生态与农村环境学报 2018，34（7）：599-605
Journal of Ecology and Rural Environment

DOI：10.11934/j.issn.1673-4831.2018.07.004
袁佳慧，汪玉，王慎强，等.稻麦轮作磷肥减施下水稻土磷素生物有效性特征[J].生态与农村环境学报，2018，34(7)：599-605.
YUAN Jia-hui，WANG Yu，WANG Shen-qiang，*et al*.Characteristic of Soil P Availability in Reduced P-Input Rice-Wheat Cropping Rotation Paddy Soils[J].Journal of Ecology and Rural Environment，2018，31(7)：599-605.

稻麦轮作磷肥减施下水稻土磷素生物有效性特征

袁佳慧[1,2]，汪　玉[2①]，王慎强[2]，赵品恒[3]，王宏燕[1②]，陈　浩[2]，朱文彬[2]（1. 东北农业大学资源与环境学院，黑龙江 哈尔滨　150030；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，江苏 南京　210008；3. 常熟市农业科学研究所，江苏 常熟　215500）

摘要： 土壤磷素化学分级提取方法被广泛应用于磷素状态及特征分析，但相关提取方法缺乏土壤根际过程的表征。基于磷素的根际过程特点，采用一种磷素生物有效性（the biologically-based phosphorus，BBP）分级方法，研究太湖稻麦轮作区磷肥减施定位试验田实施 7 a 后麦季收获期土壤磷素生物有效性及其影响因素。结果表明：就宜兴试验田而言，稻季不施磷麦季施磷处理（PW）$CaCl_2$-P 含量与稻麦季均施磷处理（PR+W）之间无显著差异，Citrate-P、HCl-P 和 Enzyme-P 含量则差异显著（$P<0.05$）。就常熟试验田而言，不同磷肥减施方式对各磷组分含量总体无显著影响，仅 Pzero 处理 HCl-P 含量与 PR+W 处理相比明显降低。两块试验田用 BBP 法提取的 4 种土壤磷组分含量与有效磷含量之间的决定系数（R^2）不同：宜兴有效磷主要来自 Citrate-P（$R^2=0.587$，$P<0.01$）、HCl-P（$R^2=0.587$，$P<0.01$）和 Enzyme-P（$R^2=0.531$，$P<0.01$），常熟有效磷主要来自 HCl-P（$R^2=0.386$，$P<0.05$）和 Citrate-P（$R^2=0.280$，$P<0.05$）。4 种磷组分含量由大到小依次为 HCl-P、Citrate-P、Enzyme-P 和 $CaCl_2$-P。冗余分析结果表明，土壤 pH、碱性磷酸酶（S-ALP）是影响磷组分变化的重要因素，与土壤磷组分间存在一定的正相关关系。认为该研究结果能加深对减磷条件下土壤磷素生物有效性的理解。

关键词： 生物分级；生物有效性；环境因子；麦季；水稻土
中图分类号： X501　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 1673-4831(2018)07-0599-07

Characteristic of Soil P Availability in Reduced P-Input Rice-Wheat Cropping Rotation Paddy Soils. *YUAN Jia-hui*[1,2], *WANG Yu*[2①], *WANG Shen-qiang*[2], *ZHAO Pin-heng*[3], *WANG Hong-yan*[1②], *CHEN Hao*[2], *ZHU Wen-bin*[2] (1. College of Resources and Environmental Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture/ Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. Changshu Institute of Agricultural Sciences, Changshu 215500, China)

Abstract: Chemical soil phosphorus (P) extraction has been widely used to characterize and understand changes in soil P fractions, however lacking adequately capture rhizosphere processes. Relying on two reduced P-input experimental stations in Taihu rice-wheat cropping rotation area, the biologically-based phosphorus (BBP) grading method was used to evaluate the availability and influencing factors of soil P during wheat-growing stage. The trial of long-term positioning P fertilizer reduction has been conducted for 7 years. The results show that, in Yixing Station, $CaCl_2$-P in soil treated with P fertilization at wheat season only (PW) had no significant difference with soil treated at both rice and wheat seasons (PR+W), while Citrate-P and HCl-P as well as Enzyme-P under PW treatments were significantly low ($P<0.05$). As for Changshu Station, no significant differences were shown between three P-reducing treatments and PR+W; only Pzero treatment significantly reduced the concentration of soil HCl-P. Correlation coefficients between four BBP fractions and Olsen-P at two stations were different. Olsen-P was mainly from Citrate-P ($R^2=0.587$, $P<0.01$), HCl-P ($R^2=0.587$, $P<0.01$) and Enzyme-P ($R^2=0.531$, $P<0.01$) in Yixing, while mainly from HCl-P ($R^2=0.386$, $P<0.05$) and Citrate-P ($R^2=0.280$, $P<0.05$) in Changshu. The concentration of four BBP fractions followed the order of HCl-P > Citrate-P >

收稿日期： 2017-10-11
基金项目： 国家自然科学基金面上项目（41671304）；国家重点研发计划（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）
① **通信作者** E-mail：wangyu@issas.ac.cn
② **共同通信作者** E-mail：Why220@126.com

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Enzyme-P>$CaCl_2$-P. Furthermore, RDA showed that soil alkaline phosphatase (S-ALP) activity and pH were the dominant factors for the changes in soil P, and correlated with soil P fractions positively. These results may be helpful for understanding of the changes in soil P status while P-input was reducing.

Key words: phosphorus fractionation; bioavailability; environmental factor; wheat-growing season; paddy soil

磷是植物生长发育的必需营养元素之一[1-2]，但过量施用磷肥会增加磷随径流或向下淋洗流失的风险[3]。因此，农田施磷方案的科学设计对节约资源和保护环境尤为重要。以往研究表明在太湖稻麦轮作区实施稻季不施磷仅麦季施磷的磷肥减施措施在水稻季仍可为作物提供充足的磷源，并从化学分级等层面解释了原因[4-5]。然而，磷素化学分级方法缺少对植物根系和微生物磷素获取机制的研究[6-7]，并且提取过程相对复杂，耗时长，设备要求高[8-9]。土壤磷化合物的复杂成分使得各种形态磷素对应着不同的生物有效性[10-11]。

DELUCA 等[12]基于生物学利用难易程度开发了基于磷素生物有效性的分级方法(简称 BBP 法)，该方法模拟微生物和作物根系的磷矿化作用，对土壤不同形态磷素生物有效性进行评价。GAO 等[13]采用该方法对生物炭施入情况下的美国圣胡安群岛土壤养分的保持和供应进行研究，生物炭的施入可显著增加吸附土壤黏粒或弱结合于无机沉淀物中的柠檬酸提取态磷(Citrate-P)组分含量，促进作物吸收利用，从而增加土壤养分可利用性。ZHONG 等[14]采用该方法针对某沿海平原土壤展开研究，发现根际-蚯蚓-海鸟粪交互作用对土壤磷素供给、组分以及植物可利用性具有一定的调节作用。水稻土是一种特殊的周期性淹水土壤，主要通过氧化还原反应对元素的生物地球化学循环、土壤 pH 以及酶活性产生深远影响[15]。

利用 BBP 法研究 4 种磷肥处理水稻土麦季收获期磷素生物有效性，以及土壤 pH 和磷酸酶活性对磷组分及有效性的影响，分析各形态磷对植物磷吸收的贡献，从而合理评估土壤磷素生物有效性，加强对减磷处理下土壤磷状态变化的表征和理解。

1 材料与方法

1.1 样品采集

试验地点为太湖西北岸中国科学院常熟农业生态实验站宜兴(31°16′ N，119°54′ E)和常熟农业科学研究所(31°41′ N，120°40′ E)试验田，两地种植方式均以稻麦轮作为主，年平均温度分别为 16.1 和 16.9 ℃，年平均降水量分别为 1 845.8 和1 615.3 mm。土壤基本理化性质见表 1。试验于 2010 年 6 月开始(稻季)，共设稻麦季均不施磷(Pzero)、稻季施磷麦季不施磷(PR)、麦季施磷稻季不施磷(PW)和稻麦季均施磷(PR+W，常规施肥)4 个处理，每组设 3 个重复，12 个小区随机分布，每个小区面积为 50 m^2。试验用 N、P、K 肥分别为尿素〔w(N) = 46%〕、过磷酸钙〔w(P_2O_5) = 12%〕和氯化钾〔w(K_2O) = 60%〕。氮肥(以 N 计)每季用量为 240 kg·hm^{-2}，钾肥(以 K_2O 计)每季用量为 60 kg·hm^{-2}，磷肥(以 P_2O_5 计)每季用量为 40 kg·hm^{-2}。每季氮肥施用分基肥(30%)、第 1 次追分蘖肥(40%)和第 2 次追拔节肥(30%)；磷肥施用情况视不同磷肥处理而定。于 2017 年(第 7 年稻麦轮作)麦季收获期用镊子小心采取小麦根际新鲜土壤并将其收集于离心管中，直接用于 BBP 生物分级试验或于-20 ℃条件下保存，剩余土壤风干过 2 mm 孔径筛于室温保存用于其他指标测定。

表 1 供试土壤初始基本性状

Table 1 Initial basic properties of soil used

试验田	w(全氮)/(g·kg^{-1})	w(全磷)/(g·kg^{-1})	w(全钾)/(g·kg^{-1})	w(有机质)/(g·kg^{-1})	w(有效磷)/(mg·kg^{-1})	阳离子交换量/(cmol·kg^{-1})	pH 值
宜兴	0.96	0.37	12.3	16.7	16.3	8.57	5.95
常熟	1.93	0.56	16.0	35.9	10.2	17.50	5.56

1.2 样品处理

供试样品分析均采用常规分析方法[16-17]。土壤 pH 采用 pH 计(Thermo ORION STAR A211)测定〔m(土)∶V(水)为 1∶2.5〕；土壤有机质含量采用 Loco CN-2000 分析仪测定；土壤全氮含量采用凯氏定氮法测定；土壤有效磷含量采用 $NaHCO_3$(pH 8.5)浸提-钼蓝比色法测定；阳离子交换量(CEC)采用乙酸铵交换法测定；土壤全钾含量采用火焰原子吸收法测定。土壤磷酸酶活性采用土壤酸性、碱性磷酸酶(S-ACP、S-ALP)活性测定试剂盒完成。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1.3　BBP 土壤磷分级

采用 DELUCA 等[12]的基于生物有效性的磷素分级方法分析土壤磷素有效性，其简要步骤如下：称取 0.5 g 新鲜土于 15 mL 离心管中，加入 10 mL 提取液，分别为 0.01 mol·L^{-1} $CaCl_2$、0.01 mol·L^{-1} 柠檬酸、0.02 EU·mL^{-1}酶（含酸性磷酸酶、碱性磷酸酶和植酸酶）和 1 mol·L^{-1} HCl。酶提取液中，在原始方法的基础上添加微生物来源的碱性磷酸酶（Sigma P5931；Enzyme Commission Number 3.1.3.1），使得所活化提取的有机磷组分更加全面和具有代表性，并且提取过程中以纯水代替醋酸钠缓冲溶液[18]。鉴于植酸酶自身含磷，在使用前于室温条件下用透析袋对植酸酶透析 5 d 以去除植酸酶中的磷。采用钼蓝法测定磷含量[19]，对于高磷含量样品（Citrate-P、HCl-P），对其进行适当稀释后测定[20]。

1.4　数据处理

采用 SPSS 17.0 软件进行 Pearson 相关分析和 Duncan 单因素方差分析（$\alpha=0.05$）。采用冗余分析（redundancy analysis，RDA）评价土壤 pH，酸性、碱性磷酸酶对磷组分的影响。在进行冗余分析前，对磷组分矩阵进行除趋势对应排序分析（detrended correspondence analysis，DCA），确定数据适合线性模型。采用 Canoco 4.5 软件进行冗余分析。

2　结果与分析

2.1　磷肥减施条件下麦季土壤磷素生物有效性特征

基于生物有效性的土壤磷素分级方法所得 4 种磷组分含量存在显著差异，由高到低依次为 HCl-P、Citrate-P、酸性磷酸酶、碱性磷酸酶和植酸酶提取态磷（Enzyme-P）和 $CaCl_2$-P，并且常熟试验田磷含量高于宜兴试验田，宜兴和常熟试验田 HCl-P 含量差异最显著（表 2）。对比 4 种施磷方式下麦季收获期土壤各磷组分含量发现，宜兴磷含量变异幅度较大，与磷肥减施处理（Pzero、PR 和 PW）相比，稻麦季均施磷处理（PR+W）Citrate-P、Enzyme-P 和 HCl-P 含量显著增加（$P<0.05$），对于 $CaCl_2$-P 含量则不存在显著差异；在常熟试验田，不同施肥方式对麦季收获期土壤各生物分级磷组分含量总体不存在显著影响（$P>0.05$），仅两季均不施磷肥处理（Pzero）HCl-P 含量与常规施磷处理相比显著降低（$P<0.05$）。

表 2　磷肥减施条件下麦季土壤基于生物有效性的土壤磷组分含量特征

Table 2　Characteristics of composition of soil phosphorus based on the biological availability in reduced P-input paddy soils

试验田	处理	w/（mg·kg^{-1}）			
		$CaCl_2$-P	Citrate-P	Enzyme-P	HCl-P
宜兴	Pzero	0.442±0.044[a]	15.815±2.684[b]	4.706±0.897[b]	55.577±5.385[c]
	PR	0.443±0.051[a]	20.914±1.209[b]	4.811±0.566[b]	87.541±15.063[b]
	PW	0.619±0.141[a]	17.606±6.264[b]	6.471±2.166[b]	88.939±15.767[b]
	PR+W	0.531±0.097[a]	46.116±9.815[a]	13.080±2.181[a]	202.580±7.691[a]
常熟	Pzero	0.553±0.053[a]	12.564±9.219[a]	7.153±1.353[a]	132.660±12.391[b]
	PR	0.602±0.047[a]	19.990±2.630[a]	9.393±2.128[a]	163.255±9.183[a]
	PW	0.691±0.139[a]	18.624±2.856[a]	7.378±1.958[a]	153.786±13.084[ab]
	PR+W	0.584±0.054[a]	22.500±3.383[a]	9.306±0.829[a]	174.066±20.801[a]

Pzero 为稻麦季均不施磷；PR 为稻季施磷麦季不施磷；PW 为麦季施磷稻季不施磷；PR+W 为稻麦季均施磷（常规施肥）。就某一试验田而言，同一列数据后英文小写字母不同表示不同处理间某指标差异显著（$P<0.05$）。

2.2　磷肥减施下麦季基于生物有效性的土壤磷素组分与有效磷的关系

宜兴、常熟试验田土壤有效磷含量见表 3。宜兴试验田 Citrate-P、Enzyme-P 和 HCl-P 含量均与有效磷含量呈极显著正相关关系（$P<0.01$），决定系数（R^2）分别为 0.587、0.531 和 0.587，而 $CaCl_2$-P 含量与有效磷含量之间不存在显著相关关系（图 1）。常熟试验田 Citrate-P 和 HCl-P 含量与有效磷含量呈显著正相关关系（$P<0.05$），R^2 分别为 0.280 和 0.386，而 $CaCl_2$-P、Enzyme-P 含量与有效磷含量之间不存在显著相关关系。

表 3　磷肥减施条件下麦季土壤有效磷含量

Table 3　Concentration of soil olsen-P in reduced P-input paddy soils

处理	w（有效磷）/（mg·kg^{-1}）	
	宜兴试验田	常熟试验田
Pzero	1.885±0.209[c]	4.200±0.659[c]
PR	5.311±1.490[b]	6.370±0.948[b]
PW	6.512±1.553[b]	6.187±1.134[b]
PR+W	9.622±0.063[a]	9.541±1.141[a]

Pzero 为稻麦季均不施磷；PR 为稻季施磷麦季不施磷；PW 为麦季施磷稻季不施磷；PR+W 为稻麦季均施磷（常规施肥）。同一列数据后英文小写字母不同表示不同处理间有效磷含量差异显著（$P<0.05$）。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

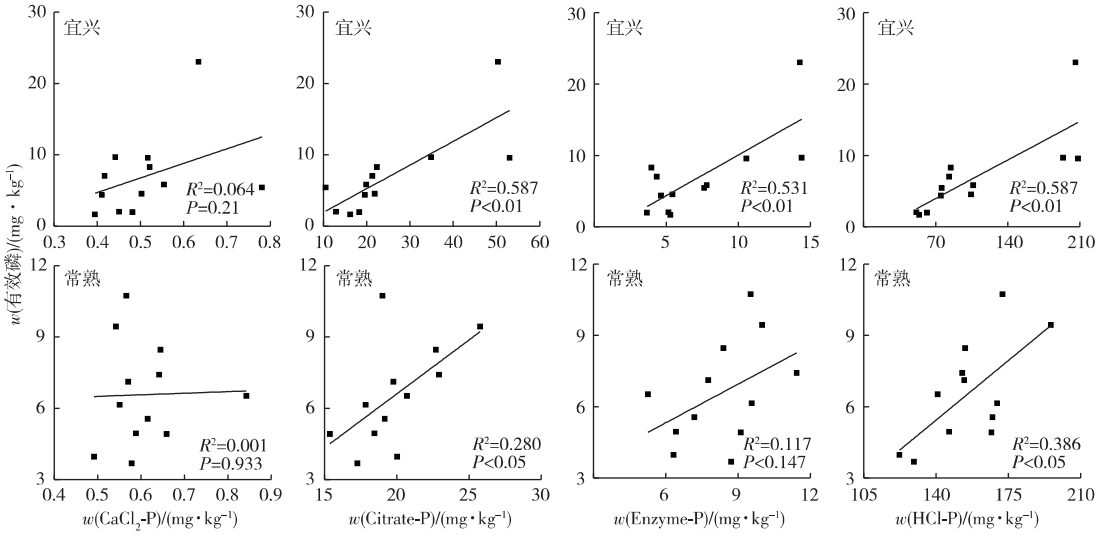


图 1 磷肥减施下麦季土壤 4 种生物有效性磷与有效磷相关性

Fig. 1 Relationships between Olsen-P concentration and four fractions of the proposed biologically-based P in reduced P-input paddy soils

2.3 磷肥减施下麦季土壤磷酸酶活性

由表 4 可知，宜兴、常熟试验田土壤酸性磷酸酶(S-ACP)活性均高于碱性磷酸酶(S-ALP)活性。两地 S-ACP 活性均值分别为 19.60 和 21.70 μmol·d^{-1}·g^{-1}，S-ALP 活性均值则分别为 0.719、1.543 μmol·d^{-1}·g^{-1}，并且不同施肥方式对宜兴麦季收获期 S-ACP、S-ALP 活性总体不存在显著影响(P>0.05)，而常熟试验田仅稻季施磷肥处理(PR) S-ACP 活性显著低于常规施肥处理(PR+W)(P<0.05)，对于 S-ALP 活性则不存在显著差异。

表 4 磷肥减施下麦季土壤磷酸酶活性

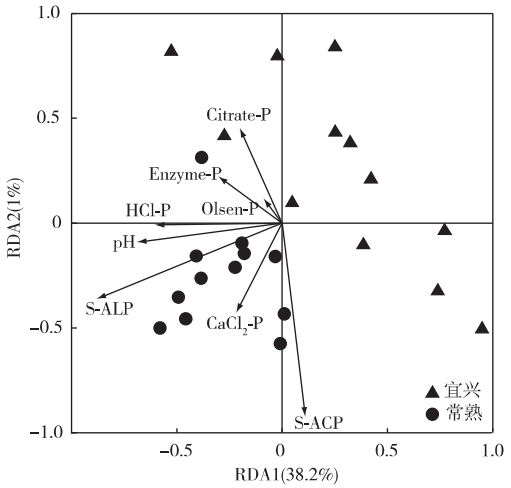
Table 4 Soil phosphatase activity in reduced P-input paddy soils

试验田	处理	酸性磷酸酶活性/(μmol·d^{-1}·g^{-1})	碱性磷酸酶活性/(μmol·d^{-1}·g^{-1})
宜兴	Pzero	20.072±3.848^a	0.467±0.148^a
	PR	19.361±0.965^a	0.747±0.447^a
	PW	21.415±2.175^a	0.758±0.332^a
	PR+W	17.558±1.216^a	0.903±0.374^a
常熟	Pzero	21.880±0.574^{ab}	1.548±0.254^a
	PR	20.194±1.321^b	1.491±0.144^a
	PW	22.114±1.229^{ab}	1.617±0.342^a
	PR+W	22.628±0.679^a	1.517±0.279^a

Pzero 为稻麦季均不施磷；PR 为稻季施磷麦季不施磷；PW 为麦季施磷稻季不施磷；PR+W 为稻麦季均施磷(常规施肥)。就某一试验田而言，同一列数据后英文小写字母不同表示不同处理间某指标差异显著(P<0.05)。

2.4 磷肥减施下麦季土壤特性与土壤磷组分关系

图 2 显示，土壤 pH、S-ACP 和 S-ALP 共解释磷组分 39.2% 的变异，其中，第 1 排序轴解释变异 38.2%，为显著性轴。结果表明，pH 和 S-ALP 含量与土壤磷组分含量间存在一定正相关关系。



S-ACP 和 S-ALP 分别为土壤酸性磷酸酶和碱性磷酸酶。

图 2 磷肥减施条件下麦季土壤 pH、S-ACP 和 S-ALP 与 4 种生物有效性磷和有效磷(Olsen-P)的 RDA 分析

Fig. 2 Redundancy analysis (RDA) revealing the effects of soil pH, S-ACP and S-ALP on biologically-based P (BBP) and the conventional Olsen-P in reduced P-input paddy soils

3 讨论

3.1 磷肥减施条件下麦季土壤磷素生物有效性

BBP 磷素分级方法是可应用于复杂景观尺度上的基于土壤根际过程的一套简洁的土壤磷素平

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

行提取评估过程[12]。笔者研究中，与稻麦季均施磷处理（PR+W）相比，宜兴减施磷肥处理（Pzero、PR 和 PW）Citrate-P、Enzyme-P 和 HCl-P 含量显著降低（$P<0.05$），但作物直接可溶性磷（$CaCl_2$-P）含量没有显著差异，表明磷肥减量实施 7 a 后，宜兴 PW 处理在稻季不施磷肥条件下土壤仍可提供充足的磷源来维持水稻生长并保证产量稳定（PW：3.815 t · hm^{-2}；PR+W：3.996 t · hm^{-2}。$P>0.05$）；与稻麦季均施磷处理（PR+W）相比，常熟减施磷肥处理（Pzero、PR 和 PW）4 种有效性磷组分总体无显著差异，表明常熟 PW 处理土壤磷素供应能力与 PR+W 处理相似。以上麦季的研究结果与以往针对两块试验田 2013 年水稻季收获期 Tiessen 化学分级结果相一致[4]，进一步从土壤磷素生物有效性角度阐述了太湖流域稻麦轮作区土壤稻季减施磷肥可以实施的原因。对 2013 年稻季土壤的研究[4]表明，常熟试验田磷含量高于宜兴，因此到目前为止，与 PR+W 处理相比，常熟试验田 PR 或 PW 处理土壤磷含量无显著差异，仅 Pzero 处理需要更多的 HCl-P 对土壤活性磷进行补给。这与 BOSCHETTI 等[21]的研究结果相一致，同样也表明不同磷肥的添加主要增加了土壤无机磷（Pi）含量，而有机磷（Po）含量变化不显著。

土壤有效磷是评价土壤磷素可利用性应用最广泛的测试指标之一，尤其是可用于大规模范围内土壤磷素状态的分析[22]。BBP 方法利用 $CaCl_2$、柠檬酸、酶和 HCl 对土壤磷素进行平行提取，分别模拟 4 种土壤磷素组分；$CaCl_2$-P 为可溶性无机磷，模拟可被根系截留的磷酸根；Citrate-P 为活性无机磷，模拟能够被有机酸活化释放的磷组分；Enzyme-P 为活性有机磷，模拟微生物和植物根系分泌的酶（酸性、碱性磷酸酶和植酸酶）矿化的磷组分；HCl-P 是相对稳定的无机磷，模拟经氢质子活化的最大潜力磷库；4 种磷组分对土壤有效磷的贡献主要为 $CaCl_2$-P 和 Citrate-P。DELUCA 等[12]的研究表明，BBP 体系 4 种提取形态磷含量间差异较大，但与有效磷含量呈显著正相关关系。笔者研究中，基于 4 种磷肥减施稻麦轮作体系下麦季收获期土壤，宜兴试验田土壤 Citrate-P、HCl-P 和 Enzyme-P 含量均与有效磷含量呈极显著正相关（$P<0.01$），常熟试验田土壤 Citrate-P、HCl-P 含量与有效磷含量呈显著正相关（$P<0.05$）。相关系数差异表明两地土壤磷素有效性及有效磷来源不同[23]，就宜兴试验田而言，除有机酸活化和氢质子活化的无机磷库外，酶矿化的有机磷同样也有重要贡献。JALALI 等[24]分析各种土壤磷素提取方法与 5 种不同质地的 57 个钙质土壤吸附参数之间的关系，同样发现 BBP 体系中 Pi（$CaCl_2$-P、Citrate-P 和 HCl-P）含量与有效磷含量呈显著正相关。4 种土壤磷组分含量差异取决于不同提取机制与能力的差异，土壤 Pi（$CaCl_2$-P、Citrate-P 和 HCl-P）含量由于铁离子的化学过程[25]而显著高于 Po（Enzyme-P）含量。另外，提取体系中采用的柠檬酸和盐酸浓度若较高，则更倾向于表征微生物和植物活化磷素的最大潜能，因此提取浓度较高[12]。

3.2　磷肥减施条件下麦季土壤 pH、磷酸酶对磷组分的影响

冗余分析结果表明，pH 和 S-ALP 活性是影响土壤磷素形态和含量的主要因素，而 S-ACP 作用较弱。笔者研究中，不同磷肥处理对 S-ALP 活性没有显著影响，这与以往研究结果相似。TIAN 等[26]关于外源营养物质添加对磷酸酶活性影响的研究表明，在不同土壤中 S-ALP 活性对外源磷肥的响应不同，施肥促进草原土壤 S-ALP 分泌，而抑制荒废农田土壤中 S-ALP 分泌，此现象主要归因于土壤根系作用的差异。

S-ALP 在沉积物的生物释磷过程中具有关键作用，其作为一种可以催化磷酸酯的水解反应和磷酸基团转移反应的专一性磷酸酯水解酶，可促进磷酸酯类有机磷水解成无机磷酸盐化合物；也可作为 Ca、Al 和 Fe 等离子的螯合剂[27]，使部分难溶性磷酸盐溶解，从而提升土壤中可直接被作物吸收利用的活性无机磷含量[28]。笔者试验中关于 S-ALP 对土壤磷素影响的研究结果与以往稻季结果一致，即在 2013 年（第 4 种植年）水稻季收获期同样得到土壤活性无机磷含量与 S-ALP 活性呈正相关关系[4]。此外，WALDRIP 等[29]建立结构方程模型来研究施加有机肥条件下草原土壤 S-ALP 活性与土壤磷组分间的关系，结果表明 S-ALP 活性与 Pi 呈正相关而与 Po 呈负相关。S-ALP 活性与 Po 间关系较复杂，土壤 Po 被 S-ALP 分解后的不同去向（作物吸收或扩散到上覆水等）、土壤磷组分含量差异以及作物的根系作用均对其有直接影响，因此 S-ALP 与土壤磷素（Pi、Po）间的相关关系有待进一步深入研究。

另外，pH 是影响土壤磷素的关键因素，这与 DELUCA 等[12]的研究结果相一致。相关研究表明，酸性土壤中 pH 的增加，一方面使土壤中氢氧化铁/铝含量降低，从而降低土壤对磷素的吸附和沉淀作用[30]，另一方面铁/铝化合物随 pH 增加而水解，从而增加土壤中作物可直接利用磷含量[31]，进而呈现土壤磷组分含量随 pH 增加而升高的现象。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

4 结论

采用土壤磷素生物分级法评价宜兴、常熟两个稻麦轮作区不同磷肥处理下麦季收获期土壤磷素生物有效性。磷肥减施 7 a 后，BBP 分级法中 4 种磷组分含量由大到小均依次为 HCl-P、Citrate-P、Enzyme-P 和 $CaCl_2$-P，无机磷（Citrate-P、HCl-P）含量与有效磷含量呈显著正相关，pH 与 S-ALP 是影响土壤磷组分的关键因素。就宜兴试验田而言，与常规对照（PR+W）相比，稻季不施磷的磷肥减施处理（PW）土壤有效磷含量虽降低，但产量未受影响，而对于常熟试验田 PW 处理土壤磷素供应能力与 PR+W 处理之间则不存在显著差异，因此从土壤磷素生物有效性层面解释了太湖稻麦轮作区稻季减施磷肥方案迄今仍可行的原因。

参考文献:

[1] VU D T, TANG C, ARMSTRONG R D. Changes and Availability of P Fractions Following 65 Years of P Application to a Calcareous Soil in a Mediterranean Climate [J]. Plant and Soil, 2008, 304(1/2): 21-33.

[2] 屈凡柱，于君宝，陈小兵，等. 湿地土壤磷分级方法研究 [J]. 土壤通报，2012，43(1)：243-248. [QU Fan-zhu, YU Jun-bao, CHEN Xiao-bing, *et al*. Review on Soil Phosphorus Fractionation Scheme on Wetlands [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(1): 243-248]

[3] 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*. 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] 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.

[5] WANG Y, ZHAO X, WANG L, *et al*. A Five-Year P Fertilization Pot Trial for Wheat Only in a Rice-Wheat Rotation of Chinese Paddy Soil: Interaction of P Availability and Microorganism [J]. Plant and Soil, 2016, 399(1/2): 305-318.

[6] 孙桂芳，金继运，石元亮. 土壤磷素形态及其生物有效性研究进展 [J]. 中国土壤与肥料，2011(2)：1-9. [SUN Gui-fang, JIN Ji-yun, SHI Yuan-liang. Research Advance on Soil Phosphorous Forms and Their Availability to Crops in Soil [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2011(2): 1-9]

[7] PINGREE M R A, MAKOTO K, DELUCA T H. Interactive Effects of Charcoal and Earthworm Activity Increase Bioavailable Phosphorus in Sub-Boreal Forest Soils [J]. Biology and Fertility of Soils, 2017, 53(8): 873-884.

[8] TIESSEN H, MOIR J O. Characterization of Available P by Sequential Extraction [M] // Soil Sampling and Methods of Analysis. [s. l]: [s. n.], 1993: 5-229.

[9] HEDLEY M J, STEWART J W B, CHAUHAN B S. Changes in Inorganic and Organic Soil Phosphorus Fractions Induced by Cultivation Practices and by Laboratory Incubations [J]. Soil Science Society of America Journal, 1982, 46(5): 970-976.

[10] MCLAREN T I, SMERNIK R J, MCLAUGHLIN M J, *et al*. Complex Forms of Soil Organic Phosphorus: A Major Component of Soil Phosphorus [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(22): 13238-13245.

[11] LIANG X Q, JIN Y, HE M M, *et al*. Composition of Phosphorus Species and Phosphatase Activities in a Paddy Soil Treated With Manure at Varying Rates [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2017, 237: 173-180.

[12] DELUCA T H, GLANVILLE H C, HARRIS M, *et al*. A Novel Biologically-Based Approach to Evaluating Soil Phosphorus Availability Across Complex Landscapes [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 88: 110-119.

[13] GAO S, HOFFMAN-KRULL K, BIDWELL A L, *et al*. Locally Produced Wood Biochar Increases Nutrient Retention and Availability in Agricultural Soils of the San Juan Islands, USA [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2016, 233: 43-54.

[14] ZHONG H T, KIM Y N, SMITH C, *et al*. Seabird Guano and Phosphorus Fractionation in a Rhizosphere With Earthworms [J]. Applied Soil Ecology, 2017, 120: 197-205.

[15] KUANG W, WU T T, ZHANG Y H, *et al*. Effect of Flooding and Air-Drying on Nutrition Content of Soil in WLFZ of Chaohu Lake [J]. Agricultural Science & Technology, 2015, 16(8): 1751-1756.

[16] 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: United States Department of Agriculture, 1954.

[17] 劳家柽. 土壤农化分析手册 [M]. 北京：农业出版社，1988：234-323. [LAO Jia-cheng. Agrochemical Soil Analysis Handbook [M]. Beijing: Agriculture Press, 1988: 234-323]

[18] 蔡观，胡亚军，王婷婷，等. 基于生物有效性的农田土壤磷素组分特征及其影响因素分析 [J]. 环境科学，2017，38(4)：1606-1612. [CAI Guan, HU Ya-jun, WANG Ting-ting, *et al*. Characteristic and Influence of Biologically-Based Phosphorus Fractions in the Farmland Soil [J]. Environmental Science, 2017, 38(4): 1606-1612]

[19] MURPHY J, RILEY J P. A Modified Single Solution Method for the Determination of Phosphate in Natural Waters [J]. Analytica Chimica Acta, 1962, 27: 31-36.

[20] WEI L L, CHEN C R, XU Z H. The Effect of Low-Molecular-Weight Organic Acids and Inorganic Phosphorus Concentration on the Determination of Soil Phosphorus by the Molybdenum Blue Reaction [J]. Biology and Fertility of Soils, 2009, 45(7): 775-779.

[21] BOSCHETTI N G, QUINTERO C E, GIUFFRE L. Phosphorus Fractions of Soils Under *Lotus corniculatus* as Affected by Different Phosphorus Fertilizers [J]. Biology and Fertility of Soils, 2009, 45(4): 379-384.

[22] ZHANG X, LI Z W, ZENG G M, *et al*. Erosion Effects on Soil Prop-

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

erties of the Unique Red Soil Hilly Region of the Economic Development Zone in Southern China [J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 67(6): 1725-1734.

[23] PIZZEGHELLO D, BERTI A, NARDI S, *et al*. Phosphorus Forms and P-Sorption Properties in Three Alkaline Soils After Long-Term Mineral and Manure Applications in North-Eastern Italy [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011, 141(1/2): 58-66.

[24] JALALI M, JALALI M. Relation Between Various Soil Phosphorus Extraction Methods and Sorption Parameters in Calcareous Soils With Different Texture [J]. Science of the Total Environment, 2016, 566/567: 1080-1093.

[25] MCLAUGHLIN M J, MCBEATH T M, SMERNIK R, *et al*. The Chemical Nature of P Accumulation in Agricultural Soils-Implications for Fertiliser Management and Design: An Australian Perspective [J]. Plant and Soil, 2011, 349(1/2): 69-87.

[26] TIAN J H, WEI K, CONDRON L M, *et al*. Impact of Land Use and Nutrient Addition on Phosphatase Activities and Their Relationships With Organic Phosphorus Turnover in Semi-Arid Grassland Soils [J]. Biology and Fertility of Soils, 2016, 52(5): 675-683.

[27] 孟会生，洪坚平，吴文丽，等. 配施解磷菌肥对采煤塌陷区复垦土壤磷有效性的影响 [J]. 生态与农村环境学报，2017，33(4)：357-363. [MENG Hui-sheng, HONG Jian-ping, WU Wen-li, *et al*. Effect of Amendment of Biomanure of Phosphate-Solubilizing Bacteria on Soil Phosphorus Availability in Reclaimed Farmland in Coal Mining Subsidence Area [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2017, 33(4): 357-363.]

[28] NASH D M, HAYGARTH P M, TURNER B L, *et al*. Using Organic Phosphorus to Sustain Pasture Productivity: A Perspective [J]. Geoderma, 2014, 221/222: 11-19.

[29] WALDRIP H M, HE Z, ERICH M S. Effects of Poultry Manure Amendment on Phosphorus Uptake by Ryegrass, Soil Phosphorus Fractions and Phosphatase Activity [J]. Biology and Fertility of Soils, 2011, 47(4): 407-418.

[30] HAYNES R J. Effects of Liming on Phosphate Availability in Acid Soils [J]. Plant and Soil, 1982, 68(3): 289-308.

[31] GUSTAFSSON J P, MWAMILA L B, KÉVIN K. The pH Dependence of Phosphate Sorption and Desorption in Swedish Agricultural Soils [J]. Geoderma, 2012, 189/190: 304-311.

作者简介：袁佳慧（1993—），女，山东梁山人，硕士生，主要从事农田磷循环和面源污染控制方面的研究。 E-mail: 1310164277@qq.com

（责任编辑：李祥敏）

欢迎订阅 2019 年《生态与农村环境学报》

《生态与农村环境学报》系环境保护部主管、环境保护部南京环境科学研究所主办的全国性学术期刊，是《中文核心期刊要目总览》入编期刊、中国科学引文数据库（CSCD）核心期刊、中国学术期刊评价研究报告（RCCSE）核心期刊、中国科技论文统计源期刊（中国科技核心期刊），被中国科技论文与引文数据库（CSTPCD）、中文社会科学引文索引（CSSCI）、中国学术期刊综合评价数据库（CAJCED）、中国期刊全文数据库（CJFD）、中国核心期刊（遴选）数据库、CA、CABI、BA、BP、BD、UPD、GeoBase、ZR、EM、Scopus、AGRIS、中国农业文摘、中国生物学文摘、中国学术期刊文摘、地球与环境科学信息网（EES）等国内外重要刊库网收录。系全国优秀环境科技期刊，江苏省优秀期刊，中国期刊协会赠建全国百家期刊阅览室指定赠送期刊。

本刊宗旨：及时报道生态与农村环境保护领域创新性研究成果等。

主要栏目：研究报告、研究简报、研究方法、专论与综述、学术讨论与建议等。

主要内容：（1）区域环境与发展，包括生态环境变化与全球环境影响、区域生态环境风险评价、环境规划与管理、区域生态经济与生态安全等；（2）自然保护与生态，包括自然资源保护与利用，生物多样性与外来物种入侵，转基因生物环境安全与监控，生态保护、生态工程与生态修复、有机农业与农业生态、气候变化与生态响应等；（3）污染控制与修复，包括污染控制原理与技术、土壤污染与修复、水环境污染与修复、大气污染防控、农业废物综合利用与资源化、农用化学品风险评价与监控、化学品环境与健康等。

主要读者对象：从事生态学、环境科学、农学、林学、地学、资源科学等研究、教学、生产的科技人员，相关专业的高等院校师生以及各级决策与管理人员。

本刊为月刊，每月 25 日出版，A4 开本，每期 136 页，每期定价 30.00 元，全年定价 360.00 元，公开发行，国内邮发代号 28-114，全国各地邮局均可订阅；国外由中国国际图书贸易总公司（北京 399 信箱）负责发行，国外发行代号 Q5688。如漏订，可向本刊编辑部补订。编辑部地址：江苏省南京市蒋王庙街 8 号；邮政编码：210042；电话：（025）85287092，85287601，85287036，85287052，85287053；网址：http://www.ere.ac.cn；E-mail：ere@vip.163.com，bjb@nies.org。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net