

朱文彬, 汪玉, 王慎强, 等. 太湖流域典型稻麦轮作农田稻季不施磷的农学及环境效应探究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(6): 1129–1135.

ZHU Wen-bin, WANG Yu, WANG Shen-qiang, et al. Agronomic and environmental effects of P fertilization reduction in rice–wheat rotation field in Taihu Lake Region of Southeast China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(6): 1129–1135.

太湖流域典型稻麦轮作农田稻季不施磷的农学及环境效应探究

朱文彬^{1,2}, 汪玉², 王慎强^{2*}, 赵旭², 卢亚男^{2,3}, 程谊², 司友斌^{1*}

(1.安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036; 2.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; 3.南京农业大学理学院, 南京 210095)

摘要:以太湖流域典型稻麦轮作农田为研究对象开展大田试验,通过设置稻麦季均施磷(PR+W,当前农民施肥习惯)、麦季施磷稻季不施磷(PW)、稻季施磷麦季不施磷(PR)以及稻麦季均不施磷(Pzero,对照)四种施磷处理,提出麦季施磷稻季不施磷(PW)的减磷措施。四年八季作物研究结果表明:与传统 PR+W 处理相比较,PW 处理的作物籽粒和秸秆产量均无显著变化,但却提高磷肥利用率 3.54%,同时降低土壤速效磷累积量 10.5%~36.7%,减少径流总磷浓度 12.0%。据此推算,如果一个稻季不施磷肥,太湖流域 1.02×10⁶ hm² 水稻土四年可节约 P₂O₅ 约 24 万 t,估算该流域每年可直接节约肥料投入成本 3.06 亿元。这表明采取麦季施磷稻季不施磷的减磷措施不仅能够保持稳产,而且可节约磷肥(磷矿)资源,降低水环境污染风险,具有农学、环境以及经济效益的三赢潜力。

关键词: 稻季不施磷; 作物产量; 磷肥利用率; 土壤速效磷; 径流总磷; 经济效益

中图分类号: S143.2 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2016)06-1129-07 doi:10.11654/jaes.2016.06.015

Agronomic and environmental effects of P fertilization reduction in rice–wheat rotation field in Taihu Lake Region of Southeast China

ZHU Wen-bin^{1,2}, WANG Yu², WANG Shen-qiang^{2*}, ZHAO Xu², LU Ya-nan^{2,3}, CHENG Yi², SI You-bin^{1*}

(1.School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2.State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3.College of Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Over-fertilization of phosphorus (P) fertilizers is a common practice in rice–wheat rotation fields in the Taihu Lake Region (TLR). In this study, a four-year field experiment of eight rice–wheat–growing seasons was conducted to explore the feasibility of omitting P application in rice season. Four different P regimes, including P fertilization for wheat season only (PW), P fertilization for rice season only (PR), P fertilization for both rice and wheat seasons (PR+W), and no P fertilization for both seasons (Pzero) as control, were designed. Compared with PR+W treatment, rice and wheat yields over 4 years did not show significant difference in PW treatment; but the concentrations of Olsen-P and total P in PW treatment declined by 10.5%~36.7% and 12.0%, respectively ($P<0.05$), and the utilization efficiency of P fertilizer increased by 3.54% ($P<0.05$). Based on the current price of superphosphate, 3.06 billion RMB per year could be saved in TLR. Therefore, the regime of omitting P fertilizer for rice season in rice–wheat rotation field has positive effects on agriculture, environment and economy, and is feasible for at least 4 years in TLR.

Keywords: phosphorus fertilization for wheat only; crop yield; phosphorus utilization efficiency; soil Olsen-P; runoff TP; economic benefits

收稿日期: 2015-11-06

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2015CB150403); 中科院战略性先导科技专项 B(XDB15020402); 国家科技支撑计划课题(2012BAD15B03); 国家水专项课题(2012ZX07101-004); 江苏省农业科技自主创新资金项目[CX(15)1004]

作者简介: 朱文彬(1991—),男,硕士研究生,环境工程专业,主要从事农田磷循环和面源污染控制研究。E-mail: 15150530203@163.com

* 通信作者: 王慎强 E-mail: sqwang@issas.ac.cn; 司友斌 E-mail: youbinsi@ahau.edu.cn

化肥的大量生产使用,使我国农业现代化取得了巨大成就^[1]。如今,我国磷肥消费量稳居世界第一,由1961年的12.2万t增至2012年的1176万t^[2-4]。但由于磷肥当季利用率一般仅占施磷量的10%~25%^[5],且每年大量磷素从土壤迁移至水体,造成水体污染^[6-9],特别是总磷(TP)对水体造成了严重污染^[10-11]。太湖是我国第三大淡水湖,其水质大部分为V类和劣V类,农业面源污染是导致水体恶化的主要原因之一^[12]。

根据2006年和2011年对太湖流域的两次农户调查,该地区目前农户已不再施用有机肥^[13],基肥甚至追肥全部为高浓度N、P、K三元复合肥,由于施肥缺乏科学性,磷素又随复合肥被动施入,导致农田土壤磷素不断累积和资源严重浪费^[14]。当前该地区农田一个稻麦轮作季磷肥投加量就达120 kg P₂O₅·hm⁻²,在满足作物营养需求的同时,磷素在土壤中不断累积,不仅降低磷肥利用效率、造成磷矿资源浪费,同时增大了土壤磷向水体流失的风险^[15]。许仙菊等^[16]根据稻麦轮作两年四季的田间小区实验,建议稻麦轮作区“氮肥适当减量,磷肥隔年施用”,既可减少肥料投入,亦能保证作物产量。已有研究表明,太湖流域稻麦轮作农田磷肥施用量越大,磷素流失越严重,径流中总磷浓度就越高^[17]。前期课题组针对太湖流域稻麦轮作农田进行减磷盆栽实验,发现与传统稻麦季均施磷处理相比,无论是富磷、中磷还是缺磷土壤中,稻季不施磷处理的作物产量均无显著变化,同时降低了速效磷在土壤中的累积,表明太湖流域稻麦轮作农田稻季不施磷的减磷措施具有可行性^[18-19]。但该结论是否可以推广有待验证。本文以田间试验为研究对象,提出了稻麦轮作农田麦季施磷稻季不施磷的“减磷”方案,从农学、环境以及经济效应三方面考察其可行性,为建立科学的施磷制度提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤基本理化性状

田间试验地点为中国科学院常熟农业生态实验站宜兴基地(太湖西北岸1 km, 31°16' N, 119°54' E, 年平均气温15.7℃)。宜兴市水稻土占全市耕地面积51%左右,主要以稻麦轮作为主。试验土壤类型为湖白土,基本理化性状见表1。

1.2 小区试验设计

试验于2010年6月开始(稻季),采用完全随机设计,共4个处理:稻麦季均不施磷(Pzero);稻季施磷麦季不施磷(PR);麦季施磷稻季不施磷(PW);稻

表1 供试土壤基本理化性状

Table 1 Basic properties of soil used

全 N/ g·kg ⁻¹	全 P/ g·kg ⁻¹	全 K/ g·kg ⁻¹	有机质/ g·kg ⁻¹	有效磷/ mg·kg ⁻¹	CEC/ cmol·kg ⁻¹	pH
0.957	0.371	12.33	16.7	16.28	8.57	5.95

麦季均施磷(PR+W)。每个处理组设3个重复,共12个试验小区,每个小区面积50 m²。试验各点所需N、P、K肥用量一致,均采用尿素(46% N)、氯化钾(60% K₂O)和过磷酸钙(12% P₂O₅)。氮肥每季用量240 kg N·hm⁻²,钾肥每季用量60 kg K₂O·hm⁻²,磷肥每季用量40 kg P₂O₅·hm⁻²。每季氮肥施用分基肥(30%)、第一次追分蘖肥(40%)和第二次追拔节肥(30%);磷肥施用情况视不同磷肥处理而定。

供试作物与种植方式选择本区域种植最为普遍的冬小麦-夏水稻一年两熟制,肥、水管理等措施按照当地种植习惯,采用常规大田种植管理模式。

1.3 样品采集、分析方法

本文研究对象为2010年稻季至2014年麦季共八季作物、土壤及径流样品。每季作物收获时各小区单打单收计产。取部分稻麦秸秆、籽粒带回实验室分析植株全磷浓度。作物收获后,在小区内按照非系统布点法(S型)随机取点采集0~20 cm耕层土壤,混合成该区待测土样。土壤样品风干,磨碎,过20目筛。采用250 mL塑料瓶收集每个小区径流池中水样,分析测定前用无磷滤纸过滤。通过流量计收集并计算每个小区的径流量。

供试样品分析均采用常规分析方法^[20-22]。植株样品全磷采用H₂SO₄-H₂O₂提取-钼蓝比色-紫外分光光度计(UVmini-1240)测定;土壤pH采用1:2.5(W/V)土水比提取-pH计(Thermo ORION STAR A211)测定;土壤有机质采用Leco CN-2000分析仪测定;土壤总氮采用凯氏定氮法测定;土壤速效磷采用NaHCO₃(pH8.5)浸提-钼蓝比色法测定;阳离子交换量采用乙酸铵交换法测定;土壤总钾采取火焰原子吸收法测定;径流水样品总磷采用流动分析仪(AA3 Seal Analytical)测定。

1.4 数据处理

采用SPSS 16.0软件针对不同试验数据进行统计分析。单因素方差分析和LSD多重比较法用于评价作物产量、植株总磷浓度以及土壤速效磷、径流总磷浓度在不同磷肥处理之间的差异显著性(P<0.05);同时以四个稻麦轮作周期和不同磷处理作为考察因素

对水稻和小麦籽粒产量、植株全磷浓度以及土壤速效磷和径流总磷浓度进行双因素方差分析($P<0.05$)。

磷肥利用率(%)= $(P-P_{\text{zero}})/P_{\text{投入}}\times 100$
式中: P 表示施磷处理中作物吸收的全磷浓度, $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$;
 P_{zero} 表示不施磷处理中作物吸收的全磷浓度, $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$;
 $P_{\text{投入}}$ 表示投入土壤的磷肥总量, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

2 结果与分析

2.1 作物产量响应

四种施磷处理的作物产量如图 1 所示。显著性差异主要体现在麦季作物产量($P<0.05$),稻季作物产量均无显著性差异。以四个稻麦轮作周期和磷处理作为考察因素对水稻和小麦籽粒产量进行双因素方差分析,发现时间与水稻和小麦籽粒产量均有极显著相关性($P<0.001$,表 2),磷处理仅与小麦籽粒产量有极显著相关性($P<0.001$,表 2),时间、磷处理的交互作用与水稻和小麦籽粒产量均无显著相关性。与 PR+W 处理相比,PW 处理水稻籽粒与秸秆产量均无显著变化,然而 PR 处理的小麦产量显著减少($P<0.05$)。PR+W 处理水稻籽粒与秸秆平均产量分别为 6445、6330 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;小麦籽粒与秸秆平均产量分别为 3362、3367 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。PW 处理水稻籽粒与秸秆平均产量分别为 6536、6743 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;小麦籽粒与秸秆平均产量分别为 3256、3381 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。然而 PR 处理小麦产量在 2013 年和 2014 年出现显著性差异:2013 年麦季秸秆和籽粒产量分别降低 24.0%和 26.9%;2014 年麦季秸秆和籽粒产量分别降低 7.97%和 21.0%($P<0.05$)。同时 Pzero 处理麦季作物产量降低显著:2013 年麦季秸秆和籽粒产量分别降低 31.9%和 37.8%;2014 年麦季秸秆和籽粒产量分别降低 18.0%和 40.3%($P<0.05$)。

2.2 植株全磷浓度

不同施磷处理的全磷浓度无显著性差异(图 2)。以四个稻麦轮作周期和磷处理作为考察因素,对植株全磷浓度进行双因素方差分析可知,时间和磷处理与植株全磷浓度有极显著相关性($P<0.001$,表 2),而时间、磷处理的交互作用与植株全磷浓度无显著相关性。PR+W 处理水稻籽粒和秸秆全磷浓度分别为 2.98、0.99 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,小麦籽粒和秸秆全磷浓度分别为 2.81、0.32 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$;PW 处理水稻籽粒和秸秆全磷浓度分别为 2.85、0.99 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$;小麦籽粒和秸秆全磷浓度分别为 2.78、0.35 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。作物吸收的磷主要存在于籽粒中,水稻籽粒全磷浓度为秸秆的 2~6 倍,小麦籽粒全磷浓度为秸秆的 7~12 倍(图 2)。植株全磷浓度反映作物对施入土壤中磷肥的利用水平。四年稻麦轮作试验表明,PW 处理磷肥利用率为 7.65%,而 PR+W 处理磷肥利用率仅为 4.01%,和农民习惯施肥相比,PW 处理提高了作物磷肥利用率(图 3)。PR 处理虽然也能够整体提高作物磷肥利用率,但却显著减

表 2 时间和磷处理对作物产量、植株全磷浓度以及土壤速效磷浓度的交互作用

Table 2 Interactive effects of different years and P treatments on crop yields, plant total P, and soil Olsen-P

项目	水稻籽粒产量	小麦籽粒产量	植株全磷浓度	土壤速效磷浓度
时间	$P<0.001$ (14.17)	$P<0.001$ (46.24)	$P<0.001$ (17.85)	$P<0.001$ (18.51)
磷处理	$P=0.754$ (0.400)	$P<0.001$ (8.180)	$P<0.001$ (23.61)	$P<0.001$ (6.350)
时间×磷处理	$P=0.717$ (0.685)	$P=0.871$ (0.489)	$P=0.087$ (1.070)	$P=0.397$ (1.567)

注:括号内为多重方差分析所得 F 值。

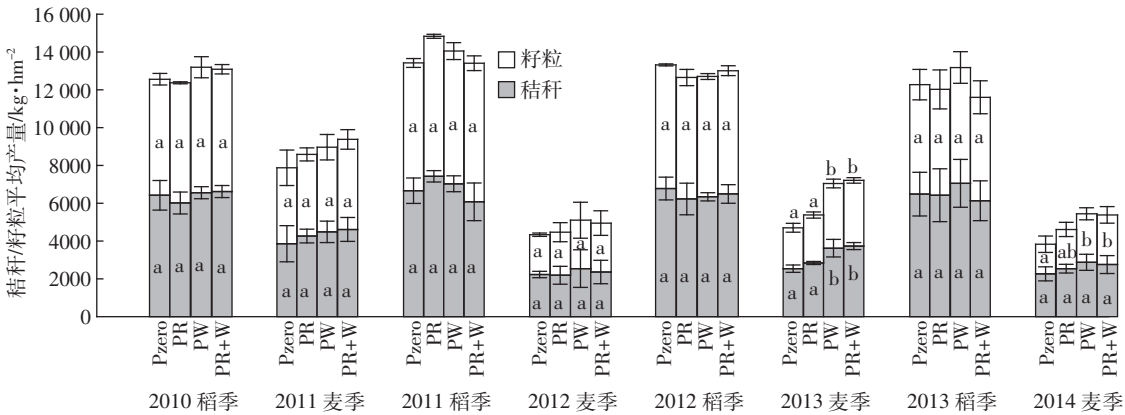


图 1 2010—2014 年秸秆/籽粒产量

Figure 1 Yields of straw and grains of rice and wheat in four entire rice/wheat rotations from 2010 to 2014

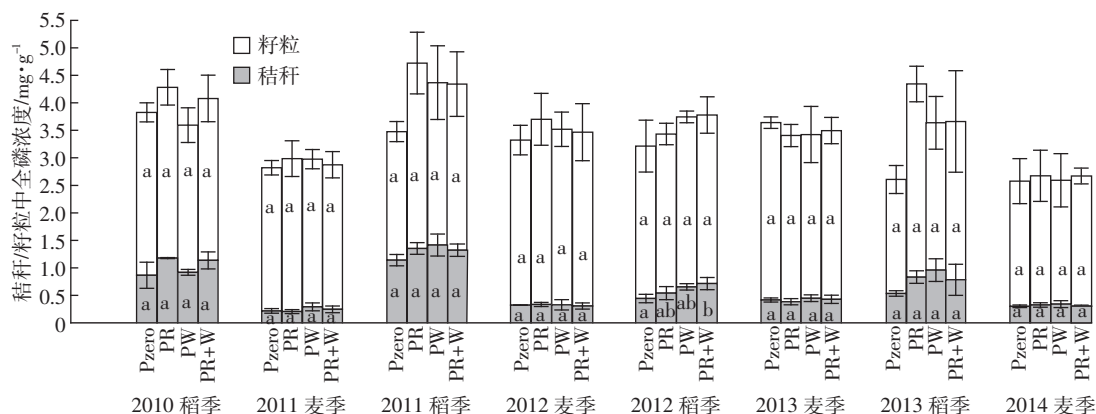


图2 2010—2014年秸秆/籽粒中全磷浓度

Figure 2 Total phosphorus content in straw and grains of rice and wheat from 2010 to 2014

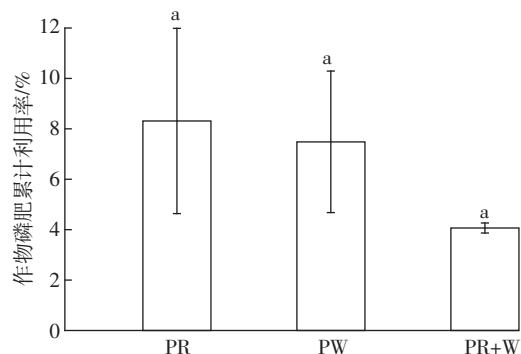


图3 不同磷肥处理下作物磷肥累积利用率

Figure 3 Cumulative P fertilizer utilization efficiencies in different treatments

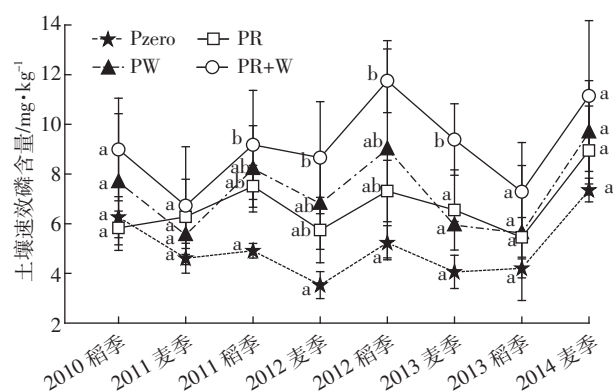


图4 2010—2014年土壤速效磷浓度变化

Figure 4 Dynamics of soil Olsen-P from 2010 to 2014

少了小麦的产量。

2.3 土壤速效磷及径流总磷浓度

土壤速效磷八季动态变化及累积浓度如图4、图5所示。以四个稻麦轮作周期和磷处理作为考察因素,对土壤速效磷浓度进行双因素方差分析可知,时间和磷处理与土壤速效磷浓度均有极显著相关性($P<0.001$,表2),但时间、磷处理的交互作用与土壤速效磷浓度无显著相关性。四种不同施磷处理四年后的土壤速效磷平均浓度依次为PR+W($9.14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)>PW($7.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)>PR($6.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)>Pzero($5.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$);土壤速效磷八季累积浓度依次为PR+W($73.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)>PW($59.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)>PR($53.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)>Pzero($40.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。与PR+W处理相比,PW、PR和Pzero处理土壤速效磷浓度降幅分别为10.5%~36.7%、6.64%~37.7%和30.3%~59.2%(图4),八季累积浓度分别降低18.4%、26.2%和45.1%(图5)。

地表径流中总磷八季累积量如图6所示。与PR+W

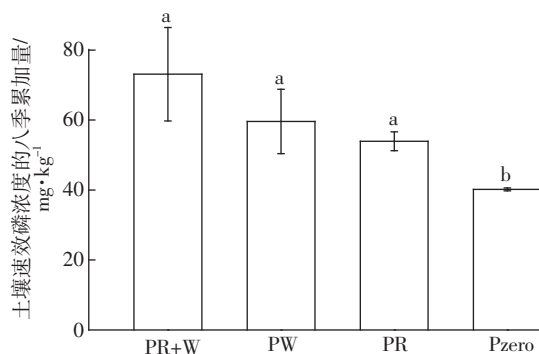


图5 2010—2014年土壤速效磷浓度的八季累积量

Figure 5 Total Olsen-P amount during four rice and wheat rotations from 2010 to 2014

处理相比,PR、PW和Pzero处理地表径流总磷八季累积量分别降低11.8%、12.0%和24.7%($P<0.05$)。

四年田间实验结果表明,麦季施磷稻季不施磷的减磷措施在稳产的同时,可以有效降低土壤速效磷以及径流中总磷浓度,从而降低水环境污染风险。

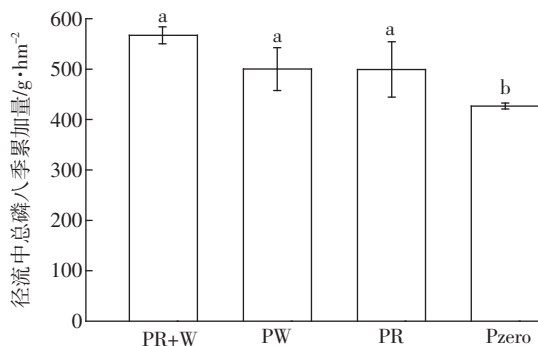


图6 2010—2014年径流中总磷八季累加量

Figure 6 Cumulative phosphorus amount in runoff from 2010 to 2014

3 讨论

四年大田试验结果表明:与当前农民习惯采用的PR+W处理相比,PW处理作物产量无显著变化(图1),在保证作物产量稳定的同时提高了磷肥累积利用率3.54%(图2、图3),且减少了磷素在土壤中的累积。与PR+W处理相比,Pzero和PR处理小麦作物产量显著降低(图1)。其原因为稻麦轮作农田种植水稻时,淹水状态下土壤具有特殊的理化性质:(1) Fe^{3+} 可还原为 Fe^{2+} ,促进Fe-P的溶解,增加土壤磷的有效性;(2)土壤有机质在厌氧条件下分解生成的有机酸与 Ca^{2+} 螯合,减少土壤对磷的固定;(3)淹水状态有利于土壤磷通过扩散到达根系^[23]。可见对于太湖流域典型稻麦轮作农田采用麦季施磷的施肥措施,不仅能够减少一季磷肥投加量,同时可保证粮食作物稳产。

施用磷肥是提高作物产量的有效措施,但磷肥投入过多却不能得到充分利用,势必造成磷素资源浪费及土壤磷素累积^[24-26]。一般情况下,磷素当季利用率仅为10%~25%^[5,23],剩余的75%~90%滞留于土壤中或流失进入水体^[27-29]。本研究设置的PW处理仅在麦季施磷,到稻季淹水时,被土壤吸附固定的潜在磷源重新释放可被水稻吸收利用,即水稻利用其后效,因此能够提高作物磷肥利用效率。本课题组经磷肥盆栽实验得出太湖流域稻麦轮作农田采用稻季不施磷的减磷措施具有可行性^[18],通过大田试验验证,发现最少在四年稻麦轮作周期,该区域实施稻季不施磷具有可行性。也有其他学者对不同作物进行减磷试验,结果类似。例如管冠^[30]在小麦-水稻轮作条件下,以当地农民传统施肥量为对照,采用20%减磷施肥模式,与传统施肥模式相比,作物产量和养分吸收量均未下降。段然等^[31]对洞庭湖区旱地开展的连续两年玉米-油菜轮

作田间试验结果表明,与常规施肥相比,减磷对玉米和油菜产量无显著影响,同时可提高磷肥利用率,降低径流损失量。

课题组前期对太湖流域典型水稻土磷库现状的调查表明,土壤磷库大部分已不缺磷,同时当土壤速效磷浓度在 $6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上时,水稻施磷已无明显增产效果^[15,23]。当土壤磷素水平不再是限制作物生长的主要因素时,按照目前农民这种年年、季季不断施磷的习惯,不仅不能提高作物产量,反而导致土壤速效磷过多累积^[14,32]。本研究中,与PR+W处理相比,PW处理四年土壤速效磷浓度降低10.5%~36.7%(图4、图5),同时径流总磷浓度下降了12.0%(图6)。过去已有研究表明,无论是有机肥还是化肥,过多施用均会造成径流磷素流失,从而影响水环境^[33-35]。可见在目前土壤磷含量已累积相当水平的情况下,仅麦季施磷就可在满足作物磷素营养需求的同时减少磷素在土壤中的累积,降低磷径流流失的风险^[36]。此外,从经济效益考虑,一季不施磷肥降低磷肥投入的成本非常可观。初步估算,如果稻季不施磷肥,每年可节省 $60\text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{hm}^{-2}$,整个太湖流域每年则可节省 P_2O_5 6.16万t;按照当前过磷酸钙市场价格($12\%\text{ P}_2\text{O}_5$, $600\text{ 元}\cdot\text{t}^{-1}$)计算,每年可直接节约肥料投入成本3.06亿元^[18,23]。因此,本文选择太湖流域典型稻麦轮作农田,采取稻季不施磷的减磷措施,不仅能保持作物稳产,而且能够提高作物磷肥利用率,减少土壤速效磷以及径流中总磷的累积量,节省磷矿资源,节约成本,获得农学效应、环境效应以及经济效益三赢。

4 结论

麦季施磷稻季不施磷的施肥方式可以满足作物生长营养所需,保证作物产量稳定,可降低因磷肥的大量使用导致的磷素大量流失对周围水体造成的风险,同时减少一季磷肥施用所带来的经济效益也很可观,故目前该地区稻麦农田仅在麦季施用磷肥的实践值得推广应用。但土壤类型、不同土壤磷含量水平等差异性对磷肥减施程度的产量响应尚待进一步研究,以便做出更全面、更客观的减磷评估。

参考文献:

- [1] 鲁如坤,时正元. 我国农田养分再循环: 潜力和问题[J]. 中国农业科学, 1993, 26(5): 1-6.
LU Ru-kun, SHI Zheng-yuan. Farmland nutrient recycling potential and problems in China[J]. *Chinese Agricultural Science*, 1993, 26(5): 1-6.

- [2] 黄高强, 武良, 李宇轩. 我国磷肥产业发展形势及建议[J]. 现代化工, 2013, 33(11): 1-4.
HUANG Gao-qiang, WU Liang, LI Yu-xuan. Development situation and suggestions on phosphorus fertilizer industry in China[J]. *Modern Chemical Industry*, 2013, 33(11): 1-4.
- [3] Li H G, Liu J, Li G H, et al. Past, present, and future use of phosphorus in Chinese agriculture and its influence on phosphorus losses[J]. *Ambio*, 2015, 44(2): 274-285.
- [4] 鲁如坤. 世界化学肥料的消费[J]. 农业现代化研究, 1986(3): 54-57.
LU Ru-kun. Consumption of chemical fertilizer all over the world[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 1986(3): 54-57.
- [5] 王庆仁, 李继云. 论合理施肥与土壤环境的可持续性发展[J]. 环境科学进展, 1999, 2(2): 116-124.
WANG Qing-ren, LI Ji-yun. Sustainable development of rational fertilization and soil environment[J]. *Advances in Environmental Science*, 1999, 2(2): 116-124.
- [6] Zhang G H, Liu G B, Wang G L, et al. Effects of vegetation cover and rainfall intensity on sediment-associated nitrogen and phosphorus losses and particle size composition on the Loess Plateau[J]. *Journal of Soil & Water Conservation*, 2011, 66(3): 192-200.
- [7] 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, 32(4): 188-193.
SI You-bin, WANG Shen-qiang, CHEN Huai-man. The loss of farmland nitrogen and phosphorus and water eutrophication[J]. *Soils*, 2000, 32(4): 188-193.
- [8] Kleinman P J A, Sharpley A N. Modeling phosphorus transport in agricultural watersheds: Processes and possibilities[J]. *Journal of Soil & Water Conservation*, 2002, 57(6): 425-439.
- [9] Liu J, Aronsson H, Blomback K, et al. Long-term measurements and model simulations of phosphorus leaching from a manured sandy soil[J]. *Journal of Soil & Water Conservation*, 2012, 67(2): 101-110.
- [10] 孔繁翔, 胡维平, 范成新. 太湖流域水污染控制与生态修复的研究与战略思考[J]. 湖泊科学, 2006, 18(3): 193-198.
KONG Fan-xiang, HU Wei-ping, FAN Cheng-xin. Research and strategic thinking for water pollution control and ecological restoration in Taihu Lake[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2006, 18(3): 193-198.
- [11] 刘浏, 徐宗学, 黄俊雄. 气候变化对太湖流域径流的影响[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2010(3): 371-377.
LIU Liu, XU Zong-xue, HUANG Jun-xiong. Effect of climatic variation on runoff in the Taihu Lake[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Sciences)*, 2010(3): 371-377.
- [12] 陶春, 高明, 徐畅, 等. 农业面源污染影响因子及控制技术的研究现状与展望[J]. 土壤, 2010, 42(3): 336-343.
TAO Chun, GAO Ming, XU Chang, et al. Research status and prospect on influential factors and control technology of agricultural non-point source pollution[J]. *Soils*, 2010, 42(3): 336-343.
- [13] 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.
- [14] 汪玉, 赵旭, 王磊. 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[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(5): 829-835.
WANG Yu, ZHAO Xu, WANG Lei. Accumulation, environmental risk and control of phosphorus in rice/wheat rotation farmland in Taihu Lake Watershed[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(5): 829-835.
- [15] 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, 44(3): 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, 44(3): 158-162.
- [16] 许仙菊, 许建平, 宁运旺, 等. 稻麦轮作周年氮磷运筹对作物产量和土壤养分含量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2013(5): 75-79.
XU Xian-ju, XU Jian-ping, NING Yun-wang, et al. Effects of nitrogen phosphorus reduction and phosphorus application patterns on crop yields and soil nutrients in rice-wheat rotation system[J]. *Soil and Fertilizer Science in China*, 2013(5): 75-79.
- [17] Zhang H C, Cao F L, Fang S Z, et al. Effects of agricultural production on phosphorus losses from paddy soils: A case study in the Taihu Lake Region of China[J]. *Wetlands Ecology & Management*, 2005, 13(1): 25-33.
- [18] Wang Y, Zhao X, Wang L, et al. The regime and P availability of omitting P fertilizer application for rice in rice/wheat rotation in the Taihu Lake Region of Southern China[J]. *Journal of Soils & Sediments*, 2015, 15(4): 844-853.
- [19] 卢亚男, 汪玉, 王慎强, 等. 太湖稻麦轮作农田减施磷肥盆栽试验研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(3): 507-513.
LU Ya-nan, WANG Yu, WANG Shen-qiang, et al. The pot study on reducing P fertilization for rice/wheat rotation in Taihu Region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(3): 507-513.
- [20] Olsen S R, Cole C V, Watanabe F S, et al. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate[R]. Washington DC: US Department of Agriculture, 1954.
- [21] 王伟妮, 李小坤, 鲁剑巍, 等. 氮磷钾配合施用对水稻养分吸收、积累与分配的影响[J]. 华中农业大学学报, 2010, 29(6): 710-714.
WANG Wei-ni, LI Xiao-kun, LU Jian-wei, et al. Effects of combined application of N, P, K on nutrient uptake and distribution of rice[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2010, 29(6): 710-714.
- [22] 劳家桢. 土壤农化分析手册[M]. 北京: 农业出版社, 1988.
LAO Jia-cheng. Agrochemical soil analysis handbook[M]. Beijing: Agriculture Press, 1988.
- [23] 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.
- [24] 胡莹莹, 张民, 宋付朋. 控释复肥中磷素在马铃薯上的效应研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(2): 174-177.
HU Ying-ying, Zhang Min, Song Fu-peng. Effects of phosphorus in controlled-release compound fertilizers on potato growth[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9(2): 174-177.

- [25] 程明芳, 何 萍, 金继运. 我国主要作物磷肥利用率的研究进展[J]. 作物杂志, 2010(1):12-14.
CHENG Ming-fang, HE Ping, JIN Ji-yun. Advance of phosphate recovery rate in Chinese main crops[J]. *Crops*, 2010(1):12-14.
- [26] 林 葆, 林继雄, 李家康. 长期施肥的作物产量和土壤肥力变化[J]. 植物营养与肥料学报, 1994, 1(1):6-18.
LIN Bao, LIN Ji-xiong, LI Jia-kang. Effects of long-term fertilizer application on crop yield and soil fertility[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1994, 1(1):6-18.
- [27] 尹飞虎, 康金花, 黄子蔚, 等. 棉花滴灌随水施滴灌专用肥中磷素的移动和利用率的研究[J]. 西北农业学报, 2005, 14(6):199-204.
YIN Fei-hu, KANG Jin-hua, HUANG Zi-wei, et al. Distribution and use efficiency of phosphorus from trickle irrigation fertilizer specific fertigated of trickle irrigated cotton via ^{32}P tracing technique[J]. *North-west Agricultural Sciences*, 2005, 14(6):199-204.
- [28] Petri E, Eila T, Juha G, et al. Phosphorus loss from different farming systems estimated from soil surface phosphorus balance[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2005, 110(3):266-278.
- [29] 张继宗, 张维理, 雷秋良. 太湖平原农田区域地表水特征及对氮磷流失的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(4):1497-1503.
ZHANG Ji-zong, ZHANG Wei-li, LEI Qiu-liang. Characteristics and effects on nitrogen and phosphorus loss of surface water in Taihu plain farmland region[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(4):1497-1503.
- [30] 管 冠. 施肥模式对稻麦产量、养分吸收及土壤生物学性状的影响研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2012.
GUAN Guan. Effects of fertilizer application modes on yield and nutrient uptake of rice and wheat and soil biological properties[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012.
- [31] 段 然, 汤月丰, 文 炯, 等. 减量施肥对湖垵旱地作物产量及氮磷径流损失的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(5):536-543.
DUAN Ran, TANG Yue-feng, WEN Jiong, et al. Effect of reducing fertilizer application on crop yield and nitrogen and phosphorus loss in runoff from embankment upland in Dongting Lake Region[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(5):536-543.
- [32] 李贵春. 农田退化价值损失评估研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2007.
LI Gui-chun. Evaluation of the loss of value of farmland degradation[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2007.
- [33] Tabbara H. Phosphorus loss to runoff water twenty-four hours after application of liquid swine manure or fertilizer[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2003, 32(3):1044-1052.
- [34] 茹铁军, 刘树海, 王金铭. 世界农业形势和肥料需求, 全球肥料供应和贸易 2003/04~2008/09(摘要报告)[J]. 磷肥与复肥, 2005, 20(1):72-75.
RU Tie-jun, LIU Shu-hai, WANG Jin-ming. World agricultural situation and fertilizer demand, global fertilizer supply and trade 2003/04~2008/09(Summary Report)[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2005, 20(1):72-75.
- [35] Ma B G, LI W H, Wang H Y. Effect of different fertilizations on the N, P loss in rice-wheat rotation soil in South Hebei, China[J]. *Procedia Engineering*, 2012, 28:640-643.
- [36] 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(6):695-701.