

DOI:10.11766/trxb202205230266

曹华, 李欢, 樊慧琳, 牛犇, 王艳玲. 外源磷添加会增加不同年限稻田磷素生物有效性[J]. 土壤学报, 2023,

CAO Hua, LI Huan, FAN Huilin, NIU Ben, WANG Yanling. Exogenous Phosphorus Addition Can Increase Phosphorus Bioavailability in Paddy Soil of Different Cultivated Years[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023,

## 外源磷添加会增加不同年限稻田磷素生物有效性\*

曹华<sup>1</sup>, 李欢<sup>2</sup>, 樊慧琳<sup>2</sup>, 牛犇<sup>1</sup>, 王艳玲<sup>2†</sup>

(1. 南京信息工程大学长望学院, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044)

**摘要:** 为明确不同数量外源磷添加对稻田磷生物有效性组分的影响, 以江西鹰潭孙家小流域内新稻田(NP, 2 ~ 3 a)、中期稻田(MP, 20 ~ 30 a)和老稻田(OP, 400 ~ 500 a)为研究对象, 基于不同浓度外源磷[0 (CK)、125 (P1)、250 (P2)、500 (P3)、625 (P4)、750 (P5) mg·kg<sup>-1</sup> (以 P 计)]添加的淹水培养实验(0 ~ 80 d), 采用模拟生物活化的磷素分级方法(BBP 法), 分析了淹水条件下外源磷添加后稻田 BBP 组分磷的增量( $\Delta$ )动态变化, 探讨了各组分磷增量的相关关系及影响因素。结果表明: 淹水条件下, 稻田有效磷(Bray-P)及 BBP 组分磷增量随磷添加量的增加而显著增加。BBP 组分磷增量由小到大依次为: 氯化钙磷增量( $\Delta$ Ca-P)、酶提取磷增量( $\Delta$ En-P)、柠檬酸磷增量( $\Delta$ Ci-P)、盐酸磷( $\Delta$ Hc-P)。培养 15 天时, 新稻田 $\Delta$ Ca-P 与 $\Delta$ Ci-P 达到最大值; 培养 60 天时, 中期稻田 $\Delta$ Ca-P、 $\Delta$ En-P、 $\Delta$ Hc-P 及 $\Delta$ Bray-P 达到最大值; 而老稻田中各组分磷随时间变化不明显。通径分析表明: 外源添加磷对新稻田和老稻田 $\Delta$ Bray-P 有显著直接正效应。外源磷添加虽能显著增加稻田磷素生物组分有效性, 但其增量最大值的出现时段不同, 新稻田与中期稻田中生物有效磷增量最大值分别出现在磷添加后的第 15 天与 60 天, 因此, 适时适量地施用磷肥对稻田磷素肥力提升与稻田磷素流失风险管控具有重要意义。

**关键词:** 稻田; 磷素分级法(BBP); 磷生物有效性; 磷添加; 通径分析

中图分类号: S154.4 文献标志码: A

## Exogenous Phosphorus Addition Can Increase Phosphorus Bioavailability in Paddy Soil of Different Cultivated Years

CAO Hua<sup>1</sup>, LI Huan<sup>2</sup>, FAN Huilin<sup>2</sup>, NIU Ben<sup>1</sup>, WANG Yanling<sup>2†</sup>

(1. Changwang School of Honors, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** 【Objective】 Phosphorus is an essential nutrient element that affects crop growth, yield enhancement and quality improvement. Due to the application of a large amount of phosphate fertilizer and the lack of scientific management, the utilization rate of phosphate fertilizer is low and the environmental risk increases. Thus, it is important to know the effects of different amounts of exogenous phosphorus (P) addition on P bioavailability components in paddy soil under flooding conditions. 【Method】 Three soil samples were collected from the new paddy field (NP, 2-3 years), medium-term paddy field (MP, 20-30 years) and old paddy field (OP, 400-500 years) in Sunjia small watershed of Yingtan, Jiangxi Province. Based on the flooding culture experiment (0-80 days) with different concentrations of exogenous P addition [0 (CK), 125 (P1), 250 (P2), 500 (P3), 625 (P4), 750 (P5) mg·kg<sup>-1</sup>], the test for simulating the bioactivation process of biologically based P

\*国家自然科学基金项目(42077087)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42077087)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: ylwang@nuist.edu.cn

作者简介: 曹华 (2000—), 男, 湖北黄冈人, 硕士研究生, 主要研究领域: 土壤磷素的环境行为。E-mail: 1872655854@qq.com

收稿日期: 2022-05-23; 收到修改稿日期: 2022-10-09; 网络首发日期 (www.cnki.net):

(BBP method) was adopted. The dynamic changes in the increment ( $\Delta$ ) of soluble P (Ca-P), easily activated and released P (Ci-P), easily mineralizable acid phosphatase (En-P), and the potential inorganic P (HC-P) were analyzed, and the correlation between all P components and influencing factors were evaluated. 【Result】 The results showed that under flooding conditions, exogenous P addition could significantly increase the available P (Bray-P) and BBP components such as Ca-P, En-P, Ci-P and HC-P in paddy soil, and the increment of P contents of each component increased significantly with an extension of P addition. The increment of BBP components was changed by the order:  $\Delta\text{Ca-P} < \Delta\text{En-P} < \Delta\text{Ci-P} < \Delta\text{HC-P}$ . On day 15 of incubation, the  $\Delta\text{Ca-P}$  and  $\Delta\text{Ci-P}$  in the new paddy field reached a maximum value while on day 60, the  $\Delta\text{Ca-P}$ ,  $\Delta\text{En-P}$ ,  $\Delta\text{HC-P}$  and  $\Delta\text{Bray-P}$  in the medium-term paddy field reached their maximum value. However, the P content of each component did not change significantly in the old paddy field. The ratio of  $\Delta\text{Bray-P}$  to  $\Delta\text{TP}$  ( $\Delta\text{Bray-P}/\Delta\text{TP}$ ) in paddy soil after exogenous P addition showed the same trend as that of  $\Delta\text{Bray-P}$ , but there was no significant difference among different P additions. Path analysis showed that exogenous P addition had a significant direct positive effect on  $\Delta\text{Bray-P}$  in new and old paddy soil;  $\Delta\text{Ci-P}$  had a significant direct positive effect on  $\Delta\text{Bray-P}$  in new paddy field;  $\Delta\text{HC-P}$  and  $\Delta\text{Ca-P}$  had a significant direct positive effect on  $\Delta\text{Bray-P}$  in medium-term paddy field, and  $\Delta\text{En-P}$  had a significant direct positive effect on  $\Delta\text{Bray-P}$  in old paddy field. 【Conclusion】 Although exogenous P addition can significantly increase the components of the bioavailability of P in paddy soil, the emergence stage of the maximum increment bioavailability of P in paddy soil is different. Therefore, it is of great significance to timely and appropriately apply P fertilizers for the improvement of P fertility and the risk control of P loss in paddy fields.

**Key words:** Paddy soil; Biological-P fractionation; Phosphorus bioavailability; Phosphorus addition; Path analysis

磷是影响作物生长发育、产量提高和品质改善的重要养分元素<sup>[1]</sup>。世界对粮食和燃料迫切需求促使大量的外源磷持续进入并大量遗存于农业系统中,进而导致土壤遗存磷数量及流失风险日益加剧<sup>[2]</sup>。土壤遗存磷的有效再利用是提高磷肥利用率的重要方面,而土壤遗存磷向植物根系释放与供应磷的数量和有效性是其中的重要部分,它受土壤 pH、氧化还原电位、水分、微生物、有机酸、磷酸酶和质子等因素的共同影响<sup>[3-4]</sup>。为此, DeLuca 等<sup>[5]</sup>对已有的各种磷分级方法进行优化,根据土壤遗存磷被利用的难易程度,创建了基于生物有效性磷素分级方法(biologically based phosphorus, BBP 法),将土壤磷素分为氯化钙溶液提取的可溶性磷(Ca-P)、酶溶液提取的易被酸性磷酸酶和植酸酶矿化的有机磷(En-P)、柠檬酸溶液提取的易被有机酸活化释放的磷(Ci-P)和盐酸提取的潜在无机磷(HC-P)等 4 个组分,分别模拟植物根际或微生物的根截获、有机酸螯合、酶水解和质子活化这 4 种磷素捕获吸收机制。该方法能够更加客观地反映土壤根际过程,更好地评估土壤中各种磷形态的生物有效性<sup>[6]</sup>。蔡观等<sup>[6]</sup>运用该方法研究发现旱地有效磷主要来自 Ca-P 和 En-P,而水田有效磷主要来源于 Ci-P;袁佳慧<sup>[7]</sup>研究发现太湖稻麦轮作区磷肥减施下稻田土壤生物有效性主要受土壤 pH、碱性磷酸酶活性的影响;黄翊兰等<sup>[8]</sup>研究发现滨海滩涂湿地土壤速效磷主要来源于 Ci-P,且影响土壤 HC-P 含量的主要环境因子是有机质, Ci-P 含量主要受含水率影响;刘玉槐等<sup>[9]</sup>研究发现水稻根际土壤中磷酸酶活性受 Ca-P 和 Ci-P 含量影响,而非根际土壤中磷酸酶活性受 En-P 和 HC-P 含量影响;蒋炳伸等<sup>[3]</sup>研究发现双季稻田秸秆还田并配合间歇灌溉或长期淹水均能提高土壤 Ci-P 和 En-P 含量,土壤 Ci-P 对水稻磷吸收起主要贡献;胡怡凡等<sup>[10]</sup>研究发现,不施磷条件下,轮作降低了土壤 Ci-P 和 HC-P 含量,但增加了 En-P 含量,进而提高了土壤中磷的生物有效性。可见, BBP 法已经广泛用于评价不同生态系统中土壤生物有效性磷组分特征,但较少应用此法研究外源磷添加后稻田土壤生物有效性磷组分特征的变化。我国南方土壤利用方式以水田为主,稻田土壤经淹水后,氧化还原电位下降, pH 趋于中性,从而影响土壤磷的生物有效性。

红壤广泛分布于我国南方亚热带及热带地区,是我国重要的粮食生产基地,农业产值高<sup>[11]</sup>。然而,受风化作用与脱硅富铝化作用的双重影响,红壤呈酸性或强酸性,外源磷极易被土壤中铁、铝离子及其化合物吸附固定,进而降低了磷的生物有效性<sup>[12-13]</sup>。土壤中 95%的磷以难溶态存在,无法被作物吸收利用进而导致作物严重“缺磷”。可见,有效评估施磷后稻田磷素的生物有效性是提升红壤磷素肥力、提高土壤遗存磷利用潜能与减少土壤磷流失的前提条件。因此,本研究基于室内培养试验,分析了淹水条

件下不同浓度外源磷添加后稻田 BBP 磷组分及有效磷的增量动态变化,探讨了各组分磷增量对有效磷增量的影响,旨在明确外源磷添加对稻田遗存磷有效性的影响,研究结果将为稻田遗存磷的再利用及土壤磷素高效管理提供数据支持,为提高稻田质量、实现农业可持续健康发展提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 土壤样品的采集与制备

2018年4月水稻种植前,在江西省鹰潭市孙家典型红壤小流域内选择了坡上中期稻田(MP, 20~30 a)、坡中新稻田(NP, 2~3 a)及坡底老稻田(OP, 400~500 a)三处稻田,在每个田块内按“S”形采集耕层(0~15 cm)土壤样品10~15点,混合均匀后带回室内,除去小石块、植物残体以及动物遗体,风干、磨细过筛,保存备用。供试土壤基本理化性质见表1。

表1 供试土壤基本理化性质

Table 1 The basic physical and chemical properties of the tested soil

稻田类型 Paddy field type	种植年限 Cultivated year/a	pH <sub>KCl</sub>	全碳 Total carbon/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total nitrogen/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全磷 Total phosphorus/ (g·kg <sup>-1</sup> )	C/N	有效磷 Bray-P/(mg·kg <sup>-1</sup> )
NP	2~3	3.84a	7.51a	1.22a	0.51a	6.32a	46.67b
MP	20~30	4.02b	11.2b	1.43a	0.59a	8.25b	27.25a
OP	400~500	4.18c	28.4c	3.51b	0.58a	8.23b	44.83b

注: NP, 新稻田; MP, 中期稻田; OP, 老稻田。同列相同字母表示不同土壤之间无显著差异( $P > 0.05$ )。下同。Note: NP, new paddy; MP, Medium-term paddy; OP, old paddy. The same letter in the same column means no significant difference between different soils ( $P > 0.05$ ). The same as below.

### 1.2 培养试验设计

称取过2 mm筛的风干新稻田、中期稻田和老稻田土壤样品100.00 g,各6份,每份重复3次,均匀平铺于250 mL培养瓶底部,用少量去离子水润湿土壤后,采用称重法调节土壤含水量至田间最大持水量的60%,以达到水土充分混合均匀的状态,密封后,置于恒温恒湿培养箱中(25 °C和70%相对湿度)内预培养3天。预培养结束后,分别一次性加入磷浓度为0 (CK)、125 (P1)、250 (P2)、500 (P3)、625 (P4)、750 (P5) mg·L<sup>-1</sup>的磷酸二氢钾(KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)溶液100 mL,充分混匀后,再放回培养箱内培养80天。分别于培养的第5、15、30、60和80天进行破坏性采样,将土壤样品风干、磨细、过筛,用于测定土壤有效磷(Bray-P)及BBP磷组分。

### 1.3 基于生物有效性的磷组分测定

采用DeLuca等<sup>[5]</sup>基于生物有效性磷素分级方法(biologically based phosphorus, BBP法)测定供试土壤BBP磷组分,即称取1.00 g过2 mm筛风干土样,加入20 mL提取液并装入50 mL离心管中,恒温(25 °C)振荡3 h (230 r·min<sup>-1</sup>),离心10 min (5 000 r·min<sup>-1</sup>)后吸取上清液,并采用孔雀石绿比色法测定提取液体中磷的浓度<sup>[14]</sup>。上述提取液分别为0.01 mol·L<sup>-1</sup> CaCl<sub>2</sub>溶液(Ca-P)、0.01 mol·L<sup>-1</sup>柠檬酸溶液(Ci-P)、0.02 EU·mL<sup>-1</sup>酸性磷酸酶和0.02 EU·mL<sup>-1</sup>碱性磷酸酶混合液(En-P)及1 mol·L<sup>-1</sup> HCl溶液(HC-P)。

### 1.4 土壤理化性质测定

土壤pH采用电位法,1 mol·L<sup>-1</sup> KCl溶液浸泡,液土比为2.5:1;有效磷(Bray-P)采用盐酸-氟化铵法测定<sup>[15]</sup>。

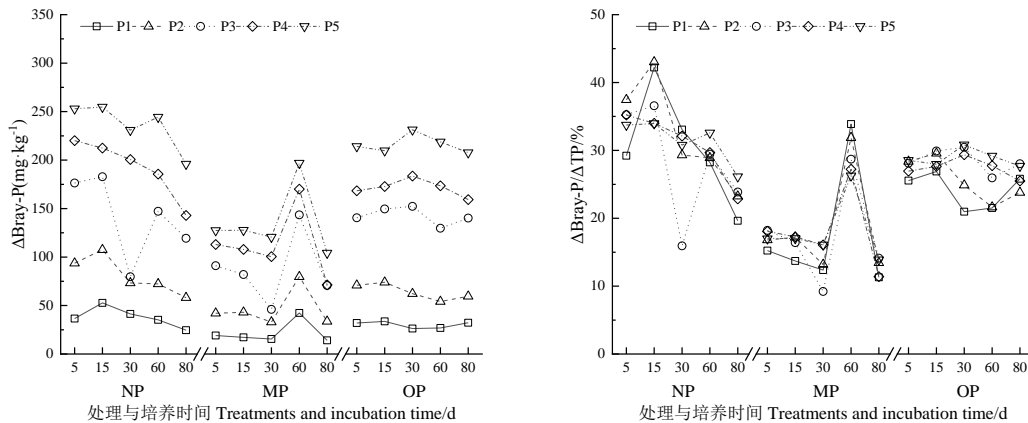
### 1.5 数据处理与分析

采用Microsoft Office Excel 2016软件进行数据整理与分析,使用IBM SPSS Statistics 26软件进行方差分析,采用Origin 2022软件进行绘图。

## 2 结果

### 2.1 不同水平外源磷添加下稻田有效磷增量及 pH

外源磷添加后稻田有效磷增量( $\Delta\text{Bray-P}$ ) 随着磷添加浓度的增加而显著增加。随着培养时间的延长, 新稻田(NP)中 $\Delta\text{Bray-P}$ 呈逐渐增加(0~80 d)的趋势, 而中期稻田(MP)中 $\Delta\text{Bray-P}$ 呈先降低(0~30 d)再升高(30~60 d)后降低(60~80 d)的趋势, 老稻田(OP)中 $\Delta\text{Bray-P}$ 则无显著变化(图 1)。与 CK 相比, 培养 15 天后, NP 中 $\Delta\text{Bray-P}$ 达到最大; 培养 60 天后, MP 中 $\Delta\text{Bray-P}$ 达到最大, 而 OP 中 $\Delta\text{Bray-P}$ 达到最大的时间较为波动(图 1)。外源磷添加量相同时, NP 和 OP 中 $\Delta\text{Bray-P}$ 均显著高于 MP (图 1)。外源磷添加后稻田 $\Delta\text{Bray-P}$ 与添加磷量( $\Delta\text{TP}$ )的比例( $\Delta\text{Bray-P}/\Delta\text{TP}$ )变化大小顺序为: NP > OP > MP, 且与 $\Delta\text{Bray-P}$ 呈相同变化趋势, 但处理间无显著变化(图 1)。

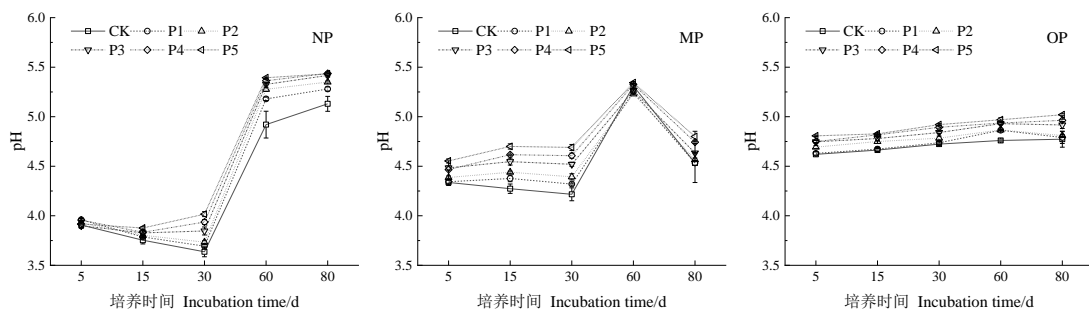


注: NP、MP、OP 分别表示新稻田、中期稻田、老稻田; P1~P5 分别表示五种水平磷添加处理, 分别为 125、250、500、625、750  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。下同。Note: NP, MP, OP represent new paddy, medium-term paddy, old paddy, respectively; P1~P5 represent five levels of phosphorus addition treatments, which are 125, 250, 500, 625, 750  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , respectively. The same as below.

图 1 外源磷添加下稻田有效磷增量( $\Delta\text{Bray-P}$ )及其占添加磷量( $\Delta\text{TP}$ )比例( $\Delta\text{Bray-P}/\Delta\text{TP}$ )的变化

Fig. 1 Changes of Bray-P increment ( $\Delta\text{Bray-P}$ ) and its proportion ( $\Delta\text{Bray-P}/\Delta\text{TP}$ ) to added phosphorus ( $\Delta\text{TP}$ ) in paddy soil with exogenous phosphorus addition

外源磷添加下稻田 pH 随着培养时间的延长, NP 中 pH 呈先降低(0~30 d)再升高(30~60 d)后平稳(60~80 d)的趋势, 而 MP 中 pH 呈先平稳(0~30d)再升高(30~60d)后降低(60~80 d)的趋势, 而 OP 中 pH 呈逐渐升高(0~80 d)的趋势(图 2)。



注: CK 表示不添加磷处理。Note: CK represents treatment without adding phosphorus.

图 2 外源磷添加下稻田 pH 的变化

Fig. 2 Changes of pH in paddy soil with exogenous phosphorus addition

### 2.2 不同水平外源磷添加下稻田生物有效性磷(BBP)组分增量

2.2.1 Ca-P 外源磷添加可显著增加稻田中 Ca-P 增量( $\Delta\text{Ca-P}$ ), 且随着培养时间的延长, NP 中 $\Delta\text{Ca-P}$ 呈先

增加(0 ~ 15 d)再降低(15 ~ 80 d)的趋势, 而 MP 中 $\Delta\text{Ca-P}$  呈先降低(0 ~ 30 d)再增加(30 ~ 60 d)后降低(60 ~ 80 d)的趋势, OP 中 $\Delta\text{Ca-P}$  则无显著变化(图 3)。与 CK 相比, 外源磷添加后 NP 中 $\Delta\text{Ca-P}$  增加了 135.1% ~ 4 430%, 且在培养第 15 天时 NP 中的 $\Delta\text{Ca-P}$  达到了最大值; MP 中 $\Delta\text{Ca-P}$  增加了 36.6% ~ 1 347%(除第 15 天外), 且在培养第 60 天时达到了最大值, 但培养第 15 天时, P1 和 P2 处理下 MP 中的 $\Delta\text{Ca-P}$  无显著变化; OP 中 $\Delta\text{Ca-P}$  则增加了 37.2%~ 1 985%(除 P1 处理外) (图 3)。相同磷添加量下, NP 和 OP 中 $\Delta\text{Ca-P}$  均显著高于 MP, 且随磷添加量降低呈逐渐减少的趋势; 而 $\Delta\text{Ca-P}/\Delta\text{TP}$  的大小顺序表现为: NP > OP > MP, 且与 $\Delta\text{Ca-P}$  呈相同变化趋势, 但 MP 和 OP 中不同磷添加处理间 $\Delta\text{Ca-P}/\Delta\text{TP}$  的变化差异不明显, 而且在培养第 15 天时, NP 中 P3、P4 和 P5 处理下的 $\Delta\text{Ca-P}/\Delta\text{TP}$  显著高于 CK 和 P1 处理(图 3)。

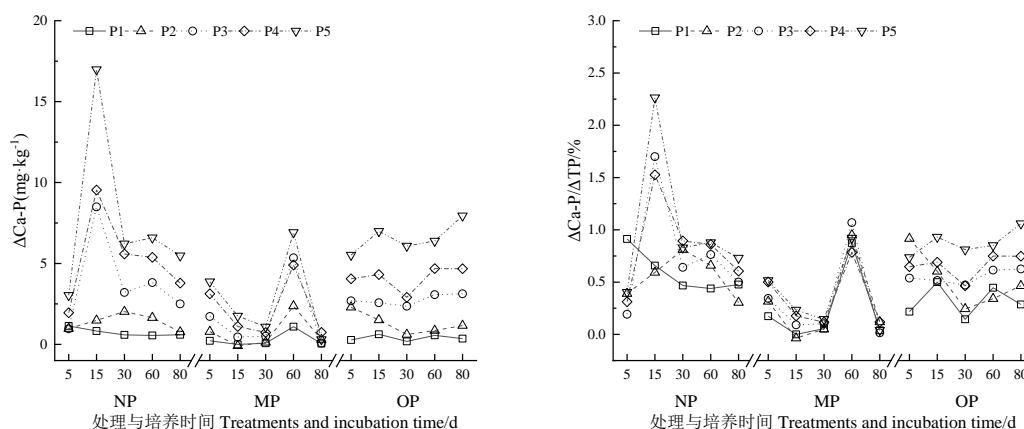


图 3 外源磷添加下稻田氯化钙磷增量( $\Delta\text{Ca-P}$ )及其占添加磷量( $\Delta\text{TP}$ )比例( $\Delta\text{Ca-P}/\Delta\text{TP}$ )的变化

Fig. 3 Changes of Ca-P increment ( $\Delta\text{Ca-P}$ ) and its proportion ( $\Delta\text{Ca-P}/\Delta\text{TP}$ ) to added phosphorus ( $\Delta\text{TP}$ ) in paddy soil under exogenous phosphorus addition

**2.2.2 En-P** 外源磷添加后, NP 中 $\Delta\text{En-P}$  呈先降低(0 ~ 30 d)再增加(30 ~ 80 d)的趋势, 而 MP 中 $\Delta\text{En-P}$  呈先降低(0 ~ 15 d)再增加(15 ~ 60 d)后降低(60 ~ 80 d)的趋势, OP 中 $\Delta\text{En-P}$  呈先平稳(0 ~ 15 d)再增加(15 ~ 30 d)后降低(30 ~ 80 d)的趋势(图 4)。与 CK 处理相比, 外源磷添加后 NP、MP 及 OP 中 $\Delta\text{En-P}$  分别增加了 54.6% ~ 3 526%、26.3% ~ 417.9%(第 80 天除外, 且在培养第 60 天时达到了最高值)及 40.3% ~ 540.7%(其中在培养第 30 天时 OP 中的 $\Delta\text{En-P}$  达到了最高值) (图 4)。相同磷添加量下, NP 中 $\Delta\text{En-P}$  均显著高于 MP 和 OP, 且磷添加量降低呈逐渐减少的趋势; 而 $\Delta\text{En-P}/\Delta\text{TP}$  的大小顺序表现为: NP > MP > OP, 且随培养时间的延长与 $\Delta\text{En-P}$  呈相同变化趋势, 但处理间无明显变化(图 4)。

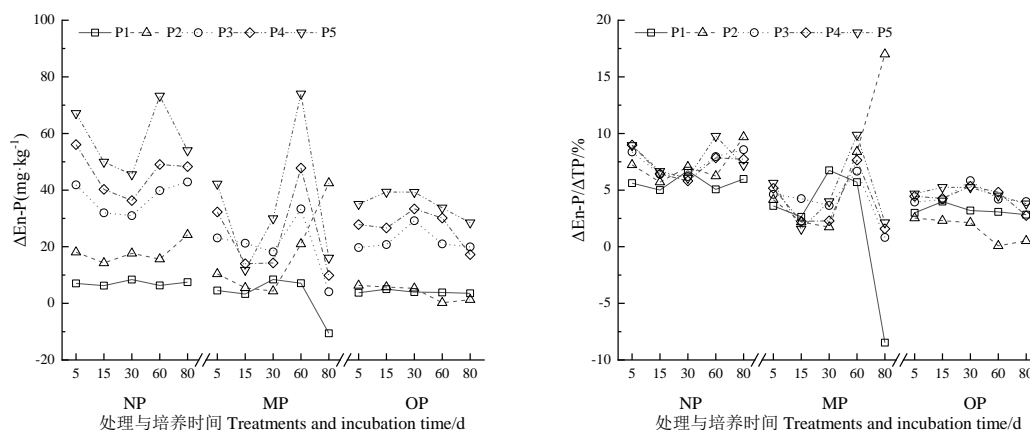


图 4 外源磷添加对稻田酶提取磷增量( $\Delta\text{En-P}$ )及其占磷添加量( $\Delta\text{TP}$ )比例( $\Delta\text{En-P}/\Delta\text{TP}$ )的变化

Fig. 4 Changes of En-P increment ( $\Delta\text{En-P}$ ) and its proportion ( $\Delta\text{En-P}/\Delta\text{TP}$ ) to added phosphorus ( $\Delta\text{TP}$ ) in paddy soil with exogenous phosphorus addition

**2.2.3 Ci-P** 外源磷添加后, NP 和 OP 中 $\Delta\text{Ci-P}$  呈先增加(0 ~ 15 d)再降低(15 ~ 30 d)后增加(30 ~ 80 d)的趋

势, 而 MP 中  $\Delta\text{Ci-P}$  呈先增加(0 ~ 15 d)再降低(15 ~ 30 d)后增加(30 ~ 60 d)最后降低(60 ~ 80 d)的趋势(图 5)。与 CK 处理相比, 外源磷添加后 NP、MP 及 OP 中  $\Delta\text{Ci-P}$  均显著增加, 其中, 培养第 15 天时 NP、MP 和 OP 中的  $\Delta\text{Ci-P}$  均达到了最大值(图 5)。相同磷添加量下, NP 和 OP 中  $\Delta\text{Ci-P}$  均显著高于 MP, 且随磷添加量降低呈逐渐减少的趋势, 而  $\Delta\text{Ci-P}/\Delta\text{ATP}$  的大小顺序表现为:  $\text{OP} > \text{NP} > \text{MP}$ , 且随着培养时间的延长与  $\Delta\text{Ci-P}$  呈相同变化趋势, 但各处理间无显著变化(图 5)。

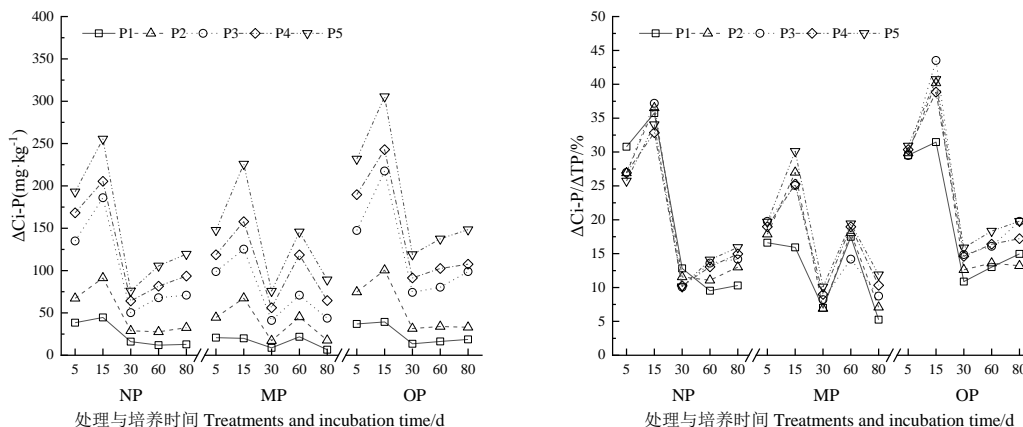


图 5 外源磷添加对稻田柠檬酸磷增量( $\Delta\text{Ci-P}$ )及其占磷添加量( $\Delta\text{ATP}$ )比例( $\Delta\text{Ci-P}/\Delta\text{ATP}$ )的变化

Fig. 5 Changes of Ci-P increment ( $\Delta\text{Ci-P}$ ) and its proportion ( $\Delta\text{Ci-P}/\Delta\text{ATP}$ ) to added phosphorus ( $\Delta\text{ATP}$ ) in paddy soil with exogenous phosphorus addition

**2.2.4 HC-P** 外源磷添加后, NP 中  $\Delta\text{HC-P}$  呈先增加(0 ~ 60 d)后平稳(60 ~ 80 d)的趋势, 而 MP 中  $\Delta\text{HC-P}$  呈先增加(0 ~ 15 d)再降低(15 ~ 30 d)后增加(30 ~ 60 d)最后降低(60 ~ 80 d)的趋势, OP 中  $\Delta\text{HC-P}$  呈先增加(0 ~ 15 d)再降低(15 ~ 30 d)后增加(30 ~ 60 d)最后平稳(60 ~ 80 d)的趋势(图 6)。与 CK 处理相比, 外源磷添加后 NP、MP 及 OP 中  $\Delta\text{HC-P}$  均显著增加, 其中, 培养 60 天时 MP 中的  $\Delta\text{HC-P}$  达到最大值(图 6)。相同磷添加处理下, MP 和 OP 中  $\Delta\text{HC-P}$  均显著高于 NP, 且随磷添加量增加呈逐渐增加的趋势,  $\Delta\text{HC-P}/\Delta\text{ATP}$  的大小顺序表现为:  $\text{MP} > \text{OP} > \text{NP}$ ; 且随着培养时间的延长与  $\Delta\text{HC-P}$  呈相同变化趋势, 但处理间无显著差异(图 6)。

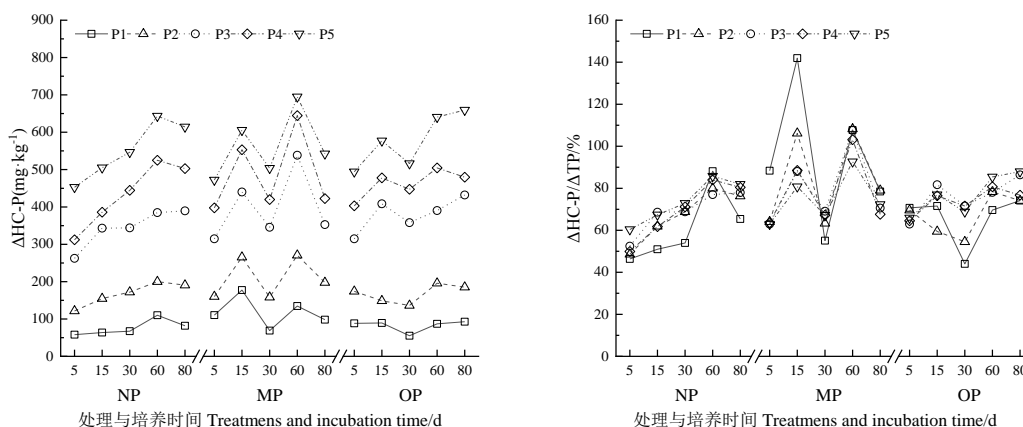


图 6 外源磷添加下稻田盐酸磷增量( $\Delta\text{HC-P}$ )及其占磷添加量( $\Delta\text{ATP}$ )比例( $\Delta\text{HC-P}/\Delta\text{ATP}$ )的变化

Fig. 6 Changes of HC-P increment ( $\Delta\text{HC-P}$ ) and its proportion ( $\Delta\text{HC-P}/\Delta\text{ATP}$ ) to added phosphorus ( $\Delta\text{ATP}$ ) in paddy soil with exogenous phosphorus addition

### 2.3 稻田生物有效性磷组分增量与 $\Delta\text{pH}$ 的关系

由表 2 可以看出, 外源磷添加后 NP 中  $\Delta\text{Ca-P}$ 、 $\Delta\text{En-P}$ 、 $\Delta\text{Ci-P}$  和  $\Delta\text{HC-P}$  与  $\Delta\text{Bray-P}$  均呈极显著正相关关系( $P < 0.01$ );  $\Delta\text{HC-P}$  与  $\Delta\text{pH}$  呈极显著正相关( $P < 0.01$ ), 而  $\Delta\text{Ca-P}$ 、 $\Delta\text{En-P}$ 、 $\Delta\text{Ci-P}$  和  $\Delta\text{Bray-P}$  与  $\Delta\text{pH}$  无显著相关关系(表 2)。MP 中  $\Delta\text{Ca-P}$ 、 $\Delta\text{En-P}$ 、 $\Delta\text{Ci-P}$  和  $\Delta\text{HC-P}$  与  $\Delta\text{Bray-P}$  均呈极显著正相关关系( $P <$

0.01);  $\Delta\text{Ci-P}$  和  $\Delta\text{HC-P}$  与  $\Delta\text{pH}$  呈显著正相关关系( $P < 0.01$ ), 而  $\Delta\text{Ca-P}$ 、 $\Delta\text{En-P}$  和  $\Delta\text{Bray-P}$  均与  $\Delta\text{pH}$  无显著相关关系(表 2)。OP 中  $\Delta\text{Ca-P}$ 、 $\Delta\text{En-P}$ 、 $\Delta\text{Ci-P}$  和  $\Delta\text{HC-P}$  与  $\Delta\text{Bray-P}$  均呈极显著正相关关系( $P < 0.01$ );  $\Delta\text{Ca-P}$ 、 $\Delta\text{En-P}$ 、 $\Delta\text{Ci-P}$ 、 $\Delta\text{HC-P}$  和  $\Delta\text{Bray-P}$  与  $\Delta\text{pH}$  均呈极显著正相关关系( $P < 0.01$ ) (表 2)。

表 2 稻田生物有效性磷组分增量与  $\Delta\text{pH}$  的相关性

Table 2 Correlation between the increment of bioavailable phosphorus components and  $\Delta\text{pH}$  in paddy soil

土壤类型 Soil type	指标 Index	$\Delta\text{Ca-P}$	$\Delta\text{En-P}$	$\Delta\text{Ci-P}$	$\Delta\text{HC-P}$	$\Delta\text{Bray-P}$	$\Delta\text{pH}$
NP	$\Delta\text{Ca-P}$	1.000	0.519**	0.740**	0.653**	0.700**	0.174
	$\Delta\text{En-P}$		1.000	0.664**	0.906**	0.900**	0.347
	$\Delta\text{Ci-P}$			1.000	0.541**	0.817**	-0.259
	$\Delta\text{HC-P}$				1.000	0.848**	0.581**
	$\Delta\text{Bray-P}$					1.000	0.186
	$\Delta\text{pH}$						1.000
MP	$\Delta\text{Ca-P}$	1.000	0.826**	0.516**	0.650**	0.837**	-0.265
	$\Delta\text{En-P}$		1.000	0.469*	0.639**	0.769**	-0.079
	$\Delta\text{Ci-P}$			1.000	0.820**	0.772**	0.468*
	$\Delta\text{HC-P}$				1.000	0.934**	0.420*
	$\Delta\text{Bray-P}$					1.000	0.206
	$\Delta\text{pH}$						1.000
OP	$\Delta\text{Ca-P}$	1.000	0.864**	0.740**	0.948**	0.926**	0.889**
	$\Delta\text{En-P}$		1.000	0.741**	0.905**	0.963**	0.819**
	$\Delta\text{Ci-P}$			1.000	0.730**	0.766**	0.594**
	$\Delta\text{HC-P}$				1.000	0.966**	0.929**
	$\Delta\text{Bray-P}$					1.000	0.901**
	$\Delta\text{pH}$						1.000

注: \*和\*\*分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著。下同。Note: \* and \*\* denotes significant correlation at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

The same as below.

途径分析结果(表 3) 表明, 培养时间(T)、外源磷添加量( $\Delta\text{TP}$ )和  $\Delta\text{Ci-P}$  对新稻田土壤中  $\Delta\text{Bray-P}$  的直接影响达显著水平, 其中  $\Delta\text{TP}$  的直接途径系数最大(0.750), 且主要通过  $\Delta\text{En-P}$  和  $\Delta\text{Ci-P}$  对其产生间接正向影响;  $\Delta\text{Ci-P}$  对新稻田土壤中  $\Delta\text{Bray-P}$  有直接正向影响; T 对新稻田土壤中  $\Delta\text{Bray-P}$  有直接负向影响(表 3)。  $\Delta\text{HC-P}$  和  $\Delta\text{Ca-P}$  对中期稻田土壤中  $\Delta\text{Bray-P}$  的直接影响达显著水平, 其中  $\Delta\text{HC-P}$  的直接途径系数最大(0.527), 且  $\Delta\text{HC-P}$  主要通过  $\Delta\text{Ca-P}$  对  $\Delta\text{Bray-P}$  有较大的间接正向效应(表 3)。  $\Delta\text{TP}$  和  $\Delta\text{En-P}$  对老稻田土壤中  $\Delta\text{Bray-P}$  的直接影响达显著水平, 其中  $\Delta\text{TP}$  的直接途径系数最大(0.831), 且主要通过  $\Delta\text{En-P}$  对其产生间接正向影响(表 3)。三种种植年限稻田整体的途径分析表明, 种植年限(Y)、外源磷添加量( $\Delta\text{TP}$ )、 $\Delta\text{Ca-P}$  和  $\Delta\text{En-P}$  对稻田土壤中  $\Delta\text{Bray-P}$  的直接影响达极显著水平, 且对稻田土壤中  $\Delta\text{Bray-P}$  均有直接正向影响, 其中  $\Delta\text{TP}$  的直接途径系数最大(0.558)。

表 3 稻田有效磷增量( $\Delta\text{Bray-P}$ )与生物有效性磷组分增量和  $\Delta\text{pH}$  之间的途径系数

Table 3 Path coefficient between  $\Delta\text{Bray-P}$  and the increment of bioavailable phosphorus components and  $\Delta\text{pH}$  in paddy soil

稻田 Paddy field	指标 Index	直接途径系数 Direct path coefficient	间接途径系数 Indirect path coefficient						
			T	$\Delta\text{TP}$	$\Delta\text{Ca-P}$	$\Delta\text{En-P}$	$\Delta\text{Ci-P}$	$\Delta\text{HC-P}$	$\Delta\text{pH}$
NP	T	-0.170*	0.000	0.000	0.006	0.006	-0.146	-0.051	0.174
	$\Delta\text{TP}$	0.750*	0.000	0.000	-0.032	0.101	0.243	-0.205	0.086
	$\Delta\text{Ca-P}$	-0.047	0.021	0.506	0.000	0.056	0.255	-0.140	0.042
	$\Delta\text{En-P}$	0.107	-0.010	0.710	-0.024	0.000	0.228	-0.195	0.083
	$\Delta\text{Ci-P}$	0.344*	0.072	0.530	-0.035	0.071	0.000	-0.116	0.062
	$\Delta\text{HC-P}$	-0.215	-0.040	0.716	-0.031	0.097	0.186	0.000	0.139
	$\Delta\text{pH}$	0.240*	-0.123	0.270	-0.008	0.037	-0.089	0.139	0.000
MP	T	-0.015	0.000	0.000	0.022	0.000	-0.002	0.046	0.004
	$\Delta\text{TP}$	0.244	0.000	0.000	0.140	0.001	0.005	0.484	-0.007
	$\Delta\text{Ca-P}$	0.286**	-0.001	0.119	0.000	0.001	0.004	0.343	0.003
	$\Delta\text{En-P}$	0.001	-0.001	0.135	0.236	0.000	0.003	0.337	0.001

	ΔCi-P	0.007	0.004	0.192	0.148	0.000	0.000	0.432	-0.005
	ΔHC-P	0.527**	-0.001	0.224	0.186	0.001	0.006	0.000	-0.005
	ΔpH	-0.011	0.005	0.149	-0.076	0.000	0.003	0.221	0.000
OP	T	-0.034	0.000	0.000	-0.001	-0.021	0.012	0.012	0.000
	ΔTP	0.831**	0.000	0.000	-0.010	0.140	-0.025	0.086	-0.001
	ΔCa-P	-0.011	-0.002	0.778	0.000	0.128	-0.024	0.083	-0.001
	ΔEn-P	0.148*	0.005	0.785	-0.010	0.000	-0.024	0.080	-0.001
	ΔCi-P	-0.032	0.013	0.640	-0.008	0.110	0.000	0.064	-0.001
	ΔHC-P	0.088	-0.005	0.812	-0.010	0.134	-0.023	0.000	-0.001
	ΔpH	-0.001	-0.007	0.763	-0.010	0.121	-0.019	0.082	0.000
稻田 Paddy field	Y	0.095**	0.000	0.000	0.010	-0.071	0.014	0.000	0.002
	T	-0.018	0.000	0.000	-0.003	0.005	-0.030	-0.024	-0.002
	ΔTP	0.558**	0.000	0.000	0.124	0.239	0.060	-0.148	-0.005
	ΔCa-P	0.195**	0.000	0.356	0.000	0.212	0.054	-0.099	-0.002
	ΔEn-P	0.323**	0.000	0.413	0.128	0.000	0.045	-0.111	-0.003
	ΔCi-P	0.082	0.006	0.408	0.128	0.175	0.000	-0.103	-0.001
	ΔHC-P	-0.156	-0.003	0.508	0.124	0.230	0.054	0.000	-0.005
	ΔpH	-0.010	-0.003	0.294	0.032	0.091	0.012	-0.082	0.000

注: T为培养时间; Y为种植年限。Note: T represents incubation time; Y represents cultivated year.

### 3 讨论

传统的磷素分级方法偏重于磷化合物的不同形态<sup>[16-17]</sup>, 而模拟生物活化过程的磷素分析方法, 即BBP法则可模拟植物根系和微生物对土壤磷素的矿化利用, 能够客观地评价土壤不同形态磷的生物有效性<sup>[5-7]</sup>。稻田淹水后形成的厌氧还原条件对稻田土壤理化性质及土壤磷素迁移转化影响较大<sup>[18-20]</sup>。淹水培养后, 新稻田、中期稻田及老稻田 pH 均有明显的波动, 但 pH 均逐渐接近中性(图 2), 这与以往研究结果<sup>[21-22]</sup>相一致。

淹水条件下, 稻田中 BBP 组分增量均随着外源磷添加时间的延长而发生明显的变化(图 3 ~ 图 6), 这与土壤磷的固定与释放过程直接相关<sup>[23]</sup>。磷酸盐在土壤中的固定过程主要包括吸附和沉淀, 磷施入土壤后会迅速与土壤中物质作用生成难溶性磷酸盐或被土壤颗粒吸附在其表面, 这会在很大程度上影响磷的生物有效性<sup>[24]</sup>。Ca-P 是由 0.01 mol·L<sup>-1</sup> CaCl<sub>2</sub> 溶液提取的可溶性磷<sup>[6]</sup>。外源磷添加培养过程中, 新稻田中 ΔCa-P 呈先增加后减少的趋势(图 3), 主要是因为稻田淹水后, 氧化还原电位下降, Fe<sup>3+</sup>被还原, 而生成的磷酸亚铁溶解度较高, 使 ΔCa-P 得以提高<sup>[23]</sup>, 同时氧化铁胶膜被大量破坏, 闭蓄态磷的有效性也被提高<sup>[25]</sup>; 但随着培养时间的延长, 可溶性磷因逐渐被土壤颗粒吸附固定而数量又减少。中期稻田中 ΔCa-P 则呈现出先缓慢减少再明显增加最后显著减少的趋势(图 3)。铁铝氧化物含量丰富的稻田多呈酸性, 外源磷的固定主要由铁、铝体系所控制<sup>[25]</sup>, 尤其是稻田中大量存在的无定形铁铝的氧化物或水合物是外源磷主要的吸附固定基质<sup>[26-27]</sup>。此外, 淹水后稻田 pH 发生显著变化, pH 的改变会引起土壤中可变电荷的变化, 进而影响了土壤胶体表面磷酸根与吸附点位的关系<sup>[24]</sup>。酸性土壤淹水后, 土壤磷的生物有效性提高主要是由土壤 pH 变化引起的, 可见, 外源磷添加后中期稻田中 ΔCa-P 变化主要与土壤对磷的吸附及 pH 的变化有关。外源磷添加至 60 天时, 中期稻田中 ΔCa-P 达到了最高值, 而此时土壤 pH 也升至最大值; 而后 ΔCa-P 逐渐降低, 而土壤 pH 也呈降低趋势(图 2)。Vadas 等<sup>[28]</sup>认为土壤淹水后其相对较高的 pH 可能会促进无定形铁氧化物的形成, 导致磷吸附能力降低, 这与本研究结果相一致。

En-P 是由 0.02 EU·mL<sup>-1</sup> 酸性磷酸酶和 0.02 EU·mL<sup>-1</sup> 碱性磷酸酶混合提取的易被酸性磷酸酶和植酸酶活化的有机磷<sup>[6]</sup>, 其含量与土壤磷酸酶活性有关, 而磷酸酶的活性主要取决于 pH、水分含量、温度等环



境因子状况。外源磷添加后, 中期稻田中 $\Delta\text{En-P}$  呈先降低后增加再降低的趋势(图 4)。外源磷添加 0 ~ 15 天时, 中期稻田中 $\Delta\text{En-P}$  逐渐减少, 这可能是因为淹水后土壤处于还原条件下, 结晶性差的铁及其氧化物的巨大表面积增强了对外源磷的固定吸附作用<sup>[29]</sup>。而后, 中期稻田中 $\Delta\text{En-P}$  逐渐增加与 pH 上升有直接关系<sup>[30]</sup>。而 Ci-P 大部分来源于吸附态磷或弱束缚于 Al-P、Fe-P 中的无机活性磷<sup>[3]</sup>, 是由  $0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  柠檬酸溶液提取的易被有机酸活化的磷<sup>[6]</sup>。外源磷添加后, 稻田中 $\Delta\text{Ci-P}$  呈先增加再降低后增加的趋势(图 5), 主要原因是培育前期土壤对磷的吸附较弱以及弱束缚于铁铝氧化物或其水合氧化物中的无机活性磷较多; 但随着培养时间延长, 土壤对磷的吸附能力明显加强, 同时部分磷酸盐被溶解度很小的无定形铁铝等胶膜所包蔽成为闭蓄态磷而被土壤固定, 导致 $\Delta\text{Ci-P}$  减少<sup>[31]</sup>。然而, 在磷添加第 60 天时, 中期稻田中 $\Delta\text{Ci-P}$  显著增加, 且与 pH 呈极显著正相关关系(表 2), 因此这与中期稻田 pH 上升有关(图 2)。不同外源磷添加量对于提高土壤生物有效性磷组分的效果也不尽相同。研究表明, 铁铝氧化物对磷吸附的牢固程度及其结合方式受磷酸盐浓度的影响<sup>[32]</sup>。中期稻田中 $\Delta\text{Ci-P}/\Delta\text{TP}$  总体上随着磷添加量的增加而增大(图 5), 这表明外源添加磷转化为 Ci-P 的比例逐渐增加, 可能是因为施磷水平低时, 磷酸盐与铁铝氧化物形成双基配合物而难于解吸, 而施磷水平高时, 磷酸盐与铁铝氧化物形成单基配合物而易于解吸<sup>[32]</sup>。而在外源磷添加 5 天和 30 天时, 新稻田中 $\Delta\text{Ci-P}/\Delta\text{TP}$  随着磷添加量的增加而逐渐降低, 这可能是由于不同磷浓度影响了土壤吸附态磷的解吸<sup>[33]</sup>。

相关性分析结果表明稻田中 HC-P 含量与 $\Delta\text{pH}$  呈显著正相关关系(表 2)。HC-P 是由  $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  盐酸提取的能被质子活化的潜在无机磷<sup>[6]</sup>。外源磷添加后, 新稻田中 $\Delta\text{HC-P}$  呈先增加后平稳的趋势, 这是因为淹水产生的厌氧环境增加了磷的有效性; 在磷添加第 60 天时, 中期稻田中 $\Delta\text{HC-P}$  达到最大值, 此时土壤 pH 也升至最大值, 且在添加磷后 80 天时 pH 降低(图 2), 土壤对磷的固定增加, 从而引起 $\Delta\text{HC-P}$  的降低。

相同磷添加量下, 新稻田和老稻田中 $\Delta\text{Bray-P}$  较中期稻田高, 这可能是新稻田和老稻田中外源添加磷更易于转化为 Bray-P。外源磷添加 60 天时, 中期稻田中 $\Delta\text{Bray-P}/\Delta\text{TP}$  达到最高值, 主要原因是中期稻田 pH 显著升高导致磷酸铁和磷酸铝的溶解度增加<sup>[20]</sup>。

途径分析(表 3) 显示, 磷添加量( $\Delta\text{TP}$ )对新稻田和老稻田中 $\Delta\text{Bray-P}$  的直接正效应最大, 分别达到显著水平和极显著水平, 说明外源磷是新稻田和老稻田中 $\Delta\text{Bray-P}$  的主要来源。就稻田 BBP 组分磷增量对 $\Delta\text{Bray-P}$  的直接效应而言,  $\Delta\text{Ci-P}$  的对新稻田中的 $\Delta\text{Bray-P}$  直接正效应较大, 达到显著水平, 说明新稻田中 $\Delta\text{Bray-P}$  主要来自 $\Delta\text{Ci-P}$ 。 $\Delta\text{HC-P}$  和 $\Delta\text{Ca-P}$  对中期稻田中 $\Delta\text{Bray-P}$  的直接正效应最大, 且均达到极显著水平(表 3), 这表明中期稻田中 $\Delta\text{Bray-P}$  主要来自 $\Delta\text{HC-P}$  和 $\Delta\text{Ca-P}$ ; 而 $\Delta\text{En-P}$  对老稻田中的 $\Delta\text{Bray-P}$  有显著直接正效应(表 3), 这表明老稻田中 $\Delta\text{Bray-P}$  主要来自 $\Delta\text{En-P}$ 。新稻田中 $\Delta\text{Ci-P}$ 、 $\Delta\text{Ca-P}$  和 $\Delta\text{Bray-P}$  均在外源磷添加后第 15 天时达到最大值, 其中 $\Delta\text{Ci-P}$  是影响 $\Delta\text{Bray-P}$  的主要因子, 中期稻田中 $\Delta\text{Ca-P}$ 、 $\Delta\text{En-P}$ 、 $\Delta\text{HC-P}$  和 $\Delta\text{Bray-P}$  均在外源磷添加后第 15 天时达到最大值, 而 $\Delta\text{Ca-P}$  和 $\Delta\text{HC-P}$  是影响 $\Delta\text{Bray-P}$  的主要因子, 因此, 对新稻田施用磷肥时结合作物的需磷旺盛期并提前施肥可增加土壤肥力并提高磷肥利用效率。

## 4 结论

外源磷添加可显著增加稻田磷的生物有效性, 各 BBP 组分磷增量大小依次为:  $\Delta\text{Ca-P} < \Delta\text{En-P} < \Delta\text{Ci-P} < \Delta\text{HC-P}$ 。外源磷添加对新稻田和老稻田中 $\Delta\text{Bray-P}$  影响最大; 新稻田、中期稻田及老稻田 $\Delta\text{Bray-P}$  分别主要来自易被有机酸活化释放的磷和潜在无机磷、可溶性磷以及易被酸性磷酸酶和植酸酶矿化的有机磷。不同年限稻田生物有效性磷组分对外源磷添加的响应不同, 对新稻田和中期稻田施磷可分别考虑在作物需磷旺盛时期 15 和 60 天前进行, 这将有利于提高磷肥肥效和利用率, 且能减少土壤磷流失带来的环境风险。

## 参考文献 (References)

- [1] Shi W, Zhang L M, Wang J S, et al. The subsequent effects of phosphorus fertilization in upland red soils and the underlying mechanisms[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(4): 1100-1111. [石伟, 张丽梅, 王劲松, 等. 磷肥在旱地红壤上的后期效应及其作用机制[J]. 土壤学报, 2022, 59(4): 1100-1111.]

- [2] Mogollón J M, Beusen A H W, van Grinsven H J M, et al. Future agricultural phosphorus demand according to the shared socioeconomic pathways[J]. *Global Environmental Change*, 2018, 50: 149-163.
- [3] Jiang B S, Shen J L, Wang J, et al. Effect of straw incorporation on biologically-based phosphorus fractions and phosphorus uptake by rice in paddy field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(6): 309-317. [蒋炳伸, 沈健林, 王娟, 等. 秸秆还田稻田土壤生物有效性磷及水稻磷吸收[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(6): 309-317.]
- [4] Hoang K T K, Marschner P. Plant and microbial-induced changes in P pools in soil amended with straw and inorganic P[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2017, 17(4): 1088-1101.
- [5] 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.
- [6] Cai G, Hu Y J, Wang T T, et al. Characteristics and influencing factors of biologically-based phosphorus fractions in the farmland soil[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(4): 1606-1612. [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.]
- [7] Yuan J H. Availability of soil P in a rice-wheat cropping rotation in Taihu Lake region[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018. [袁佳慧. 太湖稻麦轮作农田土壤磷素生物有效性研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.]
- [8] Huang Y L, Cui L J, Li C Y, et al. Biologically-based availability and influencing factors of soil phosphorus under different vegetation in coastal beach wetlands[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(10): 1999-2005. [黄翊兰, 崔丽娟, 李春义, 等. 滨海滩涂湿地不同植被土壤磷的生物有效性及其影响因子分析[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(10): 1999-2005.]
- [9] Liu Y H, Wei X M, Wei L, et al. Responses of extracellular enzymes to carbon and phosphorus additions in rice rhizosphere and bulk soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(9): 1653-1663. [刘玉槐, 魏晓梦, 魏亮, 等. 水稻根际和非根际土磷酸酶活性对碳、磷添加的响应[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(9): 1653-1663.]
- [10] Hu Y F, Liu J P, Wang Z K, et al. Rotation increases soil phosphorus bioavailability and improves phosphorus nutrition of the latter crop in rotation[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(8): 1305-1310. [胡怡凡, 刘佳坪, 王子楷, 等. 轮作提高土壤磷生物有效性改善后茬作物磷素营养[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(8): 1305-1310.]
- [11] Du J X, Liu K L, Huang J, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of soil available phosphorus and its response to phosphorus balance in paddy soil in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(2): 476-486. [都江雪, 柳开楼, 黄晶, 等. 中国稻田土壤有效磷时空演变特征及其对磷平衡的响应[J]. *土壤学报*, 2021, 58(2): 476-486.]
- [12] Wang L, Wang Y L, Li H, et al. Redundancy analysis of influencing factors of phosphorus availability in red soil upland under long-term fertilization[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(1): 17-25. [王蕾, 王艳玲, 李欢, 等. 长期施肥下红壤旱地磷素有效性影响因子的冗余分析[J]. *中国土壤与肥料*, 2021(1): 17-25.]
- [13] Luo Y F, Qin X M, Nong Y Q, et al. Effects of maize and soybean intercropping on inorganic phosphorus forms and available phosphorus in red soil under different phosphorus levels[J]. *Soils*, 2022, 54(1): 72-79. [骆妍妃, 覃潇敏, 农玉琴, 等. 不同磷水平下玉米-大豆间作对红壤无机磷组分及有效磷的影响[J]. *土壤*, 2022, 54(1): 72-79.]
- [14] National Environmental Protection Agency. Analysis methods of water and wastewater[M]. 4th ed. Beijing: China Environment Science Press, 2002. [国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.]
- [15] Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. [鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.]
- [16] Guppy C. Is soil phosphorus fractionation as valuable as we think?[J]. *Plant and Soil*, 2021, 459(1/2): 19-21.
- [17] Sun G F, Jin J Y, Shi Y L. Research advance on soil phosphorus forms and their availability to crops in soil[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2011(2): 1-9. [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.]
- [18] Shenker M, Seitelbach S, Brand S, et al. Redox reactions and phosphorus release in re-flooded soils of an altered wetland[J]. *European Journal of Soil Science*, 2005, 56(4): 515-525.
- [19] Amarawansa G, Kumaragamage D, Flaten D, et al. Predicting phosphorus release from anaerobic, alkaline, flooded soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2016, 45(4): 1452-1459.

- [20] Cui C Y, Yan Y P, Wang X M, et al. Speciation transformation and mechanism of phosphorus and iron in acid soils in paddy-upland rotation in central China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(9): 1993-2003. [崔宸阳, 严玉鹏, 王小明, 等. 华中地区水旱轮作酸性土磷、铁形态转化及机理[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(9): 1993-2003.]
- [21] Hseu Z Y, Chen Z S. Saturation, reduction, and redox morphology of seasonally flooded alfisols in Taiwan[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60(3): 941-949.
- [22] Sun L N, Chen S, Chao L, et al. Effects of flooding on changes in Eh, pH and speciation of cadmium and lead in contaminated soil[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2007, 79(5): 514-518.
- [23] Lu R K. Advances in research on soil phosphorus chemistry[J]. *Progress in Soil Science*, 1990, 18(6): 1-5, 19. [鲁如坤. 土壤磷素化学研究进展[J]. *土壤学进展*, 1990, 18(6): 1-5, 19.]
- [24] Zhao H T. Effects of phosphorus application on soil phosphorus behavior[D]. Yangzhou, Jiangsu: Yangzhou University, 2005. [赵海涛. 施磷对土壤磷素行为的影响研究[D]. 江苏扬州: 扬州大学, 2005.]
- [25] Bo L J, Wang J G, Wang Y, et al. Effect of flooding time on phosphorus transformation and availability in paddy soil[J]. *Soils*, 2011, 43(6): 930-934. [薄录吉, 王建国, 王岩, 等. 淹水时间对水稻土磷素形态转化及其有效性的影响[J]. *土壤*, 2011, 43(6): 930-934.]
- [26] Borggaard O K, Jørgensen S S, Moberg J P, et al. Influence of organic matter on phosphate adsorption by aluminium and iron oxides in sandy soils[J]. *Journal of Soil Science*, 1990, 41(3): 443-449.
- [27] Mbene K, SuhTening A, Emmanuel Suh C, et al. Phosphorus fixation and its relationship with physicochemical properties of soils on the Eastern flank of Mount Cameroon[J]. *African Journal of Agricultural Research*, 2017, 12(36): 2742-2753.
- [28] Vadas P A, Sims J T. Phosphorus sorption in manured Atlantic coastal plain soils under flooded and drained conditions[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1999, 28(6): 1870-1877.
- [29] Hong Q Q, Yan X, Wei Z Q, et al. Effects of long-term fertilization on phosphorus sorption and soil properties in paddy soil[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2018(3): 61-66, 84. [洪欠欠, 颜晓, 魏宗强, 等. 长期施肥与土壤性质对水稻土磷吸附的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2018(3): 61-66, 84.]
- [30] Margalef O, Sardans J, Maspons J, et al. The effect of global change on soil phosphatase activity[J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(22): 5989-6003.
- [31] Jiang S W. Speciation, formation, and transformation of occluded phosphorus in red soils[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020. [姜松玮. 红壤中闭蓄态磷的形态、形成及转化[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.]
- [32] Liu F, He J Z, Li X Y, et al. Phosphorus solution concentration and chemical state of adsorbed phosphorus on goethite surface[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1994, 39(21): 1996—1999. [刘凡, 贺纪正, 李学垣, 等. 磷溶液浓度与针铁矿表面吸附磷的化学状态[J]. *科学通报*, 1994, 39(21): 1996—1999.]
- [33] Su L, Lin X Y, Zhang Y S, et al. Effects of flooding on iron transformation and phosphorus adsorption-desorption properties in different layers of the paddy soils[J]. *Journal of Zhejiang University: Agriculture and Life Sciences*, 2001, 27(2): 124-128. [苏玲, 林咸永, 章永松, 等. 水稻土淹水过程中不同土层铁形态的变化及对磷吸附解吸特性的影响[J]. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2001, 27(2): 124-128.]

(责任编辑: 陈荣府)