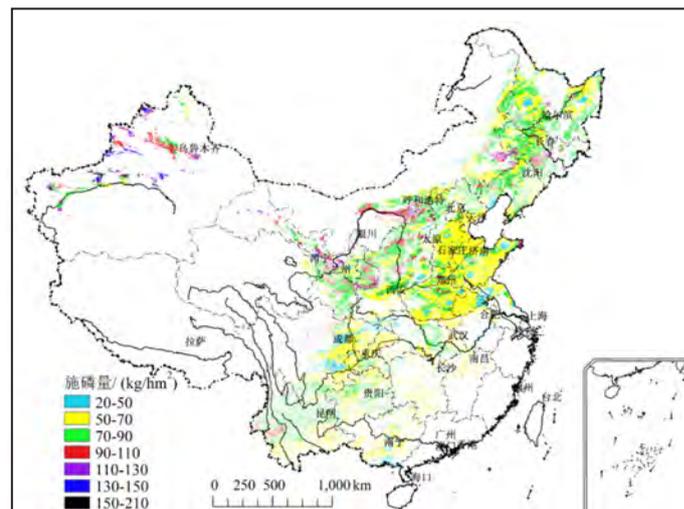


图7 玉米施磷量空间分布

地区北部和东北地区北部。施磷量位于70–90千克/公顷间的占到了全部研究区域的31.8%,主要位于东北、华北地区西北部和西南地区南部。而施磷量大于90千克/公顷的占到了全部研究区域的11.1%,主要位于西北地区。需要注意的是需磷量小于50千克/公顷的占到了全部研究的7.2%,主要位于华北地区南部和长江中下游地区北部,以及四川中部。

施钾量在地区间同样具有较强的空间变异性,变异系数为35.0%(图8)。东北、华北、西北、西南和长江

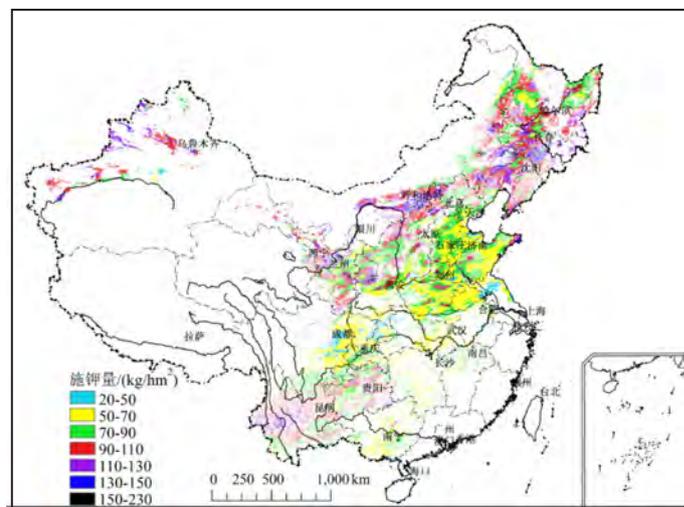


图8 玉米施钾量空间分布

中下游地区的变异系数分别为 27.4%、30.6%、36.2%、39.2% 和 31.6%。华北地区中部、长江中下游中部、以及西南地区北部的需钾量低于其它地区，大部分位于 50–90 千克 / 公顷，占到了全部研究区域的 57.8%。需钾量位于 90–110 千克 / 公顷的占到了全部研究区域的 23.7%，主要位于东北地区、西北地区南部和西南地区南部。而在所有研究区域中，有 13.8% 的需钾量大于 110 千克 / 公顷，主要位于东北和西北地区，而在新疆一些地区的需钾量甚至超过 150 千克 / 公顷。然而，仅有 4.7% 的研究区域的需钾量小于 50 千克 / 公顷。

3.4 田间验证

于 2010–2014 年共开展了 605 个玉米田间试验验证玉米养分专家系统的可行性。试验涵盖了 10 个省份，位于东北（黑龙江、吉林和辽宁），华北（河北、河南、山东和山西），西北（宁夏），西南（云南）和长江中下游（安徽）。与农民习惯施肥相比，应用养分专家系统的春玉米和夏玉

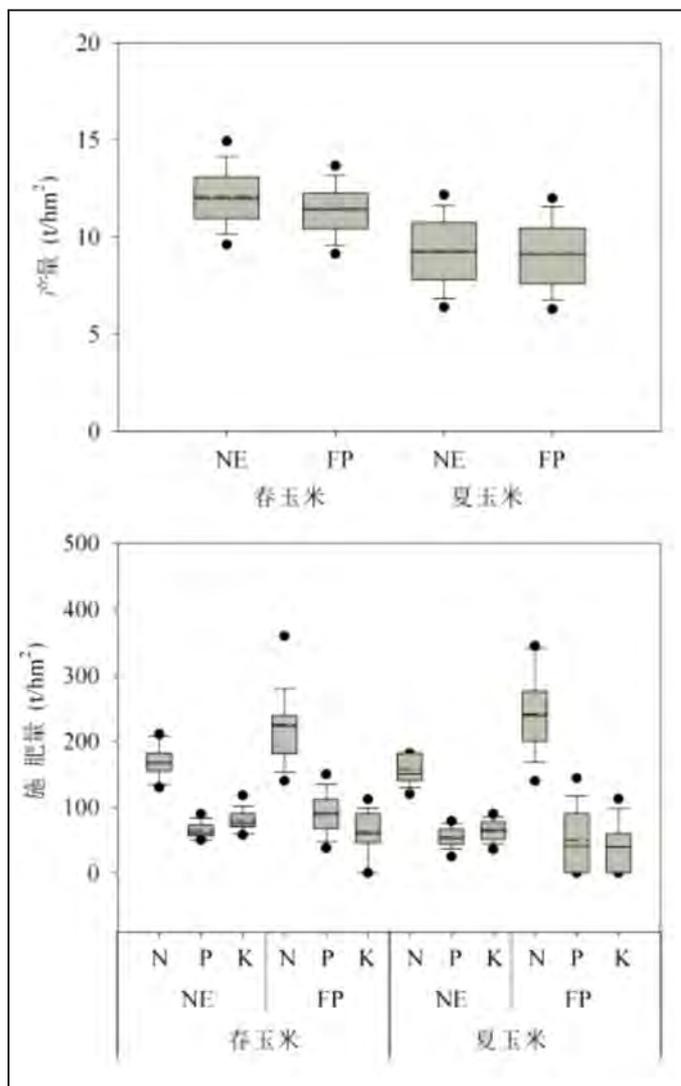


图9 不同处理下产量和施肥量

米产量分别增加 0.6 和 0.2 吨 / 公顷，增长率分别为 5.7% 和 1.7%，氮肥施用量分别减少了 25.8% 和 34.7%，磷肥施用量分别降低了 27.3% 和 3.6%，但钾肥施用量分别增加了 29.6% 和 63.2% (图 9)。

4 讨论

我国的粮食产量必须保持持续增长，以满足未来粮食需求和有限资源的竞争。应用以往的田间试验数据从区域和国家尺度估测可获得产量将为政策制定、科学研究以及投资决策提供信息 (Van Ittersum 等, 2013)。就我国整体而言，通过改良水稻品种、优化土壤与养管理、以及提高病虫害防控，玉米产量与农民习惯措施相比提高了 10% (Xu 等, 2015)。Meng 等人 (2013) 使用 137 个田间试验的数据得出平均可获得产量为 12.3 吨 / 公顷，而农民平均产量仅为 7.4 吨 / 公顷。本研究中可获得产量仅为 Chen 等 (2011) 研究的潜在产量 (15.1 吨 / 公顷) 的 65%，而在理想状态下，可获得产量应该达到潜在产量的 80% (Setiyono 等, 2010)。然而，在 1980–2008 年期间有 32.4% 玉米产区的产量停滞不前 (Tao 等, 2015)。为分析可获得产量的空间变异性，需要长期的多点试验以及当前可获得产量的地理分布，以便减少估测偏差和变异系数，特别是雨养地区 ((Lobell 等, 2009; Van Ittersum 等, 2013)。当前研究中，各区域间的可获得产量差异较大，变异系数为 25.5%，春玉米种植地区 (东北、西北、西南和华北北部) 的可获得产量要高于夏玉米种植区 (华北平原、长江中下游以及西南地区的东北部)。气候和轮作制度的差异是导致产量区域分布差异的主要控制因素。例如，东北和西北地区的春玉米生育期比华北和长江中下游的夏玉米种植区长 40–50 天，并且较高的昼夜温差也有助于物质累积。

许多研究表明，田间试验与农民习惯措施间的产量差主要是因为农民的作物管理措施效率低下 (He 等, 2009; Zhang 等, 2011; Meng 等, 2013)。Meng 等 (2013) 研究发现我国有 63% 的农民过多或过少的施用氮肥。在进行推荐施肥时考虑相对产量十分重要，相对产量是由可获得产量和施肥后的产量反应获得 (Pasuquin 等, 2014)。相对产量可以用于表征土壤肥力水平，高的相对产量表示高的土壤养分供应能力 (Xu 等, 2014a)。在本研究中，华北地区的相对产量要高于其他地区，主要与该地区高施肥量和秸秆还田有关。在我国华北平原的小麦–玉米轮作系统中，农民的年施氮量可超过 500 千克 / 公顷，有些甚

至达到了 600 千克 / 公顷 (Cui 等, 2010), 而磷的盈余量每年达到了 50 千克 / 公顷 (Vitousek 等, 2009), 而秸秆还田则有助于提高土壤钾含量 (Zhao 等, 2014)。

化肥在保证粮食安全方面发挥了重要作用, 自 20 世纪 90 年代以来, 我国的肥料用量大幅增加 (Fan 等, 2012)。然而, 过量施肥也导致了一系列的环境问题 (Ju 等, 2009)。总体而言, 施入农田的肥料回收率低于 50%, 其余大部分释放到环境中 (Ju 等, 2009; Zhang 等, 2013)。我国的平均土壤 Olsen-P 含量由 1980 年的 7.4 毫克 / 千克增到了 2007 年的 24.7 毫克 / 千克 (Li 等, 2011)。而对全国 5406 个农民田地的调查结果显示, 氮素盈余 (输入 - 输出) 达到了 72 千克 N / 公顷 (Chen 等, 2014), 而华北地区玉米播前 0-90 厘米土层的平均硝态氮含量达到了 190 千克 / 公顷 (Cui 等, 2008b)。因此, 我国农业生产在增加产量同时降低环境污染方面仍面临巨大挑战。

通过平衡施肥和优化养分管理减少化肥投入, 降低环境污染对于维持未来农业生产非常重要 (Chen 等, 2014; Wu and Ma, 2015)。本研究中, 有些地区的相对产量接近于 1, 这意味着土壤中具有较高的土壤养分累积, 导致了施肥后的低产量反应。许多试验表明在我国的小麦 - 玉米轮作系统中, 最佳的经济氮肥施用量为 140-160 千克 / 公顷 (Cui 等, 2008b; Xu 等, 2014b), 而在一些高产区 (产量在 12-14 吨 / 公顷) 氮肥需要量则达到了 200 千克 / 公顷。在本研究中, 就全部试验而言, 与农民习惯施肥相比, 基于玉米养分专家系统的推荐施肥不仅减少了 31.6% 的氮肥和 15.5% 的磷肥用量, 并且增加了 3.3% 的玉米产量。Pampolino 等 (2012) 和 Pasuquin 等 (2014) 的研究结果显示, 与农民习惯施肥相比, 使用玉米养分专家系统在菲律宾、越南和印度尼西亚增加玉米产量 0.2-1.6 吨 / 公顷。而在我国在不降低玉米产量的前提下, 可以节省 30% 的氮肥而实现氮素平衡并且降低环境风险。

近日, 中国政府发布了关于到 2020 年通过限制化肥消费提高化肥利用效率的行动计划, 随后启动了“国家重点研发计划”, 开发高效肥料推荐方法, 制定肥料施用量标准。公众的期望是政府能够采取行动, 明确政策方向

以控制当前农民实际生产中化肥施用量的增加, 甚至可以制定法律。根据作物产量反应绘制的土壤肥力分布特征, 政府可以制定粮食产量和土壤肥力状况的综合审计和报告制度, 规范化肥供应, 在保证粮食产量的同时, 提高资源利用效率并且保护环境。

当前大多数的推荐施肥策略依据的是对特定的地块或区域推荐一个平均肥料需求量或单一的施肥量。在区域水平上应用大量的田间试验形成玉米产量和肥料需求量的地理分布特征, 有助于量化粮食生产能力并为投资决策提供信息 (Van Ittersum 等, 2013)。推荐施肥系统与地理信息系统相结合提供了一个有用的工具, 可以确定不同田块或区域的肥料需求在空间上的变化差异。了解产量、土壤肥力和肥料需求的空间变异性能够指导技术开发, 并有助于进行高效的肥料管理。然而, 在制定优化养分管理策略并保持农业可持续健康发展, 必须考虑诸如土壤类型、表层土壤厚度、水土保持能力以及农田坡度等等因素。

5 结论

以大量的田间试验为基础, 结合地理信息系统和推荐施肥系统, 分析了我国主要玉米产区可获得产量、相对产量以及肥料需求的空间变异性。结果发现, 可获得产量和相对产量在区域内和区域间具有较大的变异系数, 这与气候、轮作系统、肥料施用和管理有关。这些异质性在玉米养分专家系统中加以考虑并纳入作物管理策略, 并在田块尺度上推荐施肥方面取得了成功。该方法是实现区域养分管理的重要一步, 结合大量田间试验数据可以进一步完善该系统, 并且有助于在区域尺度上精准的推荐施肥提供科学依据。然而, 合理的推荐施肥方法还应包含每个地区的土壤和气候等详细信息, 如微量元素供应强度和土壤持水能力, 对气候变化的响应, 以便更加精确的估测区域尺度上的养分需求实现最佳养分管理策略。如果实施得当, 可以在农田、区域以及国家尺度上实现产量效益和降低环境成本的双赢。

参考文献见 Field Crops Research, 2017, 203:8-15.

我国玉米产量差、土壤基础养分供应和养分利用率

徐新朋^{1,2} 刘晓燕¹ 何萍^{1,3*} Adrian M. Johnston⁴ 赵士诚¹ 仇少君¹ 周卫^{1*}

(1. 农业部植物营养与肥料重点实验室, 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2. 北京市农林科学院植物营养与资源研究所, 北京 100097; 3. 国际植物营养研究所中国项目部, 中国农业科学院与国际植物营养研究所植物营养创新研究联合实验室, 北京 100081; 4. International Plant Nutrition Institute (IPNI), 102-411 Downey Road, Saskatoon, SK, S7N 4L8, Canada)

摘要: 我国在农业生产方面已经取得很大成就, 然而仍然面临着诸多困难和挑战, 需要投入更多的努力去克服, 在保证粮食安全的同时也要保护环境。分析产量差和养分利用率有助于发展和制定农业政策与策略进而增加作物产量。从 2001–2012 年共收集了我国玉米主产区 1971 个田间试验, 试验处理包括优化管理 (OPT)、农民习惯措施 (FP) 以及一系列的缺素处理, 采用 Meta 分析和方差分析相结合的方法对产量差、养分利用率和土壤基础养分供应进行统计分析。就所有数据点而言, OPT 和 FP 之间的平均产量差是 47 公斤/亩, N、P 和 K 产量反应 (YR) 分别为 120、67 和 80 公斤/亩。N、P 和 K 的平均土壤基础养分供应量分别为 9.3、2.3 和 8.5 公斤/亩。与 FP 相比较, OPT 处理下平均 N、P 和 K 回收率 (RE) 分别增加了 12.2、5.5 和 6.5 个百分点。本研究表明, 在我国进一步的提高产量和养分利用率具有很大潜力, 将有助于发展和制定农业政策与策略, 然而一些管理措施如土壤、作物和养分是必要的, 同时需要与先进的知识和技术相结合。

关键词: 玉米; 产量差; 土壤基础养分供应; 养分利用率

1 前言

粮食安全问题在我国一直备受关注, 因为中国用占世界 9% 的耕地面积养活着世界 22% 的人口。较高的粮食需求需要不断扩大作物种植面积或增加单位产量。玉米作为主要的粮食作物之一, 是我国种植面积最广的粮食作物, 在保证粮食安全和稳定粮食市场中起着重要作用, 而提高产量应该通过技术创新缩小产量差而不是扩大种植面积^[1]。

分析可获得产量、产量差、养分利用率和土壤基础养分供应, 对于在保持生态环境条件下制定农业政策, 优化研究和实现粮食安全是至关重要的。可获得产量是在田间或试验站的试验条件下应用当前已知的信息技术和先进的管理措施在消除降低和限制产量的因素下获得的最大产量^[2, 3], 但需要多年多点的试验数据以便获得最优的稳健估计, 以确保所获得的产量能够反映典型气候变异范围^[4]。本研究中采用可获得产量分析产量差。

大多数农民的产量低于试验条件下所获得的产量。计算并分析产量差有助于改善生产技术、提供增产目标, 因为产量差在保证粮食安全中对于制定生产策略和研究生产技术是必不可少的^[4, 5]。合理的养分管理措施可以缩小产量差, 接近可获得产量^[6, 7], 而不同地区之间产量差有很大差异, 因为不同地区的气候、土壤类型、作物及养分管理措施存在很大的变异性。

缩小产量差对于我国非常重要, 肥料在缩小产量差中有着决定性的作用。近年来我国农民为了获得高产, 过多或过度的肥料施用在农民习惯措施中已经变成了一种普遍现象, 尤其是氮肥和磷肥^[8]。然而, 过量施肥不仅无助于高产, 并导致了土壤养分积累, 养分利用率降低和严重的环境污染问题^[9–11]。了解土壤养分状况是优化施肥的前提。土壤基础养分供应可以反映土壤养分状况或土壤肥力, 可以用于指导推荐施肥。在养分缺乏的地块上, 土壤基础养分供应越高, 作物产量越高^[12]。在推荐施肥时必须考虑土壤基础养分供应^[15, 16], 因为较高的土壤基础养分供应对于环境是一个潜在的威胁^[13, 14], 这些养分会通过淋洗和径流进入地下水, 污染河流和湖泊。

养分利用率是权衡施肥合理性和先进性最为直接的指标。一些农学指标常常用于评价施肥效率, 如养分回收率 (RE, 单位施用某种养分的作物吸收量增量), 农学效率 (AE, 单位施用某种养分的作物籽粒产量的增量), 偏生产力 (PFP, 单位施用某种养分的作物产量)^[17–19]。养分利用率受籽粒产量、土壤基础养分供应、施肥量、以及其它作物管理措施的及时性与质量的影响^[18]。推荐施肥策略应该同时考虑养分利用率和作物产量的最大化。

获得并了解我国主要玉米产区的可获得产量、产量差以及养分利用率对于养分管理提供依据是必需的 [20–23]。因此, 本研究的目的是:

(1) 量化玉米产量差;

- (2) 分析土壤基础养分供应和产量反应；
- (3) 评估 OPT 处理和 FP 处理下的 AE, PFP 和 RE。

2 材料与方 法

2.1 试验点描述和数据来源

本研究田间试验包括春玉米和夏玉米。春玉米主要种植在我国的东北 (NE)、西北 (NW) 和西南 (SW), 而夏玉米主要种植在我国的华北 (NC) 和长江中下游 (MLYR)。由于 MLYR 地区的玉米试验较少, 主要位于安徽省和江苏省且轮作制度为冬小麦-夏玉米轮作, 与华北地区种植制度相同, 因此, 将长江中下游数据合并入华北地区, 统一进行数据分析。本研究中所使用的数据来源于学术期刊已发表的和未发表的研究, 从 2001-2012 年共计 1971 个田间试验。未发表的研究由国际植物营养研究所 (IPNI) 中国项目部和本课题组实施, 在学术期刊已发表的相关文章来源于中国知网。田间试验涵盖了不同的土壤、气候状况、农业措施和不同的试验处理, 处理包括优化处理 (OPT)、农民习惯施肥 (FP)、以及基于 OPT 和 FP 的 N、P 和 K 减素处理^[12, 24]。试验点分布见图 1。

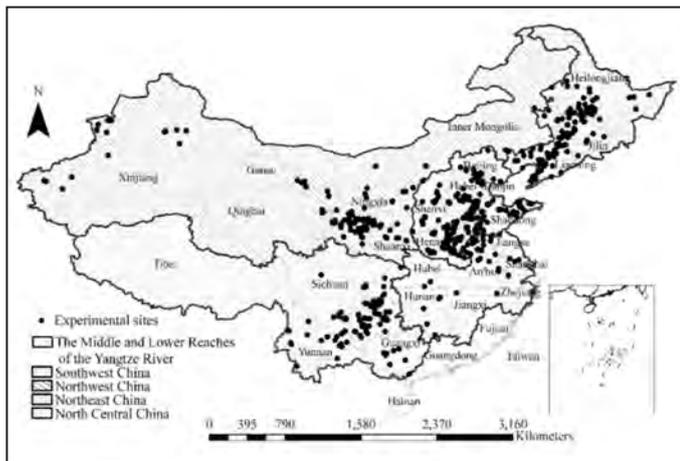


图 1 东北 (NE)、华北 (NC)、西北 (NW)、西南 (SW) 和长江中下游 (MLYR) 玉米数据点地理分布

2.2 数据分析和定量化

本研究中可获得产量定义为在田间或试验站的试验条件下应用当前已知的信息技术和先进的管理措施在最佳养分管理措施下, 可以获得的 最大产量。产量差定义为可获得产量与平均农民措施产量间的差。土壤基础养分供应定义为土壤在不施某种养分而其它养分供应充足条件下土壤中该种养分的供应能力, 这种养分在作物生长期从土壤

中可利用^[25, 26]。本研究中土壤基础氮供应 (INS)、土壤基础磷供应 (IPS) 和土壤基础钾供应 (IKS) 分别是在不施 N、P 和 K 的地块中收获期地上部干物质中 N、P 和 K 的积累量。

产量反应是表征土壤基础肥力的另一个有效指标, 氮、磷和钾产量反应定义为可获得产量与不施某种养分的产量差。产量反应与土壤基础养分供应有关, 土壤基础养分供应决定了不施某种养分的产量^[15, 26], 产量反应可以用于评价土壤养分供应能力^[12]。

养分利用率参数包括 RE, AE 和 PFP, 可以从下面方程式计算:

$$AE_i = (Y - Y_0) / F_i \quad (1)$$

$$RE_i = (U - U_0) / F_i \quad (2)$$

$$PFP_i = Y / F_i \quad (3)$$

i 代表 N、P 或 K; F 是施肥量 (公斤/亩); Y 是 OPT 或 FP 处理下的产量; Y₀ 是不施 N、P 或 K 处理的产量 (公斤/亩); U 是 OPT 或 FP 处理成熟期地上部总养分吸收 (公斤/亩); U₀ 是不施 N、P 或 K 处理成熟期地上部总养分吸收 (公斤/亩)。

采用 SAS V8 软件利用最小显著差数法 (LSD) 对 OPT 与 FP 处理间的 AE、RE、PFP 平均值差异在 0.05 概率水平下进行 ANOVA 分析。Meta 分析使用科克伦协作网 (牛津大学, 英国) 的 Revman 5.0 软件分析了可获得产量与农民产量、可获得产量与对照区产量之间的异质性以及不同区域间的差异。对于每一个数据点, 计算加权平均数的差异 (包括可获得产量 (YA)、农民措施产量 (YF)、及产量反应 (YR))。使用 Q 检验进行异质性检验, 如果异质性结果 P 值小于 0.1, 则认为在统计上具有显著的异质性。对于产量差与产量反应在 0.05 概率水平下对合并的分析效应值进行异质性检验, 如果分析结果的整体效应值 95% 置信区间与 0 不重叠, 说明结合效应值有显著的差异。

3 结果

3.1 不同地区产量和产量差

NE 地区的产量最高, 然后依次为 NW>NC>SW (表 1)。NE 和 NW 地区有较长的生育期, 其生育期比 NC 和 SW 地区长 40-50 天, 较大的昼夜温差也有助于干物质积累。Meta 分析结果显示, YA 显著地高于 YF (P<0.00001), 所有数据点 YA 比 YF 平均高 44.6 公斤/亩, 相当于 YF 的 8.4%, 而不同试验点 YA 和 YF 间的产量差存在一定差异 (P=0.07)。NW 地区的产量差 (120 公斤/亩) 显著

表 1 不同地区玉米可获得产量、农民实际产量及其产量差

区域	可获得产量 (公斤/亩)			农民措施产量 (公斤/亩)			权重 (%)	产量差 (公斤/亩) 95% 置信区间
	平均值	标准差	n	平均值	标准差	n		
东北	720	127	653	680	127	290	32.9	40 (20, 60)
西北	700	193	192	580	200	50	2.8	120 (60, 180)
华北	593	127	992	553	127	544	61.1	40 (27, 53)
西南	560	127	134	493	133	24	3.2	67 (7, 127)
总 (95% 置信区间)	640	147	1971	593	147	908	100	47 (27, 73)
异质性	P=0.07							
整体效应检验	P<0.00001							

地高于其它三个地区,95%置信区间存在较大的变化区间,因为在NW地区试验中优化处理采用了膜下滴灌技术,因此有助于提高YA。然而,随着各种农业技术和机械设备应用到农业生产中,在过去的十年里农民的产量不断提高,并逐渐接近YA,导致了低的产量差(图2)。

3.2 产量反应和土壤基础养分供应

自2000年以来在不施肥的情况下产量呈逐年增加的趋势(图2),高的施肥量导致了养分在土壤中不断积累。

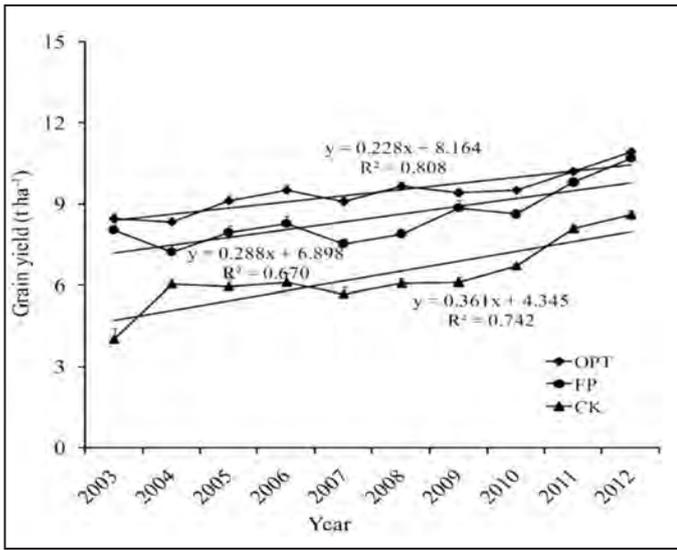


图 2 过去十年我国玉米种植区在优化处理 (OPT)、农民习惯措施 (FP) 和不施肥处理 (CK) 下玉米产量年际变化趋势
注: 产量数据为 2003-2012 年所收集数据, 误差线为标准误。

结果显示,就所有数据点而言,平均N、P和K的YR分别是120、67和80公斤/亩,Meta分析结果显示四个地区的YR存在很大变异性,N、P和K的YR区域间的异质性分别为P<0.00001、P=0.02和P=0.04(表2)。SW地区N、P和K的YR最高分别为167、113和107公斤/亩,而NC地区N和P的YR最低分别为100和60公斤/亩,NW地区K的YR最低,为20公斤/亩。

产量反应与土壤基础养分供应之间存在显著地负相关,N、P和K的相关系数分别为P<0.001、P=0.017和P<0.001。结果显示不同区域间的INS存在很大变异(P=0.0134)(图3)。NE、NC和NW地区的INS分别为9.0、9.3和9.7公斤/亩,并显著地高于SW地区,SW地区仅有5.4公斤/亩。这与SW地区较低的YA(表1)和较高的N肥YR(表2)有关。NC和NW地区的IPS高于SW地区(P=0.0242),NW地区的IKS(15.6公斤/亩)大约是SW地区(4.4公斤/亩)的四倍,是NE(7.7公斤/亩)和NC(8.5公斤/亩)地区的两倍(图3)。NW地区高的IKS与低降雨量和低K淋洗有关,并与伊利石的母质具有较高的土壤K供应能力有关^[9]。区域间的土壤基础养分供应差异与施肥量的变化存在很大的联系。比如在NC地区,农民通常在玉米季仅施氮肥而不施磷钾肥,而在NE地区,农民通常施氮磷肥,而不施钾肥。

表 2 中国不同玉米种植区 N、P 和 K 产量反应

区域	氮 (公斤/亩)		磷 (公斤/亩)		钾 (公斤/亩)	
	产量反应	n	产量反应	n	产量反应	n
华北	100 (87, 113)	639	60 (47, 73)	546	80 (67, 93)	610
东北	127 (113, 147)	348	60 (47, 80)	290	80 (67, 100)	361
西北	160 (120, 200)	127	80 (33, 120)	105	20 (-27, 67)	94
西南	167 (140, 200)	100	113 (80, 147)	98	107 (73, 140)	106
总 (95% 置信区间)	120 (107, 127)	1214	67 (53, 73)	1039	80 (73, 87)	1171
异质性	P<0.0001		p= 0.02		p= 0.04	
整体效应检验	P<0.00001		P<0.00001		p<0.00001	

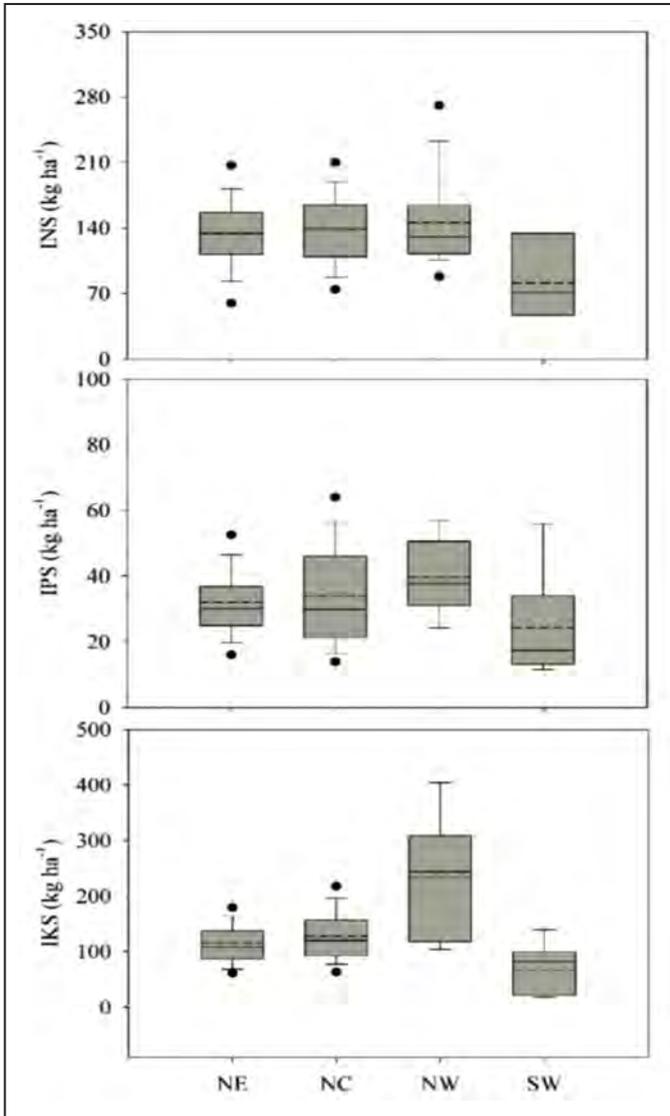


图3 不同地区玉米土壤基础养分供应；INS、IPS 和 IKS 分别代表土壤基础 N、P 和 K 供应。

注：中间实线和虚线分别代表中值和均值，方框上下边缘分别代表上下 25%，上下帽子分别代表 90% 和 10% 的数值，实心圆圈分别代表 95% 和 5% 的数。

3.3 不同管理措施下养分利用率的变化

就所有试验点而言，OPT 处理的平均 N 和 P 的 AE 显著高于 FP 处理，分别高 3.9 和 5.8 公斤/公斤，但 K 的 AE 差异较小 ($P=0.2823$) (图 4A)；OPT 处理 (51.6 公斤/公斤) 的 PFPP 显著高于 FP 处理 (43.3 公斤/公斤, $n=884$) (图 4B)，而 OPT 处理的 PFPP 和 PFPK 低于 FP 处理，分别降低了 23.0 和 62.5 公斤/公斤；OPT 处理的平均 REN、REP 和 REK 显著高于 FP 处理，分别增加了 12.2、5.5 和 6.5 个百分点 (图 4C)。

不同地区 OPT 与 FP 处理间养分利用率存在很大差异。较高氮肥施用量和不合理的管理措施 (比如一次性施肥) 是导致 FP 处理氮素利用率低的主要原因。对于 FP 处理而言，氮肥施用量高于 12 公斤/亩的数据点占到了

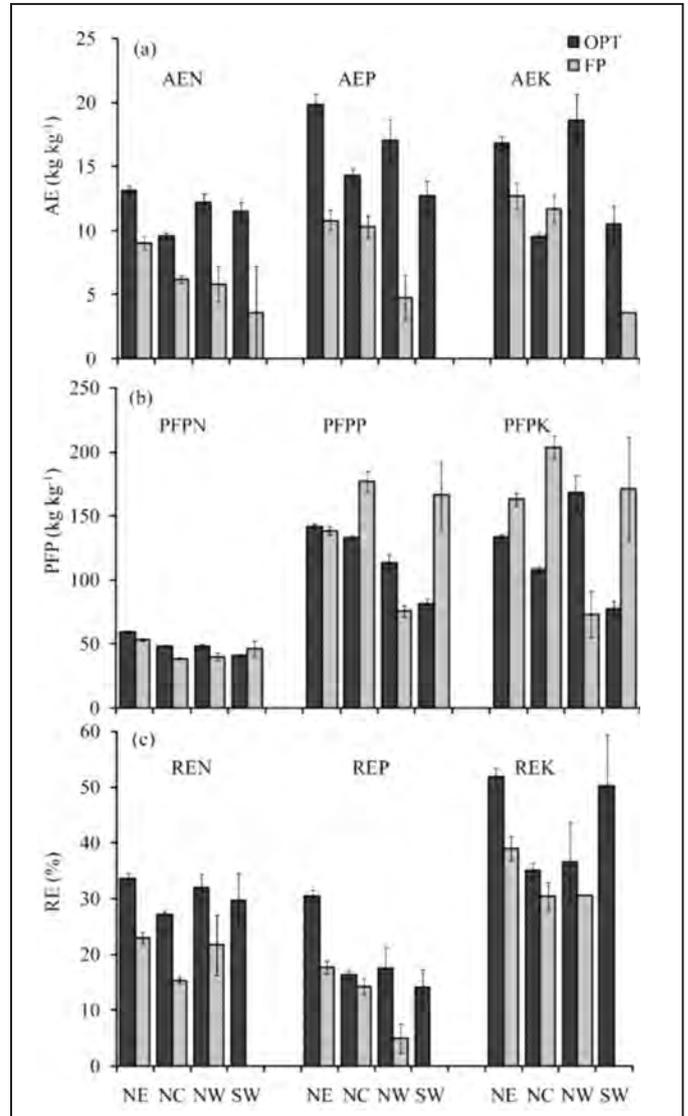


图4 不同地区玉米优化处理 (OPT) 和农民习惯措施 (FP) 下的农学效率 (AE)、偏生产力 (PFP) 和养分回收率 (RE)
注：误差线为标准误。

总数据点的 79.8%。在一些地区较低的磷肥施用量导致了较高的 PFPP，比如在 NC 地区 52.7% 的农民施用磷肥量低于 2.7 公斤/亩。较低的钾肥施用量导致 FP 处理的 AEK 接近 OPT 处理 (图 4A)，且具有较高的 PFPK (图 4B)，FP 处理的钾肥施用量低于 3 公斤/亩的数据点占到了总数据点的 55.1%，但是 OPT 处理与 FP 处理相比较有较高的 REP 和 REK。

4 讨论

量化玉米可获得产量和产量差对地区、国家乃至全球粮食安全、环境保护及研究和制定农业政策是必要的^[5, 27]。本研究中，产量差不断缩小主要是由于农民使用先进

的技术与高量化肥的投入,导致了较高的FP产量和CK产量(图2)。缩小YA与YF间的产量差对保障粮食安全是非常重要的,然而与YA相比,YF仍然较低,因为YA是在田间或试验站的试验条件下应用最佳的管理措施,如新的作物品种、先进的耕作技术、以及优化的草害和病虫害防治等,可以获得的最大产量,而农民并没有完全采用这些管理措施。此外,产量差与灌溉、技术可操作性、市场影响、农业劳动力和市场走向有显著相关性^[28]。

尽管OPT和FP处理下玉米获得了较高产量,但与一些研究相比较仍然存在很大的差距。比如,本研究中的YF与YA分别只能达到Chen等人研究所得潜在产量(1007公斤/亩)的59%和64%^[22]。将作物养分需求规律与来自土壤、环境、施入土壤中的养分保持同步能够显著的提高产量^[6, 22]。气候、土壤以及轮作制度的差异导致了我国不同地区YA的变异性。此外如播种日期、播种量、栽培模式、水分以及作物管理也导致了实际产量的显著差异,进而导致了不同区域间产量差的变异^[27]。如果这些措施能够很好得到实施,YA与YF间的产量差将进一步缩小。

化肥的合理施用有助于缩小产量差,而较高的施肥量会导致较高的土壤基础养分供应^[6, 9, 14]。本研究中INS和IPS明显高于Liu等人研究的我国1985-1995年间的的数据(IN5.1公斤/亩,IP1.1公斤/亩)^[29]。本研究中较高的INS和IPS与前茬作物的长期过量施肥密切相关^[13, 19, 30]。INS与IPS分别占到了地上部干物质中N与P吸收的73.1%和84.4%。

在农业生产中需要维持作物产量、减小化肥向环境中流失以及提高养分利用率间的平衡。养分利用率一直是科研人员以及政府部门重点关注的对象,一些农学指标常常用于评价养分利用率^[18, 31]。在我国农民习惯措施中过量或不平衡施肥(如一次性施肥)是非常常见的,较低的氮素利用率也是很普遍的^[32]。本研究OPT处理中平均

的REN和AEN仍然低于其他人的研究^[18, 29, 33]。为满足粮食需求,到2025年氮肥消费仍需要缓慢的增长,而全球的PFPN需要每年平均增加0.1%-0.4%^[34]。许多研究表明如果农民采用新的氮肥管理技术其REN可以增加30%-50%^[35, 36]。

本研究中,与FP处理相比,OPT处理有较高的磷素和钾素利用率,OPT处理的平均REP(21.2%)和REK(40.8%)接近Dobermann等人建议的利用率^[18]。玉米磷肥与钾肥的管理已有诸多研究^[32, 37],基于土壤测试和作物的方法已经广泛地应用在磷肥与钾肥管理指导中^[12, 14, 38]。然而我国很多地区存在着磷肥与钾肥不平衡施用现象,具有较低的养分利用率。例如,在NE地区磷肥施用量较高,NC地区施用量非常低,而这四个区域FP处理钾肥施用量普遍较低。在我国NE和NW地区,由于冬季温度较低作物秸秆很难腐解,导致K出现了严重的负平衡^[39]。磷肥和钾肥管理的基本要求是保持土壤-作物系统的可持续性。因此,其它的农业管理策略如轮作、耕作、水分管理等等也需要与养分管理措施相结合从而保证较高的产量和养分利用率,促进我国农业的可持续发展。

在我国对于提高玉米产量和养分利用率仍有很大的空间。然而许多因素如小农户经营导致土壤基础养分供应、产量差和养分利用率间存在很大异质性,如何管理这些差异,对于建立优化的管理措施,实现可持续地提高玉米产量、经济效益、养分利用率和保护环境都是必不可少的。与此同时,对农民进行培训以增加农民的农业知识,田间试验示范以及社会资金对于保证优化管理措施的采用和传播是必需的。因此,获得经济活力、环境健康、农民可接受以及政策体系间的平衡是非常重要的,这可能对于我国小规模农户生产体系是一个困难且漫长的过程,但非常具有前景的。

参考文献(略)

参见英文版: Xu X, Liu X, He P, Johnston AM, Zhao S, Qiu S, et al. (2015) Yield Gap, Indigenous Nutrient Supply and Nutrient Use Efficiency for Maize in China. PLoS ONE 10(10): e0140767. doi:10.1371/journal.pone.0140767

预估中国大豆养分需求研究

杨富强¹ 徐新朋¹ 王伟² 马进川¹ 魏丹² 何萍¹

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2. 黑龙江省农业科学院土壤肥料与环境资源研究所, 黑龙江 哈尔滨 150086)

摘要: 本文收集了我国 2001–2015 年与大豆氮(N)、磷(P)和钾(K)养分吸收相关的田间试验数据, 评估了大豆产量与养分吸收的关系, 并利用 QUEFTS (Quantitative Evaluation of the Fertility of Tropical Soils) 模型估算一定目标产量下大豆对 N、P 和 K 的最佳养分需求。随着目标产量的增加(3–6 吨/公顷), QUEFTS 模型预估的大豆 N、P 和 K 养分平衡需求规律均为线性–抛物线–平台曲线。

在我国大豆产量潜力的 60–70% 范围内产量与养分吸收呈线性关系, 每生产 1000 公斤籽粒大豆对 N、P 和 K 养分的最佳需求量分别为 55.4、7.9 和 20.1 公斤(N:P:K=7:1:2.5)。同时, QUEFTS 模型模拟的 1000 公斤大豆籽粒移走的 N、P 和 K 养分量分别为 48.3、5.9 和 12.2 公斤, 相当于地上部吸收 87% 的 N、74% 的 P 和 61% 的 K 累积在籽粒中并被移出土壤。大豆籽粒产量与养分吸收之间的关系可以用于评价和指导田间施肥, 避免了施肥过量或不足。田间试验证明, QUEFTS 模型可以预估我国大豆养分吸收和用于指导田间推荐施肥。

关键词: 大豆; 养分需求; 预估; QUEFTS 模型

大豆 (*Glycine max* L.) 是我国重要的经济作物, 其籽粒含有丰富的植物油脂和蛋白, 可以榨取豆油、制作各种豆制品和提取蛋白质等。由于大豆具有生物固氮功能, 所以它也是高产体系中重要的轮作作物, 特别是在东北。但近年来, 受农业技术的限制, 我国大豆产量低且成本高, 农民种植积极性不高。肥料是限制我国大豆产量的一个重要因素, 然而当前农民并不重视大豆的施肥, 导致土壤养分失衡和肥料利用率低下, 所以迫切需要针对我国大豆研究其需肥规律和施肥技术, 进一步提高大豆产量和肥料利用效率。

目前, 国内外有关作物养分管理和推荐施肥已进行了大量研究, 并形成了一系列推荐施肥方法, 如基于土壤测试的目标产量法、地力分级法和肥料效应函数法等^[1, 2], 还有基于作物反应的养分动态模型、作物生长模型和快速叶绿素测定法等实地养分管理方法^[3, 4]。这些方法在提高作物产量和养分利用率上都发挥了积极作用, 但我国农田以小农户经营为主, 土壤养分变异大、土壤类型和气候等差异对科学指导施肥都是挑战。

Quantitative Evaluation of the Fertility of Tropical Soils (QUEFTS) 模型应用大量田间试验数据分析作物产量水平与养分吸收量之间的关系, 并综合考虑了氮(N)、磷(P)和钾(K)养分之间的交互作用, 避免了单一或少量数据点模拟养分吸收规律指导施肥的偏差。QUEFTS 模型已经在东南亚、中国、印度和非洲多个国家应用到水稻、小麦和玉米上^[5–7], 但目前世界范围内尚没有关于 QUEFTS 模型应用于大豆的报道。因此,

本研究的目的是: (1) 确定我国大豆籽粒产量与养分吸收量的关系; (2) 预估中国大豆对 N、P 和 K 的平衡需求; (3) 评估 QUEFTS 模型对我国大豆的适用性。

1 材料和方法

1.1 数据来源与描述

收集和汇总了 2000–2015 年中国 24 个省(自治区)共计 584 个田间试验, 主要包括肥料试验、长期定位试验和耕作措施试验等。数据主要来自于国际植物营养研究所(IPNI)中国项目部和国家现代农业产业技术体系多年来开展的田间试验及公开发表的文献。数据相关指标包括生物产量, 籽粒和秸秆中 N、P、K 养分吸收量等。最佳养分需求估算使用的数据同时含有产量和养分吸收数据(至少有氮磷钾三者之一)。田间试验点基本涵盖了我国大豆主要种植区域不同的气候、土壤类型、种植模式以及主栽品种等。

1.2 模型改进

养分内在效率 (Internal efficiency, IE, 公斤/公斤) 定义为大豆地上部吸收单位养分所生产的籽粒产量, 以用于评估养分向经济产量的转化能力。QUEFTS 模型假设养分内在效率是固定的, 直到目标产量达到潜在产量的 70–80%。QUEFTS 模型选择养分内在效率上下 2.5%、5.0% 和 7.5% 百分位数作为最大养分累积边界 (Maximum nutrient accumulation, a) 和最大养分稀释边界 (Maximum nutrient dilution, d) 进行最佳养分吸收估

测。但是需要剔除收获指数小于 0.4 公斤 / 公斤的数据，因为这部分数据被认为受到养分以外生物或非生物胁迫^[8]。本研究基于 Microsoft Office Excel 的求解程序用于估算不同潜在产量和目标产量下的养分吸收，主要步骤有：（1）选择合适的数据集以满足模型的边界条件；（2）定义不同数据集的 N、P 和 K 的参数 a 和 d 值；（3）估算不同潜在产量和目标产量的最佳 N、P 和 K 养分需求；（4）评估最佳养分吸收曲线是否适合于田间大豆养分需求。

1.3 田间验证

养分为了评价 QUEFTS 模型对大豆养分需求量预估的田间适应性，于 2014 年和 2015 年在黑龙江、吉林、辽宁和内蒙古四省（自治区）进行了 23 个田间验证试验。肥料用量根据目标产量利用 QUEFTS 模型计算，N 肥用量是用地块产量反应除以农学效率，P 和 K 肥用量是利用 QUEFTS 模型计算得出。

收获时，记录每个小区实收籽粒和秸秆产量。将收获后的籽粒和秸秆取部分样品烘干至恒重，然后粉碎测定 N、P 和 K 的养分含量。秸秆和籽粒中的氮、磷和钾含量采用 H₂SO₄-H₂O₂ 方法消煮，并分别采用凯氏法、钒钼黄比色法和原子吸收法测定^[9]。

将 QUEFTS 模型预估的地上部养分吸收值与实际田间测得的养分吸收值进行对比，分析二者的一致性和差异情况。用到的参数有均方根误差（RMSE）和标准化均方根误差（n-RMSE）。显著性使用 SAS 软件在 0.05 概率水平进行 ANOVA 分析。计算公式如下：

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (s_i - m_i)^2}{n}}, \quad (1)$$

$$\text{Normalized RMSE} = \frac{RMSE}{\bar{m}}, \quad (2)$$

si 和 mi 分别为预估值和实测值，n 是样本量，m̄ 是实测值的平均值^[10]。

2 结果与讨论

2.1 模型参数的确定

养分最大累积（a）和最大稀释（d）参数是 QUEFTS

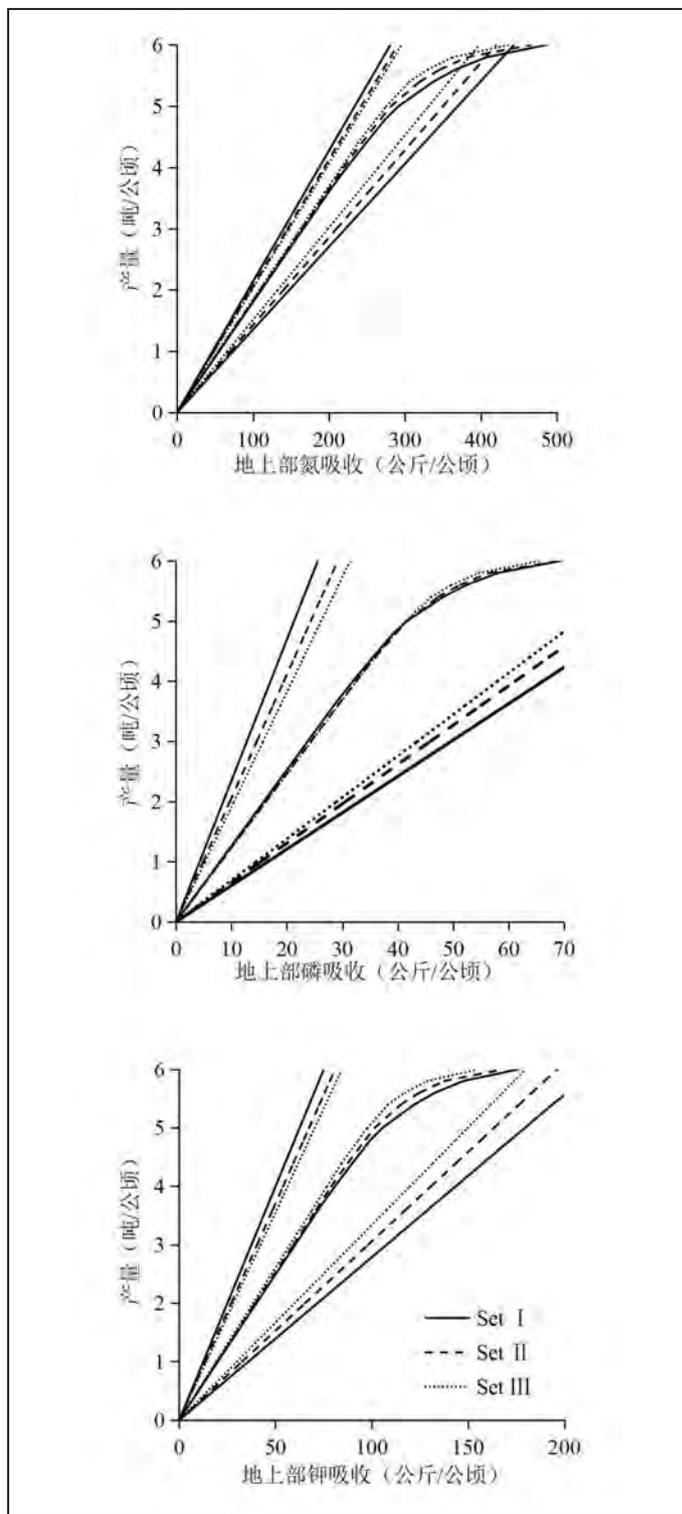


图 1 我国大豆产量与氮磷钾养分吸收的关系
注：YA、YD 和 YU 分别为地上部养分最大累积边界、最大稀释边界和最佳养分吸收曲线。下同。

表 1 我国大豆氮磷钾养分吸收的最大累积和最大稀释边界

养分	参数 I Set I		参数 II Set II		参数 III Set III	
	a (2.5th)	d (97.5th)	a (5th)	d (95th)	a (7.5th)	d (92.5th)
氮	13.5	21.4	14.3	20.6	15.1	20.3
磷	60.4	234.6	65.4	205.7	68.9	191.0
钾	27.8	79.9	30.6	74.1	33.3	71.0

模型估测不同目标产量下作物最佳养分需求量的两个重要指标。数据分析时剔除收获指数小于 0.4 的数据，并去除 IE 值上下 2.5% (Set I)、5% (Set II) 和 7.5% (Set III) 的数据，计算得到我国大豆 N、P 和 K 吸收的 a 和 d 三组参数值 (表 1)。

以三组参数为边界，在潜在产量为 6 吨/公顷条件下，应用 QUEFTS 模型模拟大豆地上部养分吸收并进行分析 (图 1)。结果显示，三组参数只是缩短了最大累积和最大稀释边界间的距离，对养分吸收曲线影响较小，三组参数的养分吸收曲线非常接近，只是在接近潜在产量时有所差异，因此采用参数 I 即 IE 上下 2.5% 作为估测养分吸收的最终参数，即 N、P 和 K 养分吸收的参数 a 和 d 值分别为 13.5 和 21.4、60.4 和 234.6、27.8 和 79.9 公斤/公斤。

2.2 一定目标产量下最佳养分吸收曲线

将去除养分内在效率数值上下限 2.5% 所对应的 a 和 d 值作为参数，应用 QUEFTS 模型对养分吸收进行模拟 (潜在产量 3–6 吨)，得出 QUEFTS 模型模拟的不同潜在产量下大豆氮磷钾养分的最佳需求量呈线性-抛物线-平台曲线关系 (图 2)。

结果得出，不论潜在产量为多少，当目标产量达到潜在产量的 60–70% 时，每生产 1 吨籽粒产量地上部养分需求是一致的，即目标产量所需的养分在达到潜在产量 60–70% 前呈直线增长。

2.3 预估一定目标产量下的最佳养分吸收

QUEFTS 模型拟合的地上部和籽粒中的养分吸收以潜在产量 6 吨/公顷为例，生产 1 吨籽粒产量地上部 N、P 和 K 养分需求量直线部分分别为 55.4、7.9 和 20.1 公斤/吨，N:P:K 的比例为 7:1:2.5 (表 2)。

大豆籽粒中养分含量比较高，所以计算籽粒所带走的养分对精准施肥至关重要，可以避免施肥过量或不足对产量造成影响。QUEFTS 模型拟合得出的籽粒养分吸收与地上部养分吸收趋势一致，呈直线增长直到目标产量达到潜在产量的 60–70%。

对于大豆而言，生产 1 吨籽粒产量籽粒中直线部分所需的 N、P 和 K 养分分别为 48.3、5.9 和 12.2 公斤/吨；当目标产量达到潜在产量的 80% 时，籽粒中所需的 N、P 和 K 养分占整个地上部养分吸收的比例分别为 86.6%、73.7% 和 60.4% (表 2)。

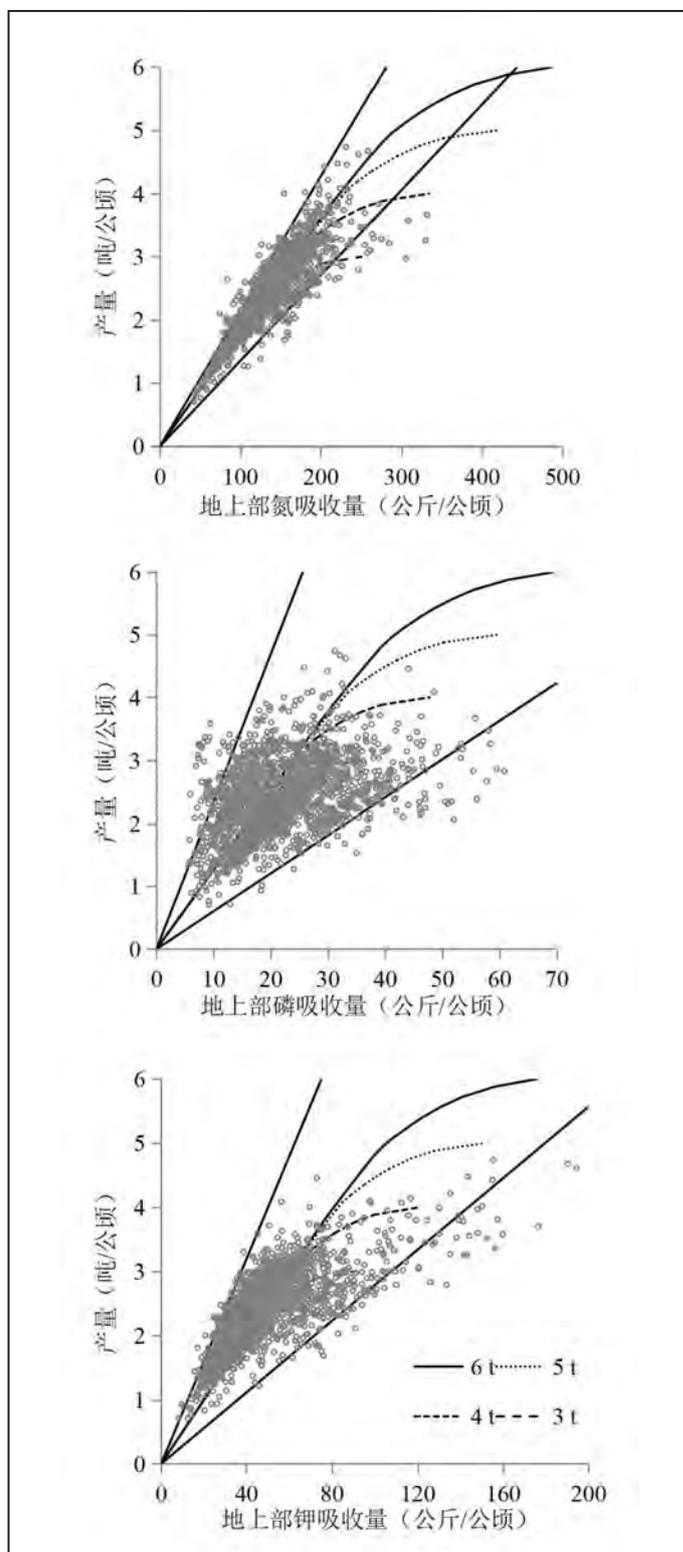


图 2 不同潜在产量下 QUEFTS 模型拟合的大豆地上部最佳养分需求量

2.4 QUEFTS 模型验证

QUEFTS 模型预估养分吸收值和实际测试值分析结果表明，N、P 和 K 三种养分的 RMSE 分别为 24.9、5.8 和 15.1 公斤/公顷，相对应的 n-RMSE 分别为 13.7%、24.3% 和 22.4% (均小于 30%)。显著性分析结果显示，N、

表 2 我国大豆不同产量水平下氮磷钾养分需求

产量 (吨/公顷)	地上部养分需求 (公斤/吨)			籽粒养分需求 (公斤/吨)			籽粒移走比例 (%)		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.8	55.4	7.9	20.1	48.3	5.9	12.2	87.1	74.1	60.8
1.2	55.4	7.9	20.1	48.3	5.9	12.2	87.1	74.1	60.8
1.6	55.4	7.9	20.1	48.3	5.9	12.2	87.1	74.1	60.8
2.0	55.4	7.9	20.1	48.3	5.9	12.2	87.1	74.1	60.8
2.4	55.4	7.9	20.1	48.3	5.9	12.2	87.1	74.1	60.8
2.8	55.4	7.9	20.1	48.3	5.9	12.2	87.1	74.1	60.8
3.2	55.4	7.9	20.1	48.3	5.9	12.2	87.1	74.1	60.8
3.6	55.4	7.9	20.1	48.3	5.9	12.2	87.1	74.1	60.8
3.9	55.7	8.0	20.2	48.3	5.9	12.2	86.7	73.8	60.5
4.2	56.2	8.0	20.4	48.7	5.9	12.3	86.7	73.7	60.5
4.5	56.7	8.1	20.5	49.1	6.0	12.4	86.7	73.7	60.5
4.8	57.3	8.2	20.7	49.6	6.0	12.5	86.6	73.7	60.4
5.0	58.3	8.3	21.1	50.9	6.2	12.9	87.3	74.3	60.9
5.2	60.2	8.6	21.8	52.6	6.4	13.3	87.3	74.3	60.9
5.4	62.5	8.9	22.6	54.6	6.6	13.8	87.3	74.3	60.9
5.6	65.5	9.4	23.7	57.2	6.9	14.5	87.3	74.3	60.9
5.8	70.2	10.0	25.4	61.3	7.4	15.5	87.3	74.2	60.9
6.0	81.0	11.6	29.4	74.6	9.1	18.9	92.1	78.3	64.2

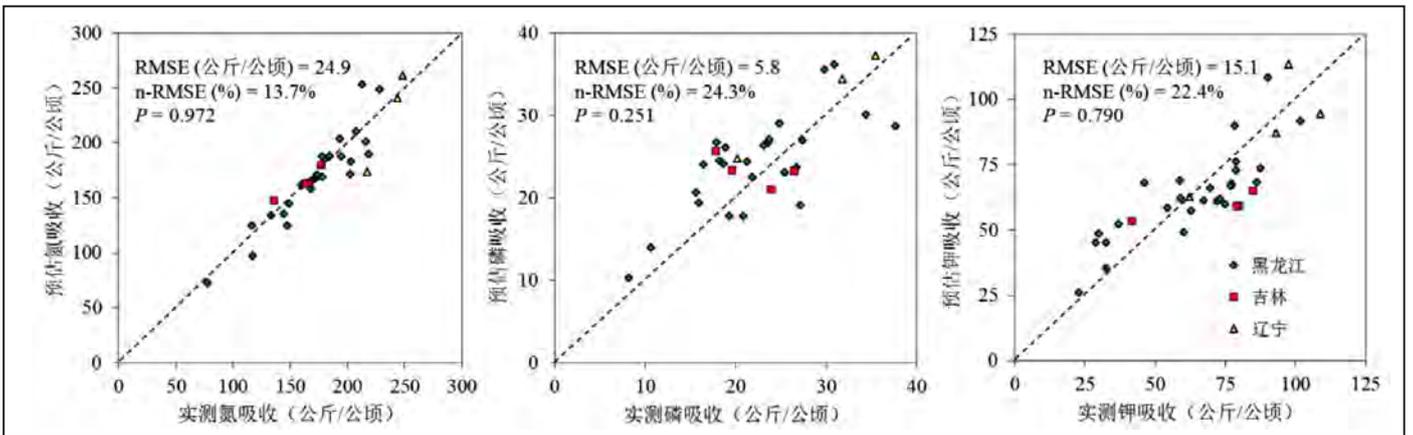


图 3 模型预估 N、P 和 K 吸收值和实测值的比较

P 和 K 三种养分对应的 P 值分别为 0.972、0.251 和 0.790 (均大于 0.05), 说明 QUEFTS 模型预估值和实际测试值没有显著性差异, 误差均在可接受范围内, 模型预估值非常接近实测值 (图 3)。

3 结论

我国大豆每生产 1 吨籽粒产量其地上部 N、P 和 K 的养分吸收分别为 55.4、7.9 和 20.1 公斤/吨, 相应的养

分内在效率分别为 18.0、126.3 和 49.8 公斤/公斤, 直线部分 N:P:K 的比例为 7:1:2.5。生产 1 吨籽粒产量所需的 N、P 和 K 分别为 48.3、5.9 和 12.2 公斤/吨。当目标产量达到潜在产量的 80% 时, 籽粒中所需的 N、P 和 K 占整个地上部养分吸收的比例—季稻的分别为 86.6%、73.7% 和 60.4%。QUEFTS 模型模拟的是最佳养分吸收曲线, 估算的 N、P 和 K 的养分吸收与实测值非常相近, 可以为优化施肥用量和改善养分管理策略提供科学基础。

参考文献

- [1] 朱兆良. 推荐氮肥适宜施用量的方法论刍议. 植物营养与肥料学报, 2006, 12:1-4.
- [2] 魏义长, 白由路, 杨俐苹, 等. 基于 ASI 法的滨海滩涂地水稻土壤有效氮、磷、钾丰缺指标. 中国农业科学, 2008, 41:138-143.
- [3] 刘立军, 桑大志, 刘翠莲, 等. 实时实地氮肥管理对水稻产量和氮素利用率的影响. 中国农业科学, 2003, 36:1456-1461.
- [4] 姜海燕, 朱艳, 汤亮, 等. 基于本体的作物系统模拟框架构建研究. 中国农业科学, 2009, 42:1207-1214.
- [5] Xu XP, Xie JG, Hou YP, et al. Estimating nutrient uptake requirements for rice in China. *Field Crops Res.* 2015, 180:37-45.
- [6] Xu XP, He P, Pampolino MF, et al. Nutrient requirements for maize in China based on QUEFTS analysis. *Field Crops Res.* 2013, 150:115-125.
- [7] Chuan LM, He P, Pampolino MF, et al. Establishing a scientific basis for fertilizer recommendations for wheat in China: yield response and agronomic efficiency. *Field Crops Res.* 2013, 140:1-8.
- [8] Janssen BH, Guiking FCT, van der Eijk D, et al. A system for quantitative evaluation of the fertility of tropical soils (QUEFTS). *Geoderma*, 1990, 46:299-318.
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析 (第3版). 北京: 中国农业出版社, 2007.
- [10] Liu HL, Yang JY, Drury CF, et al. Using the DSSAT±CERES-Maize model to simulate crop yield and nitrogen cycling in fields under long-term continuous maize production. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 2011, 89:313-328.

当前我国农业生产中的养分需求分析

李书田^{1,2} 刘晓永¹ 何萍^{1,2}

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2. 国际植物营养研究所北京办事处, 北京 100081)

摘要: 估算当前我国不同区域农业生产中的养分需求和化肥需求, 对如何实现 2020 年化肥零增长以及零增长下如何进行养分资源的合理分配、科学管理和施用具有重要的指导意义和参考价值。本研究依据国家统计局最新数据、研究结果和文献资料, 以省级为单元系统估算了农作物、林地、草地、水产养殖全面实现平衡施肥条件下对氮磷钾养分的需求量。在考虑有机肥养分有效还田基础上分析当前化肥消费量与化肥需求量的差异。当前我国农业生产需要氮磷钾养分共 8410 万吨, 其中 N 3746 万吨、 P_2O_5 2024 万吨、 K_2O 2640 万吨, 粮食作物、蔬菜/瓜果、果树和茶叶、油料作物、纤维作物、糖料作物、饲草/草地、水产养殖的养分需求分别占总需求的 42%、21%、13%、5.1%、2.3%、2.1%、11% 和 2.3%。华北、长江中下游、西北、西南、东南、东北地区的养分需求分别占 20.3%、23.2%、18.8%、16.8%、11.1% 和 9.8%, 其中山东、河南和四川对养分的需求高于其他省份。当前全国化肥消费量为 6023 万吨, 其中 N、 P_2O_5 、 K_2O 分别为 3001 万吨、1943 万吨和 1079 万吨, 东北、华北、长江中下游、东南、西南、西北地区的化肥消费量分别占全国化肥消费量的 10.6%、27.7%、24.4%、11.5%、11.4%、14.2%。我国当前有机肥养分资源潜力为 3200 万吨 N、1440 万吨 P_2O_5 和 3400 万吨 K_2O , 但还田的有效养分约为 484 万吨 N、411 万吨 P_2O_5 和 1273 万吨 K_2O 。有机肥还田主要在华北地区、四川盆地和湖南省, 其次是广东、广西、云南, 而西北、东北及东南沿海地区有机肥还田的有效养分量相对较少。化肥消费与需求差表明, 全国氮肥和钾肥供应不足, 分别亏缺 261 万吨 N 和 288 万吨 K_2O , 而磷肥投入过量约 330 万吨 P_2O_5 。但不同省份和区域间化肥供需差具有较大差异, 东北、华北、长江中下游或东南地区的一些省份如吉林、河北、河南、山东、安徽、江苏、湖北、广东省氮磷钾肥均过量, 而西北和西南地区多数省份的化肥投入不足。粮食作物是养分需求的主体, 其次是蔬菜和果树。在全面实现平衡施肥的情况下, 氮、钾肥投入不足, 磷肥投入过量。养分需求地区间差异明显, 东北、华北、长江中下游和东南沿海地区需适当减少肥料消费, 而西北和西南地区需要依据需求适量增加肥料的投入。

关键词: 养分需求; 化肥消费量; 化肥需求量; 有机肥养分; 肥料差

建国以来我国人口不断增加, 到 2015 年达 13.75 亿, 因此需要在有限的耕地上生产越来越多的粮、棉、油、水果、蔬菜及其他农产品等以满足不断增长人口的需求。而作物生产离不开植物营养, 化肥是作物的粮食。国内外研究表明, 化肥施用对粮食增产的贡献为 40%–60%。1978 年到 2015 年, 我国粮食总产从 3.1 亿吨增加到 6.57 亿吨, 年均增长率为 2.1%, 近 20 年来水果和蔬菜产量年均增长率分别为 6.4% 和 9.8%, 与此同时氮、磷、钾化肥消费量也从 880 万吨增加到 6023 万吨, 年均增涨率达到 5.3%。由此说明, 化肥在我国粮食产量增加和保证粮食安全中起着不可替代的支撑作用, 可以说没有化肥就没有中国农业的发展, 也就不可能有粮食总产十连增。当前我国已成为世界化肥消费大国, 消费量占世界化肥消费量的 1/3 以上, 施用上存在一系列不合理现象, 如: 部分地区和作物上施肥过量, 化肥利用率低、环境污染风险等。因此, 估算当前我国不同区域农业生产中的养分需求和化肥需求, 对如何实现化肥零增长和零增长下如何进行养分的科学管理具

有重要的意义和参考价值。许多研究者在不同阶段针对农业生产的特点和人口对粮食需求等对我国化肥的需求量进行一系列研究、分析与预测, 对指导我国化肥的生产、分配和施用起到了重要的指导作用, 但这些研究数据需要进一步更新与完善。随着种植业结构的改变、高产品种应用、果树蔬菜种植面积不断增加以及经济林、人工草地和水产养殖面积不断扩大等, 使得农业生产对养分的需求将会进一步增加并发生很大变化。再加上近期中国政府提出全面实现平衡施肥, 并到 2020 年实现化肥零增长目标, 如何实现这一目标并利用现有肥料资源保持我国农业生产稳步增长, 是植物营养学科面临的新任务和挑战。因此, 弄清当前农业生产全面实现平衡施肥前提下对养分和化肥的需求, 对如何实现化肥零增长目标非常必要。本研究依据统计数据、前期试验研究和文献资料在省级尺度上开展以下研究: 1) 当前农业生产包括农作物、林地、草地、水产养殖对氮、磷、钾的需求; 2) 畜禽粪肥和秸秆养分的有效还田量; 3) 化肥需求与消费差异。

1 材料方法

1.1 养分需求

由于土壤、气候、作物种类等多种因素影响,至今尚无可靠、准确的养分需求量估算方法。对农作物养分需求量的估算可根据作物产量和单位产量所需养分吸收量计算,但采用这种方法需要了解土壤肥力参数、作物养分吸收参数和养分利用率等,尤其需要了解作物吸收的养分有多少来源于土壤,多少来源于施肥,至今还没有足够的调查与研究数据可以建立这些参数。因此,采用田间肥效试验法得出的适宜养分推荐量结合种植面积计算养分需求量更实用和可行,可全面了解不同地区、不同作物对养分需

求的差异,指导肥料的生产、分配和施用。本研究利用农作物、林地、草地、水产养殖面积和适宜的养分推荐量对农业生产养分需求进行估算,不同作物适宜养分推荐量是基于多年研究数据和相关文献而得的养分平均推荐量。各种作物的试验研究和文献资料基本能反应作物主产区的土壤肥力、作物品种、灌溉条件、气象条件等,所得出的养分推荐量具有代表性。另外,鉴于目前没有各种作物上的施肥面积的比例数据,本研究在国家倡导全面实现平衡施肥前提下,假设各种作物全面平衡施肥基础上进行的估算,代表最高养分需求量,也为实现平衡施肥全面普及下的养分需求提供依据和参考。

农作物种植面积参照 2015 年国家统计局数据;林地

表 1 各种作物的养分推荐施用量

作物	样本数	平均推荐量(千克/公顷)			数据来源
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
玉米	573	158	52	68	研究数据 ^a
水稻	138	162	62	96	研究数据
小麦	315	165	84	74	研究数据
高粱	8	271	118	136	参考文献
小米	8	166	145	93	参考文献
大麦	6	206	78	44	参考文献
燕麦	7	168	91	61	参考文献
荞麦	5	122	80	81	参考文献
马铃薯	201	172	101	131	研究数据
大豆	138	70	89	96	研究数据
花生	98	103	92	125	研究数据
油菜	34	130	74	92	研究数据
芝麻	5	120	49	101	参考文献
向日葵	120	190	106	104	研究数据
甜菜	9	198	154	153	参考文献
甘蔗	59	416	230	441	研究数据
棉花	134	259	134	104	研究数据
苧麻	12	257	92	250	参考文献
红麻	3	262	139	225	参考文献
亚麻	7	77	56	39	参考文献
烟草	17	80	69	220	参考文献
蔬菜	438	290	175	237	研究数据
西瓜	7	236	142	268	参考文献
甜瓜	5	229	143	200	参考文献
草莓	4	294	182	329	参考文献
柑桔	90	634	253	674	研究数据
苹果	24	575	318	587	研究数据
梨	4	180	275	168	参考文献
葡萄	50	350	223	281	研究数据
香蕉	127	939	284	1194	研究数据
茶叶	15	180	90	180	参考文献
中草药	8	121	124	92	参考文献

^a 国际植物营养研究所(IPNI)多年研究数据。

表 2 经济林、草地和水产养殖的养分推荐施用量 (千克 / 公顷)

项目	样本数	平均推荐量 (千克 / 公顷)			数据来源
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
速生林和苗圃	75	85.3	84.6	43.0	参考文献
竹林	13	205.8	23.1	64.9	
草地	22	150.0	127.0	153.0	
池塘 / 河沟养鱼	5	355.0	182.0	0	
湖泊和水库养鱼	7	76.0	47.0	0	

面积包括竹林、速生树种和育苗面积；草地面积是牧草种植面积，指年末保留种草面积；水产养殖面积指淡水养殖，包括池塘、河沟、湖泊和水库养鱼。农作物推荐施肥量基于国际植物营养研究所 (IPNI) 前期多年试验数据和参考文献而得 (表 1)，林地、草地、水产养殖推荐施肥量依据参考文献的平均施肥量 (表 2)。各地区养分 (N、P₂O₅、K₂O) 需求计算如下：

$$\text{养分需求 (万 t)} = \sum_{i=1}^n \frac{Aci \times Fci}{1000} + \frac{(Fa \times Ff + Ga \times Gf + Aqa \times Aqf)}{1000}$$

式中 i 表示第 i 种作物，Aci 表示第 i 作物种植面积 (万公顷)，Fci 表示第 i 种作物推荐施肥量 (千克 / 公顷)，Fa、Ga、Aqa 分别表示林地、草地和水产养殖面积 (万公顷)，Ff、Gf、Aqf 分别表示林地、草地和水产养殖推荐施肥量 (千克 / 公顷)。

1.2 化肥消费量

化肥消费量按照 2015 年统计的各省化肥消费量计算，氮、磷、钾化肥消费量包括单质化肥和复合肥，其中复合肥部分的氮、磷、钾比例不清楚，需进行估算。本研究中复合肥的氮、磷、钾比例按照《2015 全国农产品成本收益资料汇编》中各地区各种作物上磷酸一铵、磷酸二铵、复合 (混) 肥的施用量计算而得 (表 3)。

1.3 有机肥还田的有效养分量

通过畜禽粪肥、人粪尿和秸秆还田的养分量参照我们最近研究数据。通过人粪尿还田的数量按照每人每年带入农田 1.0 千克 N、0.57 千克 P₂O₅、0.57 千克 K₂O，分别相当于资源量的 18.5%、28.1% 和 15.9%。畜禽粪肥和秸秆还田的养分以有机态养分为主，需经矿化释放出无机态养分才能被作物吸收利用。因此，通过畜禽粪便和秸秆还田的养分对当季作物并不都是有效的，只有当季释放出的养分才能供作物吸收利用。因此：畜禽粪肥和秸秆还田的有效养分量 = 养分还田量当季养分释放率 (%)。其中，当季养分释放率是参考有关文献资料计算而得的平均释放率 (表 4)。

1.4 肥料差

肥料差指化肥消费量与化肥需求量之差，计算如下：

肥料差 = 化肥消费量 - 化肥需求量

其中：化肥消费量为 2015 年国家统计局的化肥消费

表 3 2015 年各省化肥消费量中复合肥的氮、磷、钾比例

省份 ^a	氮磷钾比例		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
北京	1.00	1.23	0.86
天津	1.00	2.26	0.20
河北	1.00	1.61	0.65
山西	1.00	2.37	0.40
内蒙古	1.00	2.31	0.22
辽宁	1.00	1.91	0.56
吉林	1.00	1.49	0.75
黑龙江	1.00	2.07	0.45
上海	1.00	1.01	0.99
江苏	1.00	1.76	0.72
浙江	1.00	2.36	0.55
安徽	1.00	1.55	0.82
福建	1.00	2.20	0.60
江西	1.00	2.15	0.62
山东	1.00	1.63	0.74
河南	1.00	1.24	0.90
湖北	1.00	1.98	0.67
湖南	1.00	2.10	0.63
广东	1.00	1.46	0.85
广西	1.00	1.66	0.78
海南	1.00	1.33	0.89
重庆	1.00	1.11	0.96
四川	1.00	1.68	0.77
贵州	1.00	1.99	0.67
云南	1.00	2.09	0.62
西藏	1.00	1.71	0.70
陕西	1.00	1.79	0.52
甘肃	1.00	2.17	0.31
青海	1.00	2.23	0.23
宁夏	1.00	2.00	0.36
新疆	1.00	2.49	0.05
全国	1.00	1.71	0.70

^a 不包括香港、澳门和台湾数据 (下同)。

表4 畜禽粪肥和作物秸秆养分的当季释放率

有机肥种类	样本数	释放时间 (d)	平均释放率 (%)		
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O
牛、马、驴、骡粪	6	84-161	33.3	58.0	69.1
猪粪	5	105-161	25.2	47.6	65.8
羊粪	2	97-119	48.3	22.0	73.5
禽粪	6	97-161	28.6	37.4	82.2
作物秸秆	26	42-360	59.2	75.3	82.7

数据

化肥需求量 = 养分需求量 - 有机肥还田的有效养分量
肥料差为正值, 说明化肥投入过量, 为负值, 说明化肥投入不足。

2 结果与分析

2.1 养分需求

通过作物的播种面积和养分推荐施用量计算出作物对 N、P₂O₅、K₂O 的需求分别为 3746 万吨、2024 万吨和 2640 万吨, 共约 8410 万吨。其中, 粮食作物包括谷类、豆类和薯类的养分需求约占总需求的 42%, 蔬菜 / 瓜果占 21%, 果树和茶叶占 13%, 油料、纤维和糖料分别占 5.1%、2.3% 和 2.1%, 草地约占 11%, 水产养殖占 2.3% (表 5)。

本研究按照中国粮食主产区划分区域进行分析和讨论 (下同)。不同地区作物不同, 因此养分需求也存在差异 (图 1)。农作物主要种植区如华北地区和长江中下游地区则需要的养分较多, 两个地区养分需求分别占全国总需求的 20.3% 和 23.2%。其次是西北地区和西南地区, 分别占 18.8% 和 16.8%, 东北地区和东南地区分别占 9.8% 和 11.1%。山东、河南和四川省对养分的需求高于其他省份。

2.2 当前化肥的消费及分布状况

化肥是农田养分投入的主要来源, 2015 年全国化肥消费量达 6023 万吨, 其中 N、P₂O₅、K₂O 分别为 3001 万吨、1943 万吨和 1079 万吨。东北、华北、长江中下游、东南、西南、西北地区的化肥消费量分别占全国化肥消费量的 10.6%、27.7%、24.4%、11.5%、11.4%、14.2% (图 1)。山东、河南是化肥主要消费省份。华北地区化肥消费占全国的比例高于该区域养分需求占全国的比例, 而西南和西北地区化肥消费占全国的比例则低于该区养分需求所占的比例。然而养分投入过量与否不仅取决于化肥投入的多少, 还受其他养分来源尤其有机肥养分投入的影响。

2.3 有机肥养分还田量

我们近期研究表明, 中国有机肥资源包括粪肥和农作物秸秆养分资源潜力为 3200 万吨 N、1440 万吨 P₂O₅ 和 3400 万吨 K₂O。这些有机肥养分可替代或补充部分化肥以满足作物对养分的需求, 有助于实现 2020 年化肥零增长目标。当前畜禽粪肥的氮、磷、钾养分还田比例约为 32%、57% 和 52%, 秸秆的氮、磷、钾养分还田比例约为 34%、49% 和 50%。然而, 这些还田的有机肥养分当季不能全部释放为有效养分供作物吸收利用。由此, 按有机肥

表5 农作物、草地、林木和水产养殖的养分需求量 (万吨)

种类	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	总量
粮食作物 ^a	1765	791	957	3513 (41.8 ^b)
油料作物	173	113	142	428 (5.1)
纤维作物	99	52	41	192 (2.3)
糖料作物	69	39	73	181 (2.1)
蔬菜 / 瓜类	715	432	606	1753 (20.8)
水果 / 茶叶	430	223	446	1100 (13.1)
烟草 / 中草药	35	34	48	117 (1.4)
饲草 / 草地	317	255	317	889 (10.6)
经济林	21	20	10	51 (0.6)
水产养殖	121	65	0	186 (2.2)
总量	3746	2024	2640	8410 (100)

^a 粮食作物包括谷物、豆类和薯类; ^b 占总需求的比例 (%)。

表 6 有机肥资源还田的有效养分量 (万吨)

有机肥种类	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	总量
畜禽粪肥	169.4 (35.0a)	223.0 (54.2)	597.2 (46.9)	989.6 (45.6)
人粪尿	130.8 (27.0)	74.9 (18.2)	39.4 (3.1)	245.1 (11.3)
作物秸秆	184.3 (38.0)	113.5 (27.6)	636.1 (50.0)	933.9 (43.1)
总量	484.5 (100)	411.4 (100)	1272.7(100)	2168.6 (100)

^a 占还田总量的比例 (%)。

回田量和当季养分释放率估算出通过畜禽粪肥、秸秆和人粪尿投入的氮、磷、钾有效养分量约 2168 万吨，包括 484 万吨 N、411 万吨 P₂O₅ 和 1273 万吨 K₂O，其中磷主要来源于畜禽粪肥，而钾主要来源于畜禽粪肥和作物秸秆 (表 6)。有机肥有效养分还田主要在华北地区、四川盆地和湖南省，其次是广东、广西、云南，而西北、东北及东南沿海地区通过有机肥还田的有效养分相对较少 (图 1)。

2.4 化肥消费量与化肥需求量差异分析

通过计算，氮磷钾养分总需求量减去有机肥还田的氮磷钾有效养分量即为所需要的氮磷钾化肥养分量，即为 6243 万吨，包括 3262 万吨 N，1613 吨 P₂O₅ 和 1368 万吨 K₂O。化肥需求量与 2015 年化肥消费量比较便得出当前化肥消费量与化肥需求量的差值 (表 7，图 1)。从全国范围来看氮肥和钾肥投入不足，分别亏缺 261 万吨 N 和

表 7 2015 年化肥消费量与化肥需求量差 (万吨)

	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	总养分
养分总需求量 ^a	3746	2024	2641	8411
有机肥还田的有效养分量	484	411	1273	2168
化肥需求量	3262	1613	1368	6243
2015 年化肥消费量	3001	1943	1079	6023
化肥消费量与化肥需求量的差值	-261	330	-289	-220

^a 假设大田作物、经济林、草地和水产养殖的施肥面积为 100%，全部采用平衡施肥。

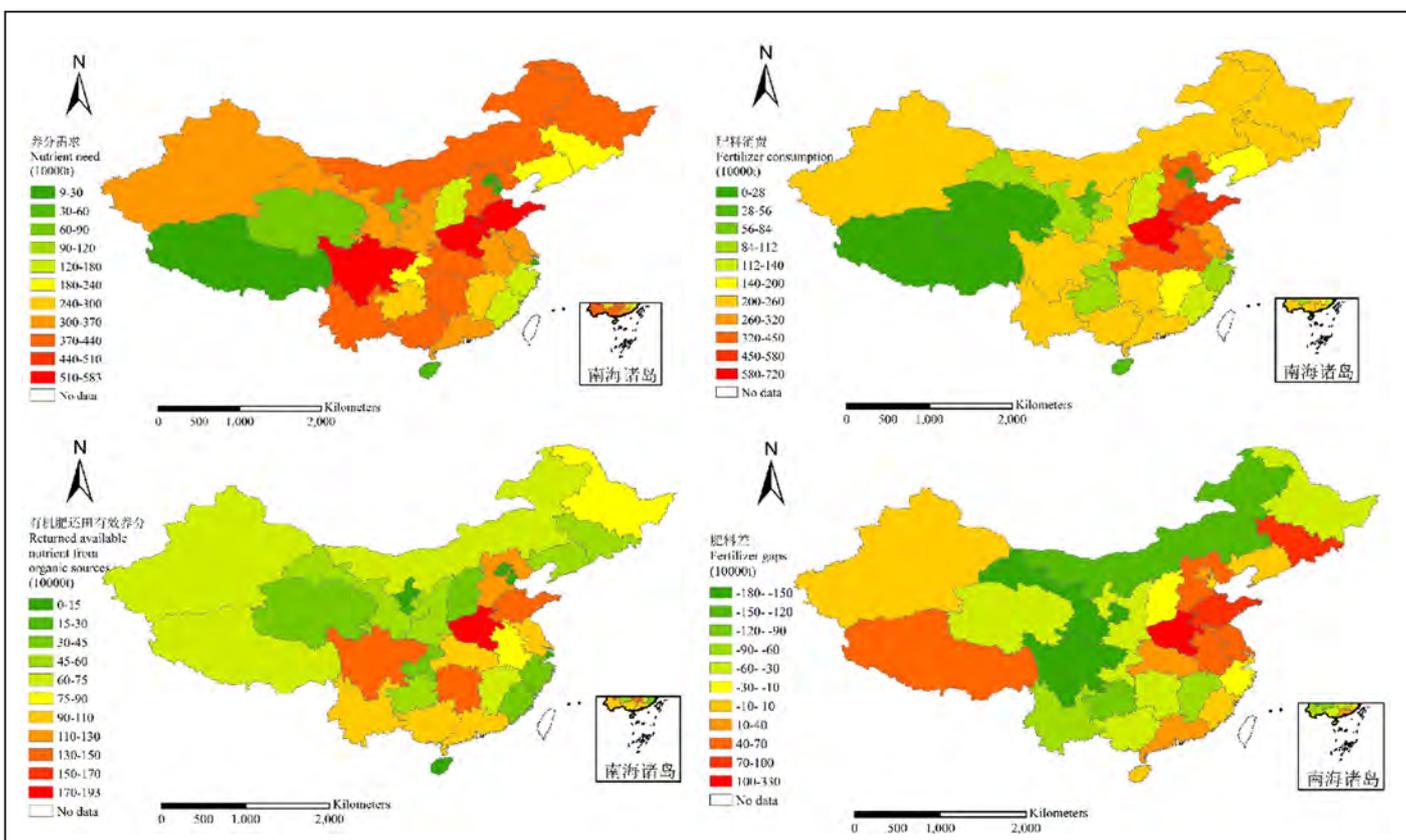


图 1 不同省份农业生产养分需求量、肥料消费量、有机肥回田有效养分量和肥料消费与肥料需求差

289 万吨 K_2O ，而磷肥的投入过量约 330 万吨 P_2O_5 。这些数据是假设作物、经济林、人工草地和水产养殖全面实现平衡施肥的情况下估算而得。

不同省份化肥供需差具有很大差异，东北地区、华北地区、长江中下游地区或东南地区的一些省份如吉林、河北、河南、山东、安徽、江苏、湖北、广东省的氮、磷、钾肥消费全部过量，需要降低投入量，而西北和西南地区的多数省份的肥料消费不足，需要增加化肥的投入量（图 1）。

参考文献（略）

详情参见：《植物营养与肥料学报》2017, 23(6): 1416–1432。
doi: 10.11674/zwyf.17393

3 结论

粮食作物是养分需求的主体，其次是蔬菜和果树。在农作物、林地、草地、水产养殖全面实现平衡施肥情况下，目前氮、钾肥投入不足，磷肥投入过量。不同省份和区域养分需求、化肥消费量、有机肥还田的有效养分以及化肥消费与化肥需求差都存在着明显差异。东北、华北、长江中下游和东南沿海地区一些省份需适当减少肥料投入，而西北和西南地区多数省份可依据养分需求适量增加肥料投入。因此，要根据养分和肥料需求的地区差异，合理分配肥料资源，提高肥料利用效率。

中国小麦的生产及平衡施肥效果和技术

陈防 汪霄

(国际植物营养研究所中国项目部, 中国武汉, 430074)

1 世界和中国的小麦生产简况

小麦(Wheat), 禾本科小麦属 *Triticum* L., 一年生或越年生草本植物。小麦是新石器时代的人类对其野生祖先进行驯化的产物, 栽培历史已有一万年以上, 一般认为起源于里海的西南部。小麦适应性强, 分布广, 用途多, 是世界上最重要的粮食作物, 其总面积、总产量及总贸易额均居粮食作物的第一位, 有 1/3 以上的世界人口以小麦为主要食粮。在中国, 小麦的地位仅次于水稻。

小麦属中有 20 多个种, 栽培最广泛的是普通小麦, 约占小麦总面积的 90%, 其次是硬粒小麦, 约占小麦总面积的 10%, 其他栽培种仅有零星种植。全世界自 67°N 至 45°S 的地域, 从低于海平面 150 米的盆地到海拔 4100 米的西藏高原都有小麦种植。主产区在北半球的 30–60°N 之间的温带地区, 南半球的 25–40°S 之间的温带也有一定面积。欧亚大陆和北美洲的小麦面积约占世界总面积的 90%, 冬小麦面积约占 3/4, 春小麦多分布在高纬度地区, 约占 1/4。二十世纪 50 年代以来, 世界小麦生产发展很快。1986 年达到 23042 万公顷, 总产量 51944 万吨, 占谷物总产量的 1/4 以上。中国各地都有小麦种植, 其中冬小麦面积约占小麦总面积的 85%, 主要分布在长城以南的黄河、淮河和长江流域; 春小麦约占 15%, 主要分布在长城以北。2010 年我国小麦播种面积已达 2425.65 万公顷, 总产量 1151.81 万吨, 平均单产 4748 公斤/公顷^[1, 2]。

2 小麦的生长习性

冬小麦为越年生作物, 一般冬前生长营养器官, 越冬后形成生殖器官。冬小麦全生育期较长, 但不同地区和品种的全生育期相差较大。冬、春小麦都会经历出苗、分蘖、拔节、抽穗、开花、灌浆到成熟等一系列明显的生育时期。中国南方冬麦区全生育期短的只有 120 天, 北方冬麦区全生育期长的达 270 天, 西南部高海拔地区可长达 330 天。春小麦一般全生育期为 80–120 天。冬小麦适宜的播种温度为 15–18℃, 在适宜范围内应争取早播, 播种深度 3–5

厘米, 每亩基本苗 20 万左右。春小麦经常是顶凌播种, 播种深度 2–3 厘米, 基本苗一般高于冬小麦。冬小麦一生中总耗水量 400–600 毫米, 春小麦略低。小麦是浅根系作物, 80% 的根系分布在 0–30 厘米深度的土层内, 因此适宜种植在耕层较深厚、排水良好、富含有机质的壤土、黏壤土上。要注意整地与播种质量, 保证全苗、培育壮苗。

3 我国冬小麦栽培与养分管理中的主要问题

我国冬小麦种植中的养分管理问题主要有:

3.1 氮肥和磷肥的施用比例偏高, 而钾肥、微量元素肥料(如锌肥)、有机肥用量偏少。

3.2 植模式多年不变, 易受连作障碍影响。

3.3 小麦新型肥料及其配套施用技术应用较少。目前小麦种植中虽然已普遍推广施用专用复混肥、配方肥, 但是一些新型商品肥料如缓控释肥、水溶性肥和生物肥等应用面积还很小。

4 小麦的需肥规律与施肥原则和技术

一般每生产 100 公斤小麦需从土壤中吸收 N 3–3.5 公斤, P₂O₅ 1–1.5 公斤, K₂O 2–4 公斤, 吸收量的比例大约是 3 : 1.25 : 3。另外, 每生产 100 公斤小麦约需吸收 Zn 9 克。小麦对养分的吸收量从苗期、分蘖期至拔节期逐渐增多, 于孕穗期达到高峰。小麦对氮肥的吸收高峰在分蘖期和拔节到孕穗期, 对磷钾肥的吸收高峰在孕穗至开花期。冬小麦营养生长阶段(出苗、分蘖、越冬、返青、起身、拔节)的主要是保证基本苗、促蘖、增穗; 在生殖生长阶段(孕穗、抽穗、开花、灌浆、成熟)主要是增加粒数和粒重。因此, 在施肥上应施足基肥、及时追肥。根据不同条件基肥用量一般占总施肥量的 70–80%, 追肥占 20–30%。一般可以把 60–70% 的氮肥和全部的磷肥、钾肥、有机肥作为基肥, 其余氮肥作为追肥。对于土壤肥力较高的高产麦田可以将 50% 的氮肥作基肥, 同时将春季施肥的时间后移至拔节期。中微量元素肥料可以作为基肥,

也可用来拌种。例如用锌、锰肥拌种时每公斤种子可用硫酸锌 2-6 克，硫酸锰 0.5-1 克，拌种后随即播种。小麦后期营养不足时可采用根外喷肥的办法补救，一般抽穗期可以用 1-2% 的尿素或硫酸铵溶液 50 公斤 / 亩，对叶色浓绿有贪青晚熟趋势的麦田可用 0.2% 的磷酸二氢钾溶液 50 公斤 / 亩喷施 1-2 次。微量元素肥料（如锌、锰、硼肥）可在苗期和抽穗期后进行喷施 1-2 次，用量为 0.1% 浓度 50 公斤 / 亩^[3, 4]。

小麦的施肥量要根据产量目标、肥料种类、土壤肥力、前茬作物、品种特性和气候条件等因素综合考虑（见表 1、表 2、表 3）。长江流域冬小麦区产量在 250-350 公斤 / 亩的情况下，一般各种肥料推荐用量为 N 10-15 公斤 / 亩，P₂O₅ 4-8 公斤 / 亩，K₂O 6-12 公斤 / 亩，硫酸锌 1 公斤 / 亩，钼酸铵 20 克 / 亩，水田小麦可施用硼砂 200-250 克 / 亩。在经常施磷肥的区域，磷肥比例和用量可适当降低；在南方缺钾地区和土壤上，钾肥的比例和用量可适当提高。当施用缓控释氮肥时，氮肥用量可适当减少 10-20%。

5 小麦平衡施肥效果与 4R 养分管理

2001-2010 年，国际植物营养研究所（IPNI）中国项目部在我国长江流域开展了 68 个冬小麦平衡施肥田间试验，较全面地研究了平衡施肥对冬小麦的影响和效果，建立了小麦试验数据库，并通过田间示范田、技术培训和新闻媒体等不同形式进行了大面积的技术示范和推广。这些前期的研究结果为目前进一步实施 IPNI 的 4R 养分管理策略和应用开发小麦养分管理专家系统（Nutrient Expert[®]）打下了良好基础。

长江流域安徽、江苏、湖北等省小麦不同养分肥效试验的统计结果表明，该地区冬小麦的平均推荐施肥量为 N-P₂O₅-K₂O = 12-7-10 公斤 / 亩，从平衡施肥处理与不同养分缺素处理的产量结果比较来看，小麦施氮平均增产 32.5%，氮肥农学效率为 9.4 公斤 / 公斤；小麦施磷平均增产 11.1%，磷肥农学效率为 8.7 公斤 / 公斤；小麦施钾平均增产 11.9%，钾肥农学效率为 6.7 公斤 / 公斤。该结

表 1 麦田土壤供氮能力与小麦推荐施氮量

土壤氮素肥力等级	土壤速效氮含量 (N 毫克 / 公斤)	小麦相对产量 (%)	推荐施氮量 (N 公斤 / 亩)
极低	< 50	< 50	> 16
低	50-80	50-65	14-16
较低	80-100	65-80	12-14
中	100-120	80-95	10-12
高	> 120	> 95	10

表 2 麦田土壤供磷能力与小麦推荐施磷量

土壤磷素肥力等级	土壤有效磷含量 (P 毫克 / 公斤)	小麦相对产量 (%)	推荐施磷量 (P ₂ O ₅ 公斤 / 亩)
极低	< 2	< 60	> 9
低	2-5	60-75	7-9
较低	5-10	75-85	5-7
中	10-15	85-95	3-5
高	> 15	> 95	3

表 3 麦田土壤供钾能力与小麦推荐施钾量

土壤钾素肥力等级	土壤速效钾含量 (K 毫克 / 公斤)	小麦相对产量 (%)	推荐施钾量 (K ₂ O 公斤 / 亩)
极低	< 40	< 40	> 10
低	40-60	40-60	8-10
较低	60-80	60-80	6-8
中	80-120	80-95	4-6
高	> 120	> 95	4

果说明长江流域冬小麦氮肥施用效果最好,农学效率最高,磷钾肥的效果相差不大。

目前国际植物营养研究所中国项目正在全国范围内研究开发小麦养分管理专家系统(Nutrient Expert[®]),该系统是在遵循4R养分管理策略的前提下,以经过实际验证的数学模型和计算机程序为手段,以大量的自然环境背

景资料和当地作物种植的关键数据为基础,充分考虑和利用土壤本身的肥力条件和养分资源、作物类型、轮作制度及肥料的种类,在作物需要时给予施肥推荐的一种作物养分管理专家系统,具有与作物反应的相关性好、操作简便、及时,价格低廉、可利用网络进行推荐施肥等优点,已在世界的许多国家和我国许多地区进行推广。

参考文献

- [1] 何康,刘瑞龙主编.中国农业百科全书(农作物卷).中国农业出版社,1991,北京.
- [2] 中国农业年鉴编辑委员会.中国农业年鉴.中国农业出版社,2011,北京.
- [3] 鲁剑巍主编.测土配方与作物配方施肥技术.金盾出版社.2010,北京.
- [4] 中国农业科学院土壤肥料研究所主编.中国肥料.上海科学技术出版社,1994年,上海.

中国畜禽粪尿养分资源及其还田的时空分布特征

刘晓永¹ 李书田^{1,2}

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京, 100081 2. 国际植物营养研究所 (IPNI) 北京办事处, 北京, 100081)

摘要: 为准确掌握中国不同地区畜禽粪尿量、畜禽粪尿氮磷钾量及其还田利用随时间变化特征, 本研究基于统计数据和文献资料, 估算各地区畜禽粪尿量、养分量及各种畜禽粪尿所占比例, 分析不同时期畜禽粪尿养分还田量的地区间差异。结果表明: 1980s, 1990s, 2000s 和 2010s 全国畜禽粪尿(鲜质)资源量分别为 276 177.41×10⁴, 391 083.29×10⁴, 445 885.84×10⁴, 423 422.87×10⁴ 吨, 30 多年增长了 53.32%, 其养分资源分别为 2 523.86×10⁴ 吨 (N 1 249.47×10⁴ 吨, P 230.64×10⁴ 吨, K 1 043.75×10⁴ 吨), 3 686.59×10⁴ 吨 (N 1 820.79×10⁴ 吨, P 327.13×10⁴ 吨, K 1 538.67×10⁴ 吨), 4 296.77×10⁴ 吨 (N 2 124.13×10⁴ 吨, P 401.29×10⁴ 吨, K 1 771.35×10⁴ 吨) 和 4 089.40×10⁴ 吨 (N 2 017.66×10⁴ 吨, P 421.17×10⁴ 吨, K 1 650.57×10⁴ 吨), 30 多年增加了 62.03%, 其中东北地区增幅最为明显。河南、四川、山东、湖南、云南和内蒙古的畜禽粪尿及其养分量约占全国的 40%。全国不同畜禽粪尿及其养分量占总量的比例依次为: 牛 > 猪 > 羊 > 家禽 > 马 > 驴 > 骡, 但各地区有一定差异。西北、西南和东北地区牛粪尿及其养分占比较大, 长江中下游地区猪粪尿及其养分占比最高, 西北地区羊粪尿及其养分占比最大, 东南地区禽粪及其养分占比最高, 马、驴、骡粪尿及其养分在各地区占比都相对较小。1980s, 1990s, 2000s 和 2010s 全国畜禽粪尿氮磷钾总养分还田量分别为 1 132.73×10⁴, 821.36×10⁴, 1 860.52×10⁴ 和 1 709.19×10⁴ 吨, 还田率分别为 44.88%, 22.28%, 43.30% 和 41.80%, 河北、河南、山东、湖南、内蒙古、四川、云南和广西省畜禽粪尿养分还田量约占全国还田量的 50%。2010s 全国畜禽粪尿 N, P 和 K 还田量分别为 615.91×10⁴, 297.70×10⁴ 和 795.58×10⁴ 吨, 还田率分别为 30.53%, 70.68% 和 48.20%。该研究为中国和各地区畜禽粪尿养分资源的合理利用和化肥零增长下畜禽粪尿养分管理提供科学依据和数据参考。

关键词: 畜禽粪尿; 养分资源; 养分还田; 时空分布

引言

改革开放以来中国畜禽养殖业迅猛发展, 从传统粗放式向规模化、集约化和产业化转变, 畜禽养殖产生的粪尿及其养分也在不断增加。不同时期各研究者估算的中国畜禽粪尿及其养分资源量结果差异较大, 且难以进行时空演变特征的比较和分析, 其中存在的较大问题是估算方法不统一, 参数不统一, 鲜有对各地区不同时期畜禽粪尿及其养分资源进行估算。因此, 有必要及时、合理地弄清不同时期中国各地区畜禽粪尿及其养分资源量的分布特征和变化规律, 旨在为统筹中国各地区畜禽粪尿资源化利用的规划布局, 为畜禽粪尿养分资源利用提供数据支撑。由此, 本研究以省级为单元, 基于国家统计数据和参考资料, 研究分析了畜禽粪尿及其养分资源的时空变化和分布特征及畜禽粪尿养分资源还田的时空变化和分布, 为实现“减施化肥”和“2020 年化肥零增长目标”提供科学依据和参考。

1 材料与方法

1.1 估算方法

本研究参照中国粮食主产区划分如下区域, 1) 东北地区: 包括黑龙江、吉林和辽宁; 2) 华北地区: 北京、天津、河北、河南、山东、山西; 3) 长江中下游地区: 上海、江苏、浙江、安徽、湖北、湖南、江西; 4) 西北地区: 内蒙古、陕西、宁夏、甘肃、青海、新疆; 5) 西南地区: 重庆、四川、贵州、云南、西藏; 6) 东南地区: 福建、广东、广西、海南。本研究未包括香港、澳门、台湾的数据。

畜禽粪尿产生量的估算多采用排泄系数法。各类畜禽粪尿的年产生量由畜禽饲养量(年末存栏数、年内出栏数)、饲养周期、排泄系数计算而得。在前人研究的基础上, 考虑畜禽年内出栏数和年末存栏数的差异, 以及各畜禽饲养周期的大小差异, 分别确定饲养周期≥1 年和≤1 年畜禽年排泄量的估算方法, 同时为避免粪和尿的种类差异,

将畜禽粪、尿量分开估算。计算如下：

1) 畜禽粪尿(鲜质)：

$$QM_i = S_i \times P_i \times M_i / 1000 + H_i \times 365 \times M_i / 1000 \quad (1)$$

$$QM_j = H_j \times 365 \times M_j / 1000 \quad (2)$$

$$QU_i = S_i \times P_i \times U_i / 1000 + H_i \times 365 \times U_i / 1000 \quad (3)$$

$$QU_j = H_j \times 365 \times U_j / 1000 \quad (4)$$

式中，QM和QU分别为畜禽粪量和尿量(10⁴吨)，i为猪、牛、羊、家禽的种类，j为马、驴、骡的种类，S、H分别为畜禽年内出栏数、年末存栏数(10⁴个(头))，P为饲养周期天数(天)，365为一年365天，M和U分别为畜禽粪和尿日排泄系数(千克/(天·个(头)))，1000为换算系数。

2) 畜禽粪尿养分：

$$TN_i(j) = QM_i(j) \times MN_i(j) + QU_i(j) \times UN_i(j) \quad (5)$$

$$TP_i(j) = QM_i(j) \times MP_i(j) + QU_i(j) \times UP_i(j) \quad (6)$$

$$TK_i(j) = QM_i(j) \times MK_i(j) + QU_i(j) \times UK_i(j) \quad (7)$$

式中，TN、TP和TK分别为畜禽粪尿氮(N)、磷(P)和钾(K)养分总量(10⁴吨)，i为猪、牛、羊、家禽的种类，j为马、驴、骡的种类，QM、QU分别为畜禽粪量、尿量(10⁴吨)，MN、MP和MK分别为畜禽粪氮(N)、磷(P)和钾(K)养分含量(%)，UN、UP和UK分别为畜禽尿氮N、P、K养分含量(%)。

3) 畜禽粪尿养分还田：

直接还田：

$$DN_i(j) = TN_i(j) \times (1 - LN_i(j)) \times R_{di}(j) \quad (8)$$

$$DP_i(j) = TP_i(j) \times (1 - LP_i(j)) \times R_{di}(j) \quad (9)$$

$$DK_i(j) = TK_i(j) \times (1 - LK_i(j)) \times R_{di}(j) \quad (10)$$

燃烧还田：

$$BP_i(j) = QM_i(j) \times MP_i(j) \times (1 - LP_{pi}(j)) \times R_{bi}(j) \times Pr \quad (11)$$

$$BK_i(j) = QM_i(j) \times MK_i(j) \times (1 - LK_{pi}(j)) \times R_{bi}(j) \times Kr \quad (12)$$

式中，DN、DP和DK分别为畜禽粪尿氮(N)、磷(P)和钾(K)养分直接还田量(10⁴吨)，BP和BK分别为畜禽粪便磷(P)和钾(K)养分燃烧后还田量(10⁴吨)，R_d为畜禽粪尿直接还田率(%)，R_b为畜禽粪燃烧还田率(%)，LN、LP、LK分别为氮(N)、磷(P)、钾(K)养分损失率(%)，Pr、Kr分别为畜禽粪便燃烧后P、K养分归还率(%)。

1.2 数据及参数

1.2.1 数据

畜禽(猪、牛、羊、家禽、马、驴、骡)年末存栏数、

年内出栏数数据取自《中国统计年鉴》(1981-2016)和《中国农业统计年鉴》(1981-2016)。为避免畜禽种类和畜禽养殖量年际间变化的影响，本研究分别以1980-1989、1990-1999、2000-2009和2010-2015的均值表示1980s、1990s、2000s、2010s的数据。1980s和1990s重庆的数据包含在四川省内。

1.2.2 参数

1) 畜(禽)粪尿日排泄系数

畜(禽)粪、尿排泄系数是指单个畜(禽)每日排出粪、尿的数量，是畜(禽)粪、尿年排放量估算的关键。本研究收集、整理和分析大量的文献资料、书籍或研究报告等，加权均值计算各种畜(禽)的粪、尿日排泄系数(表1)。

畜禽	粪/尿	取值范围	加权均值
牛	粪	10.00-60.00	24.87(58)
	尿	3.00-26.71	11.70(51)
马	粪	9.00-16.16	11.46(9)
	尿	2.55-5.40	4.55(9)
驴	粪	4.80-13.70	7.77(6)
	尿	2.88-5.10	3.75(5)
骡	粪	4.80-13.70	7.77(6)
	尿	2.88-5.10	3.75(5)
羊	粪	1.15-2.62	2.09(30)
	尿	0.41-1.50	0.64(14)
猪	粪	0.64-12.00	2.71(41)
	尿	1.42-6.90	3.86(38)
家禽	粪	0.01-0.66	0.12(87)

注：括号内数值为加权均值数据样本数，下同。

2) 畜(禽)粪、尿的氮磷钾含量

本研究估算的畜(禽)粪、尿量时以鲜质量计，因此在估算畜(禽)粪、尿氮磷钾养分含量也是以鲜基计。本研究通过收集、整理和分析大量相关文献资料、书籍或研究报告等，加权均值计算各种畜(禽)的粪、尿的氮N、P、K养分含量(表2)。

3) 畜(禽)饲养周期

畜(禽)饲养周期指畜(禽)被饲养的天(天)数，生产周期大于一年(1a)的，按365天计算，生产周期小于1a的，按实际饲养天数计算。本研究通过汇总《全国农产品成本收益资料汇编》(1980-2015)中的畜禽(猪、牛、羊、家禽、马、驴和骡)饲养周期，分别以1980-1989、1990-1999、2000-2009和2010-2015畜禽饲养周期的均值表示1980s、1990s、2000s和2010s数据。

4) 畜禽粪尿还田率

畜禽	粪/尿	养分	取值范围	加权均值
牛	粪	N	0.30-0.84	0.38(1187)
		P	0.02-0.41	0.10(1177)
		K	0.10-3.00	0.24(1173)
	尿	N	0.50-1.20	0.51(574)
		P	0.01-0.10	0.02(240)
		K	0.50-1.50	0.92(558)
马	粪	N	0.40-1.05	0.44(343)
		P5	0.08-0.32	0.14(340)
		K	0.24-2.07	0.40(334)
	尿 Urine	N	0.69-1.30	0.72(94)
		P	0.01-0.06	0.06(50)
		K	0.68-1.50	0.72(91)
驴	粪	N	0.49	0.49(83)
		P	0.19	0.19(83)
		K	0.54	0.54(83)
	尿	N	0.7	0.71(1)
		P	0.01	0.01(4)
		K	0.23-0.28	0.25(4)
骡	粪	N	0.31	0.32(37)
		P	0.16	0.16(37)
		K	0.23	0.23(37)
	尿	N	0.60	0.60(1)
		P	0.01	0.01(2)
		K	0.28	0.28(3)
羊	粪	N	0.60-2.35	1.01(380)
		P	0.15-0.50	0.22(381)
		K	0.20-2.13	0.54(364)
	尿	N	0.59-1.68	0.70(76)
		P	0.01-0.10	0.03(48)
		K	0.70-2.10	0.77(73)
猪	粪	N	0.24-2.96	0.55(933)
		P	0.09-1.76	0.26(929)
		K	0.17-2.08	0.30(896)
	尿	N	0.17-0.50	0.18(431)
		P	0.02-0.15	0.02(318)
		K	0.16-1.00	0.16(432)
家禽	粪	N	0.42-3.00	0.81(1174)
		P	0.22-1.54	0.37(1267)
		K	0.25-2.90	0.62(1258)

畜禽	N	P	K
牛	60	15	19
马	38	18	28
驴	38	18	28
骡	38	18	28
羊	15	18	28
猪	75	15	36
家禽	40	15	15

本研究通过收集、整理和分析现有的文献资料、书籍或研究报告等,分地区加权均值计算不同年代不同地区畜(禽)粪尿还田率。1980s 全国畜禽粪尿资源大多数作为有机肥还田利用,还田率为 60-75%,而在牧区,如内蒙古、青海、宁夏和西藏大部分粪便被用来做燃料燃烧后还田,还田率分别为 66.7%, 50.0%, 50.0% 和 73.0%。1990s 全国畜禽粪尿资源还田率为 31.5-59.4%,而藏区牧民依然有燃烧畜禽粪便的习惯,其燃烧率为 73.0%, 2000s 和 2010s 的全国各地区畜(禽)粪尿还田率和损失率分别见表 3 和表 4。

5) 畜禽粪尿养分损失率

畜禽粪尿在施到农田之前通常要经历“排泄-清扫-储存-处理(堆积、高温堆肥或厌氧发酵)-运输和转移”过程,在处置、利用过程中氮磷钾养分损失较大,不可避免地造成畜禽粪尿养分的损失,其氮、磷、钾损失率见表 8。而用作燃料燃烧的粪便,燃烧后其氮、磷和钾养分归还率为 0、82.5% 和 82.5%。

2 结果与分析

2.1 畜禽粪尿资源量

通过计算,1980s, 1990s, 2000s 和 2010s 全国畜禽粪尿(鲜质)资源量分别为 276 177.41 × 10⁴ 吨(粪 167 234.36 × 10⁴ 吨,尿 108 943.05 × 10⁴ 吨), 391 083.29 × 10⁴ 吨(粪 243 753.30 × 10⁴ 吨,尿 147 329.99 × 10⁴ 吨),

	牛、马、驴、骡		猪		羊		家禽	
	2000s	2010s	2000s	2010s	2000s	2010s	2000s	2010s
东北	58.7-72.9(8)	50.2-68.0(9)	58.7-72.9(10)	50.2-80.0(8)	58.7-72.9(9)	50.2-69.9(10)	58.7-72.9(10)	62.8-74.6(13)
华北	47.0-79.0(9)	51.6-80.8(15)	47.0-79.0(8)	53.3-70.7(17)	47.0-85.5(10)	58.7-70.0(13)	52.8-79.0(8)	55.6-70.0(15)
长江中下游	64.5-90.7(20)	50.0-76.7(14)	67.5-81.1(16)	50.0-72.1(13)	49.7-90.7(19)	50.0-75.6(14)	47.9-86.1(23)	50.0-64.9(16)
西北	46.2-100.0(3)	68.4-80.7(4)	59.3-100.0(2)	68.4-80.7(4)	46.2-100.0(3)	68.4-80.7(4)	59.3-100.0(2)	68.4-80.7(4)
西南	55.2-67.2(9)	49.0-67.5(7)	55.2-78.8(10)	49.0-72.5(11)	40.0-67.2(9)	41.5-75.1(7)	52.8-67.0(13)	49.0-75.1(10)
东南	60.0-69.9(1)	53.3-60.0(2)	60.0-69.9(1)	70.4(5)	60.0-69.9(1)	53.3-60.0(2)	60.0-69.9(1)	53.3-60.0(2)

注:西藏大牲畜(牛、马、驴和骡)粪便为燃烧还田。

表 5 2010s 各地区各种畜禽粪尿资源量占本地区粪尿资源总量的比例

畜禽	东北	华北	长江中下游	西北	西南	东南	全国
猪	38.35	37.53	58.95	13.82	39.31	52.65	39.09
牛	42.00	39.42	25.78	52.64	44.26	30.52	41.12
羊	10.01	11.98	4.67	27.68	9.19	1.59	10.27
家禽	7.84	10.24	10.53	1.53	4.27	14.71	7.81
马	0.89	0.21	0.04	1.78	1.99	0.48	0.87
驴	0.67	0.44	0.02	2.00	0.62	0.00	0.60
骡	0.24	0.18	0.01	0.55	0.36	0.05	0.24

445 885.84 × 10⁴ 吨 (粪 279 929.65 × 10⁴ 吨, 尿 165 956.15 × 10⁴ 吨) 和 423 422.87 × 10⁴ 吨 (粪 263 439.16 × 10⁴ 吨, 尿 159983.71 × 10⁴ 吨)。30 多年来全国畜禽粪尿资源总量增长了 53.32%, 粪量增长了 57.53%, 尿量增长了 46.85%。东北三省和宁夏增幅最大, 在 1.5 倍以上, 其次是河南、天津、山东和河北, 增幅在 1 倍左右, 而青海、江苏、浙江和上海呈略有下降趋势。

畜禽粪尿资源主要分布在河南、四川、山东、湖南、云南和内蒙古, 这些地区的畜禽粪尿资源量占全国总量的 39.03%–41.22%, 这与畜禽养殖业分布相一致, 也可归结于中国畜禽养殖业正逐步向经济欠发达的且自然资源丰裕的地区转移, 生产区域集中度进一步强化。

1980s 以来, 牛、猪、羊、家禽一直是中国畜禽粪尿的主要来源。以 2010s 为例, 全国各类畜禽粪尿量占其总量的比例大小依次为: 牛 > 猪 > 羊 > 家禽 > 马 > 驴 > 骡, 分别占全国粪尿资源总量 41.12%、39.09%、10.27%、7.81%、0.87%、0.60%、0.24%(表 5), 其他年代也有类似的趋势。各区域不同种类畜禽粪尿资源占本区域畜禽粪尿资源总量的比例也存在一定差异, 其中牛粪尿资源占比较大的是西北、西南和东北地区, 其次是华北地区, 东南和长江中下游地区相对较低。猪粪尿占比最大的是长江中下游地区, 其次是东南地区, 西南、东北和华北地区猪粪尿资源占比相对较低, 西北地区最低。羊粪尿资源占比最大的是西北地区, 其次是华北、东北和西南地区, 长江中下游相对较低, 最低的是东南地区。禽粪资源占比最大的

是东南地区, 其次是长江中下游和华北地区, 东北和西南地区相对较低, 最低的是西北地区。马、驴或骡粪尿养分在各区域占比都相对较小, 低于 2%, 有的地区几乎没有。因此, 中国各种畜禽粪尿资源结构所占比例差异较大, 源于畜禽养殖数量及结构存在较大差异。

2.2 畜禽粪尿养分资源量

30 多年来全国畜禽粪尿中的氮磷钾养分总量呈增加趋势。1980s, 1990s, 2000s 和 2010s 全国畜禽粪尿中的氮磷钾养分总量分别为 2 523.86 × 10⁴ 吨 (N 1 249.47 × 10⁴ 吨, P 230.64 × 10⁴ 吨, K 1 043.75 × 10⁴ 吨), 3 686.59 × 10⁴ 吨 (N 1 820.79 × 10⁴ 吨, P 327.13 × 10⁴ 吨, K 1 538.67 × 10⁴ 吨), 4 296.77 × 10⁴ 吨 (N 2 124.13 × 10⁴ 吨, P 401.29 × 10⁴ 吨, K 1 771.35 × 10⁴ 吨) 和 4 089.40 × 10⁴ 吨 (N 2 017.66 × 10⁴ 吨, P 421.17 × 10⁴ 吨, K 1 650.57 × 10⁴ 吨)(图 1), 30 多年间增加了 62.03%。畜禽粪尿的氮磷钾总量分别占各时期化肥消费量的 142.42%、107.15%、90.97% 和 70.03%。从区域角度来看, 东北地区增加幅度最大, 增长 185.76%, 其次是华北部分地区增长 108.24%, 而长江中下游、西北、西南和东南地区增幅较低, 增幅仅为 35.74%–46.70%。畜禽粪尿养分资源量的分布与畜禽粪尿资源量时空分布相似, 主要分布在河南、四川、山东、内蒙古以及云南, 这些地区的畜禽粪尿氮磷钾养分总量约占全国总量的 40%。

与畜禽粪尿资源结构一致, 畜禽粪尿养分量占总量的

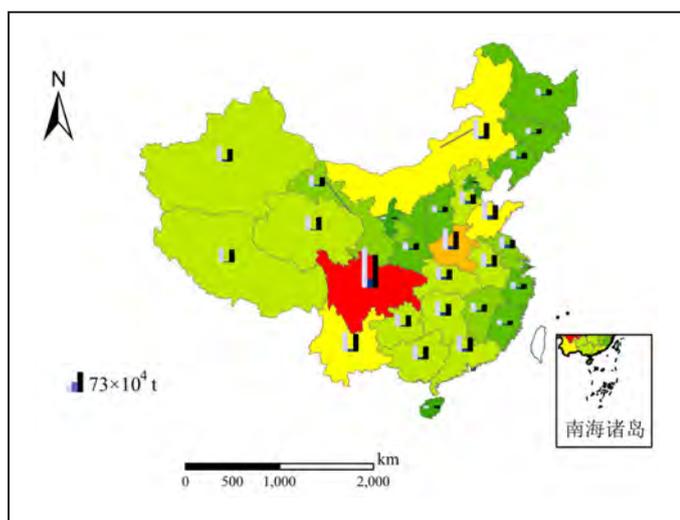
表 6 2010s 各地区畜禽粪尿养分资源量占本地区粪尿资源养分总量的比例

畜禽	东北	华北	长江中下游	西北	西南	东南	全国
猪	26.67	25.19	44.24	8.38	28.50	38.29	27.19
牛	40.10	36.33	26.55	43.82	48.64	30.48	39.27
羊	17.13	19.79	8.63	41.28	12.42	2.85	17.58
家禽	14.16	17.85	20.50	2.40	7.86	27.78	14.11
马	1.00	0.23	0.05	1.76	2.00	0.56	0.98
驴	0.76	0.48	0.03	1.99	0.29	0.00	0.69
骡	0.18	0.13	0.00	0.37	0.29	0.04	0.18

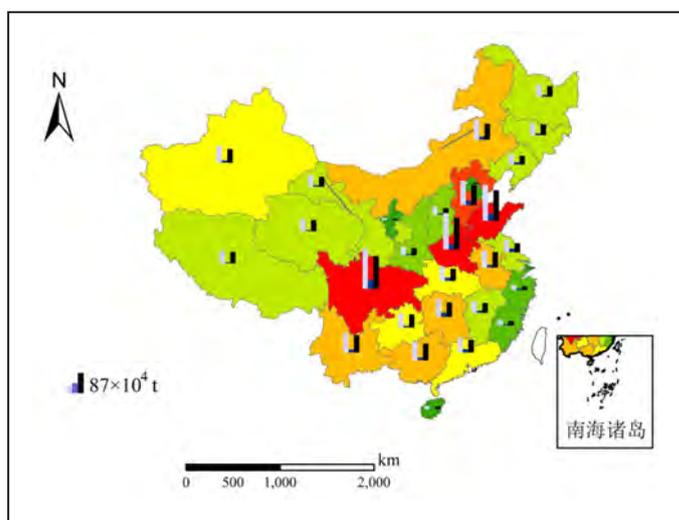
比例依次为：牛 > 猪 > 羊 > 家禽 > 马 > 驴 > 骡，分别占全国总量的 39.27%、27.19%、17.58%、14.11%、0.98%、0.68% 和 0.18%（表 6）。牛粪尿养分占比较大的是西南地区，其次是西北和东北地区，华北和东南地区相对较低，长江中下游地区最低。猪粪尿养分占比最大的是长江中下游地区，其次是东南地区，西南、东北和华北地区相对较低，西北地区最低。羊粪尿养分占比最大的是西北地区，其次是华北和东北地区，西南和长江中下游次之，东南地区最低。禽粪养分占比最大的是东南地区，其次是华北、东北和长江中下游地区，西南地区相对较低，西北地区最低。马、驴或骡粪尿养分在各区域占比都相对较小，低于 2%，有的地区甚至没有。

2.3 畜禽粪尿养分还田量

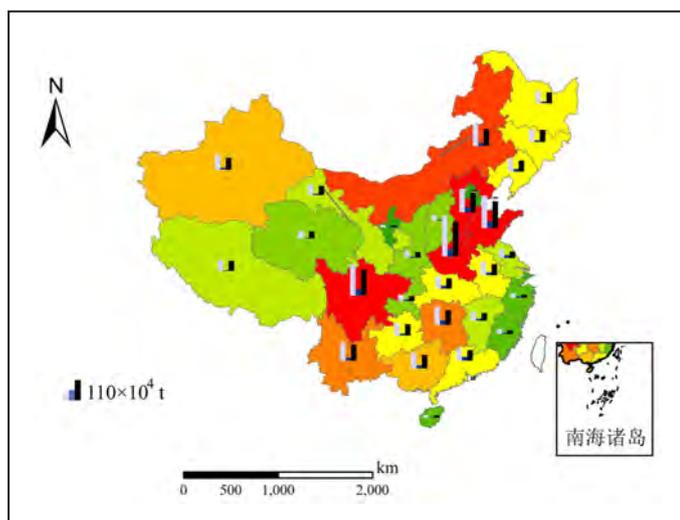
1980s 全国畜禽粪尿养分还田量为 $1\ 132.73 \times 10^4$ 吨，还田率为 44.88%，其中 N、P 和 K 还田量分别为 365.13×10^4 、 194.19×10^4 和 573.40×10^4 吨，还田率分别为 29.22%、84.20% 和 54.94%，还田的氮磷钾总量占同时期化肥消费量的 63.92%；1990s 全国畜禽粪尿养分还田量为 821.36×10^4 吨，还田率为 22.28%，其中 N、P 和 K 还田量分别为 280.91×10^4 、 135.20×10^4 和 405.24×10^4 吨，还田率分别为 15.42%、41.33% 和 26.34%，还田的氮磷钾总量占当时期化肥消费量的 23.87%；2000s 全国畜禽粪尿养分还田量为 $1\ 860.52 \times 10^4$ 吨，还田率为 43.30%，其中 N、P 和 K 还田量分别为 662.46×10^4 、 309.48×10^4



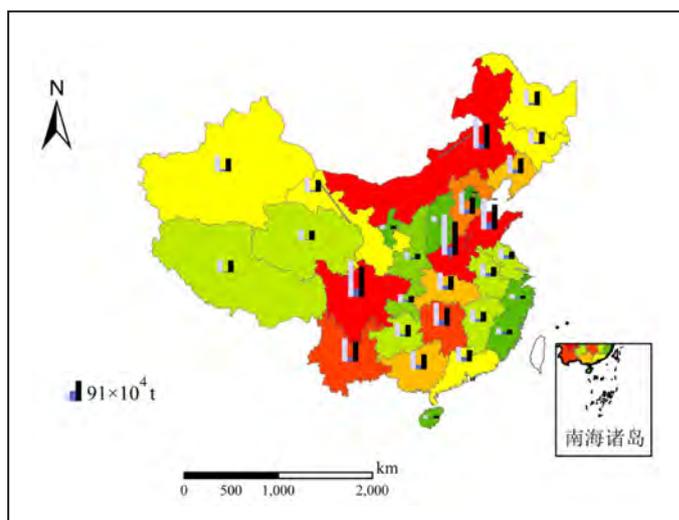
a.1980s



b.1990s



c.2000s



d.2010s



图 1 畜禽粪尿养分资源量时空分布

和 888.58×10^4 吨，还田率分别为 31.19%、77.12% 和 50.16%，还田的氮磷钾总量占当时期化肥消费量的 39.39%；2010s 全国畜禽粪尿养分还田量为 $1\ 709.19 \times 10^4$ 吨，还田率为 41.80%，其中 N、P 和 K 还田量分别为 615.91×10^4 、 297.70×10^4 和 795.58×10^4 吨，还田率分别为 30.53%、70.68% 和 48.20%，还田的氮磷钾总量占当时期化肥消费量的 29.27% (图 2)。

从 1980s 到 2010s，中国畜禽粪尿氮磷钾养分还田总量增加了 50.89%，其中，东北地区增幅最大为 148.74%，其次是西北和华北地区，增幅分别为 88.27%

和 80.29%。从省域角度来看，中国各地区畜禽粪尿养分还田量增减幅度大不相同。其中，宁夏增幅最大，为 439.82%，其次是内蒙古、东北三省和山东增幅均在 1 倍以上，河南、河北、天津、甘肃和青海增幅均在 70% 以上，而上海、浙江和山西呈明显下降趋势，这主要是由于各地经济发展水平不均、各地区畜禽养殖数量及养殖结构的变化，以及各地区化肥消费水平的不同所致。从地区分布来看，中国畜禽粪尿养分还田量主要分布在河北、河南、山东、湖南、内蒙古、新疆、四川、云南和广西，约占全国还田养分总量的 50.88%–55.58%。

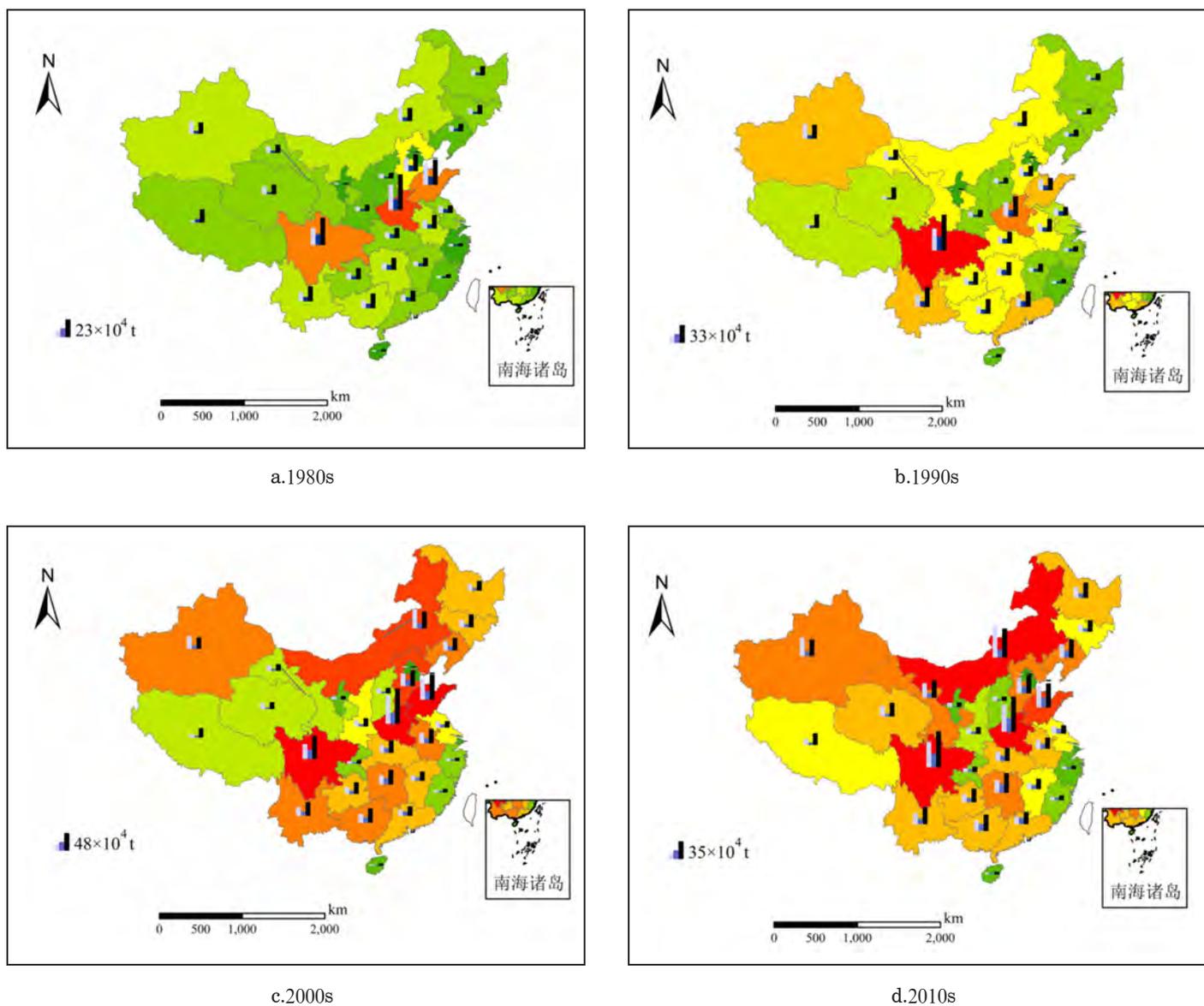


图 2 畜禽粪尿养分还田资源量时空分布

3 结论

1) 1980s 到 2010s 全国畜禽粪尿及其氮磷钾养分资源量持续增加, 30 多年来分别增长了 53.32% 和 62.03%, 其中, 东北地区增幅最为明显, 分别增长了 169.41% 和 185.76%, 其次是河南、天津、山东、河北。约 40% 的畜禽粪尿及其养分资源分布在河南、四川、山东、湖南、云南和内蒙古。

2) 全国不同畜禽粪尿及其养分量占总量的比例依次为: 牛 > 猪 > 羊 > 家禽 > 马 > 驴 > 骡, 但各地区有一定差异。西北、西南和东北地区牛粪尿及其养分占比较大,

长江中下游地区猪粪尿及其养分占比最高, 西北地区羊粪尿及其养分占比最大, 东南地区禽粪及其养分占比最高, 马、驴、骡粪尿及其养分在各地区占比都相对较小。

1980s, 1990s, 2000s 和 2010s 畜禽粪尿氮磷钾总养分还田量分别为 $1\ 132.73 \times 10^4$, 821.36×10^4 , $1\ 860.52 \times 10^4$ 和 $1\ 709.19 \times 10^4$ 吨, 还田率分别为 44.88%, 22.28%, 43.30% 和 41.80%。河北、河南、山东、湖南、内蒙古、四川、云南和广西的畜禽粪尿养分还田量约占全国的 50%。2010s 全国畜禽粪尿 N、P 和 K 还田量分别为 615.91×10^4 、 297.70×10^4 和 795.58×10^4 吨, 还田率分别为 30.53%、70.68% 和 48.20%。

参考文献 (略)

详情参见: 农业工程学报, 2018, 34(4):1-14.

中国秸秆养分资源及有效还田的时空分布

刘晓永¹ 李书田^{1,2}

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2. 国际植物营养研究所 (IPNI) 北京办事处, 北京 100081)

摘要: 我国农作物秸秆资源丰富, 但不同地区秸秆及其养分资源数量、还田利用状况以及随时间的变化特征不十分清楚。本研究基于官方统计数据和文献资料, 分析了我国不同年代各省秸秆资源和氮磷钾养分资源量及其还田利用状况, 为秸秆养分资源的合理利用和化肥零增长下作物养分管理提供科学依据和参考。结果表明: 从 1980s 到 2010s 我国秸秆及其养分资源总量分别增长了 85.5% 和 104%, 西北地区以及西藏、黑龙江增幅明显。华北、长江中下游、四川盆地以及黑龙江地区的秸秆及其养分资源占全国的 2/3 以上。到 2010s 秸秆资源和氮磷钾养分资源分别达到 9.0×10^8 吨和 2485.6×10^4 吨。各种作物秸秆及其养分资源所占比例各地区差异较大, 2010s 谷类作物秸秆及其养分资源分别占全国的 70% 和 56.5%, 东北地区谷类作物秸秆比例最高; 果蔬类作物秸秆及其养分资源分别占 9.7% 和 22%, 东南地区果蔬类作物秸秆比例最高; 豆类、薯类、油料类、棉麻纤维类和其他类作物秸秆及其养分资源占比相对较小。从 1980s 到 2010s, 秸秆直接还田量持续增加, 燃烧还田量从 1980s 到 2000s 增加, 2010s 则下降。然而秸秆养分还田量则持续增加, 氮磷钾还田总量从 1980s 的 583.9×10^4 吨 (N 97.8×10^4 吨、P 40.1×10^4 吨和 K 446.0×10^4 吨) 增加到 2010s 的 1770.7×10^4 吨 (N 574.5×10^4 吨、P 105.5×10^4 吨和 K 1090.6×10^4 吨)。1980s、1990s、2000s、2010s 秸秆氮磷钾养分还田率分别为 47.9%、56.2%、60.1% 和 71.2%。内蒙古、新疆、黑龙江省秸秆养分还田率增加明显, 但华北、长江中下游和四川盆地秸秆养分还田量占全国秸秆养分还田总量的 2/3 以上。

关键词: 作物秸秆; 秸秆养分; 秸秆还田; 时空分布

我国农作物秸秆资源丰富, 蕴藏着大量的氮、磷、钾、中微量元素和有机物质等, 是重要的有机肥资源。秸秆还田增加土壤养分, 提高农田养分的利用效率, 提高土壤质量, 改善土壤水、肥、气、热, 达到增加作物产量等诸多作用, 同时还减少焚烧、丢弃秸秆出现的资源浪费和环境污染等问题。

纵观我国农作物秸秆资源研究文献, 其研究热点主要集中在: 秸秆资源数量、秸秆资源利用现状、秸秆综合利用技术路径及其经济效益、环境效益和社会效益, 以及监测秸秆焚烧排放物等方面。但是, 秸秆及其养分资源总量、种类和分布特征不清晰, 其利用现状不明确, 不利于国家秸秆资源政策的制定和实施。从国家尺度上, 对各地区秸秆及养分资源总量及有效还田的时空分布状况的研究鲜有报道。为此, 本文利用官方统计数据和大量的文献资料, 系统估算、分析了我国农业发展不同阶段秸秆资源量、养分供应潜力及有效利用的时空变化特征及存在问题, 为合理利用秸秆养分资源, 实现“减施化肥”和“2020 年化肥零增长目标”提供科学依据和参考, 更为决策者制定秸秆资源综合利用政策和措施提供依据。

1 材料与方法

1.1 估算方法

参照中国粮食主产区划分如下区域。(1) 东北地区: 包括黑龙江、吉林和辽宁 3 省; (2) 华北地区: 北京、天津、河北、河南、山东、山西 6 省(市); (3) 长江中下游地区: 上海、江苏、浙江、安徽、湖北、湖南、江西 7 省(市); (4) 西北地区: 内蒙古、陕西、宁夏、甘肃、青海、新疆 6 省; (5) 西南地区: 重庆、四川、贵州、云南、西藏 5 省(市); (6) 东南地区: 福建、广东、广西、海南 4 省。本研究未包括香港、澳门、台湾的数据。采用国际上通用的草谷比方法来估算中国秸秆资源量、氮磷钾养分量及其还田资源量, 其计算公式如下:

秸秆及其养分资源量:

$$TS = \sum_{i=1}^n Y_i \cdot R_i$$
$$TN \text{ (或 } TP \text{ 或 } TK) = \sum_{i=1}^n Y_i \cdot R_i \cdot N_{ci} \text{ (或 } P_{ci} \text{ 或 } K_{ci})$$

其中: TS 为秸秆理论资源量(风干基), TN、TP、TK 分别为秸秆氮、磷、钾资源量; i 为第 i 种作物, Y 为

作物经济产量, R 为作物草谷比, Nc、Pc、Kc 分别为秸秆 N、P、K 含量。

秸秆直接还田:

$$Sd = \sum_{i=1}^n Y_i \cdot R_i \cdot R_{di}$$

$$SdN \text{ (或 } SdP \text{ 或 } SdK) = \sum_{i=1}^n Y_i \cdot R_i \cdot N_{ci} \text{ (或 } P_{ci} \text{ 或 } K_{ci}) \cdot R_{di}$$

其中: Sd 为秸秆直接还田量(风干基), SdN、SdP、SdK 分别为秸秆氮、磷、钾直接还田量; Rd 为秸秆直接还田率; i 为第 i 种作物, Y 为作物经济产量, R 为作物草谷比, Nc、Pc、Kc 分别为秸秆 N、P、K 含量。

秸秆燃烧还田:

$$Sb = \sum_{i=1}^n Y_i \cdot R_i \cdot R_{bi}$$

$$SbN \text{ (或 } SdP \text{ 或 } SdK) = \sum_{i=1}^n Y_i \cdot R_i \cdot N_{ci} \text{ (或 } P_{ci} \text{ 或 } K_{ci}) \cdot R_{bi} \cdot N_r \text{ (或 } P_r \text{ 或 } K_r)$$

其中: Sb 为秸秆燃烧还田量(风干基), SbN、SbP、SbK 分别为秸秆氮、磷、钾燃烧还田量; Rb 为秸秆燃烧还田率; i 为第 i 种作物, Y 为作物经济产量, R 为作物草谷比, Nc、Pc、Kc 分别为秸秆 N、P、K 含量, Nr、Pr、Kr 分别为秸秆燃烧后氮、磷、钾养分归还率。

秸秆养分还田总量:

$$StNPK = SdNPK + SbNPK$$

其中: StNPK、SdNPK、SbNPK 分别为秸秆氮、磷、钾养分还田总量、直接还田量和燃烧还田量。

1.2 数据及其来源

1.2.1 统计数据

作物产量和耕地面积数据来自《中国统计年鉴》(1981–2016)和《中国农业统计年鉴》(1981–2016)。由于作物种类和种植面积年间变化的影响,因此本研究以10年为周期,分别以1980–1989、1990–1999、2000–2009和2010–2015的均值表示1980s、1990s、2000s、2010s数据,以反应不同时期的平均差异。

农作物产量包括谷类(水稻、小麦、玉米、大麦和其他谷类)、油料(绿豆、红小豆、大豆和其他豆类)、棉麻类(棉花、黄红麻、亚麻、大麻和苕麻)、糖料(甘蔗和甜菜)、烟叶、蔬菜和瓜类(西瓜、甜瓜和其他瓜类),以及水果(香蕉、菠萝)的经济产量。

1980s和1990s重庆的数据包含在四川省。1980s和1990s统计数据中未包含瓜类、香蕉、和菠萝数据。

1.2.2 参数设定

本研究通过收集、整理和分析大量的文献资料、书籍或研究报告等,分地区计算各种作物草谷比的加权平均值作为该地区一定的气候和作物品种下各种作物的草谷比。参考2000年中国农业技术推广服务中心出版的《中国有机肥料养分志》和《中国有机肥料资源》的基础上,增加其他文献的秸秆养分含量结果,用加权均值确定各种作物的秸秆养分含量。通过查阅搜集、整理文献资料中秸秆直接还田率和燃烧还田率,用加权均值表示各年代不同地区主要作物的直接还田率和燃烧后还田率。秸秆养分还田时,直接还田的秸秆养分按100%还田,而燃烧后还田氮、磷、钾养分还田率则分别按0%、82.5%、82.5%计。

2 结果与分析

2.1 秸秆及其养分资源

通过计算得到1980s、1990s、2000s、2010s全国秸秆资源量分别为 4.9×10^8 吨、 6.6×10^8 吨、 7.4×10^8 吨、 9.0×10^8 吨,30多年来秸秆资源总量增长了85.5%。其中,新疆、内蒙古、宁夏、甘肃等西北地区以及西藏、黑龙江增幅较为明显,西北地区从1980s的 3.5×10^7 吨增加到2010s的 12.0×10^7 吨,增长了246%,而北京、上海、浙江几乎没有明显增长。秸秆资源主要分布华北、长江中下游、四川盆地以及黑龙江地区,这些地区的秸秆资源量占全国秸秆资源总量的66.6–72.9%。其中,山东、河南两省秸秆资源量最大,占全国秸秆资源总量的18.6%。

表1 2010s各地区主要作物秸秆资源占本地区秸秆资源总量的比例 (%)

作物	东北	华北	长江中下游	西北	西南	东南	全国
谷类	85.23	73.76	72.97	59.92	62.85	45.97	69.86
豆类	6.16	1.14	2.14	3.38	4.63	1.49	2.84
薯类	0.91	1.23	1.22	3.44	6.63	4.26	2.36
油料	2.58	6.70	10.66	7.67	10.49	4.49	7.53
棉麻	0.05	4.50	3.30	17.19	0.20	0.05	4.40
果蔬	4.38	12.41	9.21	7.21	8.89	16.41	9.67
其他	0.69	0.26	0.50	1.19	6.31	27.33	3.35

通过分析 2010s 不同作物秸秆资源比例 (表 1), 谷类作物秸秆资源占 70%, 其次是果蔬类作物秸秆占 9.7%, 豆类、薯类、油料类、棉麻纤维类和其他类作物秸秆资源分别占 2.8%、2.4%、7.5%、4.4%、3.3%。不同区域各种作物秸秆资源占比有一定差异, 谷类作物占比最大为东北地区, 约占该地区秸秆资源总量的 85.2%, 其中吉林最高, 达到 89.3%; 其次是华北地区、长江中下游地区, 西北、西南和东南地区谷类作物占比相对较低, 东南地区最低为 46%。豆类作物秸秆资源占比最多的是东北地区为 6.2%, 其次是西南地区为 4.6%、西北地区为 3.4%, 最小的是华北地区, 仅有 1.1%。薯类作物秸秆资源所占比例最大的是西南地区, 其次是东南、西北地区, 华北、长江中下游和东北地区相对较低。油料作物秸秆资源占比例较大是长江中下游、西南地区, 棉麻纤维作物秸秆资源占比例最大

的是西北地区, 果蔬作物和其他类作物秸秆资源占比例最大的是东南地区。

通过估算, 1980s、1990s、2000s、2010s 全国秸秆 N、P、K 养分总量分别为 1218.5×10^4 吨、 1689.2×10^4 吨、 2035.5×10^4 吨、 2485.6×10^4 吨, 持续增加, 新疆、内蒙古、宁夏、甘肃等西北地区以及西藏、黑龙江增长幅度较为明显, 西北地区从 1980s 的 80.3×10^4 吨增加到 2010s 的 323.2×10^4 吨, 增长了三倍以上, 而北京、上海、浙江几乎没有明显增长 (图 1)。1980s 秸秆 N、P、K 养分分别为 420.6×10^4 吨、 66.2×10^4 吨、 731.7×10^4 吨, 氮磷钾养分总量是 1980s 化肥消费均量 1772.2×10^4 吨的 68.8%; 1990s 秸秆 N、P、K 养分分别为 605.4×10^4 吨、 91.6×10^4 吨、 992.2×10^4 吨, 氮磷钾养分总量是 1990s 化肥消费均量 3440.6×10^4 吨的 49.1%; 2000s 秸

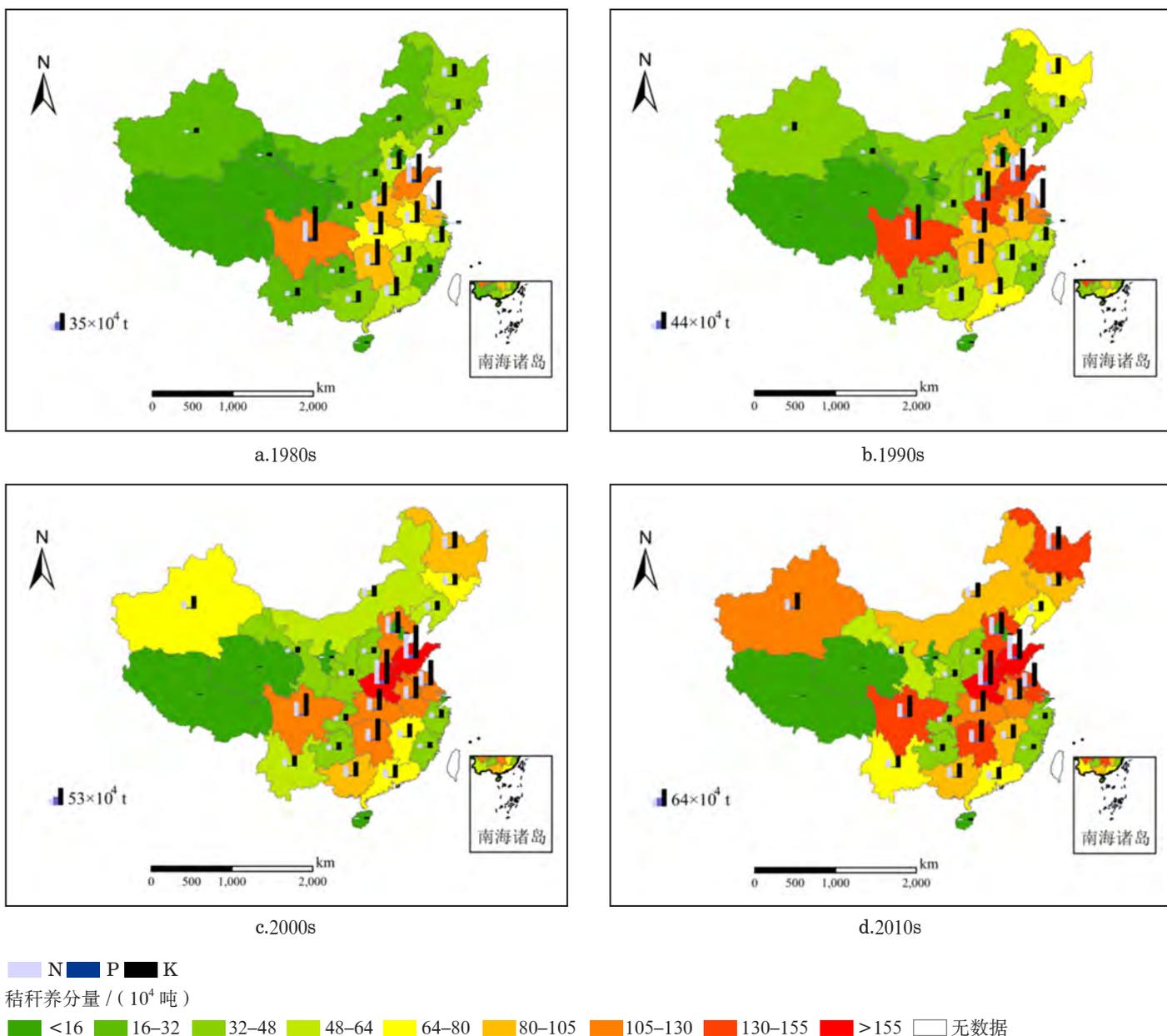


图 1 秸秆养分资源量时空分布

表 2 2010s 各地区主要作物秸秆养分资源量占本地区秸秆养分资源总量的比例 (%)

作物	东北	华北	长江中下游	西北	西南	东南	全国
谷类	77.67	54.20	63.11	44.93	51.05	38.49	56.47
豆类	4.20	0.75	1.25	2.18	2.74	0.80	1.75
薯类	2.01	2.12	1.94	7.12	11.22	5.92	4.21
油料	4.16	8.29	10.37	10.91	10.20	4.64	8.57
棉麻	0.05	4.62	3.03	17.21	0.15	0.03	4.28
果蔬	11.25	29.74	19.87	16.68	19.40	31.86	21.99
其他	0.66	0.28	0.44	0.98	5.24	18.26	2.73

秆 N、P、K 养分分别为 767.3×10^4 吨、 112.6×10^4 吨、 1155.6×10^4 吨，氮磷钾养分总量是 2000s 化肥消费均量 4723.3×10^4 吨的 43.1%；2010s 秸秆 N、P、K 养分分别增加到 947.0×10^4 吨、 136.5×10^4 吨、 1402.1×10^4 吨，氮磷钾养分总量是 2010s 化肥消费均量 5839.2×10^4 吨的 42.6%。可见，秸秆养分占化肥消费量的比例是逐渐下降的，主要原因是化肥消费量的增长较快。与秸秆资源量相似，秸秆养分主要分布在粮食主产区，如华北、长江中下游、四川盆地以及黑龙江省，这些地区的秸秆养分资源量占全国总量的 66.0–72.4%，其中，山东、河南两省秸秆养分资源量最大，占全国总量的 15.6–18.9%。

分析 2010s 不同作物秸秆养分资源量占比（表 2），谷类作物占 56.5%，其次是果蔬类作物占 22%，豆类、薯类、油料类、棉麻纤维类以及其他类作物秸秆养分资源分别占总量的 1.8%、4.2%、8.6%、4.3%、2.7%。不同区域各种作物秸秆养分资源所占有比例也有较大差异，谷类作物秸秆养分占比最大的为东北地区，达到 77.7%，其次是长江中下游（63.1%）、华北地区（54.2%），东南地区最小（38.5%）；果蔬类作物秸秆养分占比最大的是东南地区（31.9%），其次是华北（29.7%）、长江中下游地区（19.9%），最小的是东北地区（11.2%）；豆类作物秸秆养分占比大的是东北地区（4.2%），其次是西南地区（2.7%）、西北地区（2.2%），最小的是华北地区（0.7%）；薯类作物秸秆养分占比最大的为西南地区，达 11.2%，其他类作物秸秆养分占比最大的是东南地区。

2.2 秸秆还田

2.2.1 直接还田

从 1980s 到 2010s，全国秸秆直接还田率从 23.9% 增加到 61.3%，秸秆直接还田量从 1980s 的 1.2×10^8 吨增加到 2010s 的 5.5×10^8 吨，直接还田的 N、P、K 量分别从

1980s 的 97.8×10^4 吨、 15.2×10^4 吨、 169.4×10^4 吨增加到 2010s 的 314.4×10^4 吨、 46.3×10^4 吨、 481.0×10^4 吨。新疆、内蒙古的秸秆养分直接还田量增幅最明显，还田的秸秆养分量分别从 1980s 的 4.1×10^4 吨、 4.2×10^4 吨增加到 2010s 的 75.7×10^4 吨、 50.6×10^4 吨，分别增加 17.3 和 11.0 倍；其次是黑龙江、西藏、河南、宁夏，还田的秸秆养分量分别从 1980s 的 11.4×10^4 吨、 0.16×10^4 吨、 19.8×10^4 吨和 0.87×10^4 吨增加到 2010s 的 104.9×10^4 吨、 1.82×10^4 吨、 160.7×10^4 吨和 8.56×10^4 吨，增幅分别为 8.2、10.4、7.1 和 8.8 倍。地域上秸秆及其养分还田主要在华北、长江中下游及四川盆地及 2010 后的黑龙江。

2.2.2 燃烧还田

1980s 到 2000s 秸秆燃烧还田量和燃烧后养分还田量持续缓慢增加，燃烧还田量从 2.0×10^8 吨增加到 2.8×10^8 吨，增加了 35.8%。1980s 秸秆燃烧后养分还田量达 301.5×10^4 吨，其中 P 和 K 分别为 24.9×10^4 吨、 276.6×10^4 吨；1990s 秸秆燃烧后养分还田量达 318.2×10^4 吨，其中 P 和 K 分别为 26.8×10^4 吨、 291.4×10^4 吨；2000s 秸秆燃烧后养分还田量达 381.9×10^4 吨，其中 P 和 K 分别为 33.0×10^4 吨、 348.9×10^4 吨。这一时期秸秆燃烧及其燃烧后养分还田量主要分布在华北、长江中下游和四川盆地，这些地区秸秆燃烧及其燃烧后养分还田量分别占全国的 46.4–69.4% 和 50.0–69.8%。

2010s 秸秆燃烧及其养分还田量显著下降，燃烧还田的 P 和 K 分别为 22.3×10^4 吨和 222.8×10^4 吨，比 2000s 分别下降 32.4% 和 36.1%。其中上海、浙江、江苏、江西、北京、天津、山东秸秆燃烧及其燃烧后养分还田量降幅明显，与近年来政府鼓励秸秆还田、禁止焚烧以及规模化、机械化收获等有关，还与近年来农民依赖秸秆做能源的比重逐渐减少有关。

2.2.3 还田总量

作物秸秆养分还田总量包括直接还田量和间接还田量(图2)。1980s 秸秆氮磷钾养分还田总量为 583.9×10^4 吨, 还田率为 47.9%, 其中秸秆 N、P 和 K 还田量分别为 97.8×10^4 吨、 40.1×10^4 吨、 446.0×10^4 吨, 还田率为 23.3%、60.6%、61.0%。1990s 秸秆氮磷钾养分还田总量为 948.6×10^4 吨, 还田率为 56.2%, 其中 N、P 和 K 还田量分别为 224.8×10^4 吨、 61.3×10^4 吨、 662.6×10^4 吨, 还田率为 37.1%、66.9%、66.8%。2000s 秸秆氮磷钾养分还田总量为 1223.7×10^4 吨, 还田率为 60.1%, 其中 N、P 和 K 还田量分别为 314.4×10^4 吨、 79.4×10^4 吨、 829.9×10^4 吨, 还田率为 41.0%、70.5%、71.8%。2010s 秸秆氮磷钾养分还田总量为 1770.7×10^4 吨, 还田率为 71.2%, 其中 N、P 和 K 还田量分别为 574.5×10^4 吨、 105.5×10^4 吨、 1090.6×10^4

吨, 还田率为 60.7%、77.3%、77.8%。1980s、1990s、2000s、2010s 氮磷钾养分还田量相当于各年代化肥消费量的 33.0%、27.6%、25.9%、30.3%。可见, 从 1980s 到 2010s 秸秆氮、磷、钾及其总还田量和还田率持续增加, 其中内蒙古、新疆、黑龙江增幅较明显。从区域分布来看, 秸秆养分还田主要分布在华北地区、长江中下游地区、四川盆地和黑龙江省, 这些地区秸秆养分还田总量约占全国还田养分总量的 68.6–74.7%。

秸秆还田对维持土壤钾素肥力、缓解钾肥资源不足、减少钾肥投入尤为重要。例如 2010s 通过秸秆还田的钾素全国平均为 80.7 千克/公顷, 而 2015 年通过化肥施用的钾素约为 80 千克/公顷, 相当于每年施钾量。秸秆直接还田后, 养分释放需要一定的时间, 因此在研究秸秆还田替代化肥时应考虑秸秆还田后养分的当季有效性, 避免简

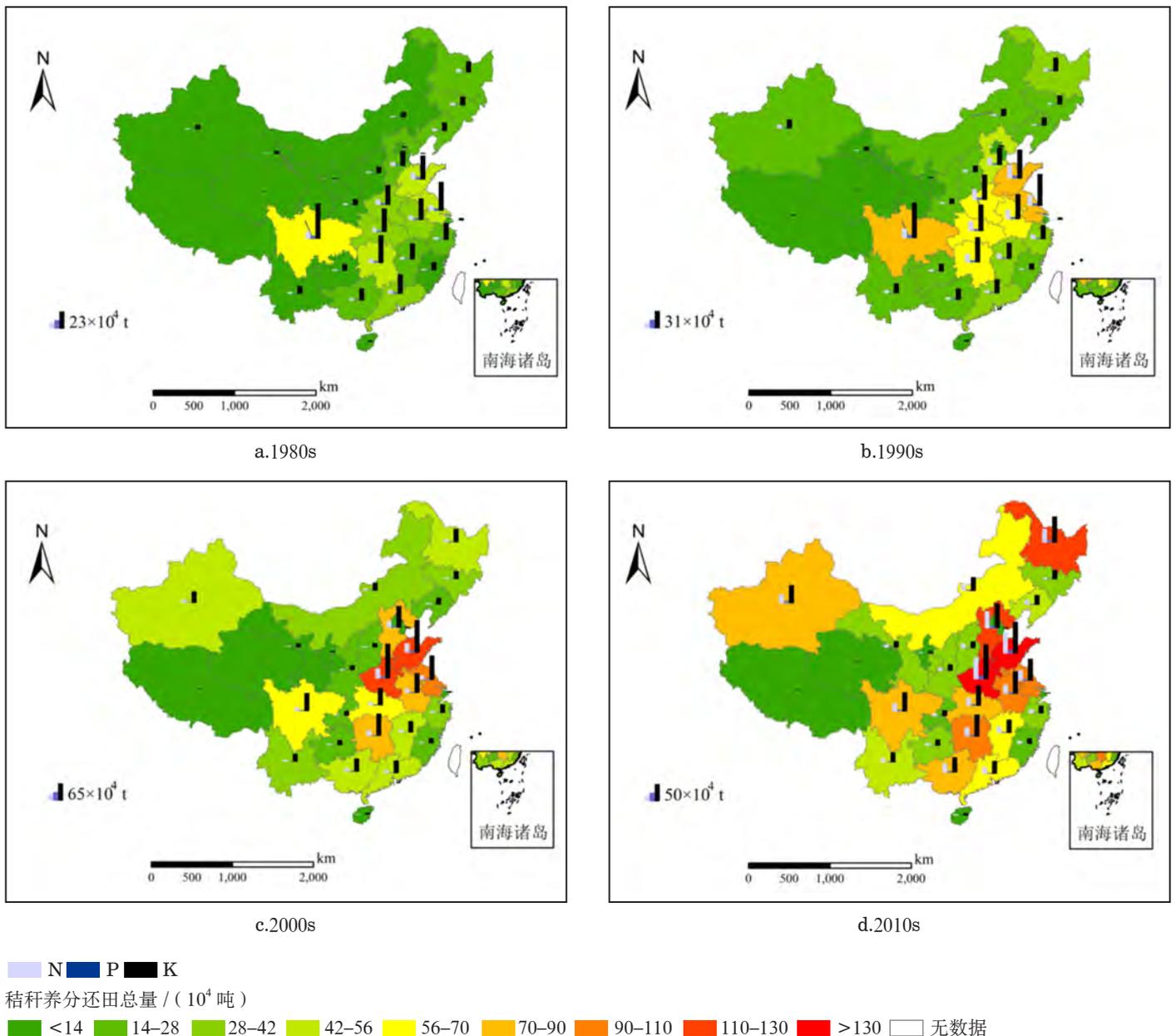


图2 秸秆养分年均还田量时空分布

单的等养分替代导致养分供应不足而影响作物生长和产量、品质。秸秆养分当季释放率对秸秆还田后调整当季化肥施用量以及实现秸秆与肥料合理配施都非常重要。

3 结论

(1) 从 1980s 到 2010s 我国秸秆及其养分资源分别增长了 85.5% 和 104%，西北地区、西藏、黑龙江增幅明显。到 2010s 秸秆资源和氮磷钾养分资源分别达到 9.0×10^8 吨和 2485.6×10^4 吨，2/3 以上分布在华北、长江中下游、四川盆地以及黑龙江地区。

参考文献 (略)

详情参见：农业工程学报，2017，33(21):1-19.

(2) 2010s 谷类作物秸秆及其养分资源占总资源量的比例最大，分别达 70% 和 56.5%，东北地区最明显；其次是果蔬类作物秸秆及其养分资源，分别占 9.7%、22%，主要分布在东南地区；豆类、薯类、油料类、棉麻纤维类和其他类作物秸秆及其养分资源占比相对较小。

(3) 从 1980s 到 2010s，秸秆氮磷钾养分还田量持续增加，还田总量从 583.9×10^4 吨增加到 1770.7×10^4 吨，华北、长江中下游和四川盆地秸秆养分还田量占全国秸秆养分还田总量的 2/3 以上。

国家重点研发计划项目“肥料养分推荐方法与限量标准”暨 IPNI 中国项目 2017 年度学术年会在京召开

2018 年 1 月 15-17 日，由中国农业科学院农业资源与农业区划研究所主持的国家重点研发计划项目“肥料养分推荐方法与限量标准”暨 IPNI 中国项目 2017 年度总结会议在北京召开。杨鹏副所长出席会议并致辞，国际植物营养研究所副所长 Kaushik Majumdar 博士讲话，项目咨询专家组及研究骨干及相关代表等 120 余人参加了会议。首席专家何萍研究员介绍了项目 2017 年的主要进展，发布了新版养分专家系统（NE 系统），颁发了国际植物营养研究所研究生奖学金。



2017 年项目就主要粮食作物、经济作物、蔬菜和果树养分推荐方法与限量标准，区域尺度养分推荐方法与限量标准、有机肥料替代化学养分机理、秸秆还田养分高效利用机理、钾及微量元素与氮磷协同增效机制以及化学肥料减施增效调控途径等问题全面开展研究，取得了可喜进展。以项目第一标注发表论文 58 篇，其中 SCI 论文 29 篇，获发明专利 13 项。各课题负责人汇报了 2017 年的研究进展及 2018 年工作计划，一致认为 2018 年项目要重点突破高水平产出和发明专利；会议还讨论确定了《作物养分限量标准》框架，各课题与项目签署了《数据库数据汇交计划与合作条款》，为各课题之间数据共享，以及建立标准化的推荐施肥新方法奠定了坚实的基础。

