

DOI: 10.11766/trxb202309070364

张伟, 陈轩敬, 马林, 邓燕, 曹宁, 肖然, 张福锁, 陈新平. 再论中国磷肥需求预测——基于农业绿色发展视角[J]. 土壤学报, 2023, 60(5): 1389–1397.

ZHANG Wei, CHEN Xuanjing, MA Lin, DENG Yan, CAO Ning, XIAO Ran, ZHANG Fusuo, CHEN Xinping. Re-prediction of Phosphate Fertilizer Demand in China Based on Agriculture Green Development[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(5): 1389–1397.

再论中国磷肥需求预测——基于农业绿色发展视角*

张伟^{1, 2}, 陈轩敬^{1, 2}, 马林^{2, 3}, 邓燕^{1, 2}, 曹宁⁴, 肖然^{1, 2},
张福锁^{2, 5}, 陈新平^{1, 2†}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 西南大学长江经济带农业绿色发展研究中心, 重庆 400715; 3. 中国科学院遗传与发育生物学研究所, 石家庄 050022; 4. 吉林大学植物科学学院, 长春 130015; 5. 中国农业大学国家农业绿色发展研究院, 北京 100193)

摘要: 磷肥产业发展关乎我国粮食安全、资源利用和环境保护。近 40 年来由于化学磷肥的持续施用, 我国农田土壤有效磷快速提升, 在这一背景下基于农业绿色发展的要求, 调整未来我国磷肥的需求预测十分必要。本文综合分析了我国家农田土壤有效磷的变化, 明确了在粮食作物上我国家农田土壤有效磷平均已经达到或超出了作物生产的农学阈值 ($15\sim 25\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 在蔬菜和果树等经济作物上土壤有效磷已经全面超过农学阈值。农业绿色发展要求在保障作物高产的同时, 要充分发挥作物的根系/根际生物学潜力以提高磷资源利用效率、同时改善农产品营养品质和降低环境风险, 为此, 应将磷肥施用策略从培肥地力保增长调整到以农学阈值为目标的维持施磷保增产、升效率、提品质。同时, 农业绿色发展需要从工艺和农艺两方面最大限度提高农业废弃物中磷资源的再利用效率。据此, 考虑我国粮食和其他农产品需求, 继 2007 年基于土壤磷肥力变化预测我国磷肥需求的基础上, 本文对我国未来农业磷肥需求进行了再预测。结果表明, 到 2030 和 2050 年, 我国化学磷肥的需求量分别为 1084 万吨和 742 万吨。因此, 在各项措施持续优化基础上, 我国化肥磷的需求在短期 (2030) 可望下降 150 万吨左右, 中长期 (2050) 可稳定回调至年消费量 750 万吨, 较当前用量下调 30%以上。

关键词: 磷肥需求; 土壤有效磷; 农学阈值; 磷循环利用

中图分类号: S365 文献标志码: A

Re-prediction of Phosphate Fertilizer Demand in China Based on Agriculture Green Development

ZHANG Wei^{1, 2}, CHEN Xuanjing^{1, 2}, MA Lin^{2, 3}, DENG Yan^{1, 2}, CAO Ning⁴, XIAO Ran^{1, 2}, ZHANG Fusuo^{2, 5}, CHEN Xinping^{1, 2†}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Interdisciplinary Research Center for Agriculture Green Development in Yangtze River Basin, Southwest University, Chongqing 400715, China; 3. Institute of Genetic and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China; 4. College of Plant Science, Jilin University, Changchun 130015, China; 5. National Academy of Agriculture Green Development, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

* 西南大学创新研究 2035 先导计划 (SWU-XDZD22001)、国家玉米产业技术体系 (CARS-02-15) 和中德国际合作项目 (328017493/GRK 2366) 资助 Supported by the Innovation Research 2035 Pilot Plan of Southwest University (No. SWU-XDZD22001), National Maize Production System in China (No. CARS-02-15), and Sino-German IRTG AMAIZE-P (No. 328017493/GRK 2366)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: chenxp2017@swu.edu.cn

作者简介: 张伟 (1987—), 男, 山东淄博人, 博士, 副教授, 主要从事土壤-作物系统磷资源综合管理研究。E-mail: zw0730@swu.edu.cn

收稿日期: 2023-09-07; 收到修改稿日期: 2023-10-08; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2023-10-16

Abstract: The development of phosphate (P) fertilizer industry is closely related to China's food security, P resource utilization, and environmental protection. Nowadays, soil available P rapidly increased due to the large amount chemical P fertilizer application in the past 40 years, especially in the surface soil. It is of great significance to predict and regulate the future demand for P fertilizer in China based on the action of green development of agriculture. The integrated analyses show that in this paper, a large proportion of soil for cereal crops production in China has reached the crop agronomic P threshold ($15\sim 25\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), which means above this threshold there is no yield increase response with P application. In particular, the soil available P had considerably exceeded the threshold value for cash crops such as vegetables and fruit trees. Soil available P should be maintained at the agronomic threshold based on the requirement of crop root/rhizosphere biological capacity, nutritional quality and environmental risks. Consequently, it is critical to implement “crop agronomic threshold” oriented P fertilizer management system. Meanwhile, the agricultural green development needs to maximize the recycling and reuse efficiency of P in agricultural waste, which should focus on the recycling process and agronomic utilization. Accordingly, considering the demand for food and other agricultural products in China, this paper re-predicted the future demand for P fertilizer, following the prediction of China's P fertilizer demand in 2007 based on changes in soil P fertility. The consumption of chemical P fertilizer in China will be 10.84 million tons and 7.42 million tons by 2030 and 2050, respectively. Therefore, based on the continued and multiple optimized measures, the overall demand for P fertilizer in China in the short term by 2030 could reduce about 1.5 million tons, in the long term by 2050 could be adjusted to 7.5 million tons per year, more than 30% reduction from the current consumption.

Key words: P fertilizer demand; Soil available P; Agronomic P threshold; P fertilizer recycle

磷肥施用事关粮食安全和农产品保供，但是又受到资源的刚性约束和环境保护的压力，因此磷肥需求的预测既是农业产业技术决策的重要参考，更是磷化工产业发展的重要依据。一方面，自2015年明确提出“化肥零增长”目标以来，我国农业生产中的磷肥施用已经进入到了一个新的阶段，统计数据表明，2017至2021年我国农业的磷肥施用总量从1 431万吨下调至1 215万吨，而同期粮食和其他农产品生产稳中有增。另一方面，我国磷矿资源只占全球的5.5%^[1]，在我国磷资源受到刚性约束的情况下，我国生产和消费了全世界近30%的磷肥^[2]，但未来磷

资源可持续利用的压力十分严峻。

2007年，本课题组通过建立我国主要农田土壤中有效磷变化模型，基于土壤肥力变化预测了未来30年内磷肥的消费将经历一个先升后降的过程，磷肥需求将在2020年左右达到最高峰1 250万吨，到2035年降至1 050万吨^[3]。当时肥料产业管理部门基于常规的趋势预测分析，认为我国磷肥需求在2020年左右要达到1 600万~1 800万吨，远高于预测需求。过去15年来我国农业生产的磷肥实际消费状态验证了当时基于土壤肥力变化的磷肥需求预测的科学性（图1）。

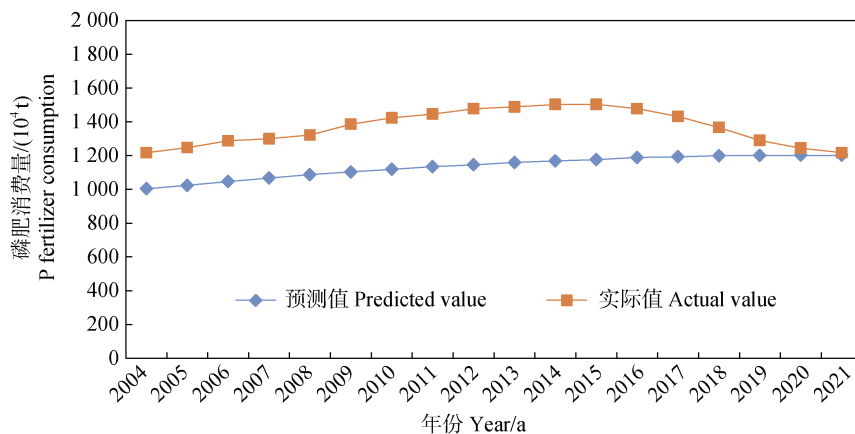


图1 基于2007年研究的我国磷肥消费量预测值与实际磷肥消费量比较

Fig. 1 Comparison of actual consumption of P fertilizer and predicted demand based on 2007 research

当前我国农业正在走向绿色发展的新阶段。农业绿色发展要求以资源环境承载力为基准,追求优质、安全、充裕农产品供给和人体营养健康的目标^[4]。我国磷资源十分紧缺,可持续的磷矿资源利用任重道远;以磷为核心的农业面源污染已经上升为我国水体富营养化的主要因子^[5-6];同时,过量施磷导致的农产品微量元素营养(如铁、锌)下降的问题日益突出^[7]。在这样的背景下,势必对磷肥管理策略以及磷肥产业产生深远影响。因此,基于农业绿色发展视角,对我国农业的磷肥需求进行再预测具有重要的意义。

1 论我国农业土壤磷的目标阈值

自绿色革命到 20 世纪 80 年代,国际上农田磷肥管理主要以作物增产为目标,磷肥推荐一般采用基于作物产量效应的方法;之后,随着环境问题的日渐突出,磷肥管理逐渐转为以实现作物产量和环境保护协同为目标,发展了基于土壤磷肥的土壤培肥-维持 (Building-up and maintenance) 管理的策略^[8]。而我国自 20 世纪 90 年代以来基于养分平衡和土壤测试的磷素恒量监控法逐渐成为磷肥管理的主要指导策略,即以保证作物持续稳定高产的土壤有效磷临界值为根层养分调控下限,以对环境产生威胁的土壤有效磷阈值为根层养分调控上限,兼顾作物高产和环境保护的双重目标^[9]。

本文采用 Meta 分析方法对全球土壤-作物系统

磷的农学阈值进行了系统的归纳分析,发现粮食作物、水果和蔬菜上的临界农学土壤有效磷阈值分别为 $15.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $32.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $30.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 2)。进一步对全球农业土壤有效磷的环境阈值的研究发现,农业土壤有效磷的环境阈值介于 $45\sim 75 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间;而我国土壤有效磷的农学阈值和环境阈值分别为 $17.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $40.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[10]。显然,农学阈值与环境阈值间的差值介于 $30\sim 40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间。而早前的研究表明,将土壤有效磷提高 $30\sim 40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,每公顷农田土壤大约需要累积 1 吨磷^[3],这将严重加剧我国磷资源枯竭的风险。

近年来的植物营养生物学研究表明,将土壤有效磷控制在农学阈值可以协同作物生产力和磷吸收利用能力,而一般环境阈值的土壤有效磷含量将严重抑制作物高效吸收利用磷的生物学能力。以根系丛枝菌根侵染为例,田间原位研究表明土壤有效磷调控丛枝菌根真菌侵染存在临界值,这个临界值接近于调控小麦和玉米生长的适宜农学阈值^[11]。因此,在该适宜临界值水平下,小麦和玉米均能维持相对较高的丛枝菌根侵染率,这为较好地发挥丛枝菌根的生物学潜力提供了保障。在玉米上的研究也表明,将土壤有效磷水平控制在靠近玉米农学阈值附近,既能保证较高的生产力,又能让根系生物学潜力得到较好的发挥,是根际调控的关键养分供应范围^[12]。分子生物学的证据同样表明,超出农学阈值的土壤磷供应抑制根系和菌根吸收磷的系列转运蛋白基因的表达^[13]。

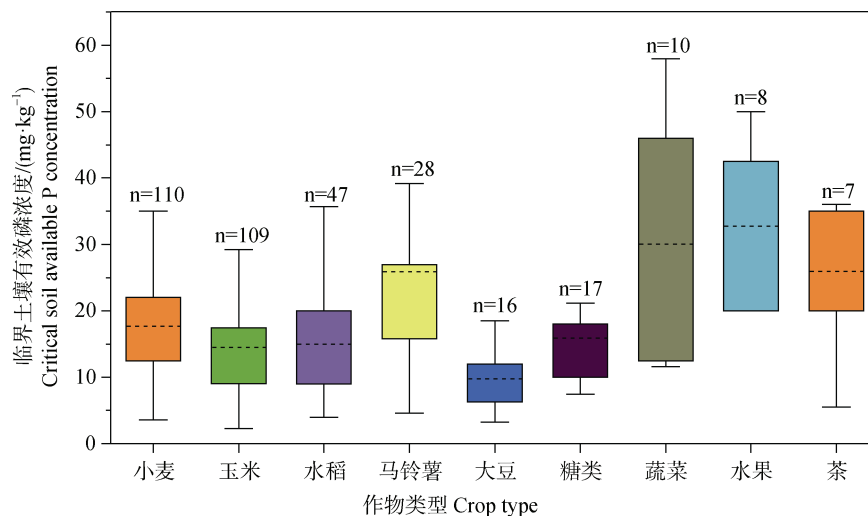


图 2 不同作物基于产量的临界土壤有效磷浓度 (农学阈值)

Fig. 2 The critical soil available P concentration for agronomic target in various crops

将土壤有效磷水平调控至农学阈值有利于实现作物籽粒较高营养品质。无论在我国还是世界范围, 缺锌、缺铁均是人体营养健康的关键问题^[14]。研究发现, 高量磷肥施用显著降低谷类作物的籽粒锌、铁含量^[15-16], 对人体健康造成潜在威胁; 而将有效磷水平控制在农学阈值可以在实现高产的同时最大化实现籽粒锌、铁含量, 保证人体锌、铁等微量营养摄入^[7]。

自 20 世纪 80 年代以来, 我国农业生产中磷肥大量持续施用。大数据分析表明 2015 年我国农田每年磷肥投入量高达 40~60 kg·hm⁻² ^[17], 平均每年磷盈余量为 24 kg·hm⁻², 高于全球生态系统安全阈值 (每年 6.9 kg·hm⁻²) 3 倍以上^[18]。大量的土壤磷素盈余造成土壤有效磷近几十年持续累积 (表 1), 2011

年的一项研究发现我国土壤有效磷从 20 世纪 80 年代全国第二次土壤普查的 7.4 mg·kg⁻¹ 增加至 2006 年的 24.7 mg·kg⁻¹^[19], 2005—2014 年期间全国测土配方施肥的大样本数据表明, 我国农田土壤有效磷平均含量为 19.2 mg·kg⁻¹^[20]。进而在经济作物上有效磷的增加幅度更大^[21], Meta 分析的结果表明当前设施菜田和露地菜田土壤中有有效磷的含量已经分别高达 179 和 100 mg·kg⁻¹^[22]; 而果园耕层土壤中有有效磷的含量也高达 63~118 mg·kg⁻¹ ^[23-24]。

因此, 在当前农业绿色发展的背景下, 必须尽快调整我国的农田磷管理策略, 从当前不超出环境阈值的培肥地力 (Building-up) 保增长策略转变为维持农学阈值的平衡施磷 (Maintenance), 以实现保增产、升效率、提品质的新策略。

表 1 目前我国主要作物的土壤有效磷含量

Table 1 Current soil available P concentration of different crop in China

作物类型 Crop type	作物 Crop	土壤有效磷 Soil available P/ (mg·kg ⁻¹)	参考文献 Reference
粮食作物 Cereal crops	小麦	25~35	[25-26]
	玉米	22	[27]
	水稻	21~28	[28-29]
蔬菜 Vegetables	露地蔬菜	100~271	[21-22]
	辣椒	40~110	[30]
	露地蔬菜	60~180	[31]
水果 Fruits	柑橘	48	[23-32]
	蜜柚	200~450	[33]
	果园	159~211	[24-34]
茶 Tea	茶园	245	[35]

2 绿色发展背景下农业废弃物磷的循环利用

以往针对磷肥的需求预测中未仔细考虑农业废弃物中磷的再循环利用, 随着国家有机肥替代化肥行动实施和环境保护要求, 我国未来农业磷肥的需求预测必须考虑有机废弃物资源的再利用。一方面, 目前我国农田磷肥总投入中有机肥料的贡献不超过 20%, 且主要集中在果、菜、茶等高价经济作物上。另一方面, 近 30 年来我国畜禽养殖规模迅速扩大, 畜禽粪便的产生量逐年增加而还田日趋困难。

经初步测算, 我国每年畜禽粪便产生量超过 30 亿吨 (鲜重), 其中畜禽粪尿中总磷资源量从 1996 年的 170 万吨增长至 2021 年的 300 万吨以上, 具有替代化肥磷的很大潜力, 且如果不很好利用将对环境产生严重威胁。

21 世纪以来畜禽粪污的不当处理与排放产生环境污染, 尤其是对水环境保护造成严重的压力^[36-37]。过去相当一段时间内, 畜禽粪便堆存量巨大, 利用率低下, 特别是大中型养殖场循环利用率不高, 环境影响突出^[38]。据研究表明, 中国畜禽养殖的粪污排放曾经对河流水体磷负荷贡献高达 52%~97% ^[39-40]。基于两次全国污染源普查公报结果发现, 畜禽养殖

排放总磷约占农业源 56%和全国水体总磷排放的 37%。畜禽粪污,尤其是在高密度养殖地区,已经成为许多江河湖泊等水体环境的主要污染源。

近些年国家出台多项政策和专项计划多措施并举推动畜禽粪污资源化循环利用,例如农业部关于印发《畜禽粪污资源化利用行动方案(2017—2020年)》、《果菜茶有机肥替代化肥行动》等。据调查研究,中国圈舍堆置后的畜禽粪尿还田率从 2007 年大约不足 50%增长至 2017 年的 67%^[41]。但是畜禽粪尿在圈舍堆置过程中仍然会产生部分磷素损失^[42]。因此,当前我国总有机磷循环率(基于排泄量)仅为 53%左右,距离美国(76%)^[43]、欧洲(>90%)^[44]和日本(79%)畜禽粪尿磷循环管理模式仍有较大差距。

通过技术进步和系统整合持续提高对有机磷的回收利用,不仅将在满足未来种植业对磷肥的需求方面发挥着重要作用,同时为消除污染源做出巨大的贡献。因此,提高农业废弃物中磷的循环利用率越来越成为农业绿色发展的关键环节。

3 基于农业绿色发展的我国磷肥需求再预测

综上,本文基于农业绿色发展的我国磷肥需求再预测主要着眼于两个方面:一是在我国土壤有效磷已经达到(或超出)农学阈值的基础上,我国农田磷肥的总投入未来应逐步下调直至等于我国未来作物生产的总需磷量;二是我国化学磷肥的需求要在农田磷肥的总投入预测的基础上,充分考虑农业废弃物磷资源的再循环利用。

具体而言,化学磷肥需求的预测是基于农田磷素投入总量与循环利用磷总量之差得出,即:化学磷肥需求=作物磷素吸收×磷素盈余比-畜禽粪污磷×循环利用率-作物秸秆磷×循环利用率。其中,作物磷素吸收总量是基于作物收获物和秸秆产量及其含磷量计算得出。作物秸秆资源量是通过作物产量和草谷比参数计算得出,草谷比以及收获物、秸秆含磷量参数来源于 NUFER(Nutrient flows in Food chains, Environment and Resources use)模型。2022 年当前中国农田磷素的盈余比(农田磷素投入/作物磷素吸收)约为 1.32,本文设定在 2030 和 2050 年

分别降低至 1.15 和 1.0,逐步实现农田磷素零盈余。畜禽粪污磷总量通过 NUFER 模型中动物数量等参数输入数据估算。在本研究中,历史作物产量和动物生产(2016—2022)数据来源于国家统计局,未来 2030、2040 和 2050 中国的作物和动物的生产预测是基于已发表的研究结果^[45]。此外,基于当前全国调查结果,2022 年我国秸秆和畜禽粪污的磷循环利用率约为 55%,本文假设 2030 年、2040 年和 2050 年分别达到 60%、70%和 80%,对关键年份(2030 年、2040 年和 2050 年)采用合理的预测参数,其余中间年份通过线性插值方法填补上数据。

基于现有对我国未来粮食生产的预测,未来我国在粮食作物上仍需要 10%~20%的增长,到 2030 年我国水稻、小麦、玉米分别较 2020 年增长 1%、15%、22%;到 2050 年增长量要分别达到 0、11%、17%,而水果、蔬菜、糖类和薯类等基本保持不变^[45],但油料作物产量还需大幅提升。据此,本文预测我国农作物的磷素吸收量将从目前的 1 100 万吨左右提升至未来的 1 250 万吨左右并逐渐稳定。在以农学阈值为目标的肥力维持监控策略下,包括化肥磷和循环利用磷在内的总磷投入将以此为依据。

在国家相关政策和施肥技术不断进步的推动下,对标发达国家,本文设定我国农业废弃物中磷的循环利用率从当前的 55%进一步增加至 60%(2030 年)和 80%(2050 年)。据此,预测到 2030 年在实现磷循环利用率 60%的条件下,我国化学磷肥的需求量为 1 084 万吨;到 2050 年磷循环利用率进一步提高至 80%,我国磷肥总需求量为 1 229 万吨,其中化学磷肥需求量为 742 万吨(图 3)。

4 未来优化磷肥管理中几个关键问题的讨论

值得注意的是本文的磷肥需求预测是中长期预测,短期内国内外市场、社会经济发展等对磷肥需求影响很大,中长期看,科学施肥技术应用、磷矿资源限制、农业结构调整、有机肥替代政策等多方面因素影响预测的不确定性。

要达到本文预测的磷肥用量需要在磷肥施用策略、科学研究和磷肥产业发展方面实现相互支撑、有效融合。在农田尺度上,磷肥施用方法需要进一

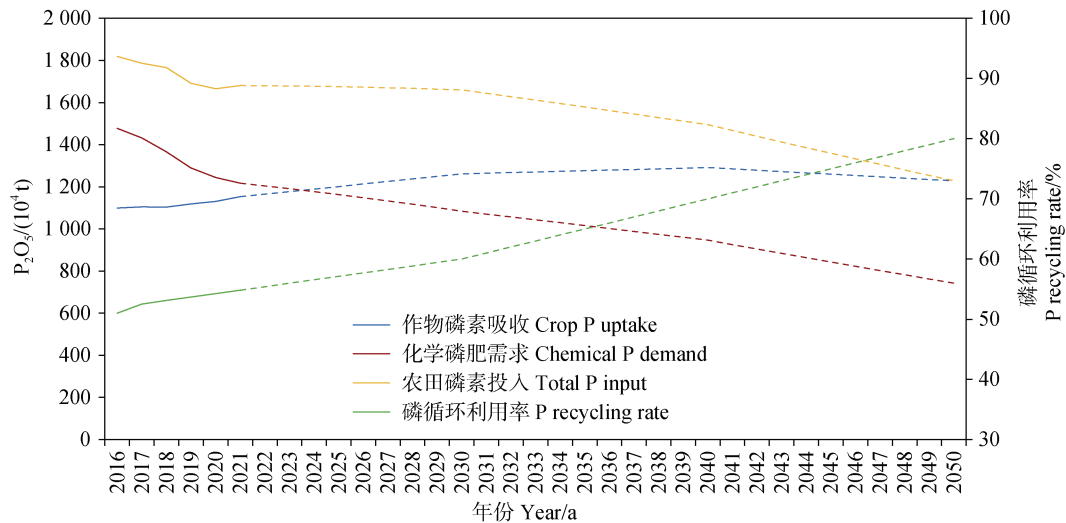


图3 我国基于农业绿色发展的磷肥需求预测

Fig. 3 The prediction of P fertilizer demand from 2022 to 2050 based on future crop P uptake and P recycling rate in China

步根据不同作物系统和区域的土壤有效磷特征进行合理磷肥管理,保障作物对磷素的需求,同时发展基于磷肥根际调控原理的新型施肥技术(如侧深施肥),进一步提高磷肥利用效率;在理论创新方面,基于有机肥中磷高效利用和基于分子生物学发展的作物磷高效吸收和利用的机理研究仍然需要进一步广泛探索;在磷肥产业发展方面,未来如何通过创新磷肥生产工艺,开发适用于不同作物需求的新型磷肥产品,需要进一步实现技术突破。

4.1 磷肥投入在不同作物系统和不同区域不平衡,磷肥管理需要“因地施策”

当前,在不同作物系统之间,蔬菜、果园和茶园磷肥投入普遍超量,土壤有效磷普遍超高,因此磷肥投入需要严格限量;在大田作物上,平均而言土壤磷肥已达到或超出农学阈值,但区域间不平衡,需要因地施策。在大田作物上,总体而言,东北、黄淮海地区土壤磷素积累较快;而西北农牧交错带、长江流域稻田土壤磷素积累较慢。研究发现,在吉林黑土和黄淮海平原土壤中每累积 $1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 磷素,土壤有效磷分别增加 $0.0574 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.0648 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[3],高于其他地区的土壤有效磷增速。在新疆和陕西等西北地区每累积 $1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 磷素,土壤有效磷仅增加 $0.0144 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,说明西北农牧区土壤有效磷的累积速度较慢。而在长江流域稻田土壤中,数据表明每盈余 $1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 磷素,土壤有效磷仅增加 $0.012 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[46],导致该地区土壤有效磷缺乏的比

例仍然高达 23.1%,主要集中在长江上游和中游地区^[47]。因此基于当前的土壤有效磷水平和区域土壤磷素累积特征,在东北、黄淮海等土壤磷素累积速率较快地区,大田作物磷肥管理应以磷肥投入与产出基本平衡为基本原则,针对长江流域上中游稻田土壤和北方干旱半干旱地区有效磷较低土壤,仍需要考虑适度提升肥力。

4.2 优化磷肥施用技术,以根际调控促进磷肥利用效率提升,确保作物产量持续提升

当前,随着农业机械化的快速发展,我国农田磷肥施用方式正在发生根本性的变化。过去常规磷肥施用是以基肥的形式撒施,肥料施入土壤后往往与土壤钙、铁、铝结合,导致土壤大部分磷被固定,磷肥利用效率不高。随着农业机械化的发展,机械作业配套根区施肥正在成为农业发展的大趋势,“种肥同播”、“侧深施肥”等技术的发展使得在大田生产中发挥作物根系高效利用磷的根际调控成为可能。此外,水肥一体化的滴灌施肥技术的普遍应用大幅度提高了磷素的有效性,通过滴灌系统施用磷肥同样实现根际施肥,进而协同提高作物产量和磷肥利用效率^[48]。因此,通过改进磷肥机械条施、水肥一体化等根际施肥方式对提高磷肥效率具有极大潜力。

4.3 精准施用有机肥、提高有机磷源利用效率需要更多的科学研究

一方面,有机肥管理需要遵循以磷为基准的总

量控制，尤其在果蔬等经济作物上，当前大量施用有机肥的情况已经导致部分地区和作物上土壤有效磷大幅度提高，生态环境压力大，因此有机肥施用量应以磷的总量控制为基准。

另一方面，有机肥的施用应注重不同来源、不同工艺、不同组分的有机磷源在不同土壤、不同作物上的应用效果。在玉米上的多年研究表明，反刍动物粪便（牛粪）的磷可以完全替代化肥施用来保证玉米磷素吸收；而非反刍动物粪便（如鸡粪）由于具有较高的植酸磷而有效性较低，生产中需要将鸡粪与化肥配施才可以协同实现作物高产和磷素高效^[49]。然而，基于不同土壤、不同作物生产条件下，有机磷肥的精准管理迫切需要更加广泛和深入的科学研究为基础^[50]。

4.4 生物学途径提高作物磷利用效率—磷吸收和磷利用同等重要

挖掘作物自身磷高效利用的生物学潜力是科学界关注的前沿，近年来随着分子生物学研究进展，许多高亲和磷转运基因已被克隆，磷向地上部转运和吸收负反馈调节的控制基因也被发现；同时针对根构型、根毛以及菌根的营养学意义性状的分子生物学研究已经取得很大进展^[51-52]。

一般而言，提高磷吸收效率将有助于推进土壤磷素农学阈值的前移。而提高磷利用效率将有助于在同等产量下降低作物的磷素需求，因此，二者同等重要。未来，应进一步加强在集约化农业体系中如何提高作物磷吸收和磷利用的生物学机理与调控途径研究。

4.5 磷肥产业的绿色发展要通过技术进步提升全过程的磷资源效率，并开发针对我国多元化农业生产条件的适配产品

自 20 世纪 90 年代以来，我国磷肥产业取得了显著的技术突破，实现了磷肥自给，有效支撑了农业生产。今后，磷肥产业要在总量调控的情况下，进一步提高从矿山开采到磷肥生产的全过程磷利用效率，特别是要创新技术突破磷石膏、磷尾矿中磷资源的回收利用。同时，由于我国幅员辽阔，农业生产的作物、土壤、气候、管理措施各不相同，需要针对多元化的农业生产条件，创新工艺，开发多元化的适配产品，从磷肥产品本身性能上着力提升磷肥利用效率。

参考文献 (References)

- [1] Zhou K X, Barjenbruch M, Kabbe C, et al. Phosphorus recovery from municipal and fertilizer wastewater: China's potential and perspective[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, 52: 151—159.
- [2] Li G H, van Ittersum M K, Leffelaar P A, et al. A multi-level analysis of China's phosphorus flows to identify options for improved management in agriculture[J]. *Agricultural Systems*, 2016, 144: 87—100.
- [3] Cao N, Chen X P, Zhang F S, et al. Prediction of phosphate fertilizer demand in China based on change in soil phosphate fertility[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44 (3): 536—543. [曹宁, 陈新平, 张福锁, 等. 从土壤肥力变化预测中国未来磷肥需求[J]. *土壤学报*, 2007, 44 (3): 536—543.]
- [4] Zhang F S, Shen J B, Zhu Q C. China's theory and practice of agricultural green development[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2022. [张福锁, 申建波, 朱齐超. 中国农业绿色发展理论与实践[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2022.]
- [5] Li X Y, Yang L B, Yan W J. Model analysis of dissolved inorganic phosphorus exports from the Yangtze River to the estuary[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2011, 90 (1): 157—170.
- [6] Liu X, Sheng H, Jiang S Y, et al. Intensification of phosphorus cycling in China since the 1600s [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113 (10): 2609—2614.
- [7] Zhang W, Zhang W S, Wang X Z, et al. Quantitative evaluation of the grain zinc in cereal crops caused by phosphorus fertilization. A meta-analysis[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2021, 41 (1): 6.
- [8] Sharpley A N, Chapra S C, Wedepohl R, et al. Managing agricultural phosphorus for protection of surface waters: Issues and options[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1994, 23 (3): 437—451.
- [9] Wang X R, Cao Y P, Zhang F S, et al. Feasibility of a fertilization method for keeping constant application rate of phosphorus by monitoring available phosphorus in the soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 1995, 1 (3): 59—64. [王兴仁, 曹一平, 张福锁, 等. 磷肥恒量监控施肥法在农业中应用探讨[J]. *植物营养与肥料学报*, 1995, 1 (3): 59—64.]
- [10] Wang Y, Cui Y T, Wang K X, et al. The agronomic and environmental assessment of soil phosphorus levels for crop production: A meta-analysis[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2023, 43 (2): 35.
- [11] Deng Y, Feng G, Chen X P, et al. Arbuscular mycorrhizal fungal colonization is considerable at optimal Olsen-P levels for maximized yields in an intensive wheat-maize cropping system[J]. *Field Crops Research*, 2017, 209:

- 1—9.
- [12] Deng Y. Regulation of phosphorus in root layer of wheat and maize based on rhizosphere process under intensive conditions[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. [邓燕. 集约化条件下小麦和玉米基于根际过程的根层磷素调控[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.]
- [13] Teng W, Deng Y, Chen X P, et al. Characterization of root response to phosphorus supply from morphology to gene analysis in field-grown wheat[J]. Journal of Experimental Botany, 2013, 64 (5): 1403—1411.
- [14] Defries R, Fanzo J, Remans R, et al. Metrics for land-scarce agriculture[J]. Science, 2015, 349 (6245): 238—240.
- [15] Zhang W, Liu D Y, Li C, et al. Zinc accumulation and remobilization in winter wheat as affected by phosphorus application[J]. Field Crops Research, 2015, 184: 155—161.
- [16] Zhang W, Liu D Y, Liu Y M, et al. Overuse of phosphorus fertilizer reduces the grain and flour protein contents and zinc bioavailability of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65 (8): 1473—1482.
- [17] Langhans C, Beusen A H W, Mogollón J M, et al. Phosphorus for sustainable development goal target of doubling smallholder productivity[J]. Nature Sustainability, 2022, 5 (1): 57—63.
- [18] Zou T, Zhang X, Davidson E A. Global trends of cropland phosphorus use and sustainability challenges[J]. Nature, 2022, 611 (7934): 81—87.
- [19] Li H, Huang G, Meng Q, et al. Integrated soil and plant phosphorus management for crop and environment in China. A review[J]. Plant and Soil, 2011, 349 (1): 157—167.
- [20] National Agricultural Technology Extension Service Center. Data set of soil basic nutrients for formula fertilization by soil testing: 2005—2014[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2015. [全国农业技术推广服务中心. 测土配方施肥土壤基础养分数据集: 2005—2014[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015.]
- [21] Ma J C, He P, Xu X P, et al. Temporal and spatial changes in soil available phosphorus in China(1990—2012) [J]. Field Crops Research, 2016, 192: 13—20.
- [22] Yan Z J, Liu P P, Li Y H, et al. Phosphorus in China's intensive vegetable production systems: Overfertilization, soil enrichment, and environmental implications[J]. Journal of Environmental Quality, 2013, 42(4): 982—989.
- [23] Guo J Q, Liu J L, Xie J, et al. Soil nutrient status and evolution of main apple producing areas in Hebei Province[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2020 (3): 157—163. [郭巨秋, 刘建玲, 谢娇, 等. 河北省主要苹果产区土壤养分状况与演变[J]. 中国土壤与肥料, 2020 (3): 157—163.]
- [24] Wu X F, Zhang Z S, Fan Q, et al. Comprehensive evaluation of soil fertility in orchards of Hainan Province[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2021, 42 (7): 2109—2118. [吴小芳, 张振山, 范琼, 等. 海南省果园土壤肥力综合评价研究[J]. 热带作物学报, 2021, 42 (7): 2109—2118.]
- [25] Ma Y, Tian Y, Yu J, et al. Threshold of soil available P and the response of wheat yield and grain N, P, and K concentrations to test-integrated fertilizer application in the northern wheat production region of China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021, 27 (10): 1675—1691. [马悦, 田怡, 于杰, 等. 北方麦区土壤有效磷阈值及小麦产量, 籽粒氮磷钾含量对监控施肥的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27 (10): 1675—1691.]
- [26] Sun H R, Zhang J P, Jiang L H, et al. The abundance-deficiency indices of soil available P and appropriate phosphorus application rates for wheat in China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35 (21): 30—37. [孙洪仁, 张吉萍, 江丽华, 等. 中国小麦土壤有效磷丰缺指标与适宜施磷量研究[J]. 中国农学通报, 2019, 35 (21): 30—37.]
- [27] Zhao Q Y, Xu S J, Zhang W S, et al. Spatial regional variability and influential factors of soil fertilities in the major regions of maize production of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53 (15): 3120—3133 [赵晴月, 许世杰, 张务帅, 等. 中国玉米主产区土壤养分的空间变异及影响因素分析[J]. 中国农业科学, 2020, 53 (15): 3120—3133.]
- [28] Du J X, Liu K L, Huang J, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of soil available phosphorus and its response to phosphorus balance in paddy soil in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(2): 476—486. [都江雪, 柳开楼, 黄晶, 等. 中国稻田土壤有效磷时空演变特征及其对磷平衡的响应[J]. 土壤学报, 2021, 58 (2): 476—486.]
- [29] Chen Z X, Qiu L X, Chen H Y, et al. Enrichment and ecological risk assessment of available phosphorus in paddy soil of Fujian Province over past 40 years[J]. Environmental Science, 2022, 43 (7): 3741—3751. [陈中星, 邱龙霞, 陈瀚阅, 等. 近 40 年来福建省水稻土有效磷富集效应及潜在生态风险评估[J]. 环境科学, 2022, 43 (7): 3741—3751.]
- [30] Zhang W, Zhang Y W, An Y L, et al. Phosphorus fractionation related to environmental risks resulting from intensive vegetable cropping and fertilization in a subtropical region[J]. Environmental Pollution, 2021, 269: 116098.
- [31] Lu M, Powlson D S, Liang Y, et al. Significant soil degradation is associated with intensive vegetable cropping in a subtropical area: A case study in southwestern China[J]. Soil, 2021, 7 (2): 333—346.

- [32] Li Y Y. Study on the present situation of phosphorus accumulation in soil of Chongqing orange orchard and its efficient utilization mechanism[D]. Chongqing : Southwest University, 2020. [李莹莹. 重庆橘园土壤磷素累积现状及高效利用机理研究[D]. 重庆: 西南大学, 2020.]
- [33] Chen X H, Yan X J, Wang M K, et al. Long-term excessive phosphorus fertilization alters soil phosphorus fractions in the acidic soil of pomelo orchards[J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 215: 105214.
- [34] Liao W H. Transformation, balance and yield effect of phosphorus in farmland soil of Hebei Province[D]. Baoding, Hebei: Hebei Agricultural University, 2012. [廖文华. 河北省农田土壤磷素转化、平衡与产量效应[D]. 河北保定: 河北农业大学, 2012.]
- [35] Zhou Z, Liu Y, Zhang L M, et al. Soil nutrient status in Wuyi tea region and its effects on tea quality-related constituents[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(8): 1425—1434. [周志, 刘扬, 张黎明, 等. 武夷茶区茶园土壤养分状况及其对茶叶品质成分的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52 (8): 1425—1434.]
- [36] Jin S Q, Zhang B, Wu B, et al. Decoupling livestock and crop production at the household level in China[J]. *Nature Sustainability*, 2021, 4 (1): 48—55.
- [37] Bai Z H, Ma W Q, Ma L, et al. China's livestock transition: Driving forces, impacts, and consequences[J]. *Science Advances*, 2018, 4 (7): eaar8534.
- [38] Ma L, Velthof G L, Wang F H, et al. Nitrogen and phosphorus use efficiencies and losses in the food chain in China at regional scales in 1980 and 2005[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 434: 51—61.
- [39] Stokal M, Ma L, Bai Z, et al. Alarming nutrient pollution of Chinese Rivers as a result of agricultural transitions[J]. *Environmental Research Letters*, 2016, 11 (2): 024014.
- [40] Wang M R, Kroeze C, Stokal M, et al. Global change can make coastal eutrophication control in China more difficult[J]. *Earth's Future*, 2020, 8(4): e2019EF001280.
- [41] Zhu Z P, Zhang X M, Dong H M, et al. Integrated livestock sector nitrogen pollution abatement measures could generate net benefits for human and ecosystem health in China[J]. *Nature Food*, 2022, 3(2): 161—168.
- [42] Bai Z H, Ma L, Jin S Q, et al. Nitrogen, phosphorus, and potassium flows through the manure management chain in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50 (24): 13409—13418.
- [43] Suh S, Yee S. Phosphorus use-efficiency of agriculture and food system in the US[J]. *Chemosphere*, 2011, 84 (6): 806—813.
- [44] Ott C, Rechberger H. The European phosphorus balance[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2012, 60: 159—172.
- [45] Zhao H, Chang J F, Havlik P, et al. China's future food demand and its implications for trade and environment[J]. *Nature Sustainability*, 2021, 4 (12): 1042—1051.
- [46] Bai Z H, Li H G, Yang X Y, et al. The critical soil P levels for crop yield, soil fertility and environmental safety in different soil types[J]. *Plant and Soil*, 2013, 372 (1): 27—37.
- [47] Yan J Y, Guo L X, Wang K K, et al. Status of soil phosphorus pool and environmental risk assessment in rice-oilseed rape rotation area in the Yangtze River Basin[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(1): 247—257. [闫金焱, 郭丽璇, 王昆昆, 等. 长江流域稻-油轮作区土壤磷库现状及环境风险分析[J]. 土壤学报, 2023, 60 (1): 247—257.]
- [48] Muhammad T, Zhou B, Liu Z Y, et al. Effects of phosphorus-fertigation on emitter clogging in drip irrigation system with saline water[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 243: 106392.
- [49] Wang Y, Zhang W, Müller T, et al. Soil phosphorus availability and fractionation in response to different phosphorus sources in alkaline and acid soils: A short-term incubation study[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13 (1): 5677—5677.
- [50] Zhao S X, Schmidt S, Gao H J, et al. A precision compost strategy aligning composts and application methods with target crops and growth environments can increase global food production[J]. *Nature Food*, 2022, 3(9): 741—752.
- [51] Liao H, Yan X L, Rubio G, et al. Genetic mapping of basal root gravitropism and phosphorus acquisition efficiency in common bean[J]. *Functional Plant Biology*, 2004, 31 (10): 959.
- [52] Gamuyao R, Chin J H, Pariasca-Tanaka J, et al. The protein kinase Pstoll from traditional rice confers tolerance of phosphorus deficiency[J]. *Nature*, 2012, 488 (7412): 535—539.

(责任编辑: 檀满枝)