

农业重大科学研究成果专著

FERTILIZER SAVING AND  
EFFICIENCY IMPROVEMENT IN  
INTENSIFIED FARMLAND

何 萍 金继运 等 著

# 集约化农田 节肥增效理论与实践



科学出版社

农业重大科学研究成果专著

**集约化农田节肥增效理论与实践**  
**Fertilizer Saving and Efficiency Improvement**  
**in Intensified Farmland**

何 萍 金继运 等 著

**科 学 出 版 社**

北 京

## 内 容 简 介

本书主要以东北、华北、长江中下游为研究区域,选择玉米、小麦、水稻、蔬菜等作物为研究对象。重点阐述了肥际-根际养分转化与调控、作物养分吸收转运与高效利用、有机无机肥料以及环境要素协同效应与机理、农田养分时空变异特征与调控、典型区域养分循环特征与节肥增效途径与模式,以及我国养分资源高效利用的战略与对策。通过以上研究提出作物持续增产和农田可持续利用的高效施肥的理论、方法和技术体系,为集约化栽培区节肥增效与保障农田可持续利用提供理论基础与技术支持。

本书可供土壤学、植物营养学、肥料学、环境与生态学以及农学领域的科研工作者、学生、农技推广人员以及相关管理部门工作人员阅读和参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

集约化农田节肥增效理论与实践/何萍等著. —北京:科学出版社,2012  
(农业重大科学研究成果专著)

ISBN 978-7-03-032652-2

I. ①集… II. ①何… III. ①施肥-研究 IV. ①S147.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 127162 号

责任编辑:罗 静 景艳霞/责任校对:刘小梅

责任印制:钱玉芬/封面设计:美光制版

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2012年6月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2012年6月第一次印刷 印张:43 1/2

字数:1 017 000

定价:180.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 《集约化农田节肥增效理论与实践》

### 著者名单

|      |            |            |            |     |     |
|------|------------|------------|------------|-----|-----|
| 第1章  | 李春俭<br>何 萍 | 李忠佩<br>张丽莉 | 苏彦华<br>杨俊诚 | 沈其荣 | 林咸永 |
| 第2章  | 李忠佩        | 王火焰        | 周健民        | 陈小琴 | 车玉萍 |
| 第3章  | 李春俭<br>张淑香 | 汪 洪<br>李桂花 | 申建波<br>彭正萍 | 张俊伶 | 陈范俊 |
| 第4章  | 苏彦华<br>李素梅 | 施卫明<br>高 南 | 封 克        | 颜廷梅 | 单玉华 |
| 第5章  | 冉 炜        | 徐阳春        | 黄启为        | 沈其荣 |     |
| 第6章  | 林咸永<br>李兆君 | 武雪萍        | 方 萍        | 朱 诚 | 冯 英 |
| 第7章  | 何 萍<br>金继运 | 黄绍文        | 赵士诚        | 仇少君 | 杨俐苹 |
| 第8章  | 张丽莉<br>张玉兰 | 梁国庆<br>武志杰 | 王秀斌<br>姜 勇 | 孙静文 | 李 琪 |
| 第9章  | 杨俊诚<br>文石林 | 李书田        | 卢昌艾        | 张建峰 | 姜慧敏 |
| 第10章 | 金继运        |            |            |     |     |

## 前 言

肥料是作物生产最大的物质投入，是作物优质高产的物质基础，也是农田可持续利用的基本保证。我国人多地少，为了保障农产品的供应，多年来依靠化肥的大量投入增加单产。新中国成立以来的实践证明，化肥的施用对保障粮食安全和农产品充分供应发挥了不可替代的作用。然而，近年来，在我国集约化农区化肥的过量和不合理施用问题严重。当前我国以占世界 9% 的耕地，年消耗世界 32% 的化肥，单位耕地面积施肥量大约是世界平均水平的 3 倍，某些集约化粮田氮肥投入量甚至高达  $450\sim 600\text{ kg/hm}^2$ ，菜田高达  $500\sim 2000\text{ kg/hm}^2$ 。肥料过量和不科学施用，造成资源浪费、环境污染和农田生产力下降。在我国人地矛盾极为突出、农田高强度利用的条件下问题更为严重。有关研究表明，若氮肥利用率由 30% 提高到 40%，在维持现有生产水平下可以相应减少 1/4 的氮肥的投入。与此同时，我国丰富的有机肥资源未能充分利用，有机养分资源有效返回农田的比例仅为 34%，资源浪费严重。肥料的过量和不科学施用还直接影响到农田的可持续利用，造成农田养分失衡、土壤酸化和盐渍化、土壤结构变差以及土壤生物多样性下降。因此，如何在这种高度集约化条件下，既能保证作物持续增产，同时兼顾生态环境安全和农田的可持续利用，是我国土壤肥料科学家面临的严峻挑战。因此，开展节肥增效与农田可持续利用基础研究，提高肥料利用效率，是实现资源高效利用、改善生态环境、实现农田可持续利用以及保障粮食安全的重大国家需求，也是协调经济、社会和环境效益的现实需要。

2007 年科学技术部启动了我国第一个肥料“973”计划项目，即“肥料减施增效与农田可持续利用基础研究”。项目围绕三个科学问题开展研究，即土壤-作物系统中氮磷养分无效化阻控与活化机制、肥料养分/环境要素协同提高氮磷利用效率的机制和农田氮磷养分供应与作物吸收时空同步机制。拟定的科学目标为阐明土壤微域氮磷养分无效化过程阻控和作物高效吸收利用养分的机理，揭示肥料养分/环境要素协同提高氮磷利用效率的机制，实现农田氮磷养分供应与作物吸收的时空同步，提出实现作物持续增产和农田可持续利用的高效施肥的理论、方法和技术体系，协调社会效益、经济效益和环境效益，为集约化栽培区减施化肥 20%~30% 提供理论基础与技术支撑。项目组织中国农业科学院农业资源与农业区划研究所、中国科学院南京土壤研究所、中国科学院沈阳应用生态研究所、中国农业大学、南京农业大学、浙江大学等单位的研究人员组成项目组，针对三个关键科学问题，以氮肥和磷肥节施增效为主要目标，以东北、华北、长江中下游为主要研究区域，选择玉米、小麦、水稻、蔬菜等作物，结合主要种植制度开展研究。2007~2011 年，项目组通过开展大量的田间试验、野外观测、室内模拟与分析等，在三个科学问题涉及的理论和技术方面均有突破性的进展。项目组将相关的主要研究成果汇集凝练，形成本书奉献给读者，希望对从事土壤学、植物营养学、肥料学、环境与生态学以及农学领域的科研工作者和学生有一定的参考价值和借鉴作用。

在本书的写作过程中，我们力求数据可靠、分析透彻、论证全面、观点客观，但由于水平所限，书中可能存在疏漏和不足之处，敬请读者批评指正。

我们衷心感谢国家重点基础研究发展计划的资助。感谢科学技术部“973”计划有关顾问专家和咨询专家对项目的关心和支持，感谢本项目专家组在项目执行过程中提出的宝贵意见。感谢为本书的研究成果作出贡献的所有研究人员。感谢科学出版社对本书出版的大力支持。

作 者

2011年9月于北京

# 目 录

## 前言

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 第 1 章 总论                  | 1   |
| 1.1 肥料养分转化与高效利用           | 1   |
| 1.2 肥料养分与环境要素协同增效机理       | 7   |
| 1.3 农田养分时空变异特征与调控机制       | 11  |
| 1.4 典型区域肥料养分循环特征与驱动机制     | 15  |
| 1.5 典型区域节肥增效与农田可持续利用途径与模式 | 17  |
| 1.6 结论                    | 19  |
| 参考文献                      | 20  |
| 第 2 章 肥际微域养分转化与调控         | 22  |
| 2.1 引言                    | 22  |
| 2.2 肥料氮素在肥际微域的迁移转化        | 28  |
| 2.3 肥料磷素在肥际微域的释放迁移动态及形态转化 | 46  |
| 2.4 肥际微域中多元养分的交互作用        | 62  |
| 2.5 肥际微域氮磷养分迁移转化的调控       | 87  |
| 参考文献                      | 96  |
| 第 3 章 根际养分转化与调控           | 102 |
| 3.1 引言                    | 102 |
| 3.2 作物根系生长和根际养分转化         | 103 |
| 3.3 根际生物互作与养分有效性          | 115 |
| 3.4 提高养分利用效率的根层调控         | 134 |
| 参考文献                      | 141 |
| 第 4 章 作物养分吸收转运与高效利用       | 149 |
| 4.1 引言                    | 149 |
| 4.2 作物养分吸收转运规律            | 150 |
| 4.3 作物对氮养分非均匀供应的弹性响应和耐受性  | 163 |
| 4.4 作物关键生育期养分临界阈值         | 200 |
| 4.5 增强养分吸收和利用的机制与途径（以磷为例） | 222 |
| 参考文献                      | 230 |
| 第 5 章 有机无机肥料协同效应与机理       | 239 |
| 5.1 引言                    | 239 |
| 5.2 有机肥料养分供应特征            | 241 |
| 5.3 有机无机肥料配施的协同效应与机制      | 245 |

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| 5.4 有机肥料替代无机肥料的养分当量 .....             | 261 |
| 5.5 有机肥料与农田可持续利用 .....                | 270 |
| 参考文献 .....                            | 286 |
| <b>第6章 环境要素影响养分利用的机制与调控</b> .....     | 297 |
| 6.1 引言 .....                          | 297 |
| 6.2 环境要素对土壤养分迁移转化的影响及其机制 .....        | 301 |
| 6.3 蔬菜作物对养分与环境因子互作的响应及其机制 .....       | 328 |
| 6.4 肥料高效利用的环境要素调控 .....               | 340 |
| 6.5 结语 .....                          | 369 |
| 参考文献 .....                            | 370 |
| <b>第7章 农田养分时空变异特征与调控</b> .....        | 384 |
| 7.1 引言 .....                          | 384 |
| 7.2 生育期养分供求特征与调控 .....                | 386 |
| 7.3 农田土壤养分空间变异特征与精准调控 .....           | 416 |
| 7.4 区域土壤养分空间变异特征与分区调控——以吉林玉米带为例 ..... | 443 |
| 参考文献 .....                            | 451 |
| <b>第8章 典型区域养分循环特征与驱动机制</b> .....      | 456 |
| 8.1 引言 .....                          | 456 |
| 8.2 不同区域农田土壤养分循环特征 .....              | 459 |
| 8.3 长江中下游地区稻麦轮作体系养分循环特征 .....         | 483 |
| 8.4 东北地区玉米种植体系养分循环特征 .....            | 495 |
| 8.5 典型区域养分循环的驱动机制 .....               | 519 |
| 8.6 减少养分损失和无效化的主要途径 .....             | 586 |
| 参考文献 .....                            | 587 |
| <b>第9章 典型区域节肥增效途径与模式</b> .....        | 592 |
| 9.1 前言 .....                          | 592 |
| 9.2 东北春玉米种植区节肥增效的途径与模式 .....          | 592 |
| 9.3 华北冬小麦-夏玉米轮作区节肥增效模式 .....          | 613 |
| 9.4 长江中下游小麦-水稻轮作区节肥增效途径与模式 .....      | 624 |
| 9.5 长江中下游稻-稻轮作区节肥增效途径与模式 .....        | 636 |
| 9.6 华北集约化菜地氮肥减施增效途径与模式 .....          | 647 |
| 参考文献 .....                            | 670 |
| <b>第10章 养分资源高效利用的战略与对策</b> .....      | 677 |
| 10.1 我国肥料利用的现状和问题 .....               | 677 |
| 10.2 养分资源高效利用的战略和目标 .....             | 680 |
| 10.3 实现养分资源高效利用的技术对策 .....            | 681 |
| 10.4 实现养分资源高效利用的政策性建议 .....           | 684 |
| 参考文献 .....                            | 685 |

# 第1章 总 论

我国人多地少，依靠化肥的大量投入增加单产，形成了我国特有的农田高强度利用生产体系。目前，我国以占世界9%的耕地，年消耗世界32%的化肥，单位耕地面积施肥量已达世界平均水平的3倍，但肥料利用率低，如氮肥当季利用率仅为30%，磷肥当季利用率为10%~20%。针对我国特有的化肥高量投入和农田高强度利用生产体系，如何高效利用肥料资源，保障作物持续高产和农田可持续利用，国内外尚无可以借鉴的理论和体系。

国际上尤其是发达国家十分重视肥料资源高效利用基础研究，从肥料施入土壤后发生的一系列物理化学和生物学的变化，到作物的高效吸收和利用，以及在不同尺度上土壤养分时空变异规律和相应的肥料资源高效利用技术途径等方面都开展了大量的研究工作，并且应用生物技术和信息技术的最新研究成果使相关研究进入一个全新的阶段。但是这些研究成果是否适应我国这种高复种指数、高投入、高产出的农业生产体系，目前尚不清楚，而且针对我国高投入高产情况下作物-土壤系统特有规律的研究非常缺乏，而这方面的研究正是我国实现节肥增效和农田可持续利用的关键。

为此，在国家重点基础研究发展计划“肥料减施增效与农田可持续利用基础研究”的支持下，本项目围绕三个科学问题开展研究：①土壤-作物系统中氮磷养分无效化阻控与活化的机制；②肥料养分/环境要素协同提高氮磷利用效率的机制；③农田氮磷养分供应与作物吸收时空同步的机制。预期科学目标为阐明土壤微域氮磷养分无效化过程阻控和作物高效吸收利用养分的机理，揭示肥料养分/环境要素协同提高氮磷利用效率的机制，实现农田氮磷养分供应与作物吸收的时空同步，提出实现作物持续增产和农田可持续利用的高效施肥的理论、方法和技术体系，协调社会效益、经济效益和环境效益，为集约化栽培区化肥减施增效提供理论基础与技术支持。

## 1.1 肥料养分转化与高效利用

### 1.1.1 肥际微域肥料养分转化过程与控制途径

肥际是肥料施入土壤，在土壤中溶解、扩散后，在肥料或肥粒附近形成的一个特殊的、养分浓度可能数倍或十几倍于一般土体的微域，这一微域环境内的物理、化学、生物学反应可能与一般土体有较大差异。研究肥际微域中的土壤养分转化过程特征，并提出相应的减少养分固定损失、促进养分的生物有效性的调控措施具有非常重要的理论和实际应用价值。

目前，肥际微域的研究仍处于起步阶段，其取样方法是影响研究能否深入的关键因素。经过反复探索，研制了蜡封筒取样装置、PVC管螺旋推进式采样装置、分步式立体采样装置，这些装置针对不同的取样目的，能够满足肥际微域研究中的取样要求。

肥际微域氮素的释放和迁移转化与肥料种类和施用量有关,也受土壤性质和环境要素的影响。采用动态采样、密集切片方法,观测培养过程黑土和水稻土中肥际微域的氮素迁移转化特征结果表明,土壤类型和肥料种类对氮素的迁移转化特征有明显影响。施肥后,氮素在土壤中迁移转化主要发生在肥土界面 0~50 mm 土层,且各处理中氮素最大含量变化均发生在培养开始后的前 14 天内。尿素氮的转化速率较硫铵高,黑土中尿素处理的平均硝化率是硫铵处理的 0.65~8.79 倍,相应的水稻土为 0.50~3.29 倍。

肥际养分浓度下不同肥料种类和养分配比组合处理(两种氮、磷、钾肥配比处理,复合肥,缓释肥)的氮素转化特征有明显差异,不同处理中硝化作用均主要发生在培养开始后的 14 天内。培养到第 7~14 天,硝化速率随养分浓度升高而升高,不同肥料处理间硝化速率差异明显,氮、磷、钾肥配施及复合肥的施用延缓了土壤氮素的转化速率。两种土壤类型之间,水稻土中氮素转化速率更快。

肥际养分浓度下环境因素(温度、含水量)对肥料氮素转化过程也有明显的影响。结果表明,温度和水分含量变化对土壤氮素转化速率的影响存在交互作用。在一定范围内,土壤硝化速率随水分含量和温度的升高而升高。另外,土壤硝化作用对温度变化的敏感性在不同温度和水分条件下有所不同。在低温过干或过湿的水分条件下,土壤硝化作用对温度变化更为敏感。

磷由肥际向土壤扩散与其转化过程密不可分,而这又因所施磷肥品种及土壤类型而异。磷酸二氢钙在石灰性潮土肥际的固定作用更强,这种作用强烈抑制了肥料磷由肥际向土壤的迁移扩散,90%以上的水溶性磷局限于肥际 0~20 mm。磷酸铵盐,尤其是磷酸二铵的迁移能力显著高于磷酸二氢钙。

培养温度、水分和时间等因素对磷在肥际的转化及迁移均有一定的影响,但主要是影响反应的进程,而且影响幅度有限。随着温度的升高、时间的延长和土壤水分的增加,可小幅度促进磷的迁移,但也显著增加了土壤对水溶性磷的固定。温度升高有利于黑土中  $\text{Ca}_8\text{-P}$  和  $\text{Fe-P}$  的形成,淹水较非淹水条件下容易引起土壤铁的还原,加剧磷的固定。

肥际微域由于肥料养分的浓度高,不同肥料养分之间的交互作用也更为强烈。而且肥际养分的交互作用因不同土壤、肥料的种类和特性而异。潮土中尿素与磷酸二氢钙共施显著降低了肥际水溶性磷的含量,而硫铵的作用则正好相反。红壤中钾肥较铵态氮肥对磷的转化影响较大,尿素与铵态氮肥对磷的影响也不一样。固定铵钾能力较强的水稻土肥际微域中铵态氮肥对钾的影响,涉及交换性位点、非交换性位点的竞争,并最终影响钾的迁移。红壤肥际磷钾的交互作用则主要是磷肥与土壤的反应促进了磷钾的化学固定。

肥际养分转化的系列研究结果表明,肥际养分浓度高,微环境与普通土体也显著不同,因而养分与土体的反应过程与普通土体也大不一样。但如何对此过程进行调控则具有极大的挑战性。养分交互作用的研究结果显示,不同肥料搭配显著影响肥际养分的转化、吸附及迁移过程,一定条件下通过改进肥料形态之间的搭配来促进肥料养分的迁移,并提高肥料养分的生物有效性是可行的。但通过在肥料中添加其他物质来调控肥际养分的转化和迁移过程则具有一定的难度。仅改变肥际微域中的环境条件,而不改变距

肥际较远处环境条件, 仍然不足以对肥料养分的转化及迁移过程产生显著的影响。要实现肥际和非肥际过程的共同调控, 则需要使用土壤改良剂, 而不是肥料改良剂。施肥位点变化与作物根际养分有效供给之间关系的研究结果表明, 一定条件下肥料养分形态转化的调控远不及施肥位点和施用方式的作用明显。由于肥料养分的迁移能力总是有限的, 如何实现根区施肥将是未来提高肥料当季利用率的最关键步骤。这也是未来实现高效施肥, 进一步提高肥料利用率的必然措施。

### 1.1.2 根际养分转化与根层调控

根际是受植物根系生长活动影响, 在物理、化学和生物学特性上不同于原土体的特殊土壤微域, 是植物-土壤-微生物及其环境相互作用的场所 (Marschner, 1995)。从1904年德国科学家 Hiltner 提出根际的概念并发表了根际微生物数量大于土体微生物数量的论断以来, 根际研究迄今经历了100多年的时间。揭示根际养分的转化过程是优化植物-土壤体系中物质循环及养分投入、进行根层调控、提高养分利用效率, 并促进农业可持续发展的重要基础性研究领域。

由于根系生长在土壤中, 无法直接观察和触及, 给根系研究造成了很大困难。又由于植物生长过程的复杂性和根系生长环境的高度时空变异性, 在很大程度上限制了对植物根系生长过程和根际土壤过程的系统研究。已有的大多数根际过程研究都是在控制条件下进行的模拟实验, 不能真实反映土壤中的实际过程。在集约化生产地区大量化肥投入虽然提高了作物生产力, 却导致一系列资源环境问题频发。控制根际养分供应, 使之既能满足作物高产需求, 又不致过量造成环境风险, 达到减施增效的目的, 是我国农业科学家面临的科学问题。课题组主要针对我国集约化农业生产条件下的根际养分转化与根层调控过程开展以下三个方面的研究: 作物根系生长和根际养分转化、作物根际生物互作对养分有效性的影响以及提高养分高效利用的根层调控途径。通过研究揭示我国集约化农业生产体系中作物根际过程对氮磷养分转化与作物高效吸收利用机制, 为实现农田氮磷养分供应与作物吸收的协调、保证可持续的高生产力农田生产提供理论基础和技术支持, 为实现项目肥料减施20%~30%与农田可持续利用的总体目标, 从养分供应时空同步的根际效应机理方面提供理论依据和技术途径。

#### 1. 作物根系生长和根际养分转化

以玉米、小麦为主要对象, 研究作物的需肥特性及其根系在土壤中生长和分布规律, 以及作物根系对土壤养分的活化。

根系生长及养分吸收受地上部调控 (Peng et al., 2010)。以玉米为例, 随玉米拔节后至乳熟前地上部干物质积累急剧上升, 根系干重和根系养分吸收量迅速增加, 根系生长在生殖生长初期达到最大值, 随后逐渐衰老。根系的这种生长模式可以满足植物营养生长阶段养分吸收速率高, 随后在生育后期使养分从根系向穗转运的特征。结果证明, 玉米根系在生殖生长阶段的快速死亡并非是程序化过程, 而是与田间条件下的土壤生物矿化有关 (Niu et al., 2010)。

作物根系对土壤养分的活化主要是指对土壤磷的活化。土壤中氮的矿化及无机氮的

形态转化并不是通过根系的直接作用,而主要是通过微生物的间接作用完成的。由于在玉米根鞘形成过程中有大量的根系分泌黏液参与,为微生物的生长提供碳源,促进根鞘中氮素的矿化,又由于根鞘分布于根系的成熟区域,这部分根系的吸收能力较弱,导致根鞘中的矿质氮( $N_{\min}$ 值)明显高于土体土壤,相反由于根系的吸收,根际土壤中的 $N_{\min}$ 值低于土体土壤(Ma et al., 2011)。

在缺磷条件下,植物能够通过根系形态或生理变化来适应缺磷环境,如增加质子或有机酸以及磷酸酶的分泌等。在田间供磷充足条件下,华北和东北不同试验点的多年研究表明,在玉米不同生育时期,根际土壤的 Olsen-P 并没有出现明显耗竭。这一结果与在模拟条件下的缺磷环境中所获得的根际磷耗竭的结果完全不同。研究还发现,根际与非根际土壤中不同形态无机磷组分之间没有明显差别。说明在田间供磷充足条件下,具有须根系的玉米主要通过增加根系生长扩大与土壤的接触范围来获得更多的土壤磷。

## 2. 根际生物互作与养分有效性

丛枝菌根(Arbuscular mycorrhiza, AM)真菌是重要的土壤微生物,在陆地生态系统中的分布极其广泛,能够与绝大多数高等植物根系形成共生。然而,对于集约化农田生态系统中 AM 真菌的种群分布和群落组成,以及养分吸收功能的认知仍十分缺乏,限制了其在农业生产实际中的应用。本节主要介绍高产玉米生产体系土壤中 AM 真菌群落组成的时间和空间分布特征及其磷吸收的功能,以及根际土壤氮、磷相关功能菌群的作用。

高产玉米土壤中 AM 真菌能大量侵染玉米根系,侵染率达 50%~70%。从十二叶期到吐丝期,丛枝丰度、土壤中的菌丝密度和 AM 生物标记磷脂脂肪酸含量(尤其是 C16:1cis11)高于其他时期,这与玉米在这一生长时期对磷的需求量高一致。AM 真菌根外菌丝的生物量随土层深度的增加而显著下降,然而菌丝密度和 C16:1cis11 的时间动态变化也出现在较深的土层,表明 AM 真菌仍然具有从深层土壤中吸取养分的潜力。

在河北曲周的玉米试验土壤中共鉴定出 27 种,隶属于 5 个属的 AM 真菌种类。其中 5 种属于无梗囊霉属,19 种属于球囊霉属,内养囊霉属、巨孢囊霉属和盾巨孢囊霉属各 1 种。*Glomus aggregatum*、*Glomus claroideum*、*Glomus etunicatum*、*Glomus geosporum* 和 *Glomus mosseae* 等种在玉米各生长时期均有出现,并且具有较高的相对丰度,因而被认为是优势种。

在农田生态系统中发现的 AM 真菌是否具有磷吸收功能?课题组在田间玉米根内检测到 AM 真菌碱性磷酸酶和酸性磷酸酶活性,说明在田间条件下,玉米根内的 AM 真菌中依然存在有多聚磷酸盐的分解过程(van Aarle et al., 2002)。碱性磷酸酶主要存在于 AM 真菌的根内菌丝和菌丝圈(P 型丛枝)中,酸性磷酸酶主要发现于根内菌丝中。

多聚磷酸盐(Poly P)只存在于被 AM 真菌侵染的根系中(Rasmussen et al., 2000)。本研究在大田玉米根系中发现了多聚磷酸盐,说明在田间条件下 AM 真菌仍然

能够帮助玉米吸收磷素。通过在玉米田间埋管分室隔网试验,发现玉米生长前期菌丝生长室内的菌丝密度和土壤 Olsen-P 耗竭量呈正相关关系(刘柯,2009),说明菌丝能够活化吸收土壤中的磷。上述结果挑战了集约化农田菌根真菌作用不大的传统观点,表明在集约化玉米生产体系中仍存在大量活性菌根真菌,且菌根真菌可吸收土壤中的养分。

### 3. 提高养分利用效率的根层调控

根际过程的强度高度依赖于植物的营养状况,这为通过外部养分调控强化根际效应,最大化作物根系对养分的利用潜力提供了重要理论依据。养分调控技术包括3个方面:养分供应强度、养分供应成分与养分供应位置。通过养分调控技术,论述集约化生产条件下的根际调控原理,研究不同根层调控与养分利用率的关系。

研究表明,局部氮磷施用在生长前期显著促进了玉米根系生长,调控区域的根长密度与对照相比有显著提高。同时铵态氮肥降低了根际土壤 pH,进而提高土壤和肥料磷的有效性,促进玉米对磷的吸收利用(Zhang et al., 2010)。因此,养分局部调控使玉米氮磷的养分吸收得到显著提高(Jing et al., 2010)。这种根际调控尤其对于早期低温条件下提高玉米抗逆性,促进养分吸收具有重要作用。

植物有其自身的生长发育规律。以玉米为例,整个生育期的地上部干物质累积呈“S”形曲线变化,氮素的积累也呈现类似的变化。这意味着,在玉米苗期并不需要太多养分,适量缺氮会刺激根系生长,反而基肥施用过多会抑制根系生长,同时增加淋失风险。但拔节后为保证土壤氮素的供应强度,需要追肥,这时缺氮不仅影响植株生长,更重要的是影响生殖生长器官的发育和建成。通过多年田间试验证明,减少基肥用量完全能够保证玉米苗期的生长发育,只要适时足量追肥,就能够保证玉米产量。与优化施肥相比,农民习惯性过量施肥并不能继续增加产量,氮素吸收量也没有增加。结果必然增加了氮素在土壤中的累积。

总之,在集约化农业生产中,通过集成作物根系养分活化和根层局部养分调控技术,在控制总量的前提下,保证养分供应与植株需求的时空同步,就能在保证产量的前提下,大幅度减少化肥的投入,提高养分利用率,减少施肥造成的环境污染的风险。

#### 1.1.3 作物养分吸收转运与高效利用

土壤高强度利用和化肥大量投入是支撑我国粮食生产最重要的因素之一,是农业生产最大成本,并将在长时间内不会改变。随着氮磷化肥施用量的连年增加,单位肥料的报酬递减;相应的肥料超量投入对环境的负面影响已经不容忽视。因此,研究在持续高产条件下,减少肥料投入量、提高肥料利用率的原理和技术途径,是保障我国粮食安全和农业可持续发展的重大国家需求。在土壤-植物的协作体系中,减施化肥,提高肥料的利用效率,不外乎以下几种必由途径和关键环节:①基于土壤单元所采取的调控措施;②探明作物对氮磷养分的需求,按需施肥;③作物本身高效吸收利用氮磷养分机制调动。

因此,以我国高产目标要求下肥料高量投入、氮磷非均匀供应和农田高强度利用的现状入手,以水稻、玉米和小麦等重要作物为研究材料,围绕作物关键生育期对氮磷养

分的需求规律、根系响应和养分高效利用机制等科学问题,利用植物营养学、分子生物学、生理学等技术手段,深入研究作物对氮磷需求的临界阈值,定量作物氮磷临界阈值与适宜施肥量之间的指标关系,为肥料的合理减量和养分供应保障提供科学的定量依据,同时为项目中精准施肥研究策略的制定,提供定量指标接口;在机理性研究中,阐明氮磷非均匀供应下作物的弹性响应、调控机制及其与氮磷高效型作物高效吸收利用氮磷肥料之间的内在联系,揭示氮磷非均匀供应下作物对氮磷的高效吸收利用机理。在此基础上,构建氮磷吸收利用高效型转基因植物,通过对作物的定向改造,探索增强作物吸收氮磷养分的分子生物学途径在提高肥料利用率的实际可行性和实际效果,为集约化栽培区减施化肥用量提供科学依据和技术途径。

本研究涉及多学科的研究内容,有些是植物营养学理论与技术研究的新兴前沿,具有先进的独创性和宝贵的科研价值:首先,深入研究植物对养分的高水平供应和非均匀供应的弹性响应和高效利用机制,在研究角度和内容上具有创新性;其次,利用电生理技术、分子生物学研究手段和遗传突变体材料来研究养分高效吸收利用机制,在研究技术和手段上是先进的;此外,以土壤-根系统为研究单元,研究根际环境对根内基因表达调控的影响机制,是国内外尚未开展的研究内容。

### 1. 作物氮磷需求的临界阈值

通过大田试验和盆栽试验,研究主要作物水稻、小麦和玉米不同生育期对土壤氮磷养分供应的需求规律,探讨过量施肥对作物的负面响应,在此基础上建立作物氮磷需求临界阈值的研究方法体系及其与适宜施肥量之间的关系,并确定土壤与植株养分阈值的敏感指标,为肥料的合理减量、养分供应保障和根区施肥调控提供科学的定量依据。

小麦、水稻的产量效应、植株氮磷累积量与施氮量之间呈较好的二元曲线关系,通过回归方程可求得最高产量施氮量和高产水平下的植株氮、磷需求临界阈值。该阈值比当地习惯施氮量减少 20%~30%。同时确定了小麦、水稻、玉米不同生育期的植株敏感指标。

### 2. 非均匀供应下作物的弹性响应

通过设计水稻根系对氮肥非均匀供应的弹性响应和根际溶液养分水平的研究,阐明了氮肥非均匀供应下作物的弹性响应、调控机制及其与氮高效型作物高效吸收利用氮肥之间的内在联系,揭示氮肥非均匀供应下作物对氮磷的高效吸收利用机理。我们的研究证明,不同水稻品种的氮素利用效率存在基因型差异,该差异是由相关关键基因的功能决定的。比如,氮高效品种‘桂单 4 号’较低效品种‘南光’具有较强的吸氮能力和硝态氮响应能力,其主要原因是‘桂单 4 号’根系在低氮或者缺氮条件下 *OsGln1*;2、*OsGln2*、*OsGlt1*、*OsGlt2*、*OsGlu1* 和 *OsNRT2.1* 的表达高于‘南光’,同时 GS 和 GOGAT 活性高于‘南光’。我们的结果也暗示这些与氮有关的基因可能主要在低氮下发挥作用,即在低氮下的表达更能够反映其对水稻氮效率的贡献。水稻对硝态氮的响应能力的高低可能是评价水稻氮高效的一个指标,对氮的高效吸收利用机理的探讨有着不

可低估的作用。水稻根系对铵态氮的吸收主要依托一组专门的铵转运系统 AMT。其中, *OsAMT1;1* 极可能为组成型表达的主效基因, 贡献率大约为 68%; 但该基因对土壤氮素丰缺基本没有响应, 因此对调控水稻根系吸收  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的潜力不大。而另一基因 *OsAMT1;2* 在根中的表达受缺氮和高氮条件强烈诱导, 因此该基因对增强水稻吸收  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的潜力具有重要意义, 可作为氮高效吸收型转基因水稻分子育种的优秀基因资源。水稻氮高效的另外一层含义是植株氮素的高效同化, 当外界供氮水平升高时 *OsGln1;1*、*OsGln1;2* 和 *OsGln2* 基因在叶片中的表达受到一定程度的诱导, 暗示这些基因在增强叶片同化无机氮能力中起作用。而在水稻根系中则主要通过编码 NADH-GOGAT 的基因 *OsGlt1* 和 *OsGlt2* 来同化水稻根系吸收的  $\text{NH}_4^+$ , 即 Fd-GOGAT 主要在叶中发挥作用, 而 NADH-GOGAT 主要在根中发挥作用。低浓度的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  可在一定程度上促进根系的生长, 而随着  $\text{NH}_4^+$  浓度的升高, 根系生长一直受到抑制, 表明  $\text{NO}_3^-$  不仅是一种氮源, 还是一个重要的信号调控物质。高铵对根系的抑制作用很可能是一种具有部位特异性的局部效应, 根尖是主要的感受位点, 根尖直接接触高铵是高铵抑制主根伸长的充要条件, 其深入的抑制机理独立于生长素和 ABA、乙烯等植物激素的运输和分配, 而与主根根尖特别是伸长区  $\text{NH}_4^+$  的外排密切相关, 并且 GMPase 对根中  $\text{NH}_4^+$  的外排具有直接或者间接的调控作用。

### 3. 增加作物氮磷吸收的分子调控

通过转基因植株创建和作物体内磷库容的稳态平衡及其分子调节研究, 阐明了增强作物吸收氮磷养分的分子生物学途径在提高肥料利用率方面的可行性和实际效果, 为探索肥料增效提供新的途径。成功构建了高效表达转录调控因子 microRNA399 的转基因番茄, 对其进行吸磷功能评价发现: 在高磷供应条件下, 组成型超表达植株对有效磷的吸收积累增加 3~5 倍, 并造成一定程度的磷中毒现象, 而改进的诱导型超表达可提升植株对低磷的吸收能力且高磷条件下不会导致磷中毒。转录调控因子 microRNA399 高效表达转基因番茄吸磷能力提高的机理可能是促进了根中酸性磷酸酶活性和质子分泌量, 从而增强了植株对有机磷和难溶性磷的活化能力, 另外也增强了植株磷酸盐转运子基因的活性, 促进根系对可溶性磷的吸收能力。

## 1.2 肥料养分与环境要素协同增效机理

### 1.2.1 有机无机肥料养分协同机理

有机无机肥料协同对作物的增产作用已有大量报道, 其对土壤物理 (土壤团粒结构、透水保肥性)、化学 (土壤有机碳、氮、磷、硫组分变化)、物理化学 (土壤胶体)、生物学 (土壤微生物区系及其多样性、生物活性、土壤动物、土壤酶活性) 等正效应已得到肯定。提高有机肥料中氮素的矿化 (释放) 和植物对氮的需求同步性, 是提高氮肥利用率的一个重要方法。研究发现, 有机肥料氮素效果可以延续到 3 或 4 季作物, 有机肥主要通过影响磷的吸附和解吸提高磷素有效性。微生物是养分物质循环的强大推动

者,直接驱动土壤养分转化与循环过程,土壤养分的生物转化机制是最具活力的研究领域。有关有机无机互作对土壤生物功能的影响以及有机肥料部分替代无机肥料的养分当量与替代率尚未开展系统深入的研究。

化肥具有施用简便、养分释放快等优点,我国农业生产中化肥用量巨大,然而我国化肥利用效率低,长期大量施用化肥既浪费了大量肥料养分和不可更新资源,又影响生态环境质量,加强化肥养分管理和防止土壤肥力退化是农业生产的重要内容。我国农业每年产生大量有机废弃物,含有相当于我国化肥产量的养分资源,处置不当同样会造成生态环境问题,资源化利用这些有机废弃物,将其制成有机肥,返还土壤,也是当前我国农业可持续发展亟待解决的问题。施用有机肥既可提供作物必需的多种养分元素,也有利于土壤有机质更新和积累,提高土壤肥力。

有机肥和化肥因拥有各自的特点而不可完全替代,为了发挥化肥和有机肥的优势,近20年来有机肥与化肥协同施用已成为施肥理论和应用研究最热门的领域之一。大量研究表明,有机无机肥料配合施用可以促进作物的生长和产量形成,提高土壤有机质和养分含量,改善土壤的生物活性,协调土壤养分的供应过程,提高肥料养分的利用率,减少农业生产活动对生态环境的影响。近年来对有机无机肥料协同机制研究,加速了有机肥料产业的发展和有机肥产品的推广应用。新型有机肥主要包括商品有机肥、有机无机复混肥、微生物有机肥、堆肥生防剂等肥料产品。肥料品种的变化,使施肥活动同时兼顾作物生产、土壤改良和资源循环利用的目的,在促进作物增产、减少化肥投入、提高土壤肥力和肥料利用效率、改善生态环境、发展新型肥料产业和低碳经济等方面具有重要进展。

有机无机肥料协同效应的关键过程是由土壤微生物活动主导的养分转化过程。影响土壤微生物活动的关键因子包括有机物料中氮的质量分数和C/N、碳源的有效性以及土壤环境因子如土壤水分和温度的变化、作物根茬和根际产物(如根系分泌物、黏胶物质、脱落细胞等)等以及施肥类型和方式。虽然土壤微生物生物量碳和氮通常仅占土壤碳和氮库的1%~5%,但土壤微生物生物量周转速度很快。施肥后相当数量的肥料氮当即被微生物所同化,之后微生物同化的氮又释放出来成为植物可利用的有效氮。深入研究土壤微生物对土壤氮素吸收、固持、释放、再固持、再释放过程及其动态变化特征,对提出减少土壤氮素损失、提高肥料氮素利用效率措施十分必要。

我们对长期施用不同肥料处理的水稻土研究表明,在水稻整个生长季内,土壤微生物生物量氮总体上以化肥配施有机肥处理的最高,单施化肥处理的次之,不施肥处理的最低。不同有机肥与化肥配合施用,土壤微生物量氮含量有显著差异。土壤微生物生物量氮在水稻生长季节内变化趋势为先增加后降低再增加。水稻移栽后土壤微生物生物量氮迅速增加,抽穗期较低,到稻成熟时土壤微生物量氮含量有所增加,微生物生物量氮有利于满足作物旺长期对氮素养分的大量需求,并减少氮素损失。

土壤团聚体是以土壤有机无机复合体为基础,在有机无机胶结物质的作用下形成的,是衡量土壤物理性质好坏,表征土壤肥力的一个重要指标。我们对长期施用不同肥料处理的潮沙土研究表明,长期有机无机配施显著提高了2.0~5.0 mm和1.0~2.0 mm水稳性团聚体的数量,而降低了0.25~1.0 mm及<0.053 mm水稳性团聚体的

数量,在1.0~5.0 mm 粒级,有机无机配施处理水稳性团聚体含量显著高于化肥与对照处理,有机无机配施对>5.0 mm 及0.053~0.25 mm 水稳性团聚体数量影响不大;不同有机无机配比间水稳性团聚体分布差异不明显。经过长期施肥后,土壤团聚体平均重量直径(MWD)发生显著变化。MWD 值以不施肥对照最低,施化肥处理次之,施有机肥处理最高,而且随有机肥配施比例增加。因此长期有机无机配施有利于提高土壤团聚体颗粒大小,改善土壤团聚体的基本组成,优化土壤结构性能,体现了长期土壤培肥的作用与效果。所有粒级水稳性团聚体全碳、全氮含量均表现为有机无机配施处理显著高于化肥处理及对照;随着有机肥配施比例增加,土壤水稳性团聚体全碳、全氮含量表现增加的趋势,其中配施70%有机肥处理在2.0~5.0 mm、0.25~1.0 mm 及0.053~0.25 mm 三个粒级显著高于配施30%和50%有机肥的处理,其他粒级不同有机无机配比间水稳性团聚体全碳、全氮含量差异不明显。

我们对江苏省常熟市水旱体系的研究表明,有机肥与化肥配合施用能够获得与单施化肥处理相当的当季作物产量。有机肥料氮替代部分化肥氮能够促进水稻对氮素的吸收,同时能够使土壤获得较为平稳的氮素供应过程。有机肥料原料来源丰富,不同有机肥料的氮含量和碳氮比例也各不相同,因此有机肥替代部分化肥需要确定合适的替代比例。然而,由于作物种类、品种、土壤类型和施肥方式不同,很难确定有机肥替代部分化肥的最适比例。

微生物有机肥将功能微生物与堆肥融为一体,具有明确的功能,能够解决具体土壤问题,因此为定向调控土壤微生物群落提供了有效的途径。课题组对微生物有机肥的功能进行了大量研究,与施用普通有机肥或用功能菌悬液接种土壤相比,施用微生物有机肥对作物增产和土传病害防治效果更好,施用微生物有机肥对根际土壤微生物群落结构有显著的调控作用。这些研究为进一步应用微生物定向有机肥修复问题土壤,提高土壤质量,增加作物产量提供了理论依据。

### 1.2.2 肥料养分与环境要素协同增效机理

肥料利用率不仅取决于作物和土壤的特性,还受到水分、光照、温度等环境要素的显著影响(Fageria and Baligar, 2005; Brouder and Volenec, 2008; Gonzalez-Dugo et al., 2010)。国内外对环境要素影响土壤养分迁移转化和作物养分吸收利用等方面已做了不少的研究,而关于养分与特定栽培模式下环境要素的协同效应研究仍然比较薄弱。我国各地土壤和水热条件差异明显,影响肥料养分转化、吸收、利用的主控因素各异,因此,如何根据不同栽培模式下的主控环境要素对土壤养分转化和作物养分吸收的影响机制,探索不同区域养分和环境要素的调控原理,与我国农业生产实际相结合,建立特定栽培模式下优质、高产、高效、生态、安全的养分与环境要素综合管理技术体系,是提高肥料利用率、减少肥料施用量、保护生态环境的重要措施。为此,我们以集约化东北平原、华北平原、长江中下游地区的玉米单作、玉米-小麦轮作、稻-麦轮作、稻-稻轮作和设施栽培蔬菜等代表性栽培模式为对象,研究养分与水分、温度等主控环境要素相互作用的土壤化学、生物学和植物生理学过程,探讨养分与环境要素协同增效机制,提出特定栽培模式下高效施肥原理和调控技术,以期充分发挥养分与主控环境要素协同