

陈浩, 汪玉, 袁佳慧, 等. 太湖稻麦轮作区减施磷肥对土壤供磷和小麦吸收磷的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(4): 741–746.

CHEN Hao, WANG Yu, YUAN Jia-hui, et al. The effect of phosphorus-reduction on soil phosphorus supply and wheat phosphorus uptake in a rice-wheat rotation system in the Taihu Lake Region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(4): 741–746.

太湖稻麦轮作区减施磷肥对土壤供磷和小麦吸收磷的影响

陈浩^{1,2}, 汪玉¹, 袁佳慧^{1,3}, 朱文彬¹, 王慎强^{1*}

(1.中国科学院南京土壤研究所, 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008; 2.中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3.东北农业大学, 哈尔滨 150030)

摘要:为了探究太湖稻麦轮作区土壤供磷能力, 寻找适宜的减磷措施, 通过田间减施磷肥试验, 以稻麦季均施磷(PR+W)为对照, 设置稻季施磷麦季不施磷(PR)、麦季施磷稻季不施磷(PW)、稻麦季均不施磷(Pzero) 3种处理, 于第7年测定土壤速效磷含量、梯度扩散薄膜技术(Diffusive Gradients in Thin films, DGT)提取态磷含量、小麦产量以及小麦磷吸收量, 分析太湖稻麦轮作区减施磷肥对土壤供磷和小麦吸收磷的影响。结果表明:与PR+W处理相比, PW处理的土壤速效磷含量、小麦籽粒产量以及植株全磷含量均无显著降低;但PR处理显著($P<0.05$)降低了44.8%的土壤速效磷含量、32.8%的小麦籽粒产量以及27.9%的地上部植株吸收磷量。线性回归分析发现, 利用DGT技术提取的磷与土壤速效磷有显著的正相关关系($P<0.05$, $R^2=0.42$), 且两者皆与小麦籽粒产量、地上部植株全磷含量及地下部植株全磷含量呈显著的正相关关系。可见, 麦季施磷稻季不施磷的减磷措施能够保证土壤速效磷供应和小麦吸磷量, 并维持小麦籽粒产量, 但麦季不施磷的减磷措施会显著降低土壤速效磷含量、小麦吸磷量以及小麦籽粒产量, 同时DGT提取磷可作为稻麦轮作系统土壤供磷与作物需磷动态关系研究的评价指标。

关键词:太湖农田; 减施磷肥; 籽粒产量; 植株全磷; 土壤速效磷; DGT提取磷

中图分类号: X592 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2018)04-0741-06 doi:10.11654/jaes.2017-1551

The effect of phosphorus-reduction on soil phosphorus supply and wheat phosphorus uptake in a rice-wheat rotation system in the Taihu Lake Region

CHEN Hao^{1,2}, WANG Yu¹, YUAN Jia-hui^{1,3}, ZHU Wen-bin¹, WANG Shen-qiang^{1*}

(1.State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2.College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3.Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: A field experiment was performed to investigate the effect of P reduction on soil P supply and wheat P uptake in a rice-wheat rotation system in Taihu Lake Region by analyzing the soil Olsen P, DGT-Labile P, grain yield, and P uptake of wheat. Four fertilization regimes, including P fertilization during both the rice- and wheat-growing seasons (PR+W, current farming practice, and control); P fertilization only during the rice-growing season (PR); P fertilization only during the wheat-growing season (PW); and no P fertilization during either season (Pzero) were designed. Compared with the PR+W regime, the PW treatment did not decrease soil Olsen P, wheat grain yield, or crop total P. In contrast, the PR treatment significantly ($P<0.05$) reduced the soil Olsen P, grain yield of wheat, and the aboveground

收稿日期: 2017-09-29 录用日期: 2017-12-22

作者简介: 陈浩(1991—), 男, 河南驻马店人, 硕士研究生, 从事农田磷循环和面源污染控制研究。E-mail: hchen@issas.ac.cn

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

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671304); 国家重点研发计划项目(2017YFD0200206); 江苏省农业科技自主创新资金项目[CX(15)1004], 国家“948”重点项目(2011-G30)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (41671304); The National Key Research and Development Program of China (2017YFD0200206); The Jiangsu Agriculture Science and Technology Innovation Fund [CX(15)1004]; The Key Program of the National “948” (2011-G30)

crop total P by 44.8%, 32.8%, and 27.9%, respectively. Significant positive correlation was observed between the DGT-Labile P and soil Olsen P ($P < 0.05$, $R^2 = 0.42$), both of which had a significant positive correlation with the grain yield of wheat and crop total P. In the wheat season, a P regime with P fertilization not only ensures adequate soil P supply and wheat P uptake, but also maintained the grain yield of wheat. In contrast, a P regime without P fertilization significantly reduced the soil Olsen P, P uptake, and grain yield of wheat. DGT-Labile P could assess the relationship between soil P supply and wheat P uptake in rice-wheat rotation systems in the Taihu Lake Region.

Keywords: Taihu Lake farmland; phosphorus fertilizer reduction; grain yield; crop total P; soil Olsen P; DGT-Labile P

磷(P)是植物生长发育必需的三大营养元素之一,也是作物产量的主要限制因子之一^[1]。作物吸收的磷主要来源于土壤和外源磷肥,但是磷肥的过量施用与土壤磷的高积累导致了资源浪费和水体污染负荷,王慎强等^[2]对太湖流域典型水稻土磷库现状的调查表明,太湖流域土壤磷库大部分已不缺磷,而且按照目前农民这种季施磷肥(P_2O_5) $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的习惯,土壤磷已经超过作物的营养需求,这不仅不能提高作物产量,反而导致土壤速效磷过多累积。因此,科学的磷肥施用措施对节约不可再生的磷矿资源和2020年实现化肥零增长目标具有重要现实意义^[3]。针对太湖流域稻麦轮作农田土壤磷的过量累积问题,关于减施磷肥的研究相继报道^[4-5]。但是,减磷可行的过程和机理研究主要聚焦在水稻季,小麦季减施磷肥对土壤供磷和小麦吸收磷的影响需要进一步探讨。

磷对小麦高产具有重要作用^[6],高静等^[7]研究表明长期施用磷肥可以显著提高小麦产量和磷肥利用率;曾广伟等^[8]研究发现麦季施磷可增加小麦的穗数和千粒重,进而显著提高小麦的产量。土壤速效磷(Olsen-P)能直接被作物吸收利用,是土壤磷库中对作物最有效的部分,因而被认为是评价土壤供磷能力的重要指标^[9],Reddy等^[10]研究表明长期施用磷肥可显著提高作物产量的稳定性,并且显著提高土壤供磷能力;戚瑞生等^[11]研究表明长期施用有机肥和磷肥或者有机肥磷肥配施都可以提高土壤中的速效磷含量,进而提高土壤供磷能力;秦鱼生等^[12]通过碱性紫色土25年稻麦轮作长期施肥试验研究指出,作物收获从土壤中不断带走磷素,随耕作年限的延长,施磷与不施磷对土壤速效磷的影响巨大;姜宗庆等^[13]研究表明增施磷肥可以显著提高小麦植株吸磷量;周春菊等^[14]研究也表明施磷肥可以增加籽粒中的磷素含量。但是聚焦减施磷肥对土壤供磷和小麦吸收磷的影响目前还鲜有报道。本文通过分析小麦籽粒产量、土壤速效磷、植株全磷以及DGT提取态磷之间的相关关系,以期获得土壤供磷-作物需磷的关系,探究土壤供磷能力,为农田磷肥减施增效理论与推广应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 田间试验设计

田间试验地点为中国科学院常熟农业生态试验站宜兴基地($31^{\circ}16'N$, $119^{\circ}54'E$,年平均气温 $15.7^{\circ}C$,年平均降雨量 1177 mm),地处太湖西北岸,是典型的稻麦轮作地区。

试验始于2010年6月(稻季),共4个试验处理: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);稻麦季均施磷(PR+W)。每个处理重复3次,共12个试验小区,每个试验小区面积 50 m^2 ,随机设计。试验所需N、P、K肥分别采用尿素(46%N)、氯化钾(60% K_2O)和过磷酸钙(12% P_2O_5)。氮肥每季用量为 $N\ 240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,钾肥每季用量 $K_2O\ 60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,磷肥每季用量 $P_2O_5\ 40\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,氮肥每季施用分基肥(30%),第一次追分蘖肥(40%)和第二次追拔节肥(30%),钾肥和磷肥作为基肥一次性施入。稻-麦轮作种植模式、水分等田间管理措施遵照当地农民种植习惯^[15]。

1.2 样品采集及指标测定

本文选取该减施磷肥试验进行第7年的麦季(2017年)作为研究对象。小麦收获时各小区单打单收计算籽粒产量,取部分小麦样品根部、秸秆和籽粒带回实验室分析植株全磷浓度。小麦收获后,采用S型系统布点法随机采集0~20 cm耕层土壤,混匀、风干、研磨,过20目筛后分析土壤速效磷浓度。

梯度扩散薄膜技术(Diffusive Gradients in Thin films, DGT)技术作为一种新型的可原位检测的方法,广泛应用于土壤、水、沉积物中金属/非金属及营养元素有效态含量的测定^[16]。本文采用外壳为圆形双模式DGT装置,主要有固定膜、琼脂糖扩散膜和PVDF滤膜组成^[17]。其中滤膜主要是保护外界对扩散膜的机械损坏和污染;扩散膜主要是控制待测离子到固定膜的扩散通量;固定膜则是用来吸收富集目标离子。 $1.0\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaOH}$ 提取固定膜中磷的提取率为0.950^[18],磷在扩散膜中扩散系数为 $6.86\times 10^{-6}\text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ^[19]。DGT提取

磷(DGT-Labile P)的提取步骤具体如下:

(1)土壤预平衡:取10 g土壤样品加入25 mL的烧杯,加去离子水使其为田间持水量的70%,充分搅拌覆盖保鲜膜,于恒温(25℃)下放置平衡48 h。

(2)DGT放置:先取平衡后土壤样品(3 g)放入DGT圆孔中,在桌面上轻轻平行抖动,使土壤与滤膜表面充分接触,继续添加土壤直至填满内腔。转移到自封袋中,加入少量去离子水,袋口处于半封闭状态。

(3)在恒温条件下放置24 h后,将土壤移除,用去离子水冲洗DGT装置,取出固定膜放入有少量去离子水的自封袋中,密封于4℃下保存待测。

(4)将固定膜放入2.0 mL的离心管,加入1.8 mL浓度为 $1.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的NaOH,室温下静置提取24 h,采用96微孔板分光光度计(Canon-5600F)测定磷含量。

样品分析均采用常规分析方法,采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 提取-钼蓝比色-紫外分光光度计(UVmini-1240)测定植株全磷浓度;采用 NaHCO_3 (pH 8.5)浸提-钼蓝比色法测定土壤速效磷浓度。

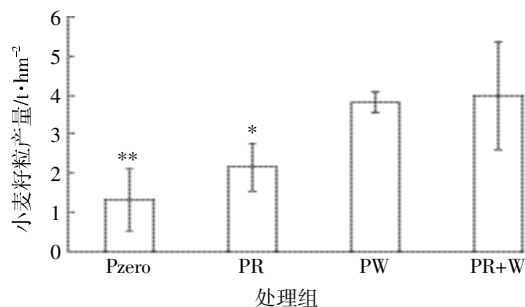
1.3 数据处理

采用SPSS 17.0进行单因素方差分析和LSD多重比较($\alpha=0.05$, $\alpha=0.01$);用Origin作图以及Excel处理数据。

2 结果与分析

2.1 小麦籽粒产量

Pzero、PR、PW及PR+W 4种施磷处理的小麦籽粒平均产量分别是1.33、2.69、3.82、3.99 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (图1)。与PR+W处理相比,PW处理的小麦籽粒产量无显著性变化;而Pzero处理极显著($P<0.01$)减少了小麦籽粒产量,其降低幅度最大,达到66.7%(2.66 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$),PR处理显著($P<0.05$)减少了小麦籽粒产量,其小麦籽粒减产达32.8%(1.30 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)。结果表明麦季施磷肥可以有效保证小麦籽粒产量,麦季不施磷仅稻季施



* 为显著相关($P<0.05$);** 为极显著相关($P<0.01$)。下同

图1 四种施肥处理的小麦籽粒产量

Figure 1 Grain yield of wheat under four P fertilization treatments

磷显著减少了小麦籽粒产量,稻麦季长期不施磷肥的处理减产幅度最大。

2.2 植株全磷浓度

Pzero、PR、PW及PR+W 4种施磷处理的地上部植株全磷平均浓度分别是1.59、2.08、2.37、2.88 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$;地下部植株全磷浓度分别是0.31、0.34、0.48、0.43 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图2)。与PR+W处理相比,PW处理地上部植株全磷浓度无显著性变化,而Pzero处理极显著($P<0.01$)减少了地上部植株全磷浓度,降幅达44.4%(1.29 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$),PR处理显著($P<0.05$)减少了地上部植株全磷浓度,降幅达27.9%(0.80 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。与PR+W处理相比,Pzero、PR、PW的地下部植株全磷浓度均无显著性变化。这表明麦季施加磷肥能保证小麦磷吸收量,麦季不施磷肥仅稻季施磷显著降低了地上部植株全磷含量;麦季施肥与否对地下部植株的全磷浓度均没有显著影响。

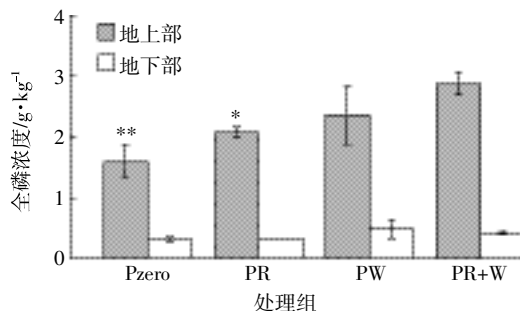


图2 四种施肥处理的小麦植株全磷浓度

Figure 2 The concentration of crop total P of wheat under four P fertilization treatments

2.3 土壤速效磷浓度和DGT提取磷浓度及其相关关系

Pzero、PR、PW及PR+W 4种施磷处理的土壤速效磷和DGT提取磷平均浓度分别为1.86、5.31、6.51、9.62 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和3.41、3.61、4.96、5.13 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ (图3)。与PR+W处理相比,PW处理土壤速效磷浓度无显著性变化;Pzero处理极显著($P<0.01$)减少了土壤速效磷浓度,其降低幅度最大,达到80.7%(7.76 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$);PR处理显著($P<0.05$)减少了土壤速效磷浓度,其浓度降低了44.8%(4.31 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。线性回归分析表明土壤速效磷浓度与DGT提取磷浓度呈显著性正相关关系($P=0.02$, $R^2=0.42$,图4)。这表明麦季施磷稻季不施磷能维持作物生长需要的土壤速效磷含量,保证土壤供磷能力;麦季不施磷仅稻季施磷显著降低了土壤速效磷浓度。

2.4 土壤速效磷浓度、DGT提取磷浓度和小麦籽粒产量与植株全磷浓度的相关关系

回归分析发现:土壤速效磷浓度与小麦籽粒产量

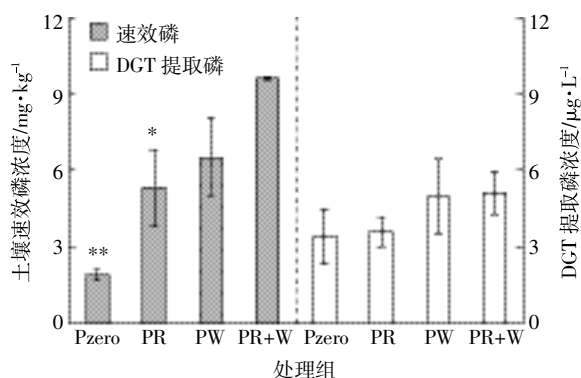


图 3 四种施肥处理的土壤速效磷浓度和 DGT 提取磷浓度
Figure 3 The concentration of soil Olsen-P and DGT-Labile P under four P fertilization treatments

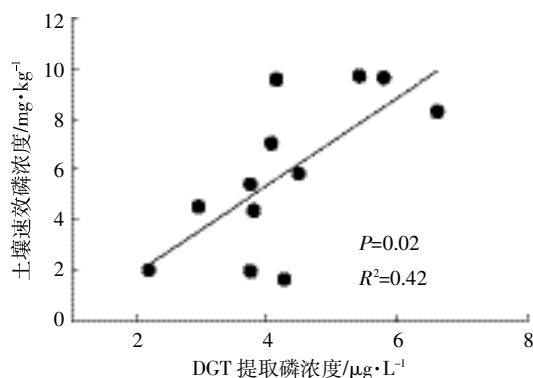


图 4 土壤速效磷浓度与 DGT 提取磷浓度相关关系

Figure 4 The correlation between the concentration of soil Olsen-P and DGT-Labile P

呈极显著正相关关系($P=0.01, R^2=0.49$);DGT 提取磷浓度与小麦籽粒产量呈极显著正相关关系($P<0.01, R^2=0.57$,图 5)。DGT 提取磷浓度与小麦籽粒产量的 R^2 值大于土壤速效磷浓度与小麦籽粒产量 R^2 值,表明 DGT 提取磷浓度与小麦籽粒产量有更好的相关性。土壤速效磷浓度与地上部植株全磷浓度有极显著的正相关关系($P<0.01, R^2=0.69$),与地下部植株全磷浓度有显著的正相关关系($P=0.04, R^2=0.30$);DGT 提取磷浓度与地上部植株全磷浓度有显著的正相关关系($P=0.03, R^2=0.32$),与地下部植株全磷浓度有极显著的正相关关系($P=0.01, R^2=0.49$,图 6)。土壤速效磷浓度与地上部植株全磷浓度的 R^2 值大于 DGT 提取磷浓度与地上部植株全磷浓度的 R^2 值,DGT 提取磷浓度与地下部植株全磷浓度的 R^2 值大于土壤速效磷浓度与地下部植株全磷浓度的 R^2 值,表明土壤速效磷浓度与地上部植株全磷浓度有更好的相关性;DGT 提取磷浓度则与地下部植株全磷浓度有更好的相关性。

3 讨论

对于稻麦轮作系统,施磷与作物吸磷和产量的关

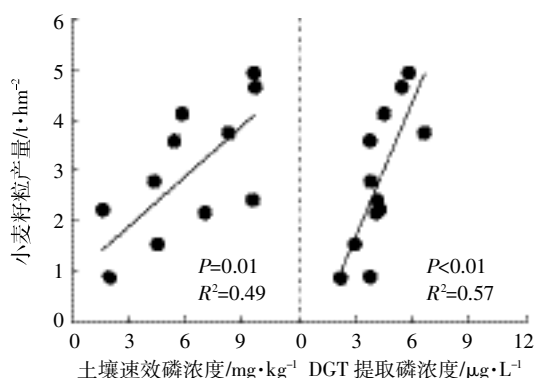


图 5 土壤速效磷浓度和 DGT 提取磷浓度与小麦籽粒产量的相关关系

Figure 5 The correlation among grain yields and the concentration of soil Olsen-P, DGT-Labile P

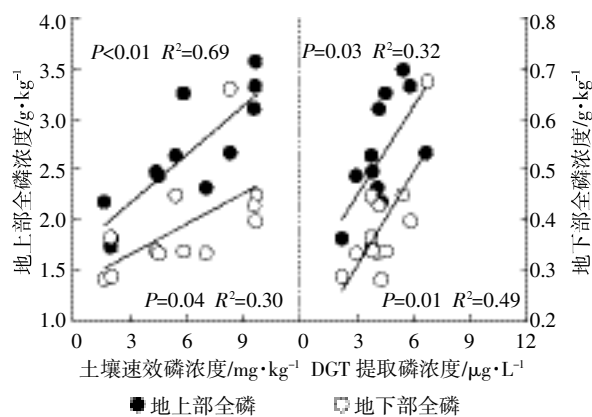


图 6 土壤速效磷和 DGT 提取磷浓度与地上部全磷和地下部全磷浓度的相关关系

Figure 6 The correlation among the concentration of aboveground TP, underground TP and soil Olsen-P, DGT-Labile P

系已有相关研究,例如马保国等^[20]和管冠^[21]的研究表明在稻麦轮作体系中,不施磷肥显著减少了小麦产量;秦伟等^[22]在近太湖地区的磷肥试验显示不施磷显著减少作物产量以及植株全磷含量;丁珊珊等^[23]研究也表明长期施磷能显著增加作物中的含磷量,并且随施磷量的增加而增加。而在长期减施磷肥措施下,本文发现与当前传统的施磷方式 PR+W 处理相比,减施磷肥第 7 年后,PW 处理的小麦籽粒产量、土壤速效磷、地下部植株全磷以及地上部植株全磷均无显著差异,而 Pzero、PR 处理的小麦籽粒产量、土壤速效磷以及作物地上部全磷显著降低($P<0.05$),Pzero、PR、PW 处理的地下部全磷没有显著性变化。结果表明太湖稻麦农田在目前产量水平下,磷肥减施至第 7 个稻麦轮作周年,实施麦季施磷稻季不施磷的减磷措施仍具有可行性,仅麦季施磷即可满足作物的磷需求和维持小麦的产量。但是,麦季不施磷则显著降低了小麦

的产量和地上部植株全磷。这与 Wang 等^[15]和朱文彬等^[24]的研究结果是一致的,即:太湖稻麦农田减施磷肥至第4年时麦季不施磷(Pzero, PR)显著降低小麦籽粒产量,但不会降低植株全磷含量。而减磷试验进行至第7年,麦季不施磷处理不仅降低籽粒产量,而且降低植株全磷含量。这可能主要是由于麦季不施磷会持续消耗土壤中的磷素,导致土壤磷素一直处于亏缺状态,随着磷素亏缺量不断增大,土壤速效磷也随之减少,致使土壤供磷能力减弱,进而减少小麦籽粒产量及地上部植株全磷含量。另外,与 PW 相比,尽管 PR 处理稻季施入了等剂量的磷肥,但是由于水田通常处于厌氧还原条件,磷素很容易被释放出来,容易造成流失,而且进入麦季时,磷素在小麦季旱地土壤中极易被固持,扩散能力弱,不易被植物吸收利用^[25],导致土壤速效磷减少,小麦生长土壤不再能供应充足的磷素。而麦季施磷处理(PW, PR+W)一直都有外源磷素的施入,土壤磷素不断累积,所以土壤速效磷也随之增加,这与黄邵敏等^[26]研究结果一致;周宝库等^[27]研究也表明连续23年不施磷肥,土壤速效磷降低幅度高达60%。所以麦季施磷处理的土壤速效磷含量显著高于麦季不施磷处理,由于土壤供磷能力增强,小麦植株全磷含量也显著增加。

DGT 作为一种新技术^[28]可用来表征很多重金属在土壤中的生物有效性,在湖泊底泥和沉积物的重金属以及磷等营养盐的扩散和有效性研究中也得到越来越多的应用。DGT 对磷的富集过程是模拟目标离子在环境中的迁移和生物吸收的过程,测定的是土壤中可溶性磷含量^[18]。本文通过相关性分析,发现 DGT 提取磷与土壤速效磷以及植株地上部全磷呈显著正相关关系($P<0.05$),与小麦籽粒产量和植株根部全磷呈极显著的正相关关系($P<0.01$)。这表明 DGT 提取磷能够反映土壤磷素的生物有效性,可以作为评价土壤供磷水平的重要指标。McBeath 等^[29]用5种方法评价土壤中磷的可利用性,认为 DGT 法和传统的 Bray 法、Colwell 法、resin 法、同位素标记法一样可以作为评价土壤磷生物有效性的指标;Mason 等^[30]研究发现麦季施磷肥条件下,DGT 法比传统的 Colwell 法、resin 法更能准确评价小麦产量和磷的生物有效性。

4 结论

本文研究太湖稻麦轮作区减施磷肥7年后对土壤供磷与小麦磷吸收的影响,发现与农民目前习惯采用的稻麦季均施磷方法相比:

(1)麦季施磷稻季不施磷的减磷措施能保持土壤速效磷供应、小麦吸磷量,维持小麦籽粒产量;麦季不施磷的减磷措施则显著降低了土壤速效磷供应、小麦吸磷量和小麦籽粒产量。

(2)DGT 提取磷与土壤速效磷有显著的正相关关系;两者均与小麦籽粒产量、地上部植株全磷、地下部植株全磷有显著的正相关关系;DGT 提取磷可作为稻麦轮作系统土壤供磷-作物需磷动态关系研究的评价指标。

参考文献:

- [1] Blake R E, O'Neil J R, Surkov A V. Biogeochemical cycling of phosphorus: Insights from oxygen isotope effects of phosphoenzymes[J]. *American Journal of Science*, 2005, 305(6/7/8): 596-620.
- [2] 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.
- [3] 汪玉, 赵旭, 王慎强, 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 Shen-qiang et al. 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.
- [4] 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.
- [5] 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 and Sediments*, 2015, 15(4): 844-853.
- [6] 赵秉强. 施肥制度与土壤可持续利用[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
ZHAO Bing-qiang. Fertilization systems and land use sustainability[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [7] 高静, 张淑香, 徐明岗, 等. 长期施肥下三类型农田土壤小麦磷肥利用效率的差异[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(9): 2142-2148.
GAO Jing, ZHANG Shu-xiang, XU Ming-gang, et al. Phosphorus use efficiency of wheat on three typical farmland soils under long-term fertilization[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(9): 2142-2148.
- [8] 曾广伟, 兰进好, 刘义国, 等. 不同土壤水分条件下施磷对小麦光合性能和产量影响比较[J]. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(5): 41-46.
ZENG Guang-wei, LAN Jin-hao, LIU Yi-guo, et al. Comparison of effects of different soil water conditions and phosphorus application on photosynthesis and yield of wheat[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(5): 41-46.

- [9] 曲均峰, 李菊梅, 徐明岗, 等. 中国典型农田土壤磷素演化对长期单施氮肥的响应[J]. 中国农业科学, 2009, 42(11):3933-3939.
- QU Jun-feng, LI Ju-mei, XU Ming-gang, et al. Response of typical soil phosphorus evolution to long-term single nitrogen fertilization[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(11):3933-3939.
- [10] Reddy D D, Rao A S, Reddy K S, et al. Yield sustainability and phosphorus utilization in soybean-wheat system on vertisols in response to integrated use of manure and fertilizer phosphorus[J]. *Field Crops Research*, 1999, 62(2/3):181-190.
- [11] 戚瑞生, 党廷辉, 杨绍琼, 等. 长期定位施肥对土壤磷素吸持特性与淋失突变点影响的研究[J]. 土壤通报, 2012, 43(5):1187-1197.
- QI Rui-sheng, DANG Ting-hui, YANG Shao-qiong, et al. The impact on soil phosphorus adsorption characteristics and leaching change-point under long-term fertilization[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(5):1187-1197.
- [12] 秦鱼生, 涂仕华, 孙锡发, 等. 长期定位施肥对碱性紫色土磷素迁移与累积的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(5):880-885.
- QIN Yu-sheng, TU Shi-hua, SUN Xi-fa, et al. Transfer and accumulation of phosphorus in the calcareous purple soil in a long-term fertilizer experiment[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(5):880-885.
- [13] 姜宗庆, 封超年, 黄联联, 等. 施磷量对小麦物质生产及吸磷特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(5):628-634.
- JIANG Zong-qing, FENG Chao-nian, HUANG Lian-lian, et al. Effects of phosphorus application on dry matter production and phosphorus uptake in wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(5):628-634.
- [14] 周春菊, 张嵩午, 王林权, 等. 冷、暖型小麦不同器官的磷素含量及其运转研究[J]. 土壤通报, 2010, 41(4):947-951.
- ZHOU Chun-ju, ZHANG Song-wu, WANG Lin-quan, et al. Phosphorus contents in different organs of CTW and WTW genotypes and their remobilization during grain filling[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(4):947-951.
- [15] Wang Y, Zhao X, Wang L, et al. Phosphorus fertilization to the wheat-growing season only in a rice-wheat rotation in the Taihu Lake region of China[J]. *Field Crops Research*, 2016, 198:32-39.
- [16] Davison W, Zhang H. *In-situ* speciation measurements of trace components in natural waters using thin-film gels[J]. *Nature*, 1994, 367(6463):546-548.
- [17] Ding S M, Wang Y, Zhang L P, et al. New holder configurations for use in the diffusive gradients in thin films (DGT) technique[J]. *RSC Advances*, 2016, 6(91):88143-88156.
- [18] Ding S M, Xu D, Sun Q, et al. Measurement of dissolved reactive phosphorus using the diffusive gradients in thin films technique with a high-capacity binding phase[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(21):8169-8174.
- [19] Wang Y, Ding S M, Gong M D, et al. Diffusion characteristics of agarose hydrogel used in diffusive gradients in thin films for measurements of cations and anions[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2016, 945:47-56.
- [20] 马保国, 杨太新, 郭凤台, 等. 麦稻轮作体系中磷素平衡的研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2):371-374.
- MA Bao-guo, YANG Tai-xin, GUO Feng-tai, et al. Balance of phosphorus in a rotation system with winter-wheat and rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(2):371-374.
- [21] 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.
- [22] 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 of typical farmland soil system in Taihu Lake basin[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2012, 40(6):321-323.
- [23] 丁珊珊, 徐宁彤, 徐明岗. 长期定位施肥对暗棕壤磷素肥力的影响[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(29):14295-14297, 14333.
- DING Shan-shan, XU Ning-tong, XU Ming-gang. Effects of long-term located fertilization on phosphorus fertility of alfisol[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2009, 37(29):14295-14297, 14333.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 黄绍敏, 宝德俊, 皇甫湘荣, 等. 长期施肥对潮土土壤磷素利用与积累的影响[J]. 中国农业科学, 2006, 39(1):102-108.
- HUANG Shao-min, BAO De-jun, HUANGFU Xiang-rong, et al. Effect of long-term fertilization on utilization and accumulation of phosphate nutrient in fluvo-aquic soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(1):102-108.
- [27] 周宝库, 张喜林. 长期施肥对黑土磷素积累、形态转化及其有效性影响的研究[J]. 营养与肥料学报, 2005, 11(2):143-147.
- ZHOU Bao-ku, ZHANG Xi-lin. Effect of long-term phosphorus fertilization on the phosphorus accumulation and distribution in black soil and its availability[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(2):143-147.
- [28] Zhang H, Davison W. Performance characteristics of diffusion gradients in thin films for the *in situ* measurement of trace metals in aqueous solution[J]. *Analytical Chemistry*, 1995, 67(19):3391-3400.
- [29] McBeath T M, McLaughlin M J, Armstrong R D, et al. Predicting the response of wheat (*Triticum aestivum* L.) to liquid and granular phosphorus fertilisers in Australian soils[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2007, 45(6):448-458.
- [30] Mason S, Meneill A, McLaughlin M J, et al. Prediction of wheat response to an application of phosphorus under field conditions using diffusive gradients in thin-films (DGT) and extraction methods[J]. *Plant and Soil*, 2010, 337(1/2):243-258.