



农业重大科学研究成果专著

MECHANISM AND APPROACHES FOR HIGH
EFFICIENT USE OF NUTRIENT RESOURCES

周卫 艾超 等著

养分资源高效利用 机理与途径



科学出版社

农业重大科学研究成果专著

养分资源高效利用机理与途径

**Mechanism and Approaches for High Efficient
Use of Nutrient Resources**

周 卫 艾 超 等 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书系统总结了国家重点基础研究发展计划(973 计划)“肥料养分持续高效利用机理与途径(2013—2017 年)”的研究成果。相关研究得到了国家重点研发计划项目(2016YFD0200100)、国家水稻产业技术体系和中国农业科学院科技创新工程的资金支持。主要内容包括氮肥损失阻控与高效利用机理,磷肥增效的化学/生物学调控机理,畜禽有机肥氮磷生物转化与促效机制,秸秆还田碳氮互作提高化肥利用率机制,农田养分协同优化原理与方法,肥料养分持续高效利用途径及模式等 6 方面。

本书可供农学、土壤学、植物营养学、肥料学、环境与生态学领域的科研和教学工作者、研究生、农技推广人员、肥料企业从业人员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

养分资源高效利用机理与途径 / 周卫等著. —北京: 科学出版社, 2018.11
(农业重大科学研究成果专著)

ISBN 978-7-03-054432-2

I. ①养… II. ①周… III. ①化学肥料—施肥—研究 IV. ①S143

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 221022 号

责任编辑: 罗 静 / 责任校对: 王晓茜 严 娜

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 刘新新

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>

北京虎彩文化传播有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 11 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2018 年 11 月第一次印刷 印张: 33

字数: 780 000

定价: 248.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《养分资源高效利用机理与途径》著者名单

主著：周 卫 艾 超

著者：（以姓氏笔画为序）

马进川	王火焰	王玉军	王秀斌	仇少君
尹 斌	艾 超	卢昌艾	申亚珍	申建波
冉 炜	刘光荣	刘迎夏	刘晓伟	许卫锋
孙 刚	孙静文	李 俊	李 慧	李双来
李书田	李忠佩	李春俭	李海港	杨俊诚
吴 萌	串丽敏	何 萍	何文天	汪 洪
张 倩	张水清	张文学	张建峰	张俊伶
张勇勇	林咸永	金 梁	金继运	周 卫
单玉华	封 克	赵士诚	胡 诚	侯胜鹏
姜 勇	姜慧敏	倪吾钟	徐芳森	徐新朋
郭世伟	郭腾飞	黄启为	黄建国	黄绍敏
梁林洲	梁国庆	窦晓琳	魏 丹	

前 言

肥料是国家粮食安全的重要保障，对粮食增产的贡献占 40%~50%。我国集约化农业肥料利用率低，氮肥利用率仅为 30%~35%，磷肥为 10%~20%。同时，我国丰富的畜禽有机肥和秸秆资源未能被充分利用。大量的肥料养分通过不同损失途径进入环境，已成为水体富营养化、饮用水硝酸盐污染及温室气体排放的重要来源。目前，制约肥料养分高效利用的因素主要是，氮肥在土壤中易于损失，适宜的缓控释氮肥种类较少，氮肥高效施用方法缺乏；土壤对磷肥固定强烈，磷素活化困难；有机无机肥料互作促效未能充分发挥；肥料施用盲目性大，缺乏协同优化的肥料推荐方法。因此，突破制约肥料养分高效利用的科技瓶颈，最大限度地提高肥料利用率，减少施肥造成的生态环境问题，增强高强度利用农田粮食生产能力，是我国当前及今后的重大战略需求和科学命题。

围绕肥料养分高效利用，科技部先后启动了两期国家重点基础研究发展计划(973 计划)，第一期项目“肥料减施增效与农田可持续利用基础研究(2007—2011 年)”，第二期项目“肥料养分持续高效利用机理与途径(2013—2017 年)”，本书即第二期项目研究工作的系统总结。该项目紧紧围绕无机肥料氮磷养分无效化阻控与增效机理、有机肥料氮磷生物转化与碳氮互作机理、农田氮磷钾养分协同优化原理与方法等三个关键科学问题，从氮肥损失阻控与高效利用机理、磷肥增效的化学/生物学调控机理、畜禽有机肥氮磷生物转化与促效机制、秸秆还田碳氮互作提高化肥利用率机制、农田养分协同优化原理与方法、肥料养分持续高效利用途径及模式等 6 方面开展研究，目标是构建肥料养分持续高效利用的理论、方法和技术体系，为集约化农业化肥减施提供理论和技术支撑。项目由周卫研究员担任首席科学家，组织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、南京农业大学、中国农业大学、浙江大学、扬州大学、西南大学、江西省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所、湖北省农业科学院植保土肥研究所、河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所、黑龙江省农业科学院土壤肥料与环境资源研究所等单位组成项目组，开展了系统深入的研究。通过 5 年共同努力，项目取得了可喜的进展。同时，相关研究也得到了国家重点研发计划项目(2016YFD0200100)、国家水稻产业技术体系和中国农业科学院科技创新工程的资金支持。

在本书写作过程中，我们力求数据可靠、分析透彻、论证全面、观点客观。由于水平有限，对于书中的不足之处，切望读者批评指正！我们真诚感谢科技部 973 计划的资

助，感谢项目咨询专家组周健民研究员、李保国教授和喻子牛教授的大力指导！感谢项目专家组赵其国院士、朱兆良院士、刘旭院士、金继运研究员、沈其荣教授、张玉龙教授、李晓林教授和徐芳森教授的大力指导！感谢为本书研究成果做出贡献的所有研究人员和技术支撑人员。



2017年9月

目 录

第 1 章 总论	1
1.1 引言	1
1.2 无机肥料增效机理	2
1.2.1 氮肥损失阻控与高效利用机理	2
1.2.2 磷肥增效的化学/生物学调控机理	4
1.3 有机肥料促效机制	5
1.3.1 畜禽有机肥氮磷生物转化与促效机制	5
1.3.2 秸秆还田碳氮互作提高化肥利用率机制	7
1.4 养分协同优化方法	8
1.4.1 农田养分协同优化原理与方法	8
1.4.2 肥料养分持续高效利用途径及模式	11
1.5 重要结论与创新	14
1.6 未来研究	15
参考文献	16
第 2 章 氮肥损失阻控与高效利用机理	19
2.1 根区施肥氮素高效利用机理	19
2.1.1 根区施肥的概念及原理	19
2.1.2 根区高浓度养分促进作物生长机理	21
2.1.3 局部土体养分供应促进作物生长机理	23
2.1.4 根区养分供应减少养分损失机理	26
2.2 缓控释氮肥创制与高效利用机理	30
2.2.1 缓控释氮肥的发展趋势	30
2.2.2 基于功能性材料的缓控释氮肥创制	33
2.2.3 生化抑制剂型缓释氮肥创制	55
2.2.4 缓控释肥促进作物养分高效利用机理	78
2.3 基于肥际-根际协调的根区施肥原理	85
2.3.1 根区施肥肥际养分扩散与损失特征	85
2.3.2 作物对不同施肥方式和施肥位点的响应	88
2.3.3 肥际-根际协调的根区施肥技术优化	90
2.4 氮肥持续高效利用的限制因素与调控途径	91
2.4.1 氮肥持续高效利用的限制因素	91
2.4.2 氮肥持续高效利用的调控途径	93
参考文献	94
第 3 章 磷肥增效的化学/生物学调控机理	97
3.1 典型土壤磷素累积状况与释放潜力	98

3.1.1 我国土壤速效磷状况	98
3.1.2 磷肥施入土壤后的累积	99
3.1.3 典型土壤磷的培肥阈值与淋溶阈值	108
3.2 土壤微生物提高磷肥利用率机理	110
3.2.1 田间条件下菌根真菌对磷的活化利用机理	110
3.2.2 解磷微生物对土壤磷的活化利用效果	122
3.3 作物高效利用土壤磷的生物学机理	127
3.3.1 水稻高效利用土壤磷的生物学机理	127
3.3.2 玉米高效利用土壤磷的生物学机理	130
3.3.3 小麦高效利用土壤磷的生物学机理	152
3.4 磷肥持续高效利用的限制因素与调控途径	156
3.4.1 磷肥高效利用的限制因素	156
3.4.2 提高磷肥高效利用的调控途径	157
参考文献	168
第4章 畜禽有机肥氮磷生物转化与促效机制	174
4.1 畜禽有机肥施用下化肥的减施潜力	174
4.1.1 东北春玉米单作体系化肥减施潜力	174
4.1.2 华北小麦-玉米轮作体系化肥减施潜力	176
4.1.3 长江中下游小麦-水稻轮作体系化肥减施潜力	177
4.1.4 长江中下游双季稻连作体系化肥减施潜力	183
4.2 畜禽有机肥氮磷转化的微生物学机理	192
4.2.1 畜禽有机肥施用下土壤酶活性变化	192
4.2.2 畜禽有机肥施用下土壤微生物群落结构	197
4.2.3 畜禽有机肥碳转化微生物过程及分子机理	204
4.2.4 畜禽有机肥氮转化微生物过程及分子机理	211
4.2.5 畜禽有机肥磷转化微生物过程及分子机理	218
4.3 畜禽有机肥施用下土壤团聚体微生物学特征	227
4.3.1 土壤团聚体有机碳、氮分布	227
4.3.2 土壤团聚体酶活性变化	230
4.3.3 土壤团聚体微生物群落结构	234
4.3.4 土壤团聚体氨氧化微生物分异特征	244
4.3.5 土壤团聚体纤维素分解酶基因多样性	257
参考文献	263
第5章 秸秆还田碳氮互作提高化肥利用率机制	270
5.1 秸秆还田对农田土壤养分库容的影响	270
5.1.1 秸秆还田对农田土壤有机碳库容的影响	270
5.1.2 秸秆还田对农田土壤氮素库容的影响	280
5.1.3 秸秆还田对农田土壤磷素库容的影响	283
5.1.4 秸秆还田对农田土壤钾素库容的影响	286
5.2 秸秆降解过程中养分释放微生物学机理	288
5.2.1 秸秆降解过程中有机组分的变化	288
5.2.2 秸秆降解过程中的养分释放规律	292

5.2.3 秸秆降解中土壤酶活性变化	294
5.2.4 秸秆降解中土壤微生物群落结构变化	295
5.2.5 秸秆还田碳氮互作的微生物学机理	297
5.3 秸秆还田对碳氮微生物固持-释放的影响	308
5.3.1 秸秆还田下土壤微生物碳氮固持/释放特征	308
5.3.2 秸秆还田对作物氮素供应的影响	312
5.3.3 土壤肥力和氮素调控对微生物量碳氮固持与释放的影响	314
5.4 秸秆还田碳氮互作提高氮素利用率的途径	317
5.4.1 东北春玉米单作体系碳氮互作调控途径	317
5.4.2 华北小麦-玉米轮作体系碳氮互作调控途径	317
5.4.3 长江中下游小麦-水稻轮作体系碳氮互作调控途径	319
5.4.4 长江中下游双季稻连作体系碳氮互作调控途径	321
参考文献	323
第6章 农田养分协同优化原理与方法	325
6.1 水稻基于产量反应和农学效率的养分推荐方法	325
6.1.1 水稻养分推荐原理与研究方法	325
6.1.2 水稻养分吸收特征参数	328
6.1.3 水稻养分推荐模型	342
6.1.4 水稻养分专家系统评价	356
6.2 玉米基于产量反应和农学效率的养分推荐方法	361
6.2.1 玉米养分推荐原理与研究方法	361
6.2.2 玉米养分吸收特征参数	362
6.2.3 玉米养分推荐模型	373
6.2.4 玉米养分专家系统评价	385
6.3 小麦基于产量反应和农学效率的养分推荐方法	396
6.3.1 小麦养分推荐原理与研究方法	396
6.3.2 小麦养分吸收特征参数	396
6.3.3 小麦养分推荐模型	402
6.3.4 小麦养分专家系统评价	412
6.4 区域尺度养分系统优化原理与方法	417
6.4.1 区域尺度水稻养分推荐	418
6.4.2 区域尺度玉米养分推荐	419
6.4.3 区域尺度小麦养分推荐	421
参考文献	423
第7章 肥料养分持续高效利用途径及模式	432
7.1 典型农区土壤养分限制因素	432
7.1.1 全国土壤氮的时空变化	432
7.1.2 全国土壤有效磷的时空变化	455
7.1.3 全国土壤速效钾的时空变化	461
7.2 肥料养分高效利用技术集成	470
7.2.1 东北春玉米单作体系肥料高效利用技术集成	470
7.2.2 华北小麦-玉米轮作体系肥料高效利用技术集成	477

7.2.3 长江中下游小麦-水稻轮作体系肥料高效利用技术集成	480
7.2.4 长江中下游双季稻轮作体系肥料高效利用技术集成	495
7.3 肥料养分持续高效利用途径及技术	500
7.3.1 提高化肥利用率的途径	500
7.3.2 提高化肥利用率的关键技术	501
7.4 肥料养分持续高效利用模式	503
7.5 技术示范效果	511
7.5.1 根区施氮/缓控释肥示范	511
7.5.2 磷高效调控示范	511
7.5.3 氮肥有机替代示范	511
7.5.4 秸秆还田调氮示范	512
7.5.5 养分专家系统推荐施肥示范	512
7.5.6 集成技术示范	513
参考文献	513

第1章 总 论

1.1 引 言

养分资源高效利用机理与途径研究是实现农业资源高效利用的国家重大需求。我国以占世界 9% 的耕地养活了占世界 21% 的人口, 用去了世界 32% 的化肥(2010 年), 单位面积施肥量已达世界平均水平的 3 倍, 但利用率低, 氮肥当季利用率仅为 30%~35%, 磷肥 10%~20%。我国丰富的有机肥资源未能被充分利用, 畜禽有机肥还田率不到 50%, 秸秆养分直接还田率在 35% 左右, 浪费严重。同时, 我国还面临能源和肥料资源短缺问题, 我国氮肥生产每年消耗能源折合 6545 万 t 标准煤, 约合 230 亿元, 可利用高品位的磷矿储量十分有限, 70% 以上的钾肥依赖于进口, 农业生产资源消耗代价巨大。《农业及粮食科技发展规划(2009—2020 年)》将化肥利用率作为我国农业及粮食科技发展的主要技术指标, 提出至 2020 年我国化肥利用率需提高 10%。近年来明确提出, 到 2020 年我国农业要减少化肥使用量, 实现化肥用量零增长。

养分资源高效利用机理与途径研究是维护国家生态环境安全的紧急需求。长期以来, 我国依靠化肥的大量投入, 提高产量, 全国有 17 个省区市的耕地平均氮肥用量超过了国际公认的上限(225kg N/hm^2), 有 4 个省份达到了 400kg N/hm^2 。大量的化肥氮通过不同损失途径进入环境, 已成为地表水富营养化、地下水和农产品硝酸盐富集及大气氧化亚氮的重要来源。我国南方过度使用氮肥, 导致土壤严重酸化, 部分农田已无法种植玉米、烟草和茶叶; 我国年产各类秸秆约 7 亿 t, 大量的秸秆被就地焚烧, 造成了严重的环境污染; 同时, 畜禽有机肥和秸秆的不合理施用增加了农田甲烷、氧化亚氮等温室气体的排放。我国肥料过量施用和养分不合理投放引起的生态环境问题, 先后在国际重要刊物 *Nature* 和 *Science* 刊出, 受到国内外的广泛关注。

养分资源高效利用机理与途径研究是保障国家粮食安全和农业可持续发展的战略需要。国内外大量研究证明, 粮食增产中化肥的作用占 40%~50%; 当前我国施肥效益不高, 每千克氮、磷、钾肥料养分所增产的粮食不及世界平均水平的 1/2、美国的 1/3, 我国肥料利用率低直接影响到作物持续增产。同时, 由不合理施肥引起的我国农田养分非均衡化、有机质下降、盐分表聚、结构性变差、生物功能下降等问题, 也直接影响到农业可持续发展。近年来, 我国农业生产方式朝着规模化、机械化、专业化和商品化方向快速转变, 不同形式的秸秆还田越来越普遍, 对肥料应用提出许多新的科学问题, 肥料养分高效利用基础研究必须服务于这一转变, 该研究也将为农业生产方式转变下提高肥料养分增产效果提供重要理论基础, 是实现全国新增 5000 万 t 粮食生产能力的重大国家需求。

目前, 制约肥料养分高效利用的因素主要是, 氮肥在土壤中易于损失, 适宜的缓控释氮肥品种较少, 氮肥高效施用方法缺乏; 土壤对磷肥固定强烈, 磷素活化困难; 有机

无机肥料互作促效未能充分发挥；肥料施用盲目性大，缺乏协同优化的肥料推荐方法。突破制约肥料养分高效利用的科技瓶颈，最大限度地提高肥料养分利用效率，减少由施肥造成的生态环境问题，增强粮食生产能力，既是世界性科技难题，又是我国当前及今后的重大战略需求和科学命题。针对我国特有的化肥高量投入和农田高强度利用集约化生产特点，如何高效利用肥料养分，保障作物持续增产和农田可持续利用，国内外尚无可以借鉴的理论和体系，必须结合国情开展创新研究。

在国家重点基础研究发展计划(973 计划)“肥料养分持续高效利用机理与途径”支持下，项目紧紧围绕无机肥料增效、有机肥料促效、养分协同优化等肥料养分高效利用的三个重要方面系统开展研究。通过氮肥损失阻控与高效利用机理、磷肥增效的化学/生物学调控机理研究，为氮肥和磷肥增效技术发展提供科学基础；通过畜禽有机肥氮磷生物转化与促效机制，以及秸秆还田碳氮互作提高化肥利用率机制研究，为有机无机养分互作提高化肥利用率提供理论依据；通过农田养分协同优化原理与方法，以及肥料养分持续高效利用途径和模式研究，为肥料高效利用和作物持续高产提供方法和技术支撑。通过上述三个方面研究，构建养分资源高效利用的理论、方法和技术体系，引领我国植物营养与肥料科学的快速发展。

1.2 无机肥料增效机理

1.2.1 氮肥损失阻控与高效利用机理

根区施肥是将适当用量和释放性能的肥料通过一定的施用技术施到植物根系分布区域，使肥料养分扩散范围与根系伸展范围达到最佳匹配的施肥模式。其核心是养分供应的浓度、数量、空间和时间与植株养分需求高度匹配。研究发现，稻田表施氮肥 30 天后，土壤表层的铵态氮含量最高，两种土壤铵态氮含量最高值超过 100mg/kg，但是该处理表层土壤铵态氮含量随施肥时间快速下降；与此相比，根区一次施氮方式下，施肥后 30 天时，施肥点周围土壤的铵态氮浓度仍然高达 1000mg/kg，显著高于同期的常规施肥，即使是在施肥 60 天后，施肥点周围的铵态氮浓度仍然在 400mg/kg 以上。可见根区一次施肥显著提高肥料养分的供应强度。另外从根区施肥后养分扩散的趋势和时间上看，根区一次施氮后铵态氮向施肥点两边扩散的距离为 5cm 左右。研究得出水稻苗期最适供氮浓度为 150mg/kg，玉米拔节期最佳供氮浓度为 100mg/kg，小麦在苗期施用氮肥 300kg/hm² 下产量最高；水稻根系 35%土体范围内供氮与全土体供氮效果相当，但显著节省氮肥；在土层 8~18cm，玉米根区施氮处理比氮肥撒施处理根系密度高 30%~50%；与普通撒施氮肥氨挥发损失率(15%~25%)比较，根区施肥将氨挥发损失率降低到 5%以下，并大幅提高根区土壤铵态氮和硝态氮浓度。

制备缓控释肥料功能性材料，主要包括纳米-亚微米级甲基丙烯酸羟乙酯混聚物、纳米-亚微米级废弃泡沫塑料-淀粉混聚物(N-PS)、纳米-亚微米级黏土-聚酯混聚物、纳米-亚微米级聚乙烯醇混聚物(CF2)、纳米-亚微米级腐殖酸类混聚物、纳米-亚微米级丙烯酸酯类混聚物、苯乙烯-丙烯酸酯混聚物等。研究发现，聚乙烯醇复合材料大分子胶团结

构表面呈球形,小分子胶团呈絮状,较均匀地分布于大分子胶团周围,胶团直径均小于100nm,材料的特殊结构增加了复合材料的比表面积和活性吸附点,从而增加了材料的团聚性能;对纳米-亚微米级黏土-聚酯混聚物分析发现,黏土的块状结构被解离成薄片状插入聚酯中,形成高分子络合胶团,黏土薄片厚度为10nm以内,薄片长和宽分别为150nm和60nm,每个薄片上络合了大分子物质,大分子物质胶团直径为10~120nm,这种特殊结构不但增加了功能材料的表面积,同时增加了活性吸附位点;纳米-亚微米级腐殖酸混聚物中,天然风化煤的疏松网状结构被解离成小颗粒状,颗粒大小在20~60nm,不但增加了其表面积,而且增加了裸露在表面的活性结合位点;纳米-亚微米级废弃泡沫塑料-淀粉混聚物复合材料在透射电镜下可观察到许多小孔,这种蜂窝状多孔结构是材料吸水及储存水分的场所,为养分缓释和水分保持提供条件。将纳米-亚微米级聚乙烯醇混聚物、纳米-亚微米级腐殖酸混聚物、纳米-亚微米级废弃泡沫塑料-淀粉混聚物、纳米-亚微米级丙烯酸酯类复合材料等4种植物营养功能性材料包膜的缓释肥按照不同比例掺混,可以满足小麦、玉米、水稻等3种大田作物的养分需求。

为研创生化抑制型氮肥,以脲酶抑制剂(*N*-丁基硫代磷酸三胺, NBPT)和硝化抑制剂(3,4-二甲基吡唑磷酸盐, DMPP)为材料,¹⁵N示踪微区试验表明,添加NBPT或NBPT与DMPP配施可以显著提高水稻地上部氮素回收率和土壤残留氮量。田间试验显示,与单施尿素处理相比,添加NBPT处理的氨挥发速率峰值降低27%,累积氨挥发损失量降低22%;NBPT与DMPP配施时,氨挥发速率峰值降低13%,累积氨挥发损失量降低13.6%;而只添加DMPP时,氨挥发速率峰值增加23.6%,累积氨挥发损失量与单施尿素的差异不显著。添加DMPP显著降低了N₂O的排放量,但水稻生长后期排放量剧增,尤其是添加抑制剂的处理增加幅度更大;添加DMPP或NBPT与DMPP配施可以显著减少施肥后21天内的N₂O排放量,而对总排放量无明显影响。添加1%的DMPP增产不显著,而添加1%的NBPT时,施氮量为135kg/hm²的籽粒产量最高,与农民习惯施氮(单施尿素180kg/hm²)相比,早、晚稻分别增产8.54%和12.87%,氮肥利用率分别提高6.78%和9.46%,节约氮肥25%;与单施尿素相比,添加NBPT时显著降低了分蘖期土壤中的脲酶活性与铵态氮含量,而显著提高了孕穗期土壤中的铵态氮含量;逐步回归分析发现,水稻分蘖期与孕穗期土壤中的铵态氮含量对水稻产量影响显著,而且对孕穗期的影响大于分蘖期,因此,添加NBPT节氮增产的主要原因是,其保持孕穗期较高的土壤铵态氮含量。

缓控释肥料施用及根区施肥是氮肥高效利用的重要途径。大量田间试验表明,与习惯施肥比较,水稻、小麦和玉米缓控释肥施用有不同程度的增产效果(2%~10%),节约氮肥20%~25%,提高氮肥利用率约10%;根区施肥中黑龙江玉米采用穴施,可节氮40%;河南小麦-玉米轮作采用沟施,施至10cm深下小麦籽粒产量最高,偏上3cm处理次之,比常规施肥分别增产21%和20%;湖北单季稻采用根区施肥,可节氮27%,增产20%;在长江中下游单季稻和双季稻根区一次施肥增产43%~50%,氮肥利用率从10%~20%提高到60%。根区施肥在当前生产实践中已有不同程度的实现,如机械深施、穴施、条施、滴灌施肥和营养钵育苗移栽等,其大幅度提高了肥料利用率,节肥增产。

1.2.2 磷肥增效的化学/生物学调控机理

利用重庆紫色土、祁阳红壤、杨凌塬土及哈尔滨黑土 4 个长期定位试验,研究作物产量与土壤供磷的关系,得出我国土壤磷应该控制在产量效应拐点与环境效应拐点之间。通过产量效应分析土壤有效磷(Olsen-P)阈值,夏玉米、冬小麦、水稻拐点的平均值分别为 21.4mg/kg、13.3mg/kg 和 10.9mg/kg,我国土壤有效磷平均超过 30mg/kg,可见提高磷肥利用率的关键是利用土壤中积累的磷;土壤全磷与 Olsen-P 之间的拐点被认为是培肥阈值,哈尔滨黑土、杨凌塬土、重庆紫色土、祁阳红壤磷培肥阈值分别为 0.44g/kg、1.32g/kg、0.51g/kg 和 0.56g/kg,阈值越高土壤固定磷素能力越强;土壤 Olsen-P 与 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 的拐点是土壤磷淋溶阈值,杨凌、祁阳、哈尔滨、重庆试验土壤的 Olsen-P 阈值分别为 39.9mg/kg、90.2mg/kg、40.2mg/kg 和 51.6mg/kg,高于此阈值,土壤磷易于淋溶损失。

研究土壤微生物提高磷肥利用率机理,发现施磷量对玉米根系菌根真菌侵染率有明显影响。随着供磷水平的增加,菌根真菌侵染率在供磷水平 $75\text{kg}/\text{hm}^2$ 时降至最低值,之后不再受供磷水平的影响。过量施用磷肥($300\text{kg}/\text{hm}^2$)并不能完全抑制菌根真菌的侵染。在玉米拔节和吐丝期,根内菌丝体酸性/碱性磷酸酶活性及根系 *Zmplt1;6* 的相对表达量在 0~20cm 及 20~40cm 土层中均以施磷量为 $75\text{kg}/\text{hm}^2$ 时达到最低值,并不再随着施磷量增加而降低;对收获的玉米根内丛枝菌根(AM)真菌典型片段测序,发现玉米根内 AM 真菌类群主要是 *Glomus*、*Funneliformis* 和 *Diversispora* 这 3 属。其中 97bp、116bp、141bp 等片段主要集中于 *Glomus* 和 *Funneliformis*,而 169bp 片段则主要属于 *Diversispora*;高磷通常抑制菌根真菌侵染和根外菌丝生长,适量磷水平可能促进菌丝生长,且在高磷区菌丝生长的抑制作用可在低磷区得到恢复;不同菌根真菌对宿主植物磷吸收的作用机理不同。接种 *Rhizophagus irregularis* 显著提高了碱性磷酸酶(ALP)活性,提高了植物对磷的吸收效率;而 *Glomus mosseae* 则主要通过根外菌丝的觅食作用,其主要功能可能是寻找新的宿主,推测根外菌丝的恢复力可能是集约化农业生态系统菌根功能得到维持的机理之一。

农田土壤里约 50%的可培养微生物具有活化磷的潜力。解磷细菌主要包括放线菌、 α -变形菌和厚壁菌等。解磷菌通过分泌 H^+ 、有机酸及磷酸酶活化土壤中的磷。在玉米拔节期,施磷处理厚壁菌丰度显著高于低磷处理,但对放线菌和 α -变形菌的丰度无显著影响。在吐丝期,施磷对三种解磷菌的丰度均无显著影响。厚壁菌和放线菌的丰度随着玉米生长期的延长而显著提高, α -变形菌的丰度受生育期的影响不显著。在采样时期,土壤 pH 和碱性磷酸酶活性是影响解磷菌丰度的主要因素。玉米苗期土壤微生物群落主要受 pH 影响,成熟期则受 ALP 影响;厚壁菌丰度对施磷水平和采样时期最敏感,其基因拷贝数与 pH 呈显著正相关关系,而与 ALP 呈显著负相关关系;长期施用磷肥影响放线菌群落结构,但对 α -变形菌和细菌的群落结构影响不显著。

植物适应低磷胁迫,一方面增加磷在体内的利用效率,另一方面增加从土壤中获取磷的能力。在水分胁迫及低磷胁迫下水稻根系质子分泌速率显著加快,促进根系伸长和磷的吸收;在河南小麦三个生育时期中酸性磷酸酶的活性均出现先升高后降低的趋势,扬花期活性最高。施磷使土壤中磷酸酶活性提高可能是由于根分泌物的释放促进微生物的生

长,以及在磷养分充足条件下根系生长旺盛,分泌的磷酸酶数量增加;低磷胁迫下,拔节期和吐丝期自交系‘478’根系增生出大量的细根,其通过增加根系对磷的获取能力来适应缺磷环境;除根系形态变化外,植物还通过分泌有机酸、质子和酸性磷酸酶及其他化合物等生理措施来直接或间接影响土壤磷的有效性,适应低磷胁迫。缺磷白羽扇豆和蚕豆根系明显增加质子分泌,显著降低营养液 pH,而玉米根系分泌 OH^- ,导致营养液 pH 上升。琼脂显色中白羽扇豆和蚕豆根际存在明显酸化现象,而玉米根际存在显著碱化现象;利用离子非损伤扫描电极技术对根尖 H^+ 流进行动态实时监测,证明在缺磷条件下,玉米不会增加根系的质子分泌;结合营养液培养和根箱土壤培养,测定玉米和豆科植物根表酸性磷酸酶活性的变化发现,白羽扇豆和蚕豆在缺磷时会增加根表酸性磷酸酶的活性,但玉米根表没有变化。根系有机酸分泌的结果也证明,缺磷条件下玉米并未增加有机酸的分泌。表明在低磷胁迫条件下,玉米主要通过增加根系形态学变化加以应对,没有表现出根系的生理适应性反应。生产上,在缺磷土壤上将蚕豆与玉米间作,蚕豆通过释放质子、有机酸和酸性磷酸酶能改善难溶性磷酸盐和有机磷源中磷的生物有效性,有利于增加蚕豆和玉米的产量。在将来的玉米育种中,选育大根系玉米对土壤无机磷吸收具有十分重要的意义,同时,生产上可以通过调整施肥方法或者肥料种类刺激根系生长,增加磷吸收。

在湖北荆门小麦-水稻轮作体系下,2014~2016 年各施磷处理的小麦产量、磷吸收量和籽粒磷含量显著高于不施磷处理。与当地习惯施肥比较,减施 30%+接种解磷菌+菌根真菌处理小麦产量不下降,接种解磷细菌或者双接菌促进了土壤中磷素活化及植物对磷的吸收;采用苯菌灵对低磷大田土壤中土著丛枝菌根真菌进行杀菌处理,比较原位接种丛枝菌根真菌 (*Glomus versiforme*) 和解磷菌 (*Pseudomonas* sp.) 对不同生育期玉米生长、磷吸收利用和产量的影响,显示苯菌灵能够有效地抑制土著丛枝菌根真菌对玉米根系的侵染,接种解磷菌和 *Glomus versiforme* 仅在玉米六叶期在根系生长上表现出协同效应,提高了玉米六叶期和成熟期的磷吸收;江西水稻在减少磷肥投入的条件下,结合干湿交替的水分处理,能够得到与正常灌溉条件下全量磷投入相似的水稻产量,从而达到提高磷肥利用率的目的;东北玉米苗期容易遭受低温胁迫,玉米覆膜条件下土壤温度高于不覆膜区,平均增加 2.7°C ,同时土壤湿度增加,苗期植株磷含量和吸收累积量显著提高。总之,磷肥减施并有针对性地配合使用不同调控措施,能够在不减产的前提下实现减少磷肥投入、提高磷肥利用率的目标,并降低由施肥造成的环境污染风险。

1.3 有机肥料促效机制

1.3.1 畜禽有机肥氮磷生物转化与促效机制

在东北春玉米单作体系,优化施肥下减氮 20%再用有机肥替氮 20%,玉米产量不下降。在华北小麦-玉米轮作体系,在推荐施肥量下,有机肥氮可替代 20%的化肥氮和 20%的化肥磷;与习惯施肥相比,在小麦季可减少 44%的化肥氮和 36%的化肥磷,在玉米季可减少 34%的化肥氮和 56%的化肥磷。在长江中下游小麦-水稻轮作体系,优化施肥下

减氮磷 20%再用有机肥替氮磷 20%，小麦和水稻产量高于习惯施肥或推荐施肥，氮肥利用率提高 10~20 个百分点，磷肥利用率提高约 10 个百分点。在长江中下游双季稻连作体系，优化施肥下减氮磷 20%再用有机肥替氮磷 20%，早稻和晚稻产量与习惯施肥相当，氮肥利用率提高约 10 个百分点，磷肥利用率提高约 30 个百分点。

研究发现，长期施用有机肥提高了石灰性潮土 α -葡萄糖苷酶、 β -木糖苷酶、 β -纤维二糖苷酶、乙酰氨基葡萄糖苷酶、 β -葡萄糖苷酶、磷酸酶和脲酶活性，而施用化肥对作物根际土壤大部分胞外酶活性具有抑制作用；长期施用有机肥显著提高了土壤磷脂脂肪酸 (PLFA) 总量，微生物群落结构也显著不同于化肥处理，有机碳、氮素和 pH 是影响 PLFA 总量和群落结构变异的重要因子；变形菌 (Proteobacteria) 是石灰性潮土的优势菌群之一，且有机肥促进变形菌的生长；小麦根际碳沉积分解转化过程中发挥关键作用的细菌类群为变形菌和放线菌 (Actinobacteria)，二者占整个 ^{13}C -根系分泌物标记微生物组的 70%；而根际酸杆菌 (Acidobacteria)、绿弯菌 (Chloroflexi)、厚壁菌 (Firmicutes)、拟杆菌 (Bacteroidetes) 主要参与土壤有机质的分解；石灰性潮土氨氧化过程主要由氨氧化细菌 (AOB) 主导，而不是氨氧化古菌 (AOA)，施用氮肥显著改变了 AOB 群落结构，有利于亚硝化螺菌属 (*Nitrosospira*) 第 3 和第 4 簇多样性的增加；而有机肥显著增加 AOA 数量，对土壤硝化潜势和 AOB 数量的影响小于化肥处理。小麦根系内部存在一个独特的反硝化过程。施肥后根系反硝化内生菌数量丰富，*nirK*、*nirS* 和 *nosZ* 基因数量均能达到 1.0×10^9 拷贝数/g 以上，且 $\text{N}_2\text{O}/(\text{N}_2\text{O}+\text{N}_2)$ 高于土壤部分。MiSeq 测序结果表明，根系中 *nirK* 型、*nirS* 型和 *nosZ* 型反硝化内生菌群落组成更加简单，多样性更低，其中 79% 集中分布在假单胞菌目、黄单胞菌目、伯克氏菌目、根瘤菌目和红细菌目。总之，长期单施化肥提高了石灰性潮土根际放线菌、硝化螺菌数量，尤其促进了 AOB 生长，加速铵态氮向硝态氮转化，但降低了土壤微生物多样性及根际胞外酶活性；而长期配施有机肥可增加根际绿弯菌、拟杆菌及厚壁菌数量，增加氨氧化古菌及反硝化基因数量，能够将施用化肥所改变的细菌群落向其初始的状态进行恢复。

团聚体作为土壤最基本的结构单元，是土壤肥力的物质基础，也是土壤碳氮转化的主要场所。土壤团聚体可分为大团聚体 ($>2000\mu\text{m}$)、粗砂 ($2000\sim200\mu\text{m}$)、细砂 ($200\sim63\mu\text{m}$)、粉粒 ($63\sim2\mu\text{m}$) 和黏粒 ($2\sim0.1\mu\text{m}$) 5 个粒径范围。与不施肥相比，有机无机配施处理显著提高了耕层土壤及各粒径团聚体的硝化潜势，其 AOB 丰度显著高于单施化肥处理。水稻季土壤的氨氧化微生物数量高于小麦季，施肥处理降低了土壤 AOA : AOB 的值，且以黏粒中最高。尽管 AOA 数量高出 AOB 数倍，但 AOB 群落结构对施肥及团聚体粒径的响应更为敏感。AOA 主导类群大多归属于奇古菌 I.1b 类群 (Thaumarchaeota Group I.1b)，AOB 主导类群大多归属于亚硝化螺菌属 (*Nitrosospira* Cluster 3a)；研究发现，参与纤维素转化的真菌糖苷水解酶 *cbhI* 基因和细菌糖苷水解酶 *GH48* 基因丰度随团聚体粒径、施肥处理变异显著，在细砂中最高、黏粒中最低，且在有机肥施用条件下丰度普遍增加。纤维素分解基因在腐殖化程度较低的粒径 ($>63\mu\text{m}$) 中较为丰富，这些组分土壤胡敏酸 (HA) 芳香度高、脂化度低、烷基碳：烷氧基碳值相对较低，而在腐殖化程度较高的粒径 ($63\sim0.1\mu\text{m}$) 中纤维素分解基因丰度较低。总之，有机无机配施显著降低了 $>2000\mu\text{m}$ 团聚体的比例，提高了 $2000\sim200\mu\text{m}$ 团聚体的比例，大粒径团聚体 ($>63\mu\text{m}$) 的碳氮含

量、碳氮水解酶活性、磷脂脂肪酸总量、氨氧化细菌丰度及纤维素分解相关基因丰度普遍高于小粒径团聚体(63~0.1 μm),有机无机配施处理下各粒径以上指标普遍高于单施化肥,显示其促进了土壤团聚体碳氮转化和养分循环。

1.3.2 秸秆还田碳氮互作提高化肥利用率机制

长期试验显示,秸秆还田显著增加黑土和潮土有机碳含量,对红壤碳储藏增加不显著;采用稳定碳同位素示踪发现,东北黑土长期秸秆还田配施无机肥(SNPK)能够增加土壤大颗粒团聚体(>250 μm)中土壤有机碳(SOC)储藏,同时可减少土壤小颗粒团聚体(<250 μm)中SOC储藏,大、小粒级的土壤团聚体的周转速率均有增加;秸秆还田显著增加黑土和潮土全氮含量,对红壤全氮增加不显著;其显著增加黑土全磷和有效磷含量,对红壤和潮土增加不显著;其对三种土壤全钾和速效钾影响均不显著。

农田氮素管理可以通过调节土壤有效氮水平而影响秸秆的腐解进程。水稻秸秆与小麦秸秆培养60d的累积腐解率分别为66.6%和46.7%,施氮处理两种秸秆的累积腐解率均高于不施氮处理,尤其明显缩短了小麦秸秆的腐解时间。土壤氮素水平和氮肥用量均影响秸秆固持氮素的总周转量。同一氮肥用量条件下,高肥力土壤的玉米秸秆氮素周转量较低肥力土壤高。高氮素土壤上,秸秆还田配施高量氮素时,不需要额外外源氮素来补充秸秆分解过程中所消耗和固持的氮素,但秸秆还田配施中量氮素时,仍需要额外外源氮素补充秸秆分解的氮素消耗。

秸秆分解中 β -葡萄糖苷酶和氨基肽酶起主导作用,而木糖苷酶活性较低;通过细菌高通量测序分析,发现秸秆分解中变形菌(Proteobacteria)、拟杆菌(Bacteroidetes)、放线菌(Actinobacteria)、绿弯菌(Chloroflexi)丰度及细菌菌群结构显著变化,不同细菌菌群在秸秆降解不同阶段作用不同,前期主要是拟杆菌起作用,后期主要是放线菌、绿弯菌起作用;对秸秆内真菌高通量测序分析显示出,在秸秆降解过程中子囊菌(Ascomycota)、球囊菌(Glomeromycota)、担子菌(Basidiomycota)、接合菌(Zygomycota)及未能鉴定的真菌菌群结构显著变化。在秸秆分解过程中真菌部分前期主要由担子菌起作用,而后期由接合菌和球囊菌起主要作用。

小麦-玉米轮作秸秆还田试验中,施氮显著提高了土壤氮素转化相关功能基因的丰度,如细菌*amoA*、*narG*、*nif*、*nirK*、*nirS*和*nosZ*基因。不同秸秆用量对土壤细菌*amoA*和*nirK*基因丰度没有显著影响,但高的秸秆还田量提高了*narG*和*nirS*基因丰度,减少了*nif*和*nosZ*基因丰度。*nirS*型反硝化细菌数量增加是由秸秆还田量提高了产黄杆菌(*Rhodanobacter*)和未分类的变形菌丰度所导致。

东北玉米单作体系中,与习惯施肥比较,秸秆还田下推荐施肥的氮肥基追比为1:1时产量不降低,氮肥利用率在50%以上,节省氮肥20%以上;华北小麦-玉米轮作体系秸秆还田下推荐施肥的小麦季和玉米季氮肥基追比为7:3时获得了最佳产量和氮肥利用率,节省氮肥20%~30%;长江中下游小麦-水稻轮作体系秸秆还田下推荐施肥的小麦季和水稻季氮肥基追比为8:2时产量和氮肥利用率最高,节省氮肥23%~27%;长江中下游双季稻连作体系秸秆还田下推荐施肥的早稻季和晚稻季氮肥基追比为(4:6)~(6:4)时获得了较高产量和氮肥利用率,节省氮肥20%左右。