

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. Reduced P fertilization for rice/wheat rotation in Taihu Lake region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(2): 507–513.

太湖稻麦轮作农田减施磷肥盆栽试验研究

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

(1.南京农业大学理学院, 南京 210095; 2.土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 土壤环境与污染修复重点实验室, 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 3.安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036)

摘要:选择江苏常熟富磷、中磷、缺磷三个磷水平水稻土,通过盆栽试验研究稻麦轮作农田稻季不施磷的减磷措施的可行性。实验分四个不同处理:麦季施磷稻季不施磷(PW)、稻季施磷麦季不施磷(PR)、稻麦季均施磷(PR+W,目前农民施肥方式)以及稻麦季均不施磷(Pzero)。四年八季试验结果表明:与PR+W处理相比,无论是富磷、中磷以及缺磷土壤中,PW处理下的作物产量均无显著性差异,却显著提高四年稻麦轮作周期内的磷肥表观利用率(富磷、中磷以及缺磷三种土壤上分别高出4.21%、17.3%、18.5%),同时土壤速效磷含量累积下降20%~60%。然而,与PR+W处理相比,PR处理在缺磷土壤上作物产量下降了75%($P<0.05$)。四年盆栽试验结果表明,稻麦轮作农田在土壤磷素供应水平中等及以上条件下,通过稻季不施磷的措施来达到稻麦轮作农田减磷的效果在理论上具有可行性,可以保证作物较高产量水平和土壤磷素的环境安全。

关键词:水旱轮作;稻季不施磷;产量;磷肥利用率;速效磷

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2016)03-0507-07 **doi:**10.11654/jaes.2016.03.014

Reduced P fertilization for rice/wheat rotation in Taihu Lake region

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

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

Abstract: High inputs of P fertilizers to soils have caused P pollution in waters, especially in intensive farming areas. A pot experiment was carried out to explore the feasibility of omitting or reducing phosphorus (P) fertilizers for rice in rice/wheat rotation using paddy soils with three different Olsen-P levels (P-rich, P-medium, and P-deficient) soils from Taihu Lake region. Four P treatments, including P fertilization for wheat only (PW), P fertilization for rice only (PR), P fertilization for both rice and wheat (PR+W), and no P for rice or wheat (Pzero), were used. Compared with PR+W treatment, crop yields in PW had no significant difference in P-rich, P-medium and P-deficient soils, while P utilization efficiency was increased by 4.21%, 17.3% and 18.5%, respectively, but the concentration of Olsen-P in soils decreased by 20%~60%. However, PR treatment significantly reduced crop yields in P-deficient soil ($P<0.05$). Hence, P fertilization for wheat only (PW) in rice/wheat rotation is feasible while maintaining rice yield.

Keywords: rice-wheat rotation; P fertilization for wheat only; crop yield; P utilization efficiency; Olsen-P

收稿日期:2015-09-18

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);国家重大水专项课题(2012ZX07101-004);江苏省农业科技自主创新资金项目[CX(15)1004];国家自然科学基金面上项目(41571294)

作者简介:卢亚男(1992—),女,硕士研究生,主要从事农田磷循环和面源污染控制研究。E-mail:zoe_yanan@126.com

* **通信作者:**王慎强 E-mail:sqwang@issas.ac.cn;李国华 E-mail:liguohua@njau.edu.cn

磷是生命必需元素之一,能够保证作物产量的关键营养。充足的磷营养供应能够显著促进小麦、水稻等作物的分蘖和根系的生长,增加植株的干物质质量,同时也能影响光合作用和光合产物的分配,保障高产^[1]。然而,长期、过量施用磷肥将导致土壤磷库出现盈余,使磷肥利用效率下降,造成资源浪费的同时也加大了环境风险^[2]。太湖流域人口密度大,农业高度集约化,化肥的高投入致使土壤磷的输入量远大于输出量^[3]。近20年来太湖流域农田土壤中磷素含量不断升高并出现盈余,而农民仍普遍过量施用磷肥(主要是因施用高浓度复合肥而被动施入),对磷资源和太湖流域水环境造成了双重压力^[4-7]。

本文主要通过麦季施磷稻季不施磷的方式探讨稻麦轮作农田减磷的有效方案。稻季不施磷的依据是目前稻麦农田土壤磷素累积已达相当水平,而在淹水状态还原条件下,土壤难溶性磷会向水溶性以及其他易被作物吸收利用的形态转化,使磷素有效性提高^[8]。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤为江苏常熟水稻土,包括乌沙土(C-H)、乌黄泥土(C-M)、乌栅土(C-L),其基本理化性质见表1。若以土壤速效磷 >20 、 $10\sim20$ 、 $<10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 分别作为富磷、中磷、缺磷的标准,则C-H(速效磷含量 $43.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)为富磷土壤、C-M(速效磷含量 $16.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)为中磷土壤、C-L(速效磷含量 $6.16\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)为缺磷土壤。

1.2 盆栽试验

选取上述三种磷含量水平水稻土进行稻麦轮作温室盆栽试验。试验始于2009年稻季,终于2013年麦季,共计四年八季。每种水稻土设4个处理,包括麦季施磷稻季不施磷(PW,简称麦季施磷)、稻季施磷麦季不施磷(PR,简称稻季施磷)、稻季麦季均施磷(PR+W,目前农民施磷习惯,作为对照)以及稻季麦季均不施磷(Pzero,空白),每个处理均3个平行。采用直径20 cm、高24 cm的聚氯乙烯(PVC)盆,供试土壤每盆6 kg。施磷处理中磷肥(KH_2PO_4)每季按每6 kg土壤1

g P_2O_5 施用;氮肥(尿素)每季按每6 kg土壤1.1 g N施用,40%施作基肥,30%在分蘖期追施,余下30%在抽穗期追施;钾肥(氯化钾)每季按每6 kg土壤1 g K_2O 施用。施用磷肥的处理中磷肥、钾肥以及40%氮肥均在作物种植之前作为基肥施入土壤;不施磷肥的处理中钾肥以及40%氮肥均在作物种植之前作为基肥施入土壤。在水稻生长季,除了季节中期的落干(持续一周时间,用来提高水稻根增长和在分蘖期有效分蘖),其余时间保持土壤淹水状态(水深5 cm)。小麦生长季土壤的持水量在60%~70%之间,采用人工灌溉方式。

1.3 样品分析

每季作物收获后,选取地表以上作物植株,秸秆和籽粒分离烘干,分别称重,粉碎后测全磷。采用X形线段布置采样点,取0~20 cm表层土壤样品50 g,进行土壤混合,风干磨碎过筛(20目),室温下保存供分析测试^[9-11]。植株样品全磷含量采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 熔融提取,钼蓝比色,紫外分光光度计(UV mini-1240)法测定。土壤pH采用1:2.5(W/V)土水比、Thermo ORION STAR A211型pH计测定;土壤有机碳采用Leco CN-2000分析仪测定;土壤全氮采用凯式定氮法测定;土壤速效磷采用 NaHCO_3 (pH8.5)浸提、钼蓝比色法测定;CEC采用乙酸铵交换法测定;土壤全钾采用火焰原子吸收法测定。

1.4 数据分析

实验数据采用Origin 8.0作图分析用SPSS 16.0进行单一因素分析($P<0.05$)以及双因素分析($P<0.001$)。

2 结果与讨论

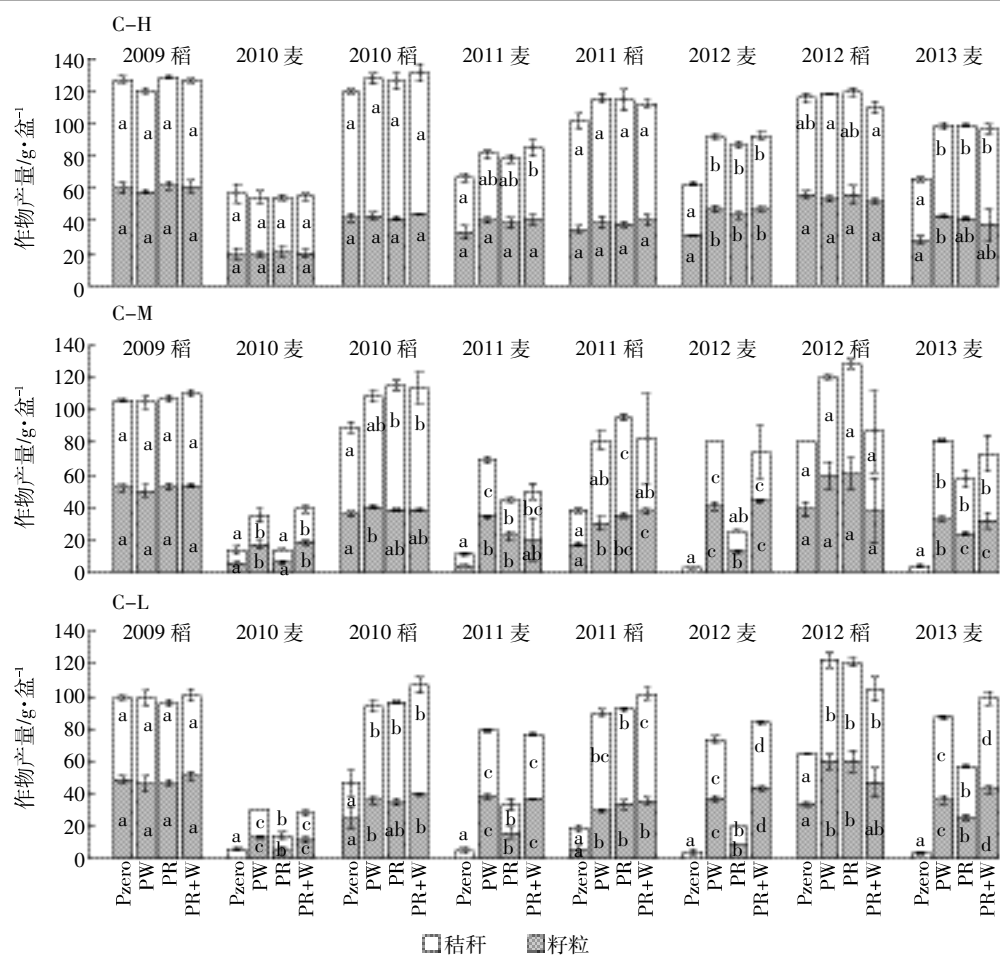
2.1 作物产量响应

不同施磷处理作物产量具有显著性差异($P<0.05$),如图1、图2所示。不同磷含量水平以及磷处理在四年稻麦轮作周期内对作物产量有极显著相关性($P<0.001$,表2)。四年盆栽试验结果表明,无论富磷、中磷还是缺磷土壤,PW处理的作物秸秆及籽粒产量与传统施肥方式PR+W处理比较无显著性差

表1 供试土样基本理化性质

Table 1 Properties of tested soils

土壤类型	全氮/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全磷/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全钾/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	有机质/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效磷/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	CEC/ $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$	pH	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%
C-H	1.80	0.75	11.8	33.4	43.9	13.2	6.32	25.4	29.9	44.7
C-M	2.01	0.67	15.4	33.9	16.3	16.1	5.70	18.4	3.5	46.1
C-L	0.96	0.44	15.3	20.9	6.16	15.4	6.36	24.8	68.7	6.5



同种土壤同一季中不同字母表示作物秸秆或籽粒产量在不同处理中的差异性。下同

图 1 不同磷水平土壤中施磷处理中植株产量

Figure 1 Crop yields under different P fertilization treatments and soil P levels

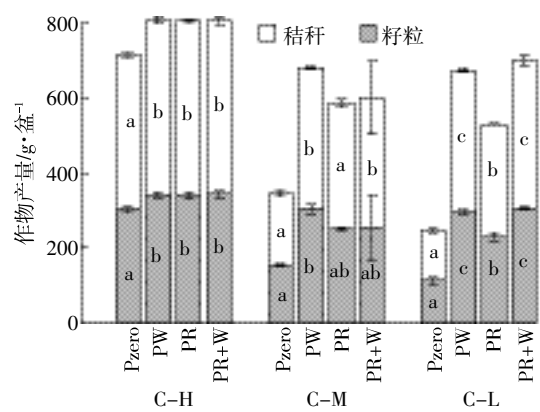


图 2 不同磷水平土壤中施磷处理作物籽粒和秸秆八年累积产量
Figure 2 Cumulative grain yields and aboveground biomass of crops from 2009 to 2013

异(表3)。富磷、中磷以及缺磷土壤中,PW 处理四年八季作物秸秆及籽粒的累积产量分别为 809、681、676 g·盆⁻¹,而 PR+W 处理的产量分别为 808、602、702

表 2 不同磷水平、磷处理以及时间与作物产量、总磷以及速效磷的交互作用

Table 2 Interaction between P-level,P-treatment, and growing time and crop yield ,total P and Olsen-P					
项目	籽粒 产量	秸秆 产量	籽粒 总磷	秸秆 总磷	速效磷
P 水平	$P<0.001$	$P<0.001$	$P<0.001$	$P<0.001$	$P<0.001$
P 处理	$P<0.001$	$P<0.001$	$P<0.001$	$P<0.001$	$P<0.001$
时间	$P<0.001$	$P<0.001$	$P<0.001$	$P<0.001$	$P<0.001$
P 水平×P 处理	$P<0.001$	$P<0.001$	$P<0.001$	$P<0.001$	$P<0.001$
P 处理×时间	$P<0.001$	$P<0.001$	$P<0.001$	$P<0.001$	$P<0.001$
P 水平×时间	$P<0.001$	$P<0.001$	$P<0.001$	$P<0.001$	$P<0.001$
P 处理×时间×P 水平	$P<0.001$	$P<0.001$	$P<0.001$	$P<0.001$	$P<0.001$

g·盆⁻¹。
与 PR+W 处理相比,不同磷水平土壤 PR 处理在四年稻麦轮作周期内具有显著性差异($P<0.001$)。PR

表 3 不同磷处理在不同磷水平以及轮作时间内与籽粒产量的交互作用

Table 3 Interaction between grain yields in different P-treatments

	Pzero	PW	PR	PR+W
Pzero	1			
PW	$P<0.001$	1		
PR	$P<0.001$	$P<0.001$	1	
PR+W	$P<0.001$	$P=0.425$	$P<0.001$	1

处理在富磷及中磷含量水平的土壤上,其作物产量无显著性差异。但对缺磷土壤来说,作物产量显著降低($P<0.05$),秸秆与籽粒产量分别下降了 75%和 76%左右。而 Pzero 处理中,在三种磷水平土壤上作物产量均呈显著下降趋势($P<0.05$),且中磷和缺磷土壤的植株无籽粒产量,表明稻麦均不施磷导致了土壤磷素亏损,供磷不足,严重影响产量。

不同磷含量水平的土壤中不同磷处理在四年稻麦轮作周期内与作物产量有极显著相关性($P<0.001$,

表 2)。从四年产量结果看出,在三个不同磷含量水平土壤上,麦季施磷稻季不施磷对水稻和小麦产量均无显著影响。究其原因,水稻土是在人为水肥管理条件下形成的耕作土壤,其物理和化学性质具有特殊性,淹水条件下土壤磷素形态会发生转化,促进 Fe-P 等形态的溶解,提高土壤磷素有效性^[12]。这也是作为对照试验的 Pzero 处理中,中磷以及缺磷土壤中水稻仍有产量,而小麦在后期出现无籽粒产量的原因。Singh 等^[13]研究表明,相对于小麦,水稻施磷过量一方面会导致更多的磷被土壤吸附固定,另一方面也会导致磷肥在土壤中的径流,降低磷肥利用率和经济效应。鉴于此,本文采取稻季不施磷的减磷措施,能充分利用稻季淹水状态下土壤中释放的磷,达到稳产的目的。

2.2 植物对土壤磷肥利用的响应

植物体全磷是衡量作物对土壤磷素吸收效率的指标。由图 3 可以看出,各处理间作物籽粒及秸秆中的全磷含量在富磷土壤中没有显著差异,但在中磷以

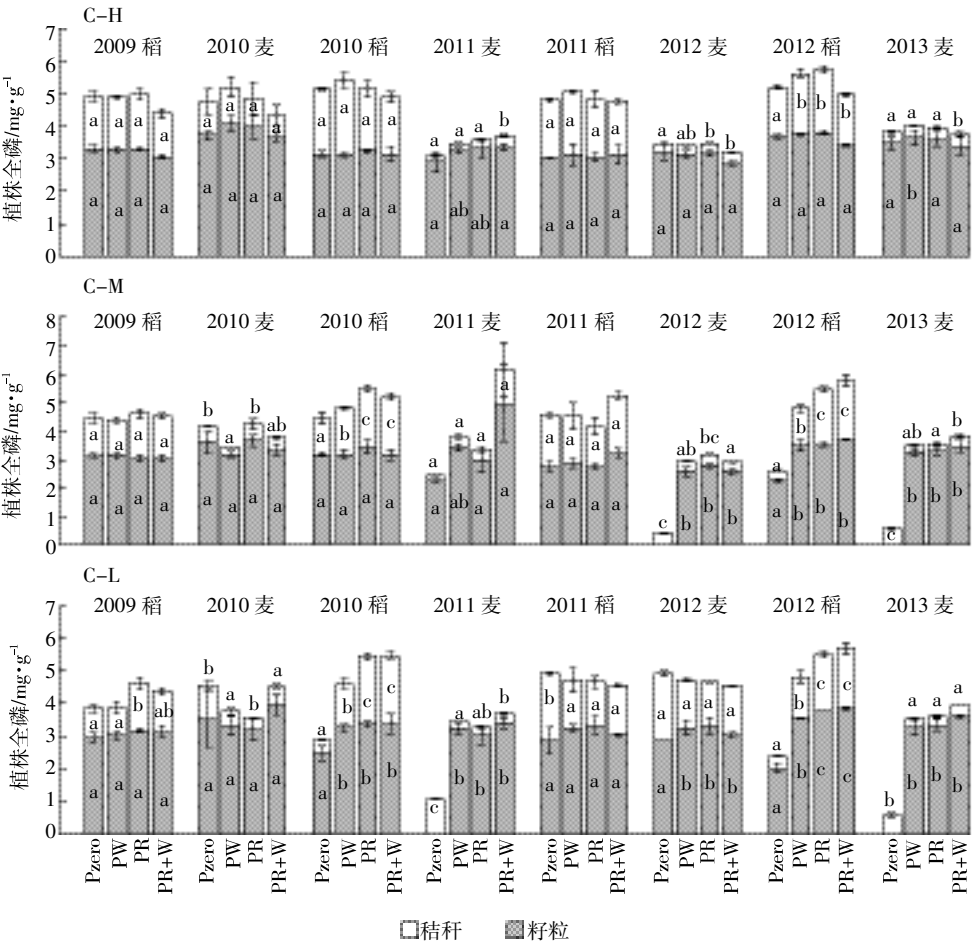


图 3 不同磷肥处理下的三种土壤四年稻麦轮作的植株籽粒和秸秆全磷含量

Figure 3 Variations in total phosphorus concentrations in grains and straws of crops in three paddy soils with different phosphorus fertilization over 4 years of rice/wheat rotation

及缺磷土壤中,施磷显著增加了作物籽粒及秸秆中的全磷含量($P<0.05$)。不同磷含量水平以及磷处理与作物全磷吸收有极显著相关性($P<0.001$,表2)。在中磷和缺磷土壤中,PW处理下,植株全磷无论是籽粒还是秸秆均高于其余三种处理,四年稻季全磷含量高于麦季,说明淹水状态下土壤中的磷能够被有效利用。另外,对于植物对磷的吸收量而言,植株吸收的土壤磷素大部分分布于籽粒中,一般占到植物吸收量的65%~90%,说明植株对磷的吸收首先用于籽粒,而且土壤的含磷量越高植株总的含磷量越高。王伟妮等^[14]也得出类似结论,即水稻植株吸收的磷有72%~75%存在于籽粒中,只有25%~28%存在于茎秆中。

根据植株全磷可以计算得出四年稻麦轮作周期的作物磷肥表观利用率(图3、图4)。

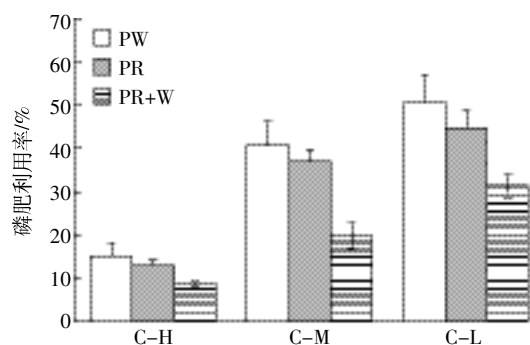


图4 不同磷肥处理下的三种土壤植株磷肥利用率

Figure 4 Utilization efficiencies of phosphorus fertilizer in crops under different phosphorus fertilization over 4 years of rice/wheat rotation

$$\text{磷肥表现利用率}(\%) = (W - W_{\text{zero}}) / W_{\text{投入}} \times 100$$

式中: W 表示四年稻麦轮作周期内施磷处理中作物吸收的全磷总量, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$; W_{zero} 表示四年稻麦轮作周期内不施磷处理中作物吸收的全磷总量, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$; $W_{\text{投入}}$ 表示四年稻麦轮作周期内投入土壤的磷肥总量, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

对于这三个不同含磷水平土壤,土壤磷含量越高,作物对磷的利用率越低。PR+W处理下四个稻麦轮作周期磷肥利用率在中磷土壤和缺磷土壤上分别为19.8%、31.3%,而在富磷土壤上仅为8.65%(图4)。张爱君等^[15]研究了淮北黄潮土长期玉米小麦轮作的磷肥肥效,11年(1985—1995年)试验结果表明:小麦的磷肥肥效与土壤速效磷的含量具有极显著相关性。在速效磷 $<15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,磷肥肥效明显,当速效磷 $\geq 25.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,施磷无效。傅明华等^[16]在水旱轮作系统上的研究也证实了这一点。章明清等^[17]和程明

芳等^[18]研究时也发现类似结果。

PW处理下,植株对土壤的四年稻麦轮作周期磷肥利用率相对于传统的PR+W处理,在富磷、中磷以及缺磷三种土壤上分别高出4.21%、17.3%、18.5%。以第一年稻麦轮作为例,PW处理中植物磷肥表观利用率在富磷土壤、中磷土壤以及缺磷土壤中分别为4.75%、3.24%以及9.89%;PR+W处理中磷肥表观利用率则分别为2.64%、7.12%以及9.27%;然而进行至第四年稻麦轮作周期时,PW处理中植物磷肥表观利用率在富磷土壤、中磷土壤以及缺磷土壤中分别上升至22.4%、74.9%以及78.8%;PR+W处理中磷肥表观利用率则分别为9.43%、30.2%以及43.5%。稻季不施磷较目前的季季施磷方式可显著提高磷肥利用率,而在单季施磷处理中,三种不同含磷土壤的PW处理的磷肥利用率均高于PR处理。

2.3 土壤速效磷含量变化

土壤速效磷是土壤中最易被植物吸收的磷。当磷肥施入土壤中,大部分被土壤固定,磷的当季利用率很低,大多仅在10%~25%之间^[12],土壤本身的供磷能力显著影响作物的磷素吸收,土壤速效磷的含量最能反映土壤施肥后对植物的作用以及施肥合理性^[19-21]。另外,水旱轮作体系的干湿交替过程有利于土壤有效磷含量的提高^[13,22]。

如图5所示,在不同施磷处理下,土壤速效磷累积具有显著性差异($P<0.05$)。不同磷含量水平的土壤中,不同磷处理在四年稻麦轮作周期内与土壤速效磷含量有极显著相关性($P<0.001$,表2)。无论富磷、中磷还是缺磷土壤,PR+W处理下,土壤速效磷累积含量均为最高。相反,若稻季麦季均不施磷,土壤速效磷则呈明显的下降趋势,以富磷土壤为例,四年速效磷含量由开始的 $43.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 下降至 $8.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在减磷处理措施下,无论是PR还是PW处理,试验周期内土壤速效磷含量累积变化不大,富磷土壤速效磷含量在初始含量 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 上下波动;对中磷、缺磷土壤,速效磷稳定在 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右,但和PR+W处理相比较,减磷处理的土壤速效磷累积量明显降低。一般情况下,当土壤速效磷含量较低时,土壤磷素随径流流失的量受速效磷含量影响微乎其微,但超过某一临界值时便迅速增加,这个临界值被称为磷素的环境警戒值^[24]。根据曹志洪等^[24]的研究结果,太湖地区水稻土的磷素环境阈值为 $25 \sim 30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,表明无论富磷土壤、中磷土壤还是缺磷土壤,持续的稻麦轮作连续施用磷肥均有可能导致磷的积累而超出环境阈值。目

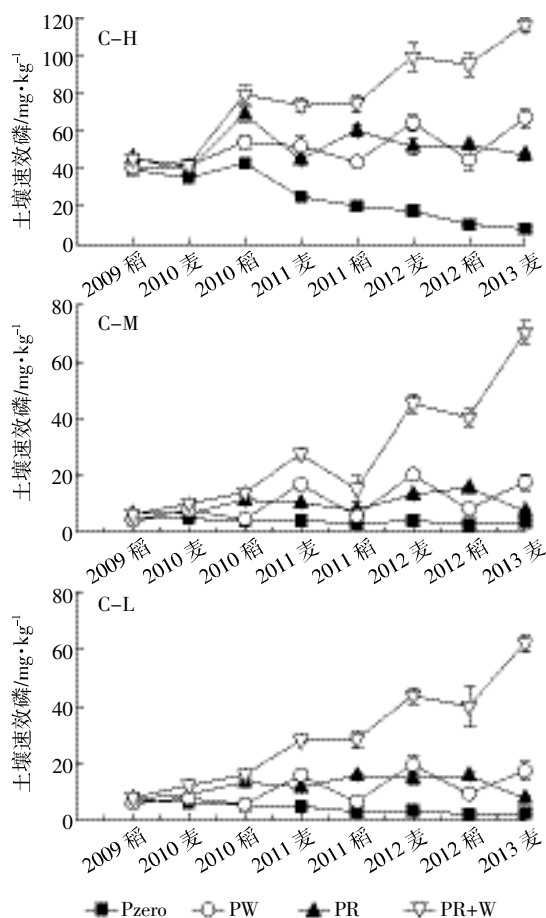


图5 不同施磷肥处理的土壤速效磷累积变化

Figure 5 Soil Olsen-P accumulation in different phosphorus fertilization

前该地区土壤磷速效含量与第二次土壤普查结果相比增加显著,不同类型的水稻土增幅在15%~579%之间^[25],土壤磷累积已达相当水平。目前的施磷量和施磷方式既浪费资源也有环境压力,因此寻求减磷措施是必要的。综合分析作物的产量表现以及土壤速效磷累积可以看出,与目前农民稻麦季都施磷的农田施肥措施相比较,麦季施磷稻季不施磷既可满足两季作物生长的需求,保证产量,同时也可减少土壤速效磷的累积风险。

3 结论

四年稻麦轮作中,麦季施磷稻季不施磷与稻麦均施磷相比较,作物秸秆及籽粒产量在高、中、低磷水平土壤中均无显著性差异,但前者却提高了磷肥利用率,并且明显降低了土壤速效磷的累积,减轻了土壤磷流失的环境风险。亦即,稻麦轮作农田在土壤磷素供应水平中等条件下,通过麦季施磷稻季不施磷的措

施来达到稻麦轮作农田减磷的效果在理论上具有可行性,可以保证作物较高产量水平和土壤磷素的环境安全。

参考文献:

- [1] 何 丹, 张锡洲, 李廷轩, 等. 稻种资源的磷利用效率差异及其分类评价[J]. 中国土壤与肥料, 2012(3): 70-76
HE Dan, ZHANG Xi-zhou, LI Ting-xuan, et al. The difference of utilization efficiency and classified evaluation of the phosphorus of rice germplasm resources[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2012(3): 70-76
- [2] 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, 23(1): 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, 23(1): 77-81.
- [3] 鲁如坤, 刘鸿翔. 我国典型地区农业生态系统养分循环和平衡现状[J]. 土壤通报, 1996, 27(5): 193-196.
LU Ru-kun, LIU Hong-xu. The nutrient cycling and balanced status of our country's typical regional farm system[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1996, 27(5): 193-196.
- [4] 汪 玉, 赵 旭, 王 磊, 等. 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, et al. The current accumulated situation of phosphorus and environmental risk and control counter measure of the paddy wheat rotation in Taihu Lake region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(5): 829-835.
- [5] 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.
- [6] 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 Chao, ZHANG Tao-lin. Agricultural soil phosphorus dynamics in Taihu Lake Watershed and its environmental impact[J]. *Rural Eco-Environment*, 2000, 16(4): 24-27.
- [7] 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. The leach of phosphorus in soil of typical farm system in Taihu Lake region[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2012, 40(6): 321-323.
- [8] 陈 祥, 朱昌锋. 淹水与风干过程中土壤有效磷含量变化研究[J]. 南方农业, 2007, 1(6): 4-6.
CHEN Xiang, ZHU Chang-feng. The research to the change of Olsen-P in soil in the process of flood and air drying[J]. *South China Agriculture*,

- 2007, 1(6):4-6.
- [9] 陈国孟, 鲁如坤. 关于测定土壤有效磷总量的研究[J]. 土壤学报, 1993, 30(4):380-389.
- CHEN Guo-meng, LU Ru-kun. The research about the measure of the volume of Olsen-P in soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1993, 30(4):380-389.
- [10] 史陶钧, 朱荫渭, 鲁如坤. 酸性水稻土有效磷测定方法的研究[J]. 土壤学报, 1979, 16(4):409-413.
- SHI Tao-jun, ZHU Yin-mei, LU Ru-kun. The research about the method of measuring the Olsen-P of acidity paddy soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1979, 16(4):409-413.
- [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社, 1999.
- LU Ru-kun. Chemical analysis of agricultural soil[M]. Beijing:China Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [12] 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.
- [13] Dobermann A, Bronson K F, Khind C S, et al. Optimal phosphorus management strategies for wheat-rice cropping on a loamy sand[J]. *Soil Science Society American Journal*, 2000, 64(4):1413-1422.
- [14] 王伟妮, 鲁剑巍, 鲁明星, 等. 湖北省早、中、晚稻施磷增产效应及磷肥利用率研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4):795-802.
- WANG Wei-ni, LU Jian-wei, LU Ming-xing, et al. The research about the yield-increasing effect and utilization efficiency of the phosphorus fertilization in early, middle and late rice in Hubei Province[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(4):795-802.
- [15] 张爱君, 张明普. 淮北黄潮土长期轮作的磷肥合理施用[J]. 安徽农业大学学报, 2000, 27(4):336-339.
- ZHANG Ai-jun, ZHANG Ming-pu. The proper application of phosphate fertilizer of long-term rotation cropping of yellow moist soil in Huaibei[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2000, 27(4):336-339.
- [16] 傅明华, 戴朱恒, 承友松, 等. 磷肥在水旱轮作周期中的效果及应用[J]. 上海农业学报, 1987, 3(1):79-86.
- FU Ming-hua, DAI Zhu-heng, CHENG You-song, et al. The Application of P fertilizer in rice-barley rotation cropping system[J]. *Acta Agriculture Shanghai*, 1987, 3(1):79-86.
- [17] 章明清, 李娟, 孔庆波, 等. 不同磷肥用量对菜稻轮作土壤磷肥利用率的影响[J]. 土壤通报, 2013, 44(4):952-955.
- ZHANG Ming-qing, LI Juan, KONG Qing-bo, et al. The influence to the efficiency of phosphorus fertilizer in rotation of rice and vegetable soil of different dosage[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(4):952-955.
- [18] 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. The research progress of our country's staple crop[J]. *Crops*, 2010(1):12-14.
- [19] 彭琳, 杨平, 刘耀宏, 等. 渭北高原旱地小麦化肥施用效果[J]. 干旱地区农业研究, 1986, 4(1):32-39.
- PENG Lin, YANG Ping, LIU Yao-hong, et al. Effects of application of chemical fertilizers upon winter wheat in rainfed lands on Weibei high-land[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1986, 4(1):32-39.
- [20] 李生秀, 赵伯善. 我国旱地土壤合理施肥之刍议[J]. 土壤通报, 1991, 22(4):145-148.
- LI Sheng-xiu, ZHAO Bo-Shan. Discussion on fertilizing reasonably in dryland soil in China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1991, 22(4):145-148.
- [21] 李生秀. 不同前作对磷肥后效的影响[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 1992, 20(增刊):74-78.
- LI Sheng-xiu. The residual effect of phosphate fertilizer of different crops in calcareous soil[J]. *Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition)*, 1992, 20(Suppl):74-78.
- [22] 赵营, 王世荣, 郭鑫年, 等. 施肥对水旱轮作作物产量、氮素吸收与土壤肥力的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2012(6):24-28.
- ZHAO Ying, WANG Shi-rong, GUO Xin-nian, et al. The effect of fertilization to the yield of rice-barley rotation cropping system, the absorption of P and soil fertility[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2012(6):24-28.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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(1):158-162.
- WANG Shen-qiang, ZHAO Xu, XING Guang-xi, et al. The Pre-test of the actuality of the P pool of paddy soil and scientific P application in typical area in Taihu Lake region[J]. *Soils*, 2012, 44(1):158-162.