

我国农田磷养分平衡研究进展*

冀宏杰 张怀志** 张维理 岳现录 雷秋良

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/农业部植物营养与养分循环重点开放实验室 北京 100081)

摘要 从农田养分平衡的角度出发,通过磷平衡的计算方法、我国农田磷平衡的时空变异特征、不同作物农田磷平衡状况、磷平衡对土壤磷含量的影响等 4 个方面,综述了近年来我国农田磷平衡研究的主要进展。研究表明,我国农田磷平衡表现为整体盈余,且目前盈余程度仍在加剧;但不同区域间变异较大,部分农田磷亏缺,不同区域及不同作物间磷平衡呈现“两极化”发展趋势。不同研究者对于我国农田磷平衡的总盈余量、单位面积盈余量以及空间变异特征所得结果差异较大,不宜直接对比;而对时间变异、不同作物种植类型农田磷平衡以及土壤磷累积规律等方面的研究结果基本一致。为保持土壤磷养分库的稳定与提升,基于我国磷平衡研究现状,探讨了我国未来在磷平衡评价指标、改善磷平衡技术措施方面的几个研究方向,并提出政策措施引导、客观舆论宣传等建议。

关键词 农田 磷平衡 磷盈余 磷“两极化” 土壤磷库

中图分类号: S153.6+1 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2015)01-0001-08

Research progress on cropland phosphorus balance in China

JI Hongjie, ZHANG Huaizhi, ZHANG Weili, YUE Xianlu, LEI Qiuliang

(Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Plant Nutrient and Nutrient Cycle, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China)

Abstract Although phosphorus is an essential element for plant growth, over surplus of phosphorus can also cause water environmental hazards such as eutrophication. Phosphorus balance (PB) is an indicator for phosphorus input and output extensively used in agricultural and environmental research. In this paper, PB in croplands in China was reviewed from four different aspects — calculation method, spatio-temporal variability analysis, crop type difference analysis and soil phosphorus content analysis. The study showed surplus PB in China's croplands and with increasing surplus levels. Regional variations in phosphorus surplus were significant, with farmland phosphorus deficiency in some areas which resulted in PB polarization. Due to differences in the calculation parameters or regional planning, vast differences were noted in different reports in terms of amounts of total surplus phosphorus, surplus phosphorus per hectare and spatial variation in surplus phosphorus. Irrespectively, the governing trends in temporal variations, effects of different planting on cropland PB and effects of PB on soil phosphorus content were basically identical. In order to control soil phosphorus polarization and to ensure a stable promotion of soil phosphorus pool in China, it was recommended that future research focused more on areas such as indicator evaluations, technical measurements, policy guides and public opinion propaganda.

Keywords Cropland; Phosphorus balance; Phosphorus surplus; Phosphorus polarization; Soil phosphorus pool

(Received Sep. 10, 2014; accepted Nov. 6, 2014)

磷是植物必需的 3 种大量营养元素之一,自 20 世纪 60 年代以来,越来越得到重视。特别是 20 世纪 80 年代以来,随着高浓度复合肥的出现,磷素被大量施入农田,远远超出作物生长的需要从而造成

土壤磷盈余,而土壤中过剩的磷又通过地表径流、渗漏等多种途径进入水体造成富营养化等环境问题。近年来,滇池、太湖蓝藻以及沿海赤潮频繁爆发,而磷被归罪为“元凶”,也一度成为众矢之的。

* 国家科技基础性工作专项项目(2012FY112100)资助

** 通讯作者: 张怀志,研究方向为土壤与环境。E-mail: zhanghuaizhi@caas.cn

冀宏杰,研究方向为土壤与环境。E-mail: jihongjie@caas.cn

收稿日期: 2014-09-10 接受日期: 2014-11-06

磷平衡可以作为一种衡量土壤磷素投入产出的方法。国际上,20世纪90年代以来已被广泛应用于农业政策制定^[1]、环境趋势分析等方面,近年来还在面源污染控制^[2]、畜禽养殖环境承载力^[3]等方面开展了研究应用。如美国有些州已把磷平衡方法作为保护水质最佳管理措施(BMP)的技术方法之一^[4],欧盟各成员国也把它作为一项优先农业环境指标(priority agri-environmental indicators)^[5],并根据每年统计数据更新。

我国学者也对磷平衡进行了大量研究,但是不同研究者的研究对象(畜禽养殖场、水产养殖场、湖泊、海洋、农田地块、土壤、作物)和研究角度(经济、环境、产量)不同,研究尺度(田块、县域、大区域、国家)和选取参数各异。本文从与农业最直接相关的农田视角出发,从农田磷平衡的计算方法与磷素盈亏状况两个方面,综述了近年来我国不同尺度农田磷平衡的时空变异特征和不同类型作物种植农田的磷平衡状况,并就改善我国农田土壤磷平衡,提高耕地质量的技术方法进行了探讨。

1 农田磷平衡的计算方法

农田磷平衡的计算,即以农田为研究对象,对涉及农田所有磷的输入量和输出量分别进行测算,并计算差减所得到的值。正值代表农田磷素盈余,负值代表农田磷素亏缺:

$$\text{磷平衡} = \text{磷输入} - \text{磷输出} \quad (1)$$

也有人对其进行了修正,如徐梦等^[6]提出“耕地生态需磷量”概念,磷平衡公式修正为:

$$\text{磷平衡} = \text{磷输入} - \text{磷输出} - \text{耕地生态需磷量} \quad (2)$$

磷输入和输出涉及的参数众多,一般来说,输入项包括肥料、干湿沉降、种子等,输出项包括作物收获、淋溶损失等。具体计算时,计算参数可因每个计算者的研究目的、研究对象、拥有资料类型、获取数据难易程度而自行取舍,缺失的指标也可以查阅文献或者用经验值代替。计算磷平衡量,既可以根据进出农田系统的各种物质的量及其磷浓度进行简单计算,也可以使用更加复杂的计算机支持的工具^[4]。

根据数据来源,计算参数项可分为两类:统计数据 and 试验实证性数据。它们各有各的特点,统计数据便于掌握大范围、长时段的时空变化;试验实证性数据更利于表征试验地块的特定情况,也为区域参数的确定提供参考值。

国际上,磷平衡应用最为广泛的是经合组织^[7],其核算的磷输入项包括化肥施用、动物粪便还田、

大气沉降、有机肥和种子带入,输出项包括各种农作物和牧草的吸收。受数据可得性制约,有机肥项没有核算绿肥、商品有机肥、污泥、饼肥等有机肥源带入的磷。在国内,全国范围测算磷平衡的研究方面,较早地有1996年鲁如坤等^[8]利用全国6个试验站数据,比较系统地分析了我国农田磷主要输入输出参数特征。输入参数包括有机肥、降雨、灌溉水,输出参数包括作物养分含量、养分消耗量、养分淋失、径流损失。李书田等^[9]测算全国磷平衡时,输入项包括化肥、有机肥、灌溉、降雨、种子带入农田的磷,输出项包括作物吸收(包括籽粒和秸秆)和养分损失(按20%估算)。

小区域研究(如以县为研究单位)方面,张慧等^[10]研究了北京两个县的磷平衡状况,涉及的参数比较多:输入项包括化肥施用、有机肥、种子、降水和灌溉水带入,输出项包括作物吸收、淋溶损失和侵蚀损失。而武兰芳等^[11]研究山东省禹城和湖南省桃源两个县的磷平衡时,输入项主要考虑化肥磷和粪便磷,输出项主要是粮、棉、油、菜和茶果等农作物产品。

有关计算磷平衡时所需要的各种输入输出参数的具体取值,近年出版的《蔬菜养分资源综合管理理论与实践》^[12]和李书田等^[9]的文章分别对蔬菜作物、大田作物种植的磷输入、输出参数进行了系统性汇总,可供读者参考使用。

2 我国农田磷平衡状况

许多学者从不同尺度和角度对我国土壤磷平衡状况进行了研究。从研究尺度来看,有国家尺度、省级尺度,也有流域尺度和县级尺度;从研究角度和内容来看,计算磷盈亏比例、单位耕地面积磷盈亏强度,以比较不同区域之间农田磷平衡的差异是比较常见的,也有一些对作物磷平衡状况的专项调查,比较不同作物之间或同一种作物不同区域间磷平衡的差异。

2.1 我国农田磷平衡的时空变异特征

全国范围来看,磷的投入超过作物移出,我国农田磷平衡表现为整体盈余,且目前盈余程度仍在加剧;同时,全国农田土壤磷平衡存在很大时空变异。

关于全国农田磷的总盈余量和盈余强度,不同研究者的测算结果差异较大,这主要是由于不同研究者所采用的研究方法、考虑因素不同,数据精度不同,因而不同研究者的测算结果之间不宜进行直接的对比,需进行综合分析。如李书田等^[9]的结果是

2009 年全国磷盈余总量为 $1\ 035.8 \times 10^4$ t, 盈余强度为 $59.2\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 而陈敏鹏等^[13]的结果是, 2003 年全国磷盈余总量为 98×10^4 t, 磷盈余强度为 $2.53\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。两者虽研究年份相差 6 年, 但无论盈余总量还是盈余强度都有了数量级的差异。

关于全国不同区域之间农田磷平衡的比较, 由于不同研究者的区域划分方法不一致, 所得结果也不完全一致。李书田等^[9]认为, 以华北和长江中下游盈余较多, 约分别盈余 353×10^4 t 和 231×10^4 t, 两地区占全国盈余的 56.4%, 东北地区盈余相对较少, 仅有 76.8×10^4 t, 占全国盈余量的 7.4%。从单位种植面积盈余看, 华北最高, 达 $85.2\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 其次是东南地区, 达 $65.7\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 东北地区最少, 为 $35.5\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 其他地区都在 $50\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 左右。方玉东等^[14]研究结果则表明, 农田磷盈余呈从东部地区向西部地区逐渐减少趋势, 另外还提出全国 16% 的耕地存在磷素亏缺的问题。Shen 等^[15]研究结果则认为磷盈余大的省份主要位于东南部和中部地区。

关于全国不同时间段农田磷平衡的变化趋势, 结果基本一致, 即随年代提升土壤盈余整体增加。曹宁等^[16]结合 GIS 平台对 1996 年及 2002 年中国县域农田土壤磷平衡状况进行分析, 结果表明农田土壤磷盈余量在 6 年间普遍提高了一个等级; 1996 年及 2002 年县域农田土壤磷盈亏范围分别为 $-20 \sim 425\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 及 $-17 \sim 450\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 农田土壤磷盈余量为 $20 \sim 50\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的县市占全国总县市的比例从 1996 年的 34.2% 下降到 2002 年的 24.1%, 而磷盈余量为 $50 \sim 100\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的县市所占比例从 29.3% 增加到 33.4%。Shen 等^[15]计算了中国 1993—2001 年国家和省级磷盈余状况, 盈余量随磷肥用量逐年升高, 大部分省份磷盈余大于 $10\ \text{kg}(\text{P}) \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

除了全国性磷平衡研究以外, 许多研究者还对流域或县级行政区等区域性磷平衡进行了研究, 得出了特定区域的磷平衡状况。何仁江等^[17]研究了三峡库区典型农业小流域土壤系统磷收支, 盈余量为 $83\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。张慧等^[10]在北京地区密云县和房山区进行了县域范围内乡镇尺度养分平衡研究, 两地的磷盈余强度分别为 $110.81\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $386.48\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。陕西省扶风县小麦—玉米种植体系 16 年累计磷盈余量 $4\ 273\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[18]。

2.2 我国不同作物的农田磷平衡状况

农田磷的盈余或亏缺, 从源头上讲主要是由作物的磷肥投入和作物带出的差异造成的。对不同作物的磷投入—产出平衡进行分类计算是农田磷平衡研究的基本步骤之一, 但有时也会针对某种或某些

重点作物类型进行专项调查。同时, 最终进行区域磷平衡的调控也要通过作物的磷投入(施肥)和产出(产量)来实现。不少研究者通过调查或统计年鉴数据, 研究了不同类型作物磷平衡状况特征, 特别是对投入肥料多、容易引起磷盈余的果树、蔬菜等经济作物进行专项调查, 为有的放矢调控磷平衡提供数据支撑。

关于不同类型作物农田磷平衡的对比研究。冀宏杰等^[19]通过农户调查, 分析了太湖流域蔬菜、果树等经济作物和水稻、小麦等大田作物磷平衡状况, 结果表明经济作物磷养分的盈余量比几种主要的大田作物多。所调查的 53 种轮作组合中, 有 47 种轮作的磷盈余超过 $150\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 25 种超过 $300\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。上海市黄浦江上游水源保护区 35 个地块、37 种种植作物的周年监测表明, 主要作物的磷养分平衡状况为: 果树 > 蔬菜 > 苗木 > 大田 > 草皮 > 芦荟^[20]。太湖上游低山丘陵地区不同用地类型磷平衡状况为茶园 > 水田 > 马尾松林 > 竹林, 分别是 $319.9\ \text{kg}(\text{P}) \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $29.7\ \text{kg}(\text{P}) \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $1.2\ \text{kg}(\text{P}) \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $-3.4\ \text{kg}(\text{P}) \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[21]。基于 19 年大麦田定位试验, 在氮磷钾平衡施肥条件下, 每年土壤磷素可盈余 $6.9\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[22]。

除了以上研究中对蔬菜、果树等经济作物与大田粮油作物进行对比分析外, 还有一些针对经济作物的专项调查。山东省桃主产区调查结果表明, 全部的桃园土壤处于磷素盈余状态, 磷盈余量达 $608.78\ \text{kg}(\text{P}_2\text{O}_5) \cdot \text{hm}^{-2}$, 而这些磷素较高的桃园仍在大量施入磷肥^[23]。河北省果园调查结果表明, 80% 的果园磷素处于盈余, 总体平均盈余量为 $269.5\ \text{kg}(\text{P}_2\text{O}_5) \cdot \text{hm}^{-2}$, 最大盈余量超过 $1\ 900\ \text{kg}(\text{P}_2\text{O}_5) \cdot \text{hm}^{-2}$ 。施磷过量造成土壤有效磷积累, 磷肥过量果园占 88.5%^[24]。

2.3 磷平衡对土壤磷含量的影响

磷平衡是研究者计算得出的结果, 反映当年或当季土壤磷盈余或亏缺。一个区域的种植制度、施肥方式与习惯往往是经过多年的累积, 短期内比较难于有大的变化, 因此多年累加起来就会造成土壤磷素含量(如土壤 Olsen-P 含量)的升高或降低, 即土壤磷的变化也可以作为磷平衡计算结果的检验。

国家级耕地土壤长期监测结果表明, 1985—2006 年土壤有效磷含量呈极显著上升趋势, 其中 1985—1997 年平均增加 $0.8\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 1998—2006 年上升更快, 年平均增加 $1.0\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[25]。区域性研究也得到了类似结果, 如太湖流域 20 世纪 80 年代初以来, 农田 0~15 cm 土壤磷素水平有较大提高, 缺磷土壤的面积已经大大减少^[26]。而据农业部测土配方施肥项目发布的结果, 近年全国采集土壤样品

1 798 万个, 耕地磷素养分富集已经成为我国一个重大共性问题^[27], 这也可以说是长期磷盈余在提高土壤磷含量上的有力验证。

长期作物磷盈余累积反映在土壤磷素含量上, 表现为不同作物类型间土壤磷素差异增大。太湖流域土壤调查结果表明, 种植经济作物的土壤磷素提高幅度远大于粮食作物^[26]; 河北省定州市 0~200 cm 和 0~400 cm 设施农业土壤磷素累积均高于普通农田, 且设施土壤速效磷深层累积比例随棚龄增加而增加^[28]。

通过有效的磷管理措施可降低磷盈余土壤的磷含量。设施菜田的研究表明, 与习惯施肥相比, 大幅减施肥料的有机无机肥料配合施用可显著降低土壤速效磷含量, 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 和 60~80 cm 土层速效磷含量较习惯施肥的平均值分别降低 21.0%、21.6%、21.1%和 21.7%^[29]。

国内外诸多研究者进一步得出了磷平衡和土壤有效磷的定量关系。国外研究表明每 100 kg(P)·hm⁻² 磷盈余增加土壤 Olsen-P 2~6 mg(P)·kg⁻¹^[30]。鲁如坤等^[8]利用长期定位, 研究了磷平衡和土壤有效磷水平消长的关系, 发现两者显著相关, 并求得回归方程。5 个 15 年小麦-玉米轮作系统长期定位试验结果表明, 100 kg(P)·hm⁻²·a⁻¹ 磷盈余可导致土壤 Olsen-P 增加 2.3~5.7 mg(P)·kg⁻¹^[31]。河北省 8 年菜地试验结果表明, 100 kg·hm⁻² 磷素盈余可导致土壤有效磷上升 1.06 mg·kg⁻¹^[32]。

3 改善我国农田磷平衡状况的对策与思考

从前面的叙述可以看出, 我国农田磷基本状况为盈余。为节约资源和环境保护, 需要采取适当技术措施降低磷素盈余以维持平衡。但我国耕地面临的另一个严峻现实也不容忽视, 即我国还有 65% 的耕地是中低产田^[33], 其中瘠薄型的比例最大, 占中低产田总面积的 27%^[34], 而提高土壤磷素水平是改造中低产田的一个重要内容。

长期试验表明, 无肥区处理的土壤磷含量降低迅速。红壤区土壤有效磷 14 年下降超过 50%, 黑土区土壤速效磷 24 年下降 60%^[35]。而对于中低产田地区, 磷投入低也必然会加速这些地区本不丰富的土壤磷素养分库的耗竭。因而, 要保持我国土壤质量整体提升, 实现“藏粮于土”战略, 也有必要防止我国土壤磷素养分走向两个极端: 一种极端情况是投入多导致磷严重盈余, 而另一种极端情况却是由于水土流失、投入不足甚至不投入等原因导致的磷严重缺乏。目前来看, 不同区域、不同作物类型间, 这种磷平衡的“两极化”现象都正在日益加剧, 值得关注。下

面从研究层面、治理层面进行讨论, 阻止农田磷平衡的“两极化”发展趋势, 保持我国农田土壤质量健康和可持续发展。

3.1 开展磷平衡评价指标基础研究, 保持土壤磷平衡

由于施入农田的磷素在土壤中极易固定, 不像氮素那样有挥发损失到大气的问题, 淋失到地下水问题也相对较少。土壤磷素的累积, 与磷肥的当季和多年累计利用率直接相关, 盈余磷的绝大部分积累在土壤中, 作为土壤磷素养分库的一部分储存起来, 在一定意义上磷的盈余提高了土壤磷素的供应潜力, 当然这种积累也存在一定的潜在环境危险。过量施入的磷可能转移向附近的淡水, 进而到输送至沿海水域^[36]。关于如何评价农田磷的盈余, 鲁如坤等^[37]认为红壤旱地上可以允许有 100%~150% 的盈余, 在红壤性水田上则应低一些。

关于磷平衡与磷流失的关系, 中国农业科学院进行了土壤、肥料和流失液中磷的系统性分组研究, 其中土壤中磷形态包括全磷、水溶性总磷、水溶性无机磷、水溶性有机磷和 Olsen-P; 有机肥中磷形态包括总磷、水溶性总磷、水溶性无机磷、水溶性有机磷和 NaHCO₃-P; 流失液中磷形态包括总磷、水溶性总磷、水溶性无机磷、水溶性有机磷和颗粒磷。在华北平原实证性研究了菜地系统“有机肥磷施肥-有机肥磷在土壤中转化-农田磷流失”这一链条的数量转化关系^[38], 然而对于其他地区土壤、作物磷组分的关系, 以及更多种类有机肥不同磷成分的分组, 尚需更多试验。

我国幅员辽阔, 作物种植类型和土壤类型极端丰富, 今后尚需针对土壤(质地、土层厚度、结构)、气候、作物开展试验研究, 研究不同土壤、作物条件下磷平衡与磷流失的关系, 制定适合各地条件的分区磷盈余阈值, 建立磷平衡综合评价指标。

3.2 农田磷平衡技术措施

农田磷平衡的优化是调控土壤磷素养分库的内容, 可以从控制磷投入、减少损失提高利用率、优化轮作 3 个方面展开, 以实现土壤-作物系统中磷素的全程优化与控制。

3.2.1 推荐施肥, 科学计算磷量的合理投入(源头控制)

制定肥料推荐配方时考虑土壤含磷量的同时, 还要考虑上、下茬作物磷的有效性(气温)。如鲁如坤等^[37]提出在一个轮作周期中“统筹施磷”, 即以单一作物为单位, 改为以一个轮作周期为单位。虽然这一理念 2000 年就已经提出, 但是目前能做到这样的推荐施肥方法还不常见, 今后仍需加强推荐施肥方法的研究。

另外, 由于养分盈余便于计算, 因而没有测土条件时, 施肥推荐时氮磷配比可根据土壤氮磷盈余比例进行适当调整。

3.2.2 提高磷肥利用率, 减少损失(过程控制)

解决农田磷的不平衡问题, 关键在于对施入的磷更有效地利用^[39]。目前我国磷肥利用率偏低, 据研究, 我国主要粮食作物的磷肥利用率在不同地区的变幅为 7.3%~20.1%, 平均为 11.6%; 且从历史变化来看, 磷肥利用率呈逐渐下降趋势^[40]。而蔬菜、果树、花卉等经济作物由于磷肥投入更大, 磷肥利用率则更加值得关注。据报道, 滇池流域土壤速效磷含量已较 20 世纪 70 年代末提高了 5 倍^[41]。

为提高磷肥利用率, 可以采取多管齐下的方式, 从控制磷投入量的时间分配、调整肥料养分配比、优化施肥方式等几个方面考虑。在磷投入量的控制方面, 不仅体现在周年或单茬作物的总施磷量, 还要体现季节气象因素、轮作作物对磷的需求。如据研究, 在一年两熟地区的旱地, 磷肥重点施在冬季作物为宜, 在水旱轮作地区, 磷肥重点施在旱作作物。一年一熟地区, 如轮作中有豆科作物或豆科绿肥, 磷肥重点施在豆科作物; 一年一熟无豆科轮作体系, 磷肥应施在越冬作物、春种作物或对磷肥敏感(增产率高)的作物^[8]。

在调整肥料养分配比方面, 可以根据磷养分平衡计算结果, 通过调整复合肥中磷与其他养分(如氮、钾)的配比来实现, 如通过作物专用肥达到对特定作物磷供应的调整, 或广谱性复合肥达到对区域性所有作物磷供应的调整。

优化磷肥的施用方式方面, 除了根部集中施用、磷肥用量较多时分层施用、与有机肥配合施用^[42-44]等原则外, 还应依据磷的土壤生物化学循环规律, 积极寻找和努力消除土壤固定机制和限制当地土壤作物磷吸收的主要限制因子。

3.2.3 优化轮作类型(末端控制)

对于经过多年磷盈余, 土壤磷累积量比较高的地区, 可以尝试采取调整、优化轮作类型的手段加以解决。在轮作作物的选择上, 可以在综合考虑经济效应、环境效应的基础上, 参考“作物百公斤经济产量带走养分量”、“氮磷钾吸收比例”等指标, 有意识地增加高吸磷量的作物种类和作物品种, 通过收获物的移出尽可能多地降低土壤磷盈余。筛选高吸磷的水生植物、湿地植物品种降低水体磷含量以抑制富营养化已经做了不少有益的尝试^[45-47]。在作物特别是蔬菜、花卉等经济作物养分吸收量方面近年来也有不少研究^[20,48-49]。

3.3 与磷相关的农业政策引导

借鉴西方发达国家农田环境治理成熟经验, 制定相应与磷相关的限定性技术标准和农业政策。如西欧的“轮作红绿灯”, 以直观的方式让农民选择合适的轮作类型, 实现农业生产的高效与环境安全的双重目标^[50]。由于很多类型的粪便中同时含有大量磷, 挪威、瑞典和爱尔兰为了减少磷盈余损失的转移污染分别规定了每年粪便磷的最高施用量为 35 kg(P)·hm⁻²、22 kg(P)·hm⁻²和 40 kg(P)·hm⁻²^[51]。荷兰法令还严格限制农业生产中畜禽粪便磷与化肥磷施用量, 从 1987 年以来规定的限量标准不断提高, 农田系统中磷的容许最高施用量标准由 125.0 kg(P₂O₅)·hm⁻²降低到 80.0 kg(P₂O₅)·hm⁻², 许可的最大盈余损失限量标准由 40.0 kg(P₂O₅)·hm⁻²降低到 20.0 kg(P₂O₅)·hm⁻²^[52]。

3.4 客观进行舆论宣传

和氮素经反硝化生成氧化亚氮破坏大气臭氧层, 硝酸盐经土壤淋失污染地下水一样, 磷也经常以“污染”的名头, 甚至与农药相提并论。其实, 与氮、钾相比, 磷是土壤中最不易淋失、最稳定的元素。由于磷肥不挥发, 不存在农田与其周边自然陆地生态系统的重新分配^[53], 磷盈余最容易发生环境问题的区域是严重土壤侵蚀区和年径流量大的地区^[15]。归根结底, 磷是植物生长必需的一种营养元素, 长期实践表明, 一定程度的磷盈余对保持作物高产稳产、土壤培肥具有重要作用, 也是“藏粮于土”的体现。可以说, 磷是一种类似双刃剑的元素, 过量会威胁水环境安全, 而不足又影响粮食产量和食品安全, 在舆论宣传中, 最重要的还是要强调磷的合理使用。

4 结语

综上所述, 我国农田磷平衡状况整体表现为盈余, 且盈余程度仍在加剧, 但不同区域的磷平衡状况变异较大。同时, 我国还存在部分地区农田磷亏缺, 尤其是在中低产田和水土流失严重区, 使我国磷平衡状况呈现“两极化”发展趋势。为保持我国土壤磷养分库的稳定与提升, 基于我国磷平衡研究现状, 建议今后在研究层面开展磷平衡评价指标的基础性研究, 在技术措施方面从控制磷投入(源头控制)、减少磷素损失提高利用率(过程控制)、优化轮作(末端控制)等方面展开, 以实现土壤-作物系统中磷素的全程优化与控制。

参考文献

[1] European Environment Agency. Integration of environment

- into EU agriculture policy — The IRENA indicator-based assessment report[R]. Copenhagen, 2006: 1–60
- [2] 曹宁, 曲东, 陈新平, 等. 东北地区农田土壤氮、磷平衡及其对面源污染的贡献分析[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2006, 34(7): 127–133
Cao N, Qu D, Chen X P, et al. Analysis of the contribution to non-point pollution made by balanced fertilizer in Northwest China[J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry: Natural Science Edition, 2006, 34(7): 127–133
- [3] 白瑜. 基于土壤氮磷平衡的畜禽养殖环境承载力案例研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2012
Bai Y. A case study on the environmental carrying capacity of livestock and poultry based on soil nitrogen and phosphorus balance[D]. Xiamen: Xiamen University, 2012
- [4] Beegle D, Lanyon L. Phosphorus balance[EB/OL]. http://www.sera17.ext.vt.edu/Documents/BMP_phosphorus_balance.pdf
- [5] Eurostat/OECD. Phosphorus balance in agriculture[EB/OL]. http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Phosphorus_balance_in_agriculture
- [6] 徐梦, 吴胜军, 张亮, 等. 耕地磷盈余研究进展[J]. 世界科技研究与发展, 2012, 34(4): 589–593
Xu M, Wu S J, Zhang L, et al. Reviews on phosphorus surplus of cultivated land[J]. World Sci and Tech R&D, 2012, 34(4): 589–593
- [7] OECD, EUROSTAT. Gross phosphorus balance handbook [EB/OL]. [2007]. <http://www.oecd.org/dataoecd/2/36/40820243.pdf>
- [8] 鲁如坤, 刘鸿翔, 闻大中, 等. 我国典型地区农业生态系统养分循环和平衡研究 V. 农田养分平衡和土壤有效磷、钾消长规律[J]. 土壤通报, 1996, 27(6): 241–242
Lu R K, Liu H X, Wen D Z, et al. Study on nutrient cycling and balance of China's typical agri-ecosystem. V. Rules of farmland nutrient balance and soil available P and K dynamics[J]. Chinese Journal of Soil Sciences, 1996, 27(6): 241–242
- [9] 李书田, 金继运. 中国不同区域农田养分输入、输出与平衡[J]. 中国农业科学, 2011, 44(20): 4207–4229
Li S T, Jin J Y. Characteristics of nutrient input/output and nutrient balance in different regions of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(20): 4207–4229
- [10] 张慧, 高如泰, 夏训峰, 等. 北京地区农田生态系统磷养分平衡研究——以密云县和房山区为例[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(10): 195–199
Zhang H, Gao R T, Xia X F, et al. Analysis of phosphorus balance of farmland in Beijing — A case study of Miyun County and Fangshan District[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 33(10): 195–199
- [11] 武兰芳, 欧阳竹, 谢小立. 不同种养结合区农田系统氮磷平衡分析[J]. 自然资源学报, 2011, 26(6): 943–954
Wu L F, Ouyang Z, Xie X L. Nitrogen and phosphorus balance of cropland at regional scale for integrated crop-livestock farming system in two different areas[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(6): 943–954
- [12] 陈清, 张福锁. 蔬菜养分资源综合管理理论与实践[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2007
Chen Q, Zhang F S. Theory and Practice of Nutrient Re-
- sources Management for Vegetable[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2007
- [13] 陈敏鹏, 陈吉宁. 中国区域土壤表观氮磷平衡清单及政策建议[J]. 环境科学, 2007, 28(6): 1305–1310
Chen M P, Chen J N. Inventory of regional surface nutrient balance and policy recommendations in China[J]. Environmental Science, 2007, 28(6): 1305–1310
- [14] 方玉东, 胡业翠, 封志明. 基于 GIS 技术的中国农田磷素养分收支平衡研究[J]. 资源科学, 2008, 30(5): 725–731
Fang Y D, Hu Y C, Feng Z M. GIS study of phosphorus nutrient input/output in China at the county level[J]. Environmental Science, 2008, 30(5): 725–731
- [15] Shen R P, Sun B, Zhao Q G. Spatial and temporal variability of N, P and K balances for agro-ecosystems in China[J]. Pedosphere, 2005, 15(3): 347–355
- [16] 曹宁, 张玉斌, 陈新平. 中国农田土壤磷平衡现状及驱动因子分析[J]. 中国农学通报, 2009, 25(13): 220–225
Cao N, Zhang Y B, Chen X P. Spatial-temporal change of phosphorus balance and the driving factors for agroecosystems in China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(13): 220–225
- [17] 何仁江, 江韬, 木志坚, 等. 三峡库区典型农业小流域土壤系统氮磷收支研究[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2011, 33(5): 95–101
He R J, Jiang T, Mu Z J, et al. Nitrogen and phosphorus balance for the soil systems in a typical small agricultural watershed in the Three-gorges Reservoir Area[J]. Journal of Southwest University: Natural Science Edition, 2011, 33(5): 95–101
- [18] 戴相林. 关中中西部地区农田土壤养分平衡状况演变研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012
Dai X L. Changes of nutrient balances in soil in midwest region of Guanzhong Plain[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012
- [19] 冀宏杰, 张认连, 武淑霞, 等. 太湖流域农田肥料投入与养分平衡状况分析[J]. 中国土壤与肥料, 2008(5): 70–75
Ji H J, Zhang R L, Wu S X, et al. Analysis of fertilizer input and nutrient balance of farmland in Taihu watershed[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2008(5): 70–75
- [20] 林青慧. 黄浦江上游水源保护区不同农田种植模式的环境效应研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2004
Lin Q H. Study on environmental effect of different planting patterns for riverhead protect region of Huangpu upriver[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2004
- [21] 韩莹, 李恒鹏, 聂小飞, 等. 太湖上游低山丘陵地区不同用地类型氮、磷收支平衡特征[J]. 湖泊科学, 2012, 24(6): 829–837
Han Y, Li H P, Nie X F, et al. Nitrogen and phosphorus budget of different land use types in hilly area of Lake Taihu upper-river basin[J]. Journal of Lake Sciences, 2012, 24(6): 829–837
- [22] 唐旭, 陈义, 吴春艳, 等. 大麦长期肥料效率和土壤养分平衡[J]. 作物学报, 2013, 39(4): 665–672
Tang X, Chen Y, Wu C Y, et al. Fertilizer efficiency and soil apparent nutrient balance for barley under long-term fertilization[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(4): 665–672

- [23] 李贵美. 山东桃园土壤养分状况评价与需肥特性研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2011.
Li G M. Evaluation of soil nutrient status in peach orchards of Shandong and studies on peach fertilizer demand characteristics[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2011
- [24] 卢树昌, 陈清, 张福锁, 等. 河北果园主分布区土壤磷素投入特点及磷负荷风险分析[J]. 中国农业科学, 2008, 41(10): 3149–3157
Lu S C, Chen Q, Zhang F S, et al. Characteristics of soil phosphorus input and phosphorus load risk in major orchards region of Hebei[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(10): 3149–3157
- [25] 全国农业技术推广服务中心, 中国农科院农业资源与区划所. 耕地质量演变趋势研究——国家级耕地土壤监测数据整理编[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2008
The National Agro-Tech Extension and Service Center (NATESC); Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences. Study on Arable Land Quality Trend — Summary of National Arable Land Soil Monitoring[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2008
- [26] 高超, 张桃林. 太湖地区农田土壤磷素动态及流失风险分析[J]. 农村生态环境, 2000, 16(4): 24–27
Gao C, Zhang T L. Agricultural soil phosphorus dynamics in Taihu Lake watershed and its environmental impact[J]. Rural Eco-environment, 2000, 16(4): 24–27
- [27] 农业部就三大主粮科学施肥区域大配方答记者问[EB/OL]. http://www.moa.gov.cn/zwl/m/zcfg/xgjd/201307/t20130726_3539678.htm
Ministry of Agriculture answer to reporters' request about regional fertilization formula for three major stable food[EB/OL]. http://www.moa.gov.cn/zwl/m/zcfg/xgjd/201307/t20130726_3539678.htm
- [28] 袁丽金, 巨晓棠, 张丽娟, 等. 设施蔬菜土壤剖面氮磷钾积累及对地下水的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(1): 14–19
Yuan L J, Ju X T, Zhang L J, et al. NPK accumulation in greenhouse soil and its effect on groundwater[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(1): 14–19
- [29] 郝小雨. 设施菜田养分平衡特征与优化调控研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012
Hao X Y. Study on nutrient balance and optimized management in soil-greenhouse vegetable system[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012
- [30] Aulakh M S, Garg A K, Kabba B S. Phosphorus accumulation, leaching and residual effects on crop yields from long-term applications in the subtropics[J]. Soil Use and Management, 2007, 23(4): 417–427
- [31] Tang X, Li J M, Ma Y B, et al. Phosphorus efficiency in long-term (15 years) wheat-maize cropping systems with various soil and climate conditions[J]. Field Crops Research, 2008, 108(3): 231–237
- [32] 廖文华. 河北省农田土壤磷素转化、平衡与产量效应[D]. 保定: 河北农业大学, 2012
Liao W H. Transformation, balance and yield response of soil phosphorus in the arable lands in Hebei Province[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2012
- [33] 林鹏生. 我国中低产田分布及增产潜力研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2008
Lin P S. Study on the distribution and possible production increase of medium and low-yield farmland in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2008
- [34] 石全红, 王宏, 陈阜, 等. 中国中低产田时空分布特征及增产潜力分析[J]. 中国农学通报, 2010, 26(19): 369–373
Shi Q H, Wang H, Chen F, et al. The spatial-temporal distribution characteristics and yield potential of medium-low yielded farmland in China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(19): 369–373
- [35] 徐明岗, 梁国庆, 张夫道. 中国土壤肥力演变[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2006
Xu M G, Liang G Q, Zhang F D. Changes of Soil Fertility in China[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2006
- [36] Pen-uelas J, Poulter B, Sardans J, et al. Human-induced nitrogen-phosphorus imbalances alter natural and managed ecosystems across the globe[J]. Nature Communications, 2013, 4: 2934, doi: 10.1038/ncomms3934
- [37] 鲁如坤, 时正元, 施建平. 我国南方 6 省农田养分平衡现状评价和动态变化研究[J]. 中国农业科学, 2000, 33(2): 63–67
Lu R K, Shi Z Y, Shi J P. Nutrient balance of agroecosystem in six provinces in southern China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2000, 33(2): 63–67
- [38] 朱晓晖. 施用有机肥对土壤磷组分和农田磷流失的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011
Zhu X H. Effects of manure application on soil phosphorus components and phosphorus losses of farmland[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2011
- [39] Macdonald G K, Bennetta E M, Potter P A, et al. Agronomic phosphorus imbalances across the world's croplands[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108(7): 3086–3091
- [40] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915–924
Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 915–924
- [41] 张维理, 武淑霞, 冀宏杰, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7): 1008–1017
Zhang W L, Wu S X, Ji H J, et al. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies. 1. Estimation of agricultural non-point source pollution in China in early 21 century[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(7): 1008–1017
- [42] Patidar M, Mali A L. Residual effect of farmyard manure, fertilizer and biofertilizer on succeeding wheat (*Triticum aestivum*)[J]. Indian Journal of Agronomy, 2002, 47(1): 26–32
- [43] 林德喜, 胡锋, 范晓晖, 等. 长期施肥对太湖地区水稻土壤磷素转化的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2006, 12(4): 453–456
Lin D X, Hu F, Fan X H, et al. Effect of long term fertilization on phosphorus transformation in paddy soil in the Taihu Lake

- region[J]. *China Journal of Applied and Environmental Biology*, 2006, 12(4): 453–456
- [44] 李中阳, 徐明岗, 李菊梅, 等. 长期施用化肥有机肥下我国典型土壤无机磷的变化特征[J]. *土壤通报*, 2010, 41(6): 1434–1439
- Li Z Y, Xu M G, Li J M, et al. Changes of inorganic phosphorus in typical soils of China under long-term combined application of chemical and organic fertilizer[J]. *Chinese Journal of Soil Sciences*, 2010, 41(6): 1434–1439
- [45] 徐德福, 徐建民, 王华胜, 等. 湿地植物对富营养化水体中氮、磷吸收能力研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(5): 597–601
- Xu D F, Xu J M, Wang H S, et al. Absorbability of wetland plants on N and P from eutrophic water[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(5): 597–601
- [46] 吴建强, 王敏, 吴健, 等. 4 种浮床植物吸收水体氮磷能力试验研究[J]. *环境科学*, 2011, 32(4): 995–999
- Wu J Q, Wang M, Wu J, et al. Study on the nitrogen and phosphorus uptake ability of four plants cultivated on floating-bed[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(4): 995–999
- [47] Sooknah R D, Wilkie A C. Nutrient removal by floating aquatic macrophytes cultured in anaerobically digested flushed dairy manure wastewater[J]. *Ecological Engineering*, 2004, 22(1): 27–42
- [48] 李翠萍, 续勇波, 李永梅, 等. 滇池湖滨带设施蔬菜、花卉的农田养分平衡[J]. *云南农业大学学报*, 2005, 20(6): 804–809
- Li C P, Xu Y B, Li Y M, et al. The nutrient balance in the protected fields of vegetable and flower cultivation in Dian lakefront[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2005, 20(6): 804–809
- [49] 王静, 张维理, 郑毅, 等. 滇池流域环境友好作物轮作模式的选择[J]. *云南农业大学学报*, 2006, 21(5): 663–669
- Wang J, Zhang W L, Zheng Y, et al. Selection of environmental friendly crop rotation pattern in Dianchi catchment[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2006, 21(5): 663–669
- [50] 张维理, 冀宏杰, Kolbe H, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 : 欧美国家农业面源污染状况及控制[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(7): 1018–1025
- Zhang W L, Ji H J, Kolbe H, et al. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies. . Status of agricultural non-point source pollution and the alleviating strategies in European and American countries[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(7): 1018–1025
- [51] Ulén B, Bechmann M, Fölster J, et al. Agriculture as a phosphorus source for eutrophication in the north-west European countries, Norway, Sweden, United Kingdom and Ireland: A review[J]. *Soil Use and Management*, 2007, 23(S1): 5–15
- [52] Tamminga S. Pollution due to nutrient losses and its control in European animal production[J]. *Livestock Production Science*, 2003, 84(2): 101–111
- [53] Peñuelas J, Sardans J, Rivas-ubach A, et al. The human-induced imbalance between C, N and P in Earth's life system[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(1): 3–6