

李 智, 郭明月, 朱文昊, 等. 淹水和适水条件下不同磷肥对稻麦轮作土壤磷库的影响[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(9): 1633-1642.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2024.09.007

淹水和适水条件下不同磷肥对稻麦轮作土壤磷库的影响

李 智¹, 郭明月¹, 朱文昊¹, 罗来超¹, 王 智¹, 张朝春^{1,2}, 叶新新¹

(1. 安徽农业大学资源与环境学院, 安徽 合肥 230036; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要: 本研究以巢湖稻麦轮作区沙壤土和水稻土为研究对象, 探究淹水和适水条件下施用不同磷肥对稻麦轮作土壤磷库动态变化的影响, 为合理施用磷肥提供理论依据。2 种土壤均设置适水处理和淹水处理, 同时设 3 个施肥处理: 不施磷肥 (CK)、单施过磷酸钙 (SSP) 和单施控释活化磷酸二铵 (LC-DAP), 共 12 个处理。在恒温培养后第 5 d、10 d、30 d、60 d 采集土样, 分析土壤磷库变化。结果表明: 沙壤土中淹水处理下 LC-DAP 处理的活性磷库整体上最高, 适水处理下 SSP 处理在 10 d、60 d 时的活性磷库最高, 2 种水分处理下, SSP 处理的中等活性磷库整体上均最高; 而在水稻土中 SSP 处理的活性磷库和中等活性磷库整体上均最高。沙壤土占比最大的磷组分是 HCl-P, 水稻土占比最大的磷组分是 NaOH-P_i。培养开始后, 2 种土壤的 NaOH-P_o 含量明显下降, 表明施用磷肥促进 NaOH-P_o 矿化。淹水处理 NaHCO₃-P_i、NaHCO₃-P_o、NaOH-P_i 和 Residual-P 与 H₂O-P 存在显著或极显著相关关系, 而适水处理 NaHCO₃-P_o、NaOH-P_o 和 Residual-P 与 NaHCO₃-P_i 存在显著或极显著相关关系。施用磷肥显著增加活性磷库和中等活性磷库, 而磷肥品种和水分处理仅影响活性磷库, 不影响中等活性磷库和残余态磷库。

关键词: 磷肥; 磷组分; 磷库变化; 不同水分处理

中图分类号: S147.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2024)09-1633-10

Effects of different phosphorus fertilizers on phosphorus pool in rice-wheat rotation soil under flooding and suitable water conditions

LI Zhi¹, GUO Mingyue¹, ZHU Wenhao¹, LUO Laichao¹, WANG Zhi¹, ZHANG Chaochun^{1,2}, YE Xinxin¹

(1. College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2. College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: In this study, sandy loam and paddy soil in Chaohu rice-wheat rotation area were used as the research objects to explore the effects of different phosphorus (P) fertilizers on the dynamic changes of soil P pool in rice-wheat rotation areas under flooding and suitable water conditions, so as to provide theoretical basis for rational application of P fertilizer in the given region. Suitable water treatment and flooding treatment were set for two soils, and three fertilization treatments were set, such as no P fertilizer (CK), single application of calcium superphosphate (SSP) and single application of lost-controlled diammonium phosphate (LC-DAP). There were 12 treatments in total. Soil samples were collected five days, ten days, 30 days and 60 days after constant temperature culture, and the changes of soil P pool were analyzed. The results showed that the labile P pool in sandy loam was the highest on the whole in LC-DAP treatment under flooding condition, and under suitable water condition, the labile P pool was the highest after ten days and 60 days by SSP treatment. The moderate labile P

pool was the highest on the whole in SSP treatment under two water conditions, while the labile P pool and moderate labile P pool were the highest on the whole under SSP treatment in paddy soil. HCl-P took the largest proportion of P component in sandy loam, and NaOH-P_i took the largest proportion of P component in paddy soil. NaOH-P_o contents

收稿日期: 2023-11-15

基金项目: 安徽省科技重大专项 (202103a06020012)

作者简介: 李 智 (1999-), 男, 河南鹤壁人, 硕士研究生, 主要从事养分资源综合管理研究。(E-mail) 1207344132@qq.com

通讯作者: 张朝春, (E-mail) zhangcc@cau.edu.cn

in the two soils decreased obviously after cultivation, which indicated that the application of P fertilizer promoted mineralization of NaOH-P_o . Under the condition of flooding, $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$, $\text{NaHCO}_3\text{-P}_o$, NaOH-P_i and Residual-P exhibited significant or highly significant correlations with $\text{H}_2\text{O-P}$, while under the condition of suitable water, $\text{NaHCO}_3\text{-P}_o$, NaOH-P_i and Residual-P exhibited significant or highly significant correlations with $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$. Application of P fertilizer significantly increases the labile P pool and the moderate labile P pool, while P fertilizer varieties and water treatment only affect the labile P pool, do not affect the moderate labile P pool and residual P pool.

Key words: phosphate fertilizers; phosphorus component; changes in phosphorus pools; different moisture treatments

磷是植物正常生长发育所必需的营养元素之一^[1], 尽管土壤中全磷含量较高, 但可供植物吸收利用的磷较少, 只有通过施用磷肥才能确保植物有充足的吸收利用的磷^[2]。然而, 中国单位面积磷肥用量是全球的 2.9 倍^[3], 磷肥利用率仅为 5%~20%, 远低于世界平均水平^[4]。因此, 提高磷肥利用率是亟需解决的问题, 其关键是如何根据土壤特性更精准地施用磷肥, 促进磷肥与作物需求的匹配, 减少磷肥的无效化^[5-7]。

不同磷肥在土壤中的有效性差异很大, 例如王箫璇等^[8]对不同磷肥在砂姜黑土和红壤中磷素有效性的研究表明, 在砂姜黑土中施用聚磷酸铵和重过磷酸钙后土壤有效磷增加量均显著高于红壤。徐雅婷等^[9]在对黄瓜的研究中发现, 相较于传统磷肥磷酸二铵, 使用控释活化磷酸二铵能显著提高土壤中有效磷含量以及植株磷素累积量。造成以上差异的主要原因是不同磷肥的特性不同。目前磷肥品种繁多, 不同磷肥的增产效果因土壤而异^[10]。过磷酸钙作为水溶性磷肥, 适用于中性、碱性、弱酸性土壤^[11], 钙镁磷肥更适合酸性土壤^[12]。近年来新型磷肥备受关注, 与传统磷肥相比, 新型肥料采用新技术、新配方, 拥有较高的肥效^[13]。诸多研究发现新型磷肥可以活化或减少被土壤固定的磷素^[14-15]。例如, 控释活化肥以天然纳米黏土材料(凹凸棒土)为主要原料, 通过物理化学改性增加其表面活性, 能够减少 20% 化肥损失、降低 10% 化肥用量而不减产^[16]。腐殖酸磷肥通过在其生产过程中添加微量腐殖酸, 利用腐殖酸溶解难溶性磷或者与磷形成络合物等方式提高土壤磷的有效性^[17]。缓释肥是利用化学或物理方法贮存活性物质, 控制养分释放速度, 在特定时间维持一定的养分浓度^[18]。在作物生长过程中一次性施用缓释肥可以满足作物整个生育期的养分需求, 同时兼有简化施肥操作和降低人工成本、减少环境污染的优点, 其环

境效益和经济效益显著^[19]。与传统肥料相比, 缓释肥可减施 20% 且一次性施用而使产量保持不变, 大大减少了种植成本^[20]。然而, 不同磷肥如何影响淹水和适水条件下土壤磷组分目前仍不清楚。

巢湖流域位于长江中下游, 沙壤土、水稻土是该流域的 2 种主要土壤, 稻麦轮作是当地主要种植模式^[21], 本研所在区域为合肥市庐江县, 水稻、小麦产量占谷物总产量的 95.7%^[22]。然而, 由于磷肥用量大、肥料中水溶磷含量偏高, 导致巢湖流域土壤磷累积量大、面源污染加重, 2018 年巢湖流域水体总磷浓度较 2012 年升高了 16.6%^[23]。因此, 实现磷肥种类与土壤类型相匹配、提高磷肥利用率, 是减少巢湖流域农业面源污染的重要途径。本研究旨在分析不同磷肥对不同类型土壤磷组分的影响, 以求为巢湖流域稻麦轮作模式下磷肥的合理施用提供支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验所用土壤包括 2 种类型: 一种为水稻土, 采自安徽省合肥市庐江县南圩村(117°22'E, 31°47'N)稻田 0~20 cm 耕层土壤, 土壤 pH 5.21, 有机质含量 32.77 g/kg, 有效磷含量 68.74 mg/kg, 速效钾含量 220 mg/kg, 全氮含量 1.57 g/kg; 另一种为沙壤土, 采自安徽省合肥市庐江县皖中试验站(117°9'E, 31°25'N)0~20 cm 的耕层土壤, 土壤 pH 4.89, 有机质含量 13.32 g/kg, 有效磷含量 52.07 mg/kg, 速效钾含量 72.48 mg/kg, 全氮含量 0.74 g/kg。

1.2 试验设计

土壤自然风干后研磨并过 20 目筛, 每份称取 50 g 装入 100 mL 塑料烧杯中, 按如下试验设计进行处理, 2 种土壤均设置 2 种水分处理: 田间持水量的 70%, 模拟旱田环境, 称为适水处理; 田间持水量的 100%, 模拟水田环境, 称为淹水处理。2 种土壤, 共计 4 个处理。在此基础上, 设置 3 个施肥处理: 不施

肥(CK)、施用过磷酸钙(SSP, P_2O_5 12%)和控释活化磷酸二铵(LC-DAP, N 16%、 P_2O_5 46%),共计12个处理,每个处理重复3次,共计144盆。按照N 0.2 g/kg、 P_2O_5 0.1 g/kg、 K_2O 0.2 g/kg进行施肥,分别在试验后第5 d、10 d、30 d、60 d进行4次取样。处理后的土壤放入25℃培养箱中,培养期间采用称重法调控土壤含水量,每3 d添加1次蒸馏水。土壤采集后,进行自然风干,过100目网筛后,用于测定土壤磷分级。

1.3 测定指标及方法

吸附与解吸附试验:称取原始土壤1.5 g于50 mL离心管中,分别加入30 mL浓度为0 mg/L、5 mg/L、10 mg/L、20 mg/L、50 mg/L、100 mg/L、150 mg/L、200 mg/L、300 mg/L的 KH_2PO_4 溶液。于25℃恒温振荡24 h,平衡后离心,测定平衡液中的溶解性活性磷含量。吸附试验结束后,加入30 mL 0.01 mol/L的 $CaCl_2$ 溶液,振荡24 h后,离心、过滤,测定上清液中水溶磷含量,计算磷的解吸量^[24]。

土壤磷形态分级:按照Hedley等^[25]和Sui等^[26]修正的Hedley法进行土壤磷形态分级。根据活性可将磷组分分为活性磷库[包括水磷(H_2O-P)、碳酸氢钠无机磷($NaHCO_3-P_i$)、碳酸氢钠有机磷($NaHCO_3-P_o$)]、中等活性磷库[包括氢氧化钠无机磷($NaOH-P_i$)、氢氧化钠有机磷($NaOH-P_o$)、稀盐酸磷($HCl-P$)]、残余磷库[包括残余磷(Residual-P)]^[27]。

1.4 计算方法

Langmuir 等温吸附方程:

$$C/Q = 1/(K \times Q_m) + C/Q_m$$

式中, C 为平衡溶液中的磷质量浓度(mg/L); Q 为土壤磷的吸附量(mg/kg); Q_m 为磷最大吸附量(mg/kg); K 为吸附亲和力常数。

根据Langmuir 方程计算以下参数:

土壤磷最大缓冲容量(MBC , mg/kg) = $K \times Q_m$ ^[24]。

1.5 数据处理与分析

采用Microsoft Excel 2020 软件进行数据处理。采用SPSS(26.0)软件进行数据统计分析,采用Origin2021 进行图形绘制。

2 结果与分析

2.1 土壤磷的吸附/解吸特性

关于土壤对磷素的吸附特性,常采用Langmuir 方程来拟合其固体表面吸附量和溶液平衡浓度之间的关系,并可以通过等温吸附方程计算出一系列吸附参数,其相关参数见表1。当平衡液磷质量浓度为0~250 mg/L时,土壤磷素吸附量随着平衡液磷质量浓度的增加而增大(图1A)。由表1可知,沙壤土的最大吸附量为1 667 mg/kg,而水稻土最大吸附量为2 256 mg/kg。沙壤土的 MBC 为37 mg/kg,水稻土的 MBC 为50 mg/kg。土壤磷的等温解吸过程如图1B所示,磷的解吸量随着土壤磷的吸附量增加而增加,沙壤土解吸能力优于水稻土。因此,水稻土的吸附能力比沙壤土强,而解吸能力弱于后者。

表1 土壤Langmuir 拟合方程与吸附特征参数
Table 1 Langmuir fitting equation and adsorption characteristic parameters of soil

土壤类型	Langmuir 等温吸附式 $C/Q = C/Q_m + 1/KQ_m$			
	Q_m (mg/kg)	K	R^2	MBC (mg/kg)
沙壤土	1 667	0.022	0.91	37
水稻土	2 256	0.025	0.85	50

C 为平衡溶液中的磷质量浓度(mg/L); Q 为土壤磷的吸附量(mg/kg); Q_m 为磷最大吸附量(mg/kg); K 为吸附亲和力常数; MBC :土壤磷最大缓冲容量。 R^2 :决定系数。

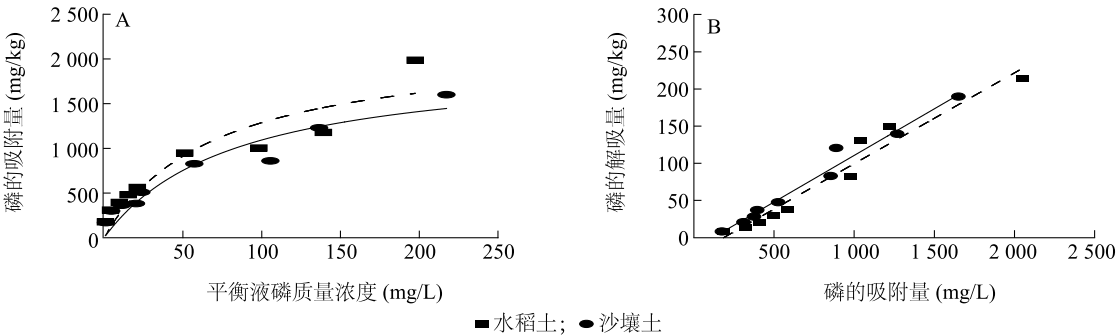


图1 土壤磷的吸附/解吸曲线
Fig.1 Curves for soil phosphorus adsorption/desorption

2.2 施用 2 种典型磷肥对土壤磷库动态变化的影响

与中等活性磷库和残余磷库相比,土壤活性磷库更容易受环境影响。土壤活性磷库受土壤类型、磷肥处理的影响,同时也受土壤类型和水分处理、土壤类型和磷肥处理、水分处理和磷肥处理等交互作用的影响;中等活性磷库、残余磷库主要受

土壤类型、磷肥处理、土壤类型和磷肥处理相互作用的影响(表 2)。2 种土壤中等活性磷库最大,沙壤土为 697~945 mg/kg(图 2),水稻土为 694~813 mg/kg(图 3);活性磷库次之,残余磷库最小(图 2、图 3)。沙壤土中等活性磷库高于水稻土,而后的残余磷库大于沙壤土。

表 2 土壤类型、水分处理以及磷肥处理对土壤磷库的 3 因素方差分析

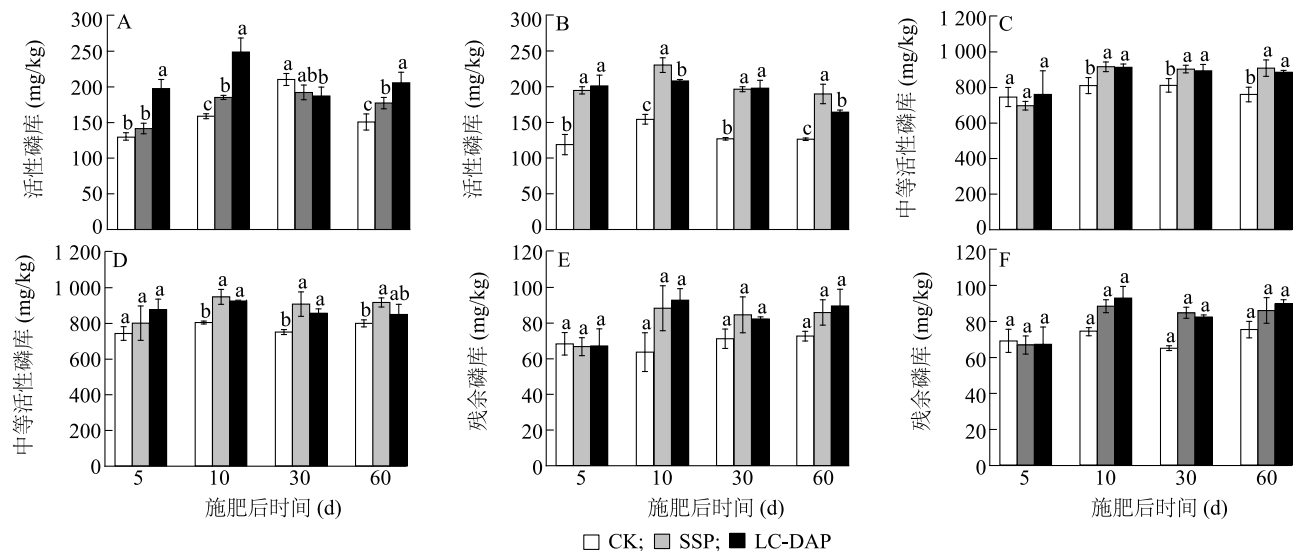
Table 2 Three-factor analysis of variance of soil type, water treatment and phosphorus fertilizer treatment on soil phosphorus pool

处理	活性磷库			中等活性磷库			残余磷库		
	df	F	P	df	F	P	df	F	P
土壤类型(S)	1	11.71	0.002 *	1	57.70	0.001 *	1	12.81	0.002 *
水分处理(W)	1	0.05	0.825	1	0.77	0.390	1	0.51	0.483
磷肥处理(P)	2	51.91	0.001 *	2	23.63	0.001 *	2	11.51	0.001 *
S×W	1	29.30	0.001 *	1	1.02	0.324	1	0.01	0.909
S×P	2	3.83	0.036 *	2	4.59	0.021 *	2	8.94	0.001 *
W×P	2	20.86	0.001 *	2	1.91	0.170	2	0.19	0.830
S×W×P	2	0.36	0.705	2	0.25	0.783	2	0.08	0.927

df:数据的自由度;F:检验模型或变量的显著性;P:决定是否接受或拒绝零假设。*表示变量对磷库具有显著影响。

施用磷肥对土壤磷库的影响随施用时间而不同。沙壤土的所有处理活性磷库整体呈先上升后下降趋势,在施肥后第 60 d 时与第 5 d 磷库相似(图 2A、图 2B)。淹水处理下,施用 LC-DAP 第 10 d 时,土壤活性磷库达到最大值(图 2A);适水处理下,

SSP 处理第 10 d 时达到最大值(图 2B)。2 种水分处理下,中等活性磷库呈先上升后趋于平缓的趋势,并因施肥而显著增加,但 2 种磷肥处理之间差异不显著(图 2C、图 2D)。施用磷肥处理残余磷库与 CK 差异不显著(图 2E、图 2F)。



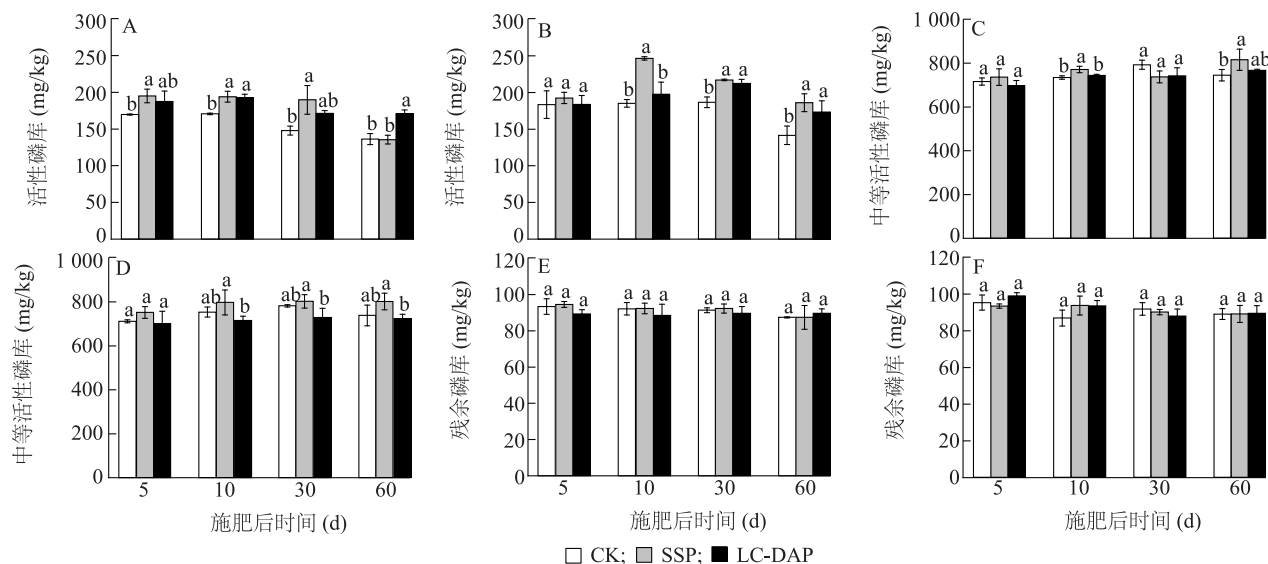
CK:对照,不施磷肥;SSP:施用过磷酸钙;LC-DAP:施用控释活化磷酸二铵。A、C、E 分别是淹水处理土壤活性磷库、中等活性磷库、残余磷库;B、D、F 分别是适水处理土壤活性磷库、中等活性磷库、残余磷库;不同小写字母表示相同时期不同处理之间差异达 0.05 显著水平。

图 2 沙壤土不同水分处理土壤磷库的变化

Fig.2 Changes of phosphorus pools of sandy loam under two water treatments

水稻土的 3 种磷库相对稳定,受外界影响较小。2 种水分处理下,培养 60 d 的活性磷库均下降,而淹水处理中等活性磷库上升。与不施用磷肥对照相比,施用磷肥可显著增加活性磷库,淹水处理下的 LC-DAP 处理在施肥后 60 d 时、适水处理下的 SSP

处理在施肥后 10 d 时的影响更大(图 3A、图 3B)。适水处理下 LC-DAP 处理的中等活性磷库与 SSP 处理相比在施肥后 10 d、30 d、60 d 显著下降(图 3C、图 3D),施用磷肥对于残余磷库无显著影响(图 3E、图 3F)。



CK:对照,不施磷肥;SSP:施用过磷酸钙;LC-DAP:施用控失活化磷酸二铵。A、C、E 分别是淹水处理土壤活性磷库、中等活性磷库、残余磷库;B、D、F 分别是适水处理土壤活性磷库、中等活性磷库、残余磷库;不同小写字母表示相同时期不同处理之间差异达 0.05 显著水平。

图 3 水稻土不同水分处理土壤磷库的变化

Fig.3 Variation of soil phosphorus pools in paddy soils under different water treatments

2.3 不同条件下土壤磷组分占比的影响

2 种土壤磷组分占比存在差异(图 4)。沙壤土占比最大的磷组分是 HCl-P, 占比达到 38%~47%; 水稻土占比最大的磷组分是 NaOH-P_i, 占比为 28%~40%。2 种土壤的 H₂O-P、NaHCO₃-P_i、NaHCO₃-P_o、NaOH-P_o 占比相似。

2 种土壤磷组分的变化受水分和施用磷肥处理的影响(图 5、图 6)。培养后的 2 种土壤与原始土样相比,NaOH-P_o 含量下降,而 NaOH-P_i、HCl-P 含量整体上增加。

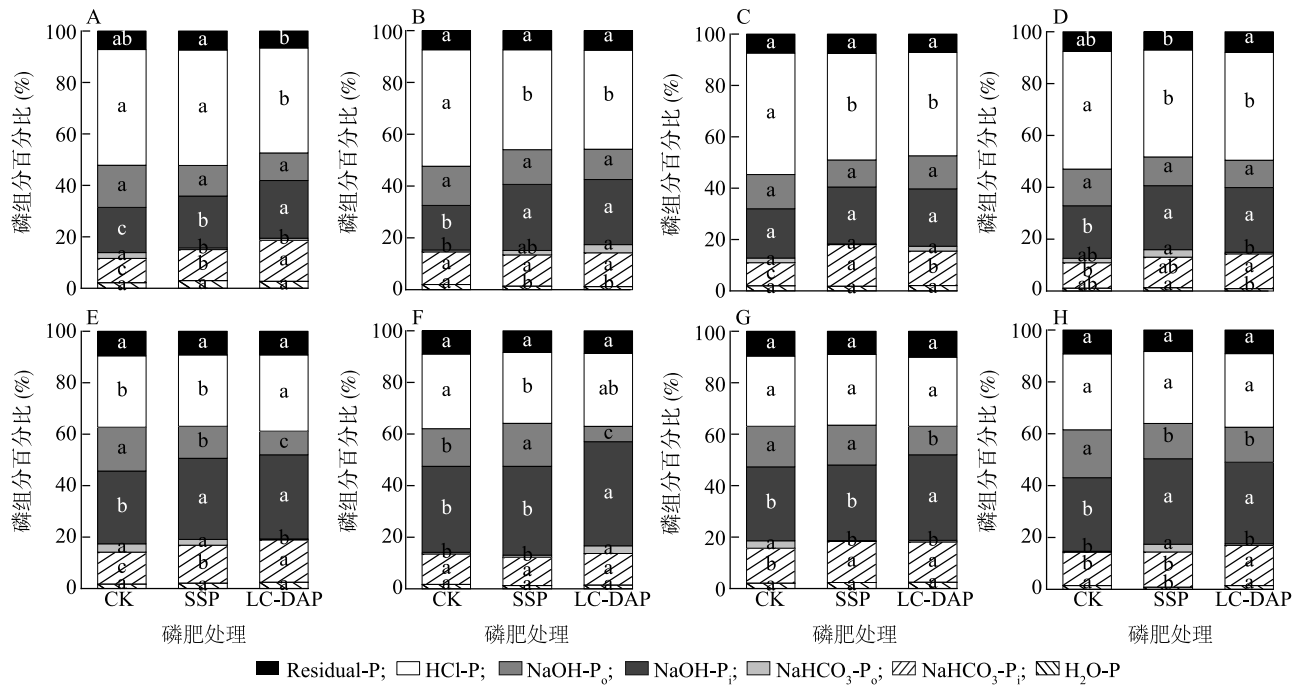
对于沙壤土(图 5),与 CK 相比,施用磷肥增加 2 种水分处理早期(培养后 5 d)的 H₂O-P 含量,培养 60 d 的 H₂O-P 含量增加量低于早期。在培养 5 d 时,淹水处理 LC-DAP 处理的 NaHCO₃-P_i 增加量显著高于 SSP 处理。在培养 60 d 时,与 CK 相比,2 种水分处理施用磷肥显著增加 NaOH-P_i 含量,适水处理显著增加 NaHCO₃-P_i 处理。对于 HCl-P, 适水处理增加量高于淹水处理。综上所述,淹水处理下,施

用磷肥早期沙壤土 H₂O-P 含量增加, LC-DAP 处理下 NaHCO₃-P_i、NaOH-P_i 含量显著增加。

2 种水分处理水稻土磷组分变化趋势基本一致(图 6)。淹水处理 60 d 时 NaOH-P_i 增加量整体上高于适水处理,而适水处理的 NaHCO₃-P_i 增加量高于淹水处理。施用磷肥可显著增加 2 种水分处理 NaHCO₃-P_i 含量。施用磷肥可以增加培养 60 d 土壤的 NaOH-P_i 含量。因此,淹水处理施用磷肥导致水稻土 NaOH-P_i 含量、HCl-P 含量增加,而 NaOH-P_o 含量降低。

2.4 磷组分相关性分析

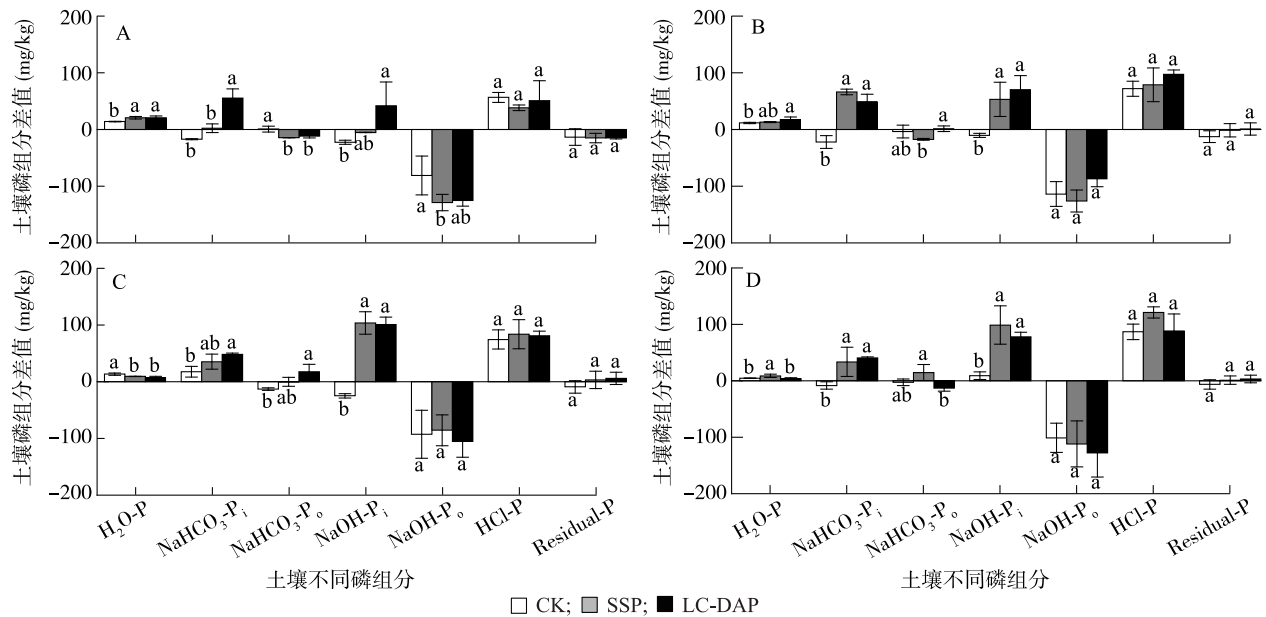
将 2 种土壤合并在一起,分别分析了 2 种水分条件下土壤磷组分之间的相关性。结果表明,2 种水分条件下,活性磷库和 Residual-P 含量与 NaHCO₃-P_i 含量极显著正相关,中等活性磷库与 NaOH-P_o 含量极显著正相关。水分处理对磷组分间相关性影响较大。表 3 显示,在淹水处理中,H₂O-P 含量与 NaHCO₃-P_o 含量、Residual-P 含量和 NaOH-P_i



A、B 分别代表沙壤土淹水处理各处理后第 5 d、60 d 不同磷组分占比; C、D 分别代表沙壤土适水处理各处理后第 5 d、60 d 不同磷组分占比。E、F 分别代表水稻土淹水处理各处理后第 5 d、60 d 不同磷组分占比; G、H 分别代表水稻土适水处理各处理后第 5 d、60 d 不同磷组分占比。不同小写字母表示同一磷组分不同处理之间差异达 0.05 显著水平。CK、SSP、LC-DAP 见图 2 注。H₂O-P: 水磷; NaHCO₃-P_i: 碳酸氢钠无机磷; NaHCO₃-P_o: 碳酸氢钠有机磷; NaOH-P_i: 氢氧化钠无机磷; NaOH-P_o: 氢氧化钠有机磷; HCl-P: 稀盐酸磷; Residual-P: 残余磷。

图 4 不同采样时期各处理沙壤土和水稻土磷组分占比变化

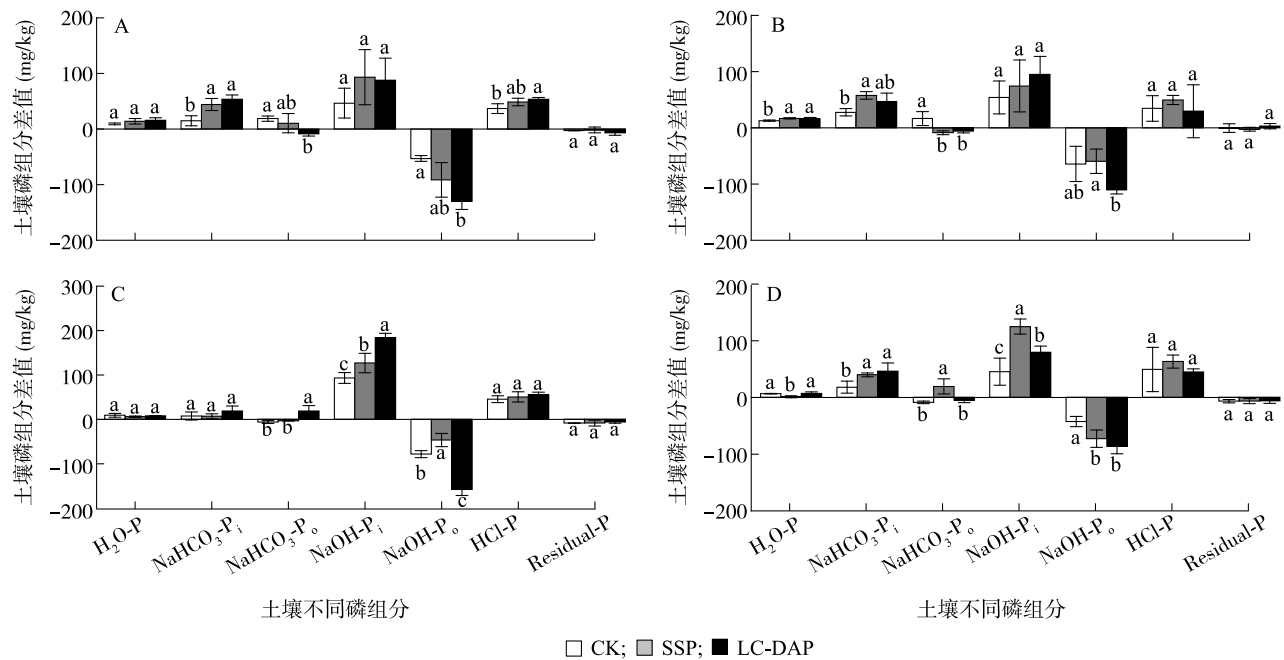
Fig.4 Changes of phosphorus component proportions of the sandy loam and paddy soil under different treatments at different sampling stages



A: 淹水处理 5 d 与 0 d 差值; B: 适水处理 5 d 与 0 d 差值; C: 表示淹水处理 60 d 与 0 d 差值; D: 表示适水处理 60 d 与 0 d 差值。不同小写字母表示同一磷组分不同处理之间差异达 0.05 显著水平。H₂O-P、NaHCO₃-P_i、NaHCO₃-P_o、NaOH-P_i、NaOH-P_o、HCl-P、Residual-P 见图 4 注。

图 5 不同水分处理下各处理沙壤土培养 5 d 和 60 d 时与原始土样磷组分含量的差异

Fig.5 Differences between phosphorus components contents of sandy loam under different water conditions at the 5th day and 60th day of culturing and that of the original soil



A 图表示淹水处理 5 d 与 0 d 差值;B 图表示适水处理 5 d 与 0 d 差值;C 图表示淹水处理 60 d 与 0 d 差值;D 图表示适水处理 60 d 与 0 d 差值。不同小写字母表示同一磷组分不同处理之间差异达 0.05 显著水平。 $\text{H}_2\text{O-P}$ 、 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 、 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_o$ 、 NaOH-P_i 、 NaOH-P_o 、 HCl-P 、 Residual-P 见图 4 注。

图 6 不同水分处理下各处理水稻土培养 5 d 和 60 d 时与原始土样磷组分含量的差异

Fig.6 Differences between phosphorus components of paddy soils under different water conditions at the 10th day and 60th day of culturing and that of the original soil

表 3 淹水处理磷库与磷组分之间的相关性分析

Table 3 Correlation analysis between phosphorus pool and phosphorus components under flooding treatment

指标	相关系数								
	H ₂ O-P 含量	NaHCO ₃ -P _i 含量	NaHCO ₃ -P _o 含量	NaOH-P _i 含量	NaOH-P _o 含量	HCl-P 含量	Residual-P 含量	活性磷库	中等活性 磷库
H ₂ O-P 含量	1.00								
NaHCO ₃ -P _i 含量	0.36 *	1.00							
NaHCO ₃ -P _o 含量	-0.43 **	-0.27	1.00						
NaOH-P _i 含量	-0.35 *	0.20	0.18	1.00					
NaOH-P _o 含量	-0.15	0.01	0.01	-0.19	1.00				
HCl-P 含量	0.03	0.16	0.19	-0.49 **	0.29 *	1.00			
Residual-P 含量	-0.29 *	0.37 **	0.09	0.76 **	0.14	-0.33 *	1.00		
活性磷库	0.35 *	0.91 **	0.11	0.20	-0.02	0.25	0.34 *	1.00	
中等活性磷库	-0.26	0.28	0.30 *	0.09	0.56 **	0.76 *	0.23	0.36 *	1.00

**、* 分别表示在 0.01、0.05 水平上相关。

含量显著或极显著负相关,与 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 含量、活性磷库显著正相关; HCl-P 含量与 NaOH-P_o 含量显著正相关,与 NaOH-P_i 含量极显著负相关。适水处理中, $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 含量与 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_o$ 含量极显著负相

关,与 NaOH-P_o 含量显著正相关(表 4)。因此,淹水处理的磷组分的变化更多来自于 $\text{H}_2\text{O-P}$ 与 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 、 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_o$ 、 NaOH-P_i 之间转化,而适水处理下更多来自于 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 与有机磷之间的变化。

表 4 适水处理磷库与磷组分之间的相关性分析

Table 4 Correlation analysis between phosphorus pool and phosphorus components under suitable water treatment

指标	相关系数								
	H ₂ O-P 含量	NaHCO ₃ -P _i 含量	NaHCO ₃ -P _o 含量	NaOH-P _i 含量	NaOH-P _o 含量	HCl-P	Residual-P 含量	活性磷库	中等活性磷库
H ₂ O-P 含量	1.00								
NaHCO ₃ -P _i 含量	0.15	1.00							
NaHCO ₃ -P _o 含量	-0.19	-0.30 **	1.00						
NaOH-P _i 含量	-0.20	0.16	0.17	1.00					
NaOH-P _o 含量	-0.01	0.24 *	0.03	-0.12	1.00				
HCl-P 含量	-0.15	0.09	0.11	-0.43 **	0.11	1.00			
Residual-P 含量	-0.11	0.37 **	0.01	0.64 **	0.20 *	-0.33 **	1.00		
活性磷库	0.30 **	0.88 **	0.12	0.19	0.24 *	0.10	0.34 **	1.00	
中等活性磷库	-0.26 *	0.27 **	0.22 *	0.08	0.43 **	0.80	0.10	0.30 **	1.00

**、* 分别表示在 0.01、0.05 水平上相关。

3 讨论

本研究分析了在淹水和适水处理下,施用不同磷肥对巢湖稻麦轮作区 2 种典型土壤磷库的影响。巢湖稻麦轮作区土壤磷库以中等活性磷库为主,受亚热带湿润性季风气候和酸性土壤的影响,施入的磷主要被铁、铝等氧化物和黏性矿物表面吸附^[28],但土壤中有有机碳、微生物等因素会显著影响土壤磷库^[29],所以本研究中 2 种土壤磷库有显著差异。沙壤土中等活性磷库中 HCl-P 显著高于水稻土,而水稻土中等活性磷库中 NaOH-P_i 高于沙壤土。中等活性磷库、残余磷库容易受土壤中阳离子等影响,而土壤中阳离子含量受种植制度和管理方式等因素的影响,造成磷库的差异^[30]。水分环境同样影响土壤磷库,在高含水量土壤中,微生物的生物量和丰富度增加,微生物分泌的有机酸以及酶等可以提高土壤中活性磷含量^[31],与其他研究结果不同的是,本研究的 2 种水分处理中等活性磷库相差不大,这可能是因为本研究的 2 种水分处理均为土壤提供了充足的水分。施用磷肥能够有效提高土壤有效磷含量并显著影响土壤磷素形态^[32]。相较于 LC-DAP 处理,SSP 处理能使磷更快转化进入活性磷库。这与刘玉洁等^[33]的研究结果相似,在单季水稻种植中施用过磷酸钙在短期内使土壤有效磷快速增长,而 LC-DAP 降低磷素释放的速度,使土壤活性磷能够长时间处于高水平^[34]。土壤磷素随着培养时间延长逐渐从活性磷库转向中等活性磷库,这与前人在莲藕中的研究结果相似,活性磷含量先增加后降低,中等

活性磷逐渐增加后趋于平稳^[35],但转化的幅度因肥料种类和土壤类型而异。沙壤土在培养期间施用磷肥处理,中等活性磷库显著高于不施用磷肥处理;水稻土适水处理 SSP 处理中等活性磷库显著高于 LC-DAP 处理。和韩梅等^[36]在稻田中的研究结果相似,施用过磷酸钙和缓释磷肥相较于不施肥处理,土壤中等活性磷库显著增大。本研究中,2 种磷肥处理的沙壤土中等活性磷库均较对照有所增加,这可能是因为本研究中活性磷含量较高,造成增长幅度较小。综上所述,土壤磷库的差异是由多方面因素造成的,本研究中施用磷肥能够促进土壤磷库转化,沙壤土中 LC-DAP 处理的活性磷库最高,SSP 处理的中等活性磷库最高,而在水稻土中 SSP 处理的活性磷库和中等活性磷库均最高。由于过磷酸钙快速溶解,磷素被土壤快速固定,因此 SSP 处理中等活性磷库要高于 LC-DAP 处理。

Sui 等^[26]用修正的 Hedley 法将土壤磷素分为有机磷和无机磷。土壤中磷组分的转化与多种因素有关,在不同土壤中磷组分的差异主要受土地利用、土壤风化程度的影响^[37]。本研究沙壤土中 HCl-P 占比较高,其次是 NaOH-P_i;水稻土 NaOH-P_i 占比最高,其次是 HCl-P,这可能与水稻土长期淹水状态促进磷酸根与 Fe 离子、Al 离子结合有关^[38]。这与其他人研究结果相差较大,前人对石灰性土壤和南方酸性土壤的研究结果均表明土壤中磷组分以 Residual-P 为主^[39-40],可能是气候和土壤性质不同导致磷组分的差异。不同水分环境的土壤中的氧化还原电位发生改变,例如淹水状态可营造还原条件将 Fe³⁺ 还

原为 Fe^{2+} , 同时释放磷酸盐来提高土壤磷的有效性^[41], 但本研究中 2 种水分处理的各个磷组分差异不显著, 可能是土壤含水量较高, 土壤在 2 种水分处理中均发生了还原反应。在碱性土壤中磷主要会与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等结合形成沉淀物被固定, 而在酸性条件下磷主要与 Fe 离子、Al 离子结合而被固定^[42]。本研究所用土壤均为酸性土壤, 因此 NaOH-P_i 占比均较大。施用磷肥也能够改变土壤中各磷组分的含量及占比, 不同品种的磷肥对磷组分含量的影响存在差异^[43]。施用磷肥一定程度影响土壤无机磷含量^[44]。LC-DAP 处理的 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 、 NaOH-P_i 、 HCl-P 占比均高于 SSP 处理, 这可能是因为不同磷肥磷素的释放速率不同, 影响土壤对磷素的固定^[45]。

土壤中存在多种磷素形态, 它们之间处于一个动态平衡的过程, 并互相制约和影响^[46]。本研究培养后的 2 种土壤中的 NaOH-P_i 含量均明显下降, 同时 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 、 NaOH-P_i 、 HCl-P 含量均有所上升。施用磷肥显著增加 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 和 NaOH-P_i 含量, 表明施用磷肥后磷素会向 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 和 NaOH-P_i 转化。此外, 施用磷肥还促进 NaOH-P_i 的矿化, 可能是因为适宜的环境促进了土壤微生物的活动, 同时在土壤酶的影响下促使 NaOH-P_i 矿化^[47], 这与张教林等^[48]关于热带胶园的研究结果相似, 种植 34 年时土壤中 NaOH-P_i 矿化, 转化为活性磷或中等活性磷。综上所述, 土壤磷组分转化受多种因素的影响, 在沙壤土中 NaOH-P_i 和 HCl-P 占比变化最大; 而在水稻土中 NaOH-P_i 和 NaOH-P_i 占比变化最大, 同时施用磷肥显著影响土壤磷组分变化。

本研究中淹水处理的磷组分主要与 $\text{H}_2\text{O-P}$ 具有相关性, 而在适水处理条件下磷组分主要与 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 具有相关性, 2 种磷组分均为活性磷, 表明磷肥进入土壤后会先转化为活性磷, 然后向其他磷组分转化。而滕泽琴等^[49]的研究发现磷组分的转化主要发生在 HCl-P , 这与本研究结果不同, 这可能是土壤类型、pH 等因素造成的。本研究中 Residual-P 同其他磷组分也有显著的相关性, 可能由于 Residual-P 也可以作为潜在磷源^[50]。

土壤中的磷必须转化为活性磷才能被植物吸收利用, 中等活性磷常被作为土壤潜在的活性磷, 可以转化为活性磷供植株吸收利用^[51]。土壤磷的转化实质上是土壤吸附和固定的磷的释放, 以及磷酸盐矿物溶解的过程, 包括有机磷矿化、吸附态磷解吸和

无机磷溶解等^[52]。

参考文献:

- [1] 闫金垚, 郭丽璇, 王昆昆, 等. 长江流域稻-油轮作区土壤磷库现状及环境风险分析[J]. 土壤学报, 2023, 60(1): 247-257.
- [2] MEDINSKI T, FREESE D, REITZ T. Changes in soil phosphorus balance and phosphorus-use efficiency under long-term fertilization conducted on agriculturally used Chernozem in Germany[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2018, 98(4): 650-662.
- [3] 联合国粮食及农业组织. 联合国粮食及农业组织数据库[DB/OL]. [2023-10-15]. <https://www.fao.org/faostat/zh/#data/RFN>.
- [4] 肖敏, 郭浪, 崔璨, 等. 磷肥运筹对机插双季稻产量构成与养分吸收利用的影响[J]. 作物杂志, 2024(2): 178-188.
- [5] 吴庚福, 黄振瑞, 陈迪文, 等. 不同类型磷肥对土壤磷素形态和烟草生长的影响[J]. 中国烟草科学, 2021, 42(6): 1-7.
- [6] 顾惠敏, 陈波浪, 王庆惠. 施用磷肥对不同质地棉田土壤磷素有效性及磷肥利用率的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019(3): 100-108.
- [7] 王晓红, 柳小琪, 吴璐璐, 等. 3 种磷肥在北方 6 种土壤中的吸持固定特点[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2020, 41(4): 75-81, 9.
- [8] 王箫璇, 张敏, 张鑫尧, 等. 不同磷肥对砂姜黑土和红壤磷库转化及冬小麦磷素吸收利用的影响[J]. 中国农业科学, 2023, 56(6): 1113-1126.
- [9] 徐雅婷, 景建元, 李虹颖, 等. 不同新型磷肥对黄瓜产量、品质及磷肥利用率的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2023, 50(4): 603-610.
- [10] 吉冰洁, 李文海, 徐梦洋, 等. 不同磷肥品种在石灰性土壤中的磷形态差异[J]. 中国农业科学, 2021, 54(12): 2581-2594.
- [11] 王利, 高祥照, 马文奇, 等. 中国低浓度磷肥的使用现状与发展展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(5): 732-737.
- [12] 邹茸, 王秀斌, 霍文敏, 等. 不同磷肥品种对苋菜镉累积的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2018(1): 37-42.
- [13] 冯尚善, 崔荣政, 王臣. 我国新型肥料产业发展现状及展望[J]. 磷肥与复肥, 2020, 35(10): 1-3.
- [14] 王修康, 王学江, 李峰, 等. 新型磷肥在玉米上的应用效果研究[J]. 磷肥与复肥, 2019, 34(4): 39-40.
- [15] 闫凤超, 王安东, 李鹏, 等. 不同形态的磷对水稻产量影响的研究[J]. 现代化农业, 2017(6): 56-57.
- [16] 蔡冬清, 吴正岩, 吴丽芳, 等. 化肥与农药控失技术研发及产业化[J]. 科技促进发展, 2019, 15(4): 351-356.
- [17] 景建元, 袁亮, 张水勤, 等. 腐殖酸磷肥中的腐殖酸对磷迁移的影响及机理[J]. 中国农业科学, 2021, 54(23): 5032-5042.
- [18] 冯文来, 赵平. 控制释放技术发展及展望[J]. 化学工业与工程, 1996(1): 49-52, 66.
- [19] 刘永红, 郑文涛, 张晋天, 等. 缓/控释肥研究进展及其应用[J]. 华中农业大学学报, 2023, 42(4): 167-176.
- [20] 田文涛, 党程成, 郝蓉蓉, 等. 缓释肥一次性施肥在水稻上增产

- 增效的农学基础研究[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(4): 71-77.
- [21] 田 帅, 单旭东, 程启鹏, 等. 巢湖流域典型稻麦轮作区大气氮磷沉降及对巢湖影响的分析[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(4): 958-966.
- [22] 合肥市统计局. 合肥市统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
- [23] ZHANG L, FANG Y, CAI H, et al. Spatio-temporal heterogeneities in water quality and their potential drivers in Lake Chaohu (China) from 2001 to 2017[J]. *Ecohydrology*, 2021, 14(7): e2333.
- [24] ZHOU L, SU L Z, ZHANG L Y, et al. Effect of different types of phosphate fertilizer on phosphorus absorption and desorption in acidic red soil of Southwest China[J]. *Sustainability*, 2022, 14(16): 9973.
- [25] 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.
- [26] SUI Y, THOMPSON M L, SHANG C. Fractionation of phosphorus in a Mollisol amended with biosolids[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63(5): 1174-1180.
- [27] 张 林, 吴 宁, 吴 彦, 等. 土壤磷素形态及其分级方法研究进展[J]. 应用生态学报, 2009, 20(7): 1775-1782.
- [28] 王 飞, 李清华, 林 诚, 等. 长期不同供磷水平下南方黄泥田生产力及磷组分特征[J]. 中国生态农业学报, 2020, 28(7): 960-968.
- [29] YUAN J H, WANG L, CHEN H, et al. Responses of soil phosphorus pools accompanied with carbon composition and microorganism changes to phosphorus-input reduction in paddy soils[J]. *Pedosphere*, 2021, 31(1): 83-93.
- [30] 蔡 成, 王擎运, 王 慧, 等. 含铁秸秆腐熟物对砂姜黑土和潮土磷形态及有效性的影响[J]. 土壤通报, 2023, 54(3): 662-672.
- [31] CHEN G L, YUAN J H, CHEN H, et al. Animal manures promoted soil phosphorus transformation via affecting soil microbial community in paddy soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 831: 154917.
- [32] 冒辛平, 刘汝亮, 赵 营, 等. 施肥措施对水旱轮作条件下灌淤土磷素形态的影响[J]. 土壤通报, 2022, 53(6): 1447-1452.
- [33] 刘玉洁, 林 诚, 王 飞, 等. 冷浸田水稻施用不同磷肥品种试验[J]. 福建农业科技, 2016, 47(4): 14-15.
- [34] 赵隽宇, 潘 波, 覃祚玉, 等. 长期施用袋控缓释肥对南方红壤中磷素形态及有效性的影响[J]. 农学学报, 2022, 12(11): 14-19.
- [35] BOSCHETTI N G, QUINTERO C E, GIUFFRÉ L. Phosphorus fractions of soils under *Lotus corniculatus* as affected by different phosphorus fertilizers[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2009, 45: 379-384.
- [36] 韩 梅, 李东坡, 武志杰, 等. 持续六年施用不同磷肥对稻田土壤磷库的影响[J]. 土壤通报, 2018, 49(4): 929-935.
- [37] TIAN L Y, GUO Q J, YU G R, et al. Phosphorus fractions and oxygen isotope composition of inorganic phosphate in typical agricultural soils[J]. *Chemosphere*, 2020, 239: 124622.
- [38] 李 季, 张 桥, 张嘉欣, 等. 秸秆还田对稻田土壤磷素形态及磷循环微生物功能基因的影响[J]. 福建农业学报, 2023, 38(10): 1230-1241.
- [39] 穆晓慧, 李世清, 党蕊娟. 黄土高原石灰性土壤不同形态磷组分分布特征[J]. 中国生态农业学报, 2008, 12(6): 1341-1347.
- [40] 苏贵锐, 荣飞龙, 张 薇, 等. 减磷施肥配施生物炭对南方酸性稻作土壤磷素形态的影响[J/OL]. 中国土壤与肥料, 2024(1): 19-27.
- [41] MARTINENGO S, SCHIAVON M, SANTORO V, et al. Assessing phosphorus availability in paddy soils: the importance of integrating soil tests and plant responses[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2023, 59(4): 391-405.
- [42] WANG Y, ZHANG W, MÜLLER T, et al. Soil phosphorus availability and fractionation in response to different phosphorus sources in alkaline and acid soils: a short-term incubation study[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 5677.
- [43] 王海龙, 张 民, 刘之广, 等. 多年定位试验条件下不同施磷水平对土壤无机磷分级的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 318.
- [44] LEE C H, PARK C Y, DO PARK K, et al. Long-term effects of fertilization on the forms and availability of soil phosphorus in rice paddy[J]. *Chemosphere*, 2004, 56(3): 299-304.
- [45] CHEN Y L, CHEN X J, ZHANG C L, et al. Conversion of ammonium polyphosphate (APP) in acidic soil and its effect on soil phosphorus[J]. *Applied Ecology & Environmental Research*, 2020, 18: 4405-4415.
- [46] 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.
- [47] 刘 津, 李春越, 邢亚薇, 等. 长期施肥对黄土旱塬农田土壤有机磷组分及小麦产量的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(1): 157-164.
- [48] 张教林, 陈爱国, 刘志秋. 定植 3, 13, 34 年热带胶园的土壤磷素形态变化和有效性研究[J]. 土壤, 2000, 32(6): 319-322.
- [49] 滕泽琴, 李旭东, 韩会阁, 等. 土地利用方式对陇中黄土高原土壤磷组分的影响[J]. 草业学报, 2013, 22(2): 30-37.
- [50] REHMAN O U, MEHDI S M, SARFRAZ M, et al. Phosphorus dynamics in Rasulpur soil series (Typic Camborthid) under rice based cropping system[J]. *Journal of Animal and Plant Sciences*, 2013, 23(2): 480-486.
- [51] 张建伟, 石孝均, 徐文静, 等. 果园绿肥对土壤磷组分及磷素有效性的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(6): 336-342.
- [52] 刘双凤, 杨德志, 王 凤, 等. 施肥对我国农田土壤磷素形态影响的 Meta 分析[J/OL]. 中国土壤与肥料, 2023: 1-13 [2023-12-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5498.S.20231219.1018.004.html>.

(责任编辑: 陈海霞)