太湖流域稻麦轮作农田磷素累积现状及其环境风险与控制对策

汪玉¹, 赵旭¹, 王磊², 程谊¹, 王慎强^{1*}

(1.土壤环境与污染修复重点实验室, 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 中国科学院南京土壤研究所 南京 210008; 2.环境保护部南京环境科学研究所 南京 210042)

摘要: 针对太湖流域稻麦农田土壤磷库出现富集, 从而磷素流失加速导致太湖地区水体环境污染负荷加重的事实, 综述了近几十年来太湖流域稻麦轮作农田因长期施用磷肥导致土壤磷库盈余的现状以及环境风险。从节约磷资源和保护水环境的角度, 提出了既能满足作物磷素营养需求, 又不造成农田土壤磷素过量积累的科学施磷方案建议。

关键词: 土壤磷素; 盈余; 径流流失; 科学施磷

中图分类号: X820.4 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2014)05-0829-07 doi:10.11654/jaes.2014.002

Accumulation, Environmental Risk and Control of Phosphorus in Rice/Wheat Rotation Farmland in Taihu Lake Watershed

WANG Yu¹, ZHAO Xu¹, WANG Lei², CHENG Yi¹, WANG Shen-qiang^{1*}

(1.Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2.Nanjing Institute of Environmental Sciences of the Ministry of Environmental Protection of PR China, Nanjing 210042, China)

Abstract: There are increasing concerns over water eutrophication in the Taihu Lake Watershed. This paper reviewed phosphorus accumulation from long-term fertilization and environmental risks in rice/wheat rotation farmland in this region. An application plan of phosphorus fertilizer was thus proposed that meets crop growth without causing soil phosphorus excess accumulation.

Keywords: soil phosphorus; surplus; runoff loss; phosphorus fertilizer application

土壤磷素是作物生长的主要营养限制因子之一。磷在土壤中易于固定而转变为作物难利用态, 因此磷肥的施用是保证土壤有效磷库和维持作物高产的最主要途径^[1]。然而长期盲目过量施用磷肥会导致土壤有效磷甚至全磷含量增加, 土壤供磷能力超过作物生长的需求, 使磷库盈余量不断攀升^[2-3], 增加了磷随农田地表径流和向下淋洗的流失, 给地表水和地下水环

境安全带来负荷^[4-5]。已有研究表明, 除人畜禽排泄物等农村磷污染源, 集约化农作区也是水体中磷的最主要来源^[6-10], 农田土壤磷素的过量积累以及流失已成为水体富营养化的重要贡献源之一^[11]。其中具有代表性的太湖、巢湖以及滇池流域水体中总磷指标甚至达到劣V类^[12], 富营养化现象已十分严重。

太湖流域作为我国工农业最为发达的地区之一, 近20年来农田土壤中磷素含量的总体水平不断上升, 并普遍出现盈余现象^[13], 而农民仍旧盲目过量施用化学磷肥或者复合肥, 导致该地区的磷肥利用效率下降, 造成磷资源的浪费, 也给流域水环境治理带来了巨大压力。因此, 了解太湖流域稻麦轮作农田土壤磷库的现状及其成因、研究土壤磷素流失与环境影响

收稿日期: 2013-10-08

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2012-BAD15B03); 国家水专项课题(2012ZX07101-004); 国家“948”重点项目(2011-G30)

作者简介: 汪玉(1983—), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事农田磷循环和面源污染控制研究。E-mail: wangyu@issas.ac.cn

* 通信作者: 王慎强 E-mail: sqwang@issas.ac.cn

的关系、提出农田科学施磷的方案,对该地区农田面源污染控制和磷资源高效利用具有重要意义。

1 太湖流域稻麦轮作农田磷库现状

近30年来,农田有机肥投入量逐渐减少,为满足作物高产需求,农田化学磷肥的投入量持续增加,磷肥工业也因此不断发展,导致我国农田土壤磷收支特征自上世纪80年代开始由亏缺扭转为盈余,盈余面积不断扩大^[14]。由于磷在土壤中极易被固持,致使作物对磷肥的当季利用率很低,大多仅在10%~25%之间^[1],大部分施入土壤的磷转变为难溶、作物难利用态在土壤中迅速积累。

太湖地处经济发达的沪、宁、杭三角带中心,总面积超过3万km²,覆盖江苏省苏南地区,浙江省嘉兴、湖州及杭州市的一部分,上海市的大部分地区,其中江苏省占53%,浙江省占33.4%,上海市占13.5%。耕作方式以稻麦轮作为主,耕作土壤主要为水稻土,目前水稻土面积约102万hm²^[13]。太湖地区经济发达,人口密度大,肥料投入量相对较高。据我们前期调查,当前太湖流域稻麦轮作农田一年投入的化学磷肥达到120 kg P₂O₅·hm⁻²^[13]。以宜兴市为例,近20年来耕地面积减少1/6,然而化肥投入量却提高了3倍多。就磷素而言,平均施肥量(以P计)为62.8 kg·hm⁻²·a⁻¹,而随作物收获支出的磷平均只有38.9 kg·hm⁻²·a⁻¹,其余磷素绝大部分积累于土壤中^[13]。

因长期大量施用磷肥,太湖地区稻麦轮作农田导致土壤速效磷以及全磷含量显著增加。以宜兴市1982年土壤普查资料为参照,归纳高超等1999年^[16]以及本课题组2009年^[13]的调查结果,如表1所示,该市主要类型稻麦轮作水稻土全磷及有效磷(Olsen-P)含量在过去30年间不断提高。与第二次土壤普查结果相比,1999年三种主要类型水稻土(黄泥土、白土

以及乌泥土,占全市水稻土面积55.71%)全磷含量平均提高了0.1 g·kg⁻¹,有效磷含量增加了4~5 mg·kg⁻¹;而湖白土全磷和速效磷含量提高幅度更大,分别达0.2 g·kg⁻¹和12.2 mg·kg⁻¹。2009年上述三种类型水稻土磷含量进一步增加,其中全磷含量达到0.53~0.72 g·kg⁻¹,有效磷含量也增加到15.3~37.3 mg·kg⁻¹。若以土壤有效磷含量<3、3~5、5~10、>10 mg·kg⁻¹分别作为土壤严重缺磷、缺磷、轻度缺磷和基本不缺磷的标准^[14],上述水稻土均不缺磷。刘付程等^[17]分析了太湖流域西北部总面积5754.5 km²的调查区域内耕层土壤磷素含量空间变异特征,发现全磷含量的平均值为0.57 g·kg⁻¹,显著高于第二次土壤普查时土壤耕层全磷含量。麻万诸等^[18]分析了浙江省11个地市的耕作土壤有效磷含量,结果表明与第二次土壤普查结果相比,有效磷含量明显增加,全省耕地土壤有效磷超过50 mg·kg⁻¹的样品占总样品的11.68%。徐祖祥^[19]通过分析杭州市30个长期定位监测点2002年至2008年数据,发现7年时间土壤速效磷含量增加了88.5%。许仙菊^[20]调查了上海郊区43个农田定位试验土壤样品的速效磷含量(监测时间2002—2005年),发现多年农田磷养分盈余会导致表层土壤速效磷积累。以上调查结果表明,太湖流域大部分稻麦农田土壤基本处于不缺磷状态,甚至出现了土壤磷过量累积的现象。

导致土壤磷累积的原因主要与该地区的肥料品种结构变化以及施肥方式有关。根据我们2006年和2011年调查,目前稻田农户已基本不再施用有机肥(人畜禽排泄物、绿肥和秸秆等)^[21],而全部以施用化学肥料代替,特别是高浓度N、P、K三元复合肥(2011年国产和进口复合肥N:P₂O₅:K₂O的比例分别为15:15:15和16:16:16)盲目性的年年施、季季施,在满足作物氮素营养需求的同时,磷、钾养分也被带入土壤而导致在土壤中累积和资源浪费。

2 太湖流域稻麦轮作农田土壤磷素累积引起的环境风险及磷素阈值

当土壤磷素过量累积时,磷可通过地表径流、土壤侵蚀、以及渗漏淋溶等途径流失,进而加重水环境污染负荷^[1]。据估计全世界每年有300~400万t P₂O₅从土壤迁移到水体中^[22]。Chen等^[23]报道,2004年中国从农田排入水体的总磷含量达到4.679亿t,其中径流流失占69.3%;在1978—2005年间,农田进入水体中的磷素含量增加了3.4倍,并预测2005年至2050年将会持续增加1.8倍。由于长期过量施用磷肥,太

表1 宜兴市稻麦轮作农田主要类型水稻土有效磷和全磷含量变化

Table 1 Changes of Olsen-P and total P contents in anthrosols in Yixing city over years

土壤类型	Olsen-P/mg·kg ⁻¹			全磷/g·kg ⁻¹		
	1982*	1999 ^[16]	2009 ^[13]	1982*	1999 ^[16]	2009 ^[13]
乌泥土	5.0	10.5	15.3	0.41	0.52	0.59
黄泥土	5.8	9.2	17.5	0.41	0.51	0.53
白土	4.9	8.3	21.4	0.37	0.46	0.55
湖白土	5.5	27.7	37.3	0.31	0.54	0.72

注:*1982年数据来自第二次土壤普查结果。

湖流域的农田土壤处于富磷状态,加速了磷素向水体的迁移速度^[24]。据报道来自农田的总磷对太湖水体富营养化的贡献率已达到19%^[25]。

地表径流是农田土壤磷素流失的主要途径。焦少俊等^[26]选取太湖东岸的青紫泥水稻土区进行常规施肥和不施肥条件下水稻季稻田磷流失的观测研究,发现水稻种植季田面水和降雨径流水中磷的浓度呈现前期高后期低的趋势,整个水稻生长季稻田磷的流失总量达 $0.95 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,以田面水径流流失为主。徐爱兰等^[27]通过太湖流域平原典型圩区野外观测和室内分析相结合的方法,阐明径流是影响磷素流失的关键因素,施磷肥后径流中磷素浓度达最高值,后呈下降趋势,磷素径流损失与施磷量呈显著正相关。地表径流中的磷包括溶解态(Dissolved P, DP)和颗粒态(Particulate P, PP)。其中溶解态磷是可被藻类直接吸收利用的,主要以正磷酸盐形式存在;颗粒态磷则是藻类能持续生长的潜在磷源,包括含磷矿物、含磷有机物以及被吸持在土壤颗粒上的磷。田间试验证明太湖流域农田径流迁移的土壤磷素主要是颗粒态磷,占总流失磷的70%~80%,可溶态磷仅占总流失磷量的20%~30%^[28-30]。土壤磷素随径流流失的量在其他条件相同的前提下,可随土壤有效磷含量增加而提高,但在土壤有效磷含量达到一定累积水平之前,径流流失的磷量随有效磷的增加非常有限,一旦达到临界值后径流流失的磷量便会迅速增加,这个临界值称为土壤磷素的环境警戒值(Break Point)^[31]。曹志洪等^[27]研究结果表明,太湖地区水稻土磷素环境警戒值为 $25\sim 30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (以Olsen-P为准)。张焕朝等^[28-29,32]研究了太湖地区爽水型水稻土和囊水型水稻土磷素随地表径流流失及其与土壤有效磷的关系,发现在常规施磷水平下,爽水型和囊水型水稻土2000—2001年度的地表径流磷流失量分别为 $603.2, 679.5 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;2001~2002年度则增加到 $1\ 148.9$ 和 $1\ 350.3 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;两种土壤磷素径流流失的突变点分别为土壤有效磷含量达到 $32, 26 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

施磷量对土壤磷素径流流失有显著影响。王建明等^[33]统计了2007—2009年太湖流域6个水稻田的田间试验结果,认为太湖流域高产水稻的氮磷钾推荐用量分别为 $267, 30\sim 60, 135 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,继续增加肥料用量,水稻产量呈下降趋势。秦伟等^[34]以江苏南部的近太湖区为案例区,在稻麦轮作区开展5个施磷肥处理试验,结果表明水稻植株体内的磷含量随施肥量的增加而呈现整体增加的趋势,过量施用磷肥不仅不能增

加稻谷产量,反而会使产量下降。但是由于太湖流域土壤类型不同,环境条件也有差异,关于土壤磷素阈值的研究较少。因此,针对太湖流域主要农田土壤,研究既满足作物磷素营养需求又不导致土壤磷素累积造成水环境污染的磷素阈值十分必要。

3 关于科学施磷方案的思考

尽管近几十年来磷肥的投入确保了粮食安全,但其带来的环境安全问题同样值得关注。考虑到磷素循环的不可逆性和磷资源枯竭期的来临,在农业生产中,制订既能满足作物磷营养需求、又不导致土壤磷素累积而造成水环境污染负荷的科学施磷方案显得十分必要。因此,针对太湖流域河网区农田科学施磷方案的制订,笔者认为主要从优化区域施磷方式和提高微域磷高效利用效率两方面入手。

3.1 优化区域施磷方式

首先从优化施磷方式出发,需要考虑太湖地区的主要轮作周期以及肥料施用方式。稻麦水旱轮作是太湖流域水稻地区最主要的轮作制度,在一个轮作周期中统筹考虑不同作物季磷肥的分配,充分利用残留磷肥的后效,减少磷肥施用量。磷肥的当季利用率在水稻上通常只有8%~20%^[35-36],当季施入的磷肥大部分被土壤固定,而后季小麦为旱作,磷的有效性在从淹水到落干的过程会进一步降低,对小麦也大多无效。因此,早在20世纪60年代鲁如坤先生就提出了“早重水轻”的施磷方法,采用在水旱轮作中把磷肥重点施在旱作上的施用制度^[1]。然而多年来,由于太湖流域经济相对发达,农民图省工省时,在生产实践中并未普遍采用这种施磷方法,而是在磷素已经盈余的情况下,仍旧盲目施用化学磷肥或者复合肥。因此,在当前高磷投入以及土壤磷富集的情况下,重新讨论和实践“早重水轻”科学施磷的措施具有重大意义。本课题组自2009年起,选择太湖地区宜兴市和常熟市主要类型稻麦轮作农田的10种主要类型水稻土进行盆栽试验,7季作物试验表明,麦季施磷、稻季不施磷处理与7季作物季季均施磷处理的水稻及小麦产量相比差异性不显著。据此推论,如果一个稻季不施磷,每公顷每年可节省 $60 \text{ kg P}_2\text{O}_5$,太湖流域 102 万 hm^2 水稻土每年可节约 $6.16 \text{ 万 t P}_2\text{O}_5$ 。按当前过磷酸钙价格计算($12\% \text{ P}_2\text{O}_5, 600 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$),每年可直接节约肥料投入成本 3.06 亿元 ^[13]。可见,在当前稻麦轮作系统下,探索根据不同水稻土类型和土壤磷累积的水平进行“早施水不施”或“早重水轻”的施磷制度具有十分重

要的意义。

此外,采取有机肥和化学磷肥配合施用,可提高土壤有效磷的供应能力。这是因为施用有机肥能够提高土壤全磷、有效磷的含量^[37]:一方面有机肥自身含有一定数量的磷,部分磷易于分解释放;另一方面,有机肥施入土壤后可以增加土壤有机质含量,除了有机质自身的矿化作用产生无机磷外,有机阴离子可参与竞争土壤固相表面的专性吸附点从而降低对磷的吸附固定,有机质分解产生的某些有机酸能与土壤中难溶性磷酸盐的金属离子产生络合反应从而释放其中的磷,而腐殖质也可在铁、铝氧化物等胶体的表面形成包蔽,从而减少对磷的吸附固定^[38-39]。林德喜等^[40]通过研究长期施肥条件下的常熟水稻土磷素的转化,发现有机肥和氮磷钾混施(施用秸秆 1500 kg·hm⁻²)是最佳的施肥模式,此施肥方式提高了土壤中的 Fe-P、Al-P、Ca₈-P 以及 Ca₂-P 含量。李中阳等^[41]通过研究我国 6 种典型农田土壤(红壤、紫色土、潮土、壤土、灰漠土和黑土)连续施肥 15 年后无机磷形态的变化,发现化肥-粪肥配施显著增加了无机磷各个组分和有效磷含量。曹翠玉等^[42]发现黄潮土经 15 年连年采用有机-无机肥料配施,土壤有机磷各组分均有不同程度的提高,其中活性、中等活性以及中稳性有机磷增幅较大。然而根据我们 2006 年和 2011 年在太湖地区的调查,农民不再在稻麦农田使用有机肥料^[21]。我国有机肥资源十分丰富,如能把有机肥秸秆资源有效利用起来,采用有机肥和化学磷肥配合施用,可大大提高土壤有效磷的供应能力。

3.2 提高土壤磷肥利用率

由于受作物、土壤类型和性质,磷肥种类和用量等一系列因素的影响,磷肥的当季利用率很低,磷肥进入土壤后多以 Fe-P、Al-P、Ca-P 以及 O-P、有机磷等形态储备起来,而以上形态的磷溶解度均较低,远不能满足一般作物的生长需求。因此,如何活化土壤磷库,寻求利用土壤中难溶态磷的技术和方法,提高土壤磷的利用率,对农业持续发展和生态系统健康的维护具有重要意义,也是制定科学施磷方案时必须考虑的问题^[43-45]。例如,从无机磷的吸附与解吸、沉淀和溶解等化学转化过程来研究土壤磷的活化,以及如何充分利用溶磷微生物作用来溶解或矿化累积于土壤中的磷源,日益受到研究者的关注。

土壤中磷的化学行为不仅直接影响着磷素的生物有效性,而且其生物地球化学循环过程与环境效应相关联。土壤无机磷中 Ca₂-P 易被作物吸收,是作物

的有效磷源, Ca₈-P、Al-P 和 Fe-P 可作为作物的第二有效磷源,而 O-P、Ca₁₀-P 在短期内不易被作物吸收利用,是作物的潜在磷源^[46]。在中酸性土壤、白浆土、石灰性土壤以及黑土等土壤中,无机磷是土壤磷的最直接来源,其中以 Ca₂-P 对有效磷的作用最大^[47]。据报道,土壤磷形态 Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P、Fe-P 以及 O-P 与土壤中有机质含量具有显著相关性^[46]。有机质的存在显著影响着土壤中磷素的吸附解吸过程,有机络合物具有促进土壤磷活化,减少磷固定以及提高磷素利用率的作用。这是因为有机质的存在能竞争和减少土壤磷的吸附位点,同时也能起到酸溶解的作用,从而改变胶体电荷,形成磷-金属-有机酸三元复合体等^[48]。因此,可以通过调节土壤有机质含量来提高土壤磷素利用效率。另外,根系分泌的低分子有机酸包括柠檬酸、草酸、酒石酸和苹果酸,在植物根系的富集也能明显促进土壤中磷的释放,提高植物对磷的吸收。有机酸主要通过溶解、螯合等作用影响土壤中无机磷组分,促进不同磷酸盐中磷的释放和难溶性磷酸盐溶解,从而提高土壤磷的有效性^[49]。龚松贵等^[50]通过室内模拟试验,发现相同浓度下有机酸活化土壤磷的能力为柠檬酸>酒石酸>苹果酸,在同一种有机酸酸度下,其活化土壤各无机磷形态以 Al-P 最多,Fe-P 及 Ca-P 次之。

此外,磷素供应主要依赖于微生物对无机磷的活化以及有机磷的矿化作用。土壤中许多微生物包括细菌、真菌以及放线菌具有将植物难利用的磷转化为可利用态磷的能力,利用微生物作用提高土壤磷素的利用率,也是值得探索的途径。土壤中有相当比例的微生物能促使植物难利用的不溶性无机磷酸盐进入溶液。有报道称,经过三周培养试验,微生物能有效利用专性吸附态磷,高岭石、针铁矿和非晶形氧化铝所吸附磷的微生物转化率分别达到 42%~43%、42%~46% 以及 38%~43%,比当季作物对磷的利用率高出 4~8 倍,其机理是微生物活动分泌的有机酸或释放的质子降低了土壤 pH,促进难溶性磷酸盐的溶解,并且有机酸作为螯合剂,能通过与 Fe、Al、Ca 等阳离子螯合,抑制过饱和和溶液生成和磷的化学沉淀^[51]。Kim 等^[52]研究表明,解磷微生物在生长代谢过程中分泌的有机酸可以螯合磷酸钙盐中的 Ca²⁺,从而引起磷酸钙盐的溶解。而土壤有机磷的矿化和积累也是以土壤微生物作用为动力,并在磷酸酶的作用下进行的。当磷是土壤微生物和植物生长的主要限制因子时,土壤微生物分泌的酸性或碱性磷酸酶可将植酸盐、磷脂等有机磷化

物水解,转化为简单的无机磷,为植物所吸收利用^[53]。Yadav等^[54]从土壤中分离出7株植酸酶和磷酸酶的高产真菌,发现其水解甘油磷酸酯的能力达到 $2.12\sim 4.85\mu\text{g}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ 。Tate^[55]认为难溶于水的有机磷在土壤中经矿化后持续释放出无机态磷,对作物的生长十分有利。因此,筛选具有溶磷特征及可矿化有机磷的解磷菌,利用解磷微生物的作用,也是提高土壤磷素利用效率的途径之一。有研究表明处于不同降解阶段的生物残体也具有溶磷作用,能够增大土壤磷的植物有效性。新鲜有机物可以对土壤有机质的降解起促进作用,从而加速磷的生物矿化。有机残体降解过程中的有机酸或其他螯合剂可以把被钙、铁、铝固定的磷释放出来,同时最终形成的腐殖质可以在铁、铝氧化物及粘土矿物表面形成保护层,减少磷酸盐的固定。Fransson等^[56]认为土壤微生物体内含有大量的核酸和磷酸糖类,当细胞死亡后,这些磷可以被释放并被转变为植物可利用的磷。因此,利用化学或生物学手段活化土壤磷,提高磷的利用率,具有广阔前景。

综上所述,鉴于磷矿资源日趋紧张、土壤磷累积水平高以及太湖地区水环境污染严重的事实,提出太湖地区农田科学施磷方案具有现实意义。此外,中国磷矿资源品位特点是富矿比例小,但目前生产的磷肥却以大量消耗富矿,生产高浓度的磷酸氢铵为主,及时调整磷肥产品结构,有效利用中低品位磷矿也是解决磷肥资源日趋贫乏的举措之一。由于不同类型土壤的理化性质不同,其供磷能力也存在差异,在建立“早施水不施”或“早重水轻”施磷制度的基础上,需要进一步探究不同土壤供磷能力差异的化学及生物学机制,为合理制定科学施磷方案提供理论与实践依据。

参考文献:

- [1] 鲁如坤. 土壤-植物营养学原理和施肥[M]. 北京:化学工业出版社, 1998.
LU Ru-kun. Principles of soil and plant nutrition and fertilizer[M]. Beijing:Chemical Industry Press, 1998.
- [2] Nikitishen V I, Lichko V I, Kurganova E V. Phosphorus in agroecosystems on gray forest soils in the opolie regions of Central Russia[J]. *Eurasian Soil Science*, 2008, 41: 869-881.
- [3] Waigwa M W, Othieno C O, Okalebo J R. Phosphorus availability as affected by the application of phosphate rock combined with organic materials to acid soils in western Kenya[J]. *Experimental Agriculture*, 2003, 39: 395-407.
- [4] Hart M R, Quin B F, Nguyen M L. Phosphorus runoff from agricultural land and direct fertilizer effects: A review[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33: 1954-1972.
- [5] McDowell R W, Sharpley A N. Approximating phosphorus release from soils to surface runoff and subsurface drainage[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30: 508-520.
- [6] Chen M. Nutrient balance modelling and policy evaluation in China farming-feeding system[D]. Beijing: Tsinghua University, 2007.
- [7] 金相灿. 中国湖泊环境[M]. 北京:海洋出版社, 1995: 267-322.
JIN Xiang-can. China lake environment [M]. Beijing: Ocean Press, 1995: 267-322.
- [8] 张乃明, 李成学, 李阳红. 滇池流域土壤磷累积特征与释放风险研究[J]. 土壤, 2007: 665-667.
ZHANG Nai-ming, LI Cheng-xue, LI Yang-hong. Accumulation and releasing risk of phosphorus in soils in Dianchi watershed[J]. *Soils*, 2007: 665-667.
- [9] Li S T, Zhou J M, Wang H Y, et al. Kinetics of phosphate release from three phosphate-treated soils[J]. *Pedosphere*, 2005, 15: 518-525.
- [10] Zhang N M, Yu Y, Hong B, et al. Factors influencing runoff P losses from farmlands of the Dianchi Lake Watershed in Yunnan, China[J]. *Pedosphere*, 2004, 14: 259-262.
- [11] 高超, 张桃林, 吴蔚东. 农田土壤中的磷向水体释放的风险评价[J]. 环境科学学报, 2001: 344-348.
GAO Chao, ZHANG Tao-lin, WU Wei-dong. Risk evaluation of agricultural soft phosphorus release to the water bodies[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2001: 344-348.
- [12] 黄东风, 王果, 陈超. 农业面源污染研究概况及发展趋势[J]. 中国农村小康科技, 2006: 39-45, 52.
HUANG Dong-feng, Wang Guo, Chen Chao. Research survey and prospect of agricultural non-point source pollution [J]. *Chinese Countryside Well-off Technology*, 2006: 39-45, 52.
- [13] 王慎强, 赵旭, 邢光熹, 等. 太湖流域典型地区水稻土磷库现状及科学施磷初探[J]. 土壤, 2012, 158-162.
WANG Shen-qiang, ZHAO Xu, XING Guang-xi, et al. Phosphorus pool in paddy soil and scientific fertilization in typical areas of Taihu Lake Watershed, China[J]. *Soils*, 2012: 158-162.
- [14] 沈善敏. 中国土壤肥力[M]. 北京:中国农业出版社, 1998.
SHEN Shan-min. Soil fertility in China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998.
- [15] Gilbert N. Environment: The disappearing nutrient[J]. *Nature*, 2009, 461: 716-718.
- [16] 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: 24-27.
GAO Chao, ZHANG Tao-lin. Agricultural soil phosphorus dynamics in Taihu Lake Watershed and its environmental impact[J]. *Rural Eco-Environment*, 2000: 24-27.
- [17] 刘付程, 史学正, 潘贤章, 等. 太湖流域典型地区土壤磷素含量的空间变异特征[J]. 地理科学, 2003: 77-81.
LIU Fu-cheng, SHI Xue-zheng, PAN Xian-zhang, et al. Characteristics of spatial variability of total phosphorus in soil of the typical area of Taihu Lake Watershed[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2003: 77-81.
- [18] 麻万诺, 章明奎, 吕晓男. 浙江省耕地土壤氮磷钾现状分析[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2012, 38(1): 71-80.
MA Wan-zhu, ZHANG Ming-kui, LU Xiao-nan. Concentrations and

- variations of total N, available P and K of cultivated soils in Zhejiang Province, China[J]. *Journal of Zhejiang University (Agric & Life Sci.)*, 2012, 38(1):71-80.
- [19] 徐祖祥. 杭州市土壤养分状况及施肥措施[J]. *土壤*, 2009, 41(6):917-920.
XU Zu-xiang. Soil nutrients in hangzhou and fertilization measures[J]. *Soils*, 2009, 41(6):917-920.
- [20] 许仙菊. 上海郊区不同作物及轮作农田氮磷流失风险研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2007.
XU Xian-ju. Studies on nitrogen and phosphorus losses risk in different crop and rotation farmlands in Shanghai suburb[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2007.
- [21] 周 杨, 司友斌, 赵 旭, 等. 太湖流域稻麦轮作农田氮肥施用状况、问题和对策[J]. *土壤*, 2012, 44(3):510-514.
ZHOU Yang, SI You-bin, ZHAO Xu, et al. Situation, problems and countermeasures in nitrogen fertilization in rice/wheat rotation paddy field of Taihu Lake Watershed, China[J]. *Soils*, 2012, 44(3):510-514.
- [22] 司友斌, 王慎强, 陈怀满. 农田氮、磷的流失与水体富营养化[J]. *土壤*, 2000:188-193.
SI You-bin, WANG Shen-qiang, CHEN Huai-man. The loss of farmland nitrogen and phosphorus and water eutrophication[J]. *Soils*, 2000:188-193.
- [23] Chen M. Chen J. Phosphorus release from agriculture to surface waters: Past, present and future in China[J]. *Water Science and Technology*, 2008, 57(9):1355-1361.
- [24] 徐明岗, 孙本华, 张一平. 土壤磷扩散规律及其能量特征的研究 II. 施磷量及水肥温相互作用对磷扩散的影响[J]. *土壤学报*, 1998:55-64.
XU Ming-gang, SUN Ben-hua, ZHANG Yi-ping. Diffusion of phosphate and its energetic characteristics in soils: II. Influence of phosphorus application rate and its interaction with soil moisture or/and temperature[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1998:55-64.
- [25] 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 世纪初中国面源污染的形势估计[J]. *中国农业科学*, 2004:1008-1017.
ZHANG Wei-li, WU Shu-xia, JI Hong-jie, et al. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies: I. Estimation of agricultural non-point source pollution in China in early 21 century[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004:1008-1017.
- [26] 焦少俊, 胡夏民, 潘根兴, 等. 施肥对太湖地区青紫泥水稻土稻季农田氮磷流失的影响[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(4):495-500.
JIAO Shao-jun, HU Xia-min, PAN Gen-xing, et al. Effects of fertilization on nitrogen and phosphorus run-off loss from Qingzini paddy soil in Taihu Lake region during rice growth season[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(4):495-500.
- [27] 徐爱兰, 王 鹏. 太湖流域典型圩区农田磷素随地表径流迁移特征[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27:1106-1111.
XU Ai-lan, WANG Peng. Phosphorus losses with surface runoff from farm lands in polder area around Taihu basin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27:1106-1111.
- [28] Zhang H C, Cao Z H, Shen Q R, et al. Effect of phosphate fertilizer application on phosphorus(P) losses from paddy soils in Taihu Lake Region; I. Effect of phosphate fertilizer rate on P losses from paddy soil[J]. *Chemosphere*, 2003, 50:695-701.
- [29] Zhang H C, Cao Z H, Wang G P, et al. Winter runoff losses of phosphorus from paddy soils in the Taihu Lake Region of South China[J]. *Chemosphere*, 2003, 52:1461-1466.
- [30] 曹志洪, 林先贵, 杨林章, 等. 论“稻田圈”在保护城乡生态环境中的功能 I. 稻田土壤磷素径流迁移流失的特征[J]. *土壤学报*, 2005, 42(5):97-102.
CAO Zhi-hong, LIN Xian-gui, YANG Lin-zhang, et al. Ecological function of "paddy field ring" to urban and rural environment: I. Characteristics of soil P losses from paddy fields to waterbodies with runoff [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(5):97-102.
- [31] Edwards A C, Withers P J A. Soil phosphorus management and water quality: A UK perspective[J]. *Soil Use and Management*, 1998, 14:124-130.
- [32] 张焕朝, 张红爱, 曹志洪. 太湖地区水稻土磷素径流流失及其 Olsen 磷的“突变点”[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2004, 28(5):6-10.
ZHANG Huan-chao, ZHANG Hong-ai, CAO Zhi-hong. Research on phosphorus runoff losses from paddy soils in the Taihu Lake region and its Olsen-P "change-point"[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2004, 28(5):6-10.
- [33] 王建国, 何晓艳, 毛华方. 太湖流域高产水稻氮磷钾肥用量的推荐[J]. *江苏农业科学*, 2011, 39(2):122-124.
WANG Jian-ming, HE Xiao-yan, MAO Hua-fang. Suggestion of NPK fertilizers usage in rice in Taihu Lake Basin of China[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2011, 39(2):122-124.
- [34] 秦 伟, 陆欢欢, 王 芳, 等. 太湖流域典型农田系统土壤中磷的流失[J]. *江苏农业科学*, 2012, 40(6):321-323.
QIN Wei, LU Huan-huan, WANG Fang, et al. Phosphorus loss typical farmland soil system in Taihu Lake basin[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2012, 40(6):321-323.
- [35] De Datta S K, Biswas T K, Charoenchamratcheep C. Phosphorus requirement and management for lowland rice [C]//Phosphorus requirement for sustainable agriculture in Asia and Oceania. Manila: IRRI, 1990:307-323.
- [36] Ma W Q, Ma L, Li J H, et al. Phosphorus flows and use efficiencies in production and consumption of wheat, rice, and maize in China[J]. *Chemosphere*, 2011, 84(6):814-821.
- [37] Patidar M, Mali A L. Residual effect of farmyard manure, fertilizer and biofertilizer on succeeding wheat(*Triticum aestivum*) [J]. *Indian Journal of Agronomy*, 2002, 47:26-32.
- [38] 赵晓齐, 鲁如坤. 有机肥对土壤磷素吸附的影响[J]. *土壤学报*, 1991:7-13.
ZHAO Xiao-qi, LU Ru-kun. Effect of organic manure on soil phosphorus adsorption[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1991:7-13.
- [39] Guppy C N, Menzies N W, Moody P W, et al. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: A review [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2005, 43(2):189-202.
- [40] 林德喜, 胡 锋, 范晓晖, 等. 长期施肥对太湖地区水稻土磷素转化

- 的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2006, 12(4):453-456.
- LIN De-xi, HU Feng, FAN Xiao-hui, et al. Effect of long-term fertilization on phosphorus transformation in paddy soil in the Taihu Lake region[J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2006, 12(4):453-456.
- [41] 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 Zhong-yang, XU Ming-gang, LI Ju-mei, 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 Science*, 2010, 41(6):1434-1439.
- [42] 曹翠玉, 蒋仁成, 有机肥料对黄潮土有效磷库的影响[J]. 土壤, 1998, 30(5):235-238.
- CAO Cui-yu, JIANG Ren-cheng. Effect of organic fertilizer on yellow meadow soil available phosphorus pool[J]. *Soils*, 1998, 30(5):235-238.
- [43] Hinsinger P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: A review[J]. *Plant and Soil*, 2001, 237(2):173-195.
- [44] Kamh M, Horst W J, Amer F, et al. Mobilization of soil and fertilizer phosphate by cover crops[J]. *Plant and Soil*, 1999, 211:19-27.
- [45] Valkama E, Uusitalo R, Ylivainio K, et al. Phosphorus fertilization: A meta-analysis of 80 years of research in Finland[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2009, 130:75-85.
- [46] 沈仁芳, 蒋柏藩. 石灰性土壤无机磷的形态分布及其有效性[J]. 土壤学报, 1992, 29(1):80-86.
- SHEN Ren-fang, JIANG Bo-fan. Speciation of inorganic phosphorus in calcareous soil and its availability[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1992, 29(1):80-86.
- [47] Abbas F, Merlet J, Morellet N, et al. Roe deer may markedly alter forest nitrogen and phosphorus budgets across Europe[J]. *Oikos*, 2012, 121(8):1271-1278.
- [48] 张广才, 燕香梅, 关连珠, 等. 有机络合物对土壤磷素和金属离子活性影响研究进展[J]. 沈阳农业大学学报, 2002, 33(3):215-218.
- ZHANG Guang-cai, YAN Xiang-mei, GUAN Lian-zhu, et al. Advances in effects of organic complex matters on phosphorus and particulate trace metals in soil [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2002, 33(3):215-218.
- [49] 唐海燕, 魏世强. 低分子有机酸对淹水土壤磷释放动力学的影响[J]. 西南农业大学学报(自然科学版), 2005, 27(4):439-443.
- TANG Hai-yan, WEI Shi-qiang. Kinetics of phosphorus release from flooded soils as affected by organic acids with low molecular weight[J]. *Journal of Southwest Agricultural University(Natural Science)*, 2005, 27(4):439-443.
- [50] 龚松贵, 王兴祥, 张桃林, 等. 低分子量有机酸对红壤无机磷活化的作用[J]. 土壤学报, 2010, 47(4):692-697.
- GONG Song-gui, WANG Xing-xiang, ZHANG Tao-lin, et al. Release of inorganic phosphorus from red soils induced by low molecular weight organic acids[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(4):692-697.
- [51] He Z L, Zhu J. Transformation kinetics and potential availability of specifically-sorbed phosphate in soils[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1998, 51(3):209-215.
- [52] Kim Y H, Bae B, Choung Y K. Optimization of biological phosphorus removal from contaminated sediments with phosphate-solubilizing microorganisms[J]. *J Biosci Bioeng*, 2005, 99(1):23-29.
- [53] Molla M A Z, Chowdhury A A, Islam A, et al. Microbial mineralization of organic phosphate in soil[J]. *Plant and Soil*, 1984, 78(3):393-399.
- [54] Yadav R S, Tarafdar J C. Phytase and phosphatase producing fungi in arid and semi-arid soils and their efficiency in hydrolyzing different organic P compounds [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(6):745-751.
- [55] Tate K R. The biological transformation of P in soil[J]. *Plant and Soil*, 1984, 76(1-3):245-256.
- [56] Fransson A M, Jones D L. Phosphatase activity does not limit the microbial use of low molecular weight organic-P substrates in soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(5):1213-1217.