

## 长期施无机磷肥对黄泥土稻田土壤磷库的影响

许琛, 沈素素, 何竹, 王宁, 周贝贝, 沈明星, 施林林, 薛利红

### 引用本文:

许琛, 沈素素, 何竹, 王宁, 周贝贝, 沈明星, 施林林, 薛利红. 长期施无机磷肥对黄泥土稻田土壤磷库的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(11): 2506–2514.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0153>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 小麦玉米秸秆长期还田对砂姜黑土磷库组成的影响

徐悦, 陈翔, 王擎运, 罗来超, 张朝春, 李金才, 叶新新, 郜红建, 柴如山

农业环境科学学报. 2022, 41(8): 1768–1777 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1504>

#### 磷高效转基因水稻全生育期根际土壤磷组分特征差异

曹璇, 臧怀敏, 赵云丽, 修伟明, 李刚, 杨殿林, 刘惠芬, 赵建宁

农业环境科学学报. 2015(10): 1951–1957 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.10.016>

#### 不同水分条件下生物炭对红壤磷素形态及磷酸酶活性的影响

夏丽丹, 曹升, 张虹, 胡华英, 周垂帆, 马祥庆

农业环境科学学报. 2019, 38(5): 1101–1111 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1171>

#### 生物炭调节盐化水稻土磷素形态及释放风险研究

曹殿云, 兰宇, 杨旭, 赫天一, 刘遵奇, 陈温福, 蔡丹丹, 温秋香

农业环境科学学报. 2019, 38(11): 2536–2543 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0682>

#### 磷高效转基因水稻对潮土无机磷形态的影响

倪土, 李刚, 修伟明, 魏琳琳, 侯萌瑶, 杨殿林, 赵建宁

农业环境科学学报. 2017, 36(8): 1551–1556 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0126>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

许琛, 沈素素, 何竹, 等. 长期施无机磷肥对黄泥土稻田土壤磷库的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(11): 2506-2514.

XU C, SHEN S S, HE Z, et al. Effects of long-term application of inorganic phosphate fertilizer to soil phosphorus pools in yellow-mud soil paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(11): 2506-2514.



开放科学 OSID

# 长期施无机磷肥对黄泥土稻田土壤磷库的影响

许琛<sup>1,2</sup>, 沈素素<sup>2,3</sup>, 何竹<sup>2</sup>, 王宁<sup>2</sup>, 周贝贝<sup>2,4</sup>, 沈明星<sup>5</sup>, 施林林<sup>5</sup>, 薛利红<sup>1,2,3\*</sup>

(1. 江苏大学环境与安全工程学院, 江苏 镇江 212001; 2. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 南京 210014; 3. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 4. 江苏开放大学环境生态学院, 南京 210017; 5. 苏州市农业科学院, 江苏 苏州 215155)

**摘要:**本研究选取太湖流域黄泥土长期定位试验田作为研究对象,明确40 a长期施磷对水稻土土壤磷库、磷形态及有效性的影响。结果表明:长期施磷(NPK)处理的土壤总磷和有效磷含量高达589.58 mg·kg<sup>-1</sup>和51.67 mg·kg<sup>-1</sup>,比不施磷(NK)处理显著增加126.61%和216.41%。两处理无机磷均以Fe-P和Ca-P为主,约占无机磷的69.53%~79.86%,有机磷以活性和中活性有机磷为主。长期施磷使稻田无机磷含量在3个生育期均极显著增加,增幅为170%以上,其中Al-P和Fe-P的含量及相对占比显著提升,Ca-P含量增加但相对含量明显降低,O-P含量变化较小而相对含量降低。长期施磷处理下有机磷含量仅在分蘖期增幅显著(33%),主要表现为活性和中活性有机磷含量显著增加。与分蘖期相比,抽穗期长期施磷处理的Al-P、Fe-P以及高稳定有机磷的相对含量明显下降,Ca-P和中活性有机磷的相对含量上升,而长期不施磷处理表现为Fe-P、O-P以及高稳定有机磷的相对含量下降,Ca-P和中活性有机磷的相对含量上升。Al-P、Fe-P、Ca-P、O-P和中活性有机磷均与有效磷(AP)显著正相关。研究发现:Al-P、Fe-P和Ca-P是黄泥土稻田最主要的有效磷源,土壤缺磷时土壤磷酸酶等对有机磷的活化也是重要的有效磷来源之一;长期施用无机磷肥导致稻田土壤无机磷库累积明显,磷流失风险增加,因此应在保证稻麦高产的前提下合理降低磷肥施入量,充分活化利用土壤中固存的难溶态磷来提高土壤磷素利用率。

**关键词:**长期施磷;稻田;磷形态;磷素有效性

中图分类号:S153.6 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2022)11-2506-09 doi:10.11654/jaes.2022-0153

## Effects of long-term application of inorganic phosphate fertilizer to soil phosphorus pools in yellow-mud soil paddy fields

XU Chen<sup>1,2</sup>, SHEN Susu<sup>2,3</sup>, HE Zhu<sup>2</sup>, WANG Ning<sup>2</sup>, ZHOU Beibei<sup>2,4</sup>, SHEN Mingxing<sup>5</sup>, SHI Linlin<sup>5</sup>, XUE Lihong<sup>1,2,3\*</sup>

(1. School of the Environment and Safety Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212001, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 3. College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 4. School of Environmental Ecology, Jiangsu Open University, Nanjing 210017, China; 5. Suzhou Academy of Agricultural Sciences, Suzhou 215155, China)

**Abstract:** In this study, a long-term positioning field in the Taihu Lake basin was selected to study the effects of long-term chemical phosphorus (P) fertilizer application on soil P content, form, and availability (yellow-mud soil). The results showed that the soil total P and available P contents in NPK treatment were as high as 589.58 mg·kg<sup>-1</sup> and 51.67 mg·kg<sup>-1</sup>, which were significantly increased by 126.61% and 216.41% over the no P (NK) treatment. The inorganic P in the two treatments was mainly Fe-P and Ca-P, which accounted for approximately 69.53%–79.86% of inorganic P. Organic P was mainly active and medium active organic P. Long-term P application

收稿日期:2022-02-17 录用日期:2022-05-10

作者简介:许琛(1996—),男,河南信阳人,硕士研究生,主要从事磷对稻田甲烷排放的调控及微生物机制研究。E-mail:xcxy1129@outlook.com

\*通信作者:薛利红 E-mail:njxuelihong@gmail.com

基金项目:国家自然科学基金项目(41877087)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41877087)

significantly increased the inorganic P content by more than 170% in the three growth stages of the yellow-mud soil field in comparison with the NK treatment. The content and relative proportion of Al-P and Fe-P increased significantly, the Ca-P content increased while the relative proportion was significantly reduced. In addition, the O-P content remained stable, but the relative proportion decreased. Organic P content, especially active and moderately active organic P content, increased significantly only at the tillering stage (33%). Compared with the tillering stage, the relative proportions of Al-P, Fe-P, and highly stable organic P in the NPK treatment decreased, while the Fe-P, O-P, and highly stable organic P in the NK treatment decreased at the heading stage, while Ca-P and medium active organic P increased. Al-P, Fe-P, Ca-P, O-P, and moderately active organic P in yellow-mud soil were significantly positively correlated with available P (AP). The results indicated that Al-P, Fe-P, and Ca-P were the main effective P sources in yellow-mud soil paddy fields, and the activation of organic P by soil phosphatase was an important source of available P when the soil is short of P. Long-term application of inorganic P fertilizer resulted in the obvious accumulation of inorganic P pools in paddy soil and increased the risk of P loss. Therefore, the amount of P fertilizer should be reasonably reduced through organic P substitution to promote the activation of soil insoluble P to ensure a high yield of rice and wheat and reduce the risk of P loss.

**Keywords:** long-term phosphorus application; paddy field; phosphorus forms; phosphorus availability

土壤磷素是作物生长发育必需的养分之一,同时也是农业生产中重要的限制养分因子<sup>[1]</sup>。磷肥施用是农田土壤磷素的重要来源,但土壤中各种物理化学反应可导致其有效性大幅降低。磷肥在农业生产中的利用率较低,其当季利用率一般低于20%<sup>[2]</sup>。生产实践中为了保证产量,磷肥的施入量远高于作物的需求量,且我国磷肥施入量平均年增长速率达到6.8%<sup>[3]</sup>,土壤磷含量正以11%的速率递增<sup>[4]</sup>。土壤中累积的磷素会通过地表径流、土壤侵蚀以及渗漏淋溶等途径流失,进而导致水环境污染加重<sup>[5-7]</sup>。因此,研究不同施肥措施对土壤磷形态分布及有效性的影响,对提高磷肥利用率及减少磷素流失具有重要意义。

土壤磷素具有形态复杂及动态平衡的特点。土壤中磷素主要分为无机磷和有机磷<sup>[8]</sup>,中性和酸性土壤中的无机磷可分为磷酸铝盐(Al-P)、磷酸铁盐(Fe-P)、磷酸钙盐(Ca-P)和闭蓄态磷(O-P)<sup>[9]</sup>,有机磷可分为活性有机磷、中活性有机磷、中稳定有机磷和高稳定有机磷<sup>[10]</sup>。以往研究表明,磷肥的施用不仅增加磷素的累积,而且会对磷素的形态组分产生一定的影响。戚瑞生等<sup>[11]</sup>的研究发现黑垆土长期施用无机磷肥后土壤无机磷库显著累积,增施有机肥处理显著增加了土壤有机磷含量。施林林等<sup>[12]</sup>发现长期施无机磷肥能明显增加太湖流域水稻土壤无机磷各组分的含量,其中以Fe-P含量的增长最为显著。而在对有机磷组分的研究中,赵吴琼等<sup>[13]</sup>发现不施磷肥可导致灰漠土有机磷各组分含量下降,而GAIND等<sup>[14]</sup>的研究结果表明施用有机肥并未增加水稻土壤总磷及有机磷含量,有机磷组分中以中稳性有机磷和高稳性有机磷为主要成分。

水稻是我国主要的粮食作物,其特殊的水分管理

方式引起氧化还原过程交替发生,从而使得水稻土壤磷的有效性发生改变<sup>[15]</sup>。太湖流域是农业生产水平最为发达的地区之一,也是磷肥投入较高的地区<sup>[16]</sup>,同时该地区近年来一直存在较为突出的水体富营养化问题。当土壤有效磷含量超过一定数值时,不仅水稻产量不再增加,而且磷的径流和淋溶风险会急剧加大。王慎强等<sup>[16]</sup>在2009年的调查研究发现太湖流域典型水稻土壤磷库大部分已不缺磷,稻季无论施磷与否均不影响水稻产量。黄泥土是太湖流域总面积最大的水稻土,具有土体厚和保水供肥能力强等特点<sup>[17]</sup>。潘根兴等<sup>[18]</sup>的研究发现太湖流域黄泥土在连续14 a低量施用无机磷肥(45 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,以P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>计)后,土壤总磷含量略有下降。而太湖流域农户稻麦两季均普遍施磷,且磷肥用量可高达60 kg·hm<sup>-2</sup>(以P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>计),长期高量施磷对土壤磷库及有效性的影响尚不明确。因此,本研究选取太湖流域黄泥土的长期定位试验田为研究对象,研究40 a长期高量施磷(稻麦周年55.8 kg·hm<sup>-2</sup>,以P计)和不施磷对水稻生育期土壤磷库、磷素形态分布及有效性的影响,以期为该区域磷肥的合理施用提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

本研究长期定位试验田(始于1980年)位于江苏太湖地区农业科学研究所(31°17'02" N, 119°54'12" E)。土壤类型为黄土沉积物发育而来的微酸性重壤质黄泥土,试验初始时土壤基本理化性质:有机质24.20 g·kg<sup>-1</sup>,全氮1.43 g·kg<sup>-1</sup>,总磷0.43 g·kg<sup>-1</sup>,有效磷8.40 mg·kg<sup>-1</sup>,有效钾127 mg·kg<sup>-1</sup>,pH 6.8。试验田所设处理具体参见文献[19]。

本研究分别选取了苏州长期定位试验田的化肥氮磷钾处理(NPK)和化肥氮钾处理(NK)为研究对象,每个处理3次重复,每个试验小区面积为20 m<sup>2</sup>。苏州长期定位试验田水稻品种是苏香粳100号,氮肥用量是350 kg·hm<sup>-2</sup>,采用尿素按基肥:返青肥:拔节肥为4.5:1.5:4的比例施用,磷肥(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)用量是60 kg·hm<sup>-2</sup>,用过磷酸钙(有效P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含量为14%)作为基肥一次性施入。钾肥(K<sub>2</sub>O)施用量是123 kg·hm<sup>-2</sup>,采用氯化钾按基肥:拔节肥为1:1的比例施加。其他田间管理措施与一般高产大田一致。

## 1.2 样品的采集和测定

在水稻关键生育期(分蘖期、抽穗期和成熟期)内用三点取样法取0~20 cm的新鲜土壤样品放入冷藏箱并迅速带回实验室处理。土壤样品充分风干后过20目和100目筛用于各种磷指标的测定。土壤总磷(TP)含量采用常规钼锑抗比色法测定,土壤有效磷(AP)含量采用0.5 mol·L<sup>-1</sup> NaHCO<sub>3</sub>溶液浸提-钼锑抗比色法测定。土壤无机磷分级采用CHANG等<sup>[9]</sup>提出的方法:分别用0.5 mol·L<sup>-1</sup> NH<sub>4</sub>F溶液提取Al-P、0.1 mol·L<sup>-1</sup> NaOH溶液提取Fe-P、0.3 mol·L<sup>-1</sup> 柠檬酸钠和连二亚硫酸钠溶液提取O-P、0.5 mol·L<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液提取Ca-P。土壤有机磷分级采用Bowman-Cole法<sup>[10]</sup>按照有机磷组分在不同浓度酸碱溶液中的溶解性分别测得活性有机磷、中活性有机磷、中稳定有机磷和高稳定有机磷。

## 1.3 数据处理

使用SPSS 25和Excel 2019进行数据的统计分析,使用Origin 2021和GraphPad Prism 9制图。不同

处理间各磷组分差异利用*t*检验进行比较,各组间的相关性为Pearson相关性。

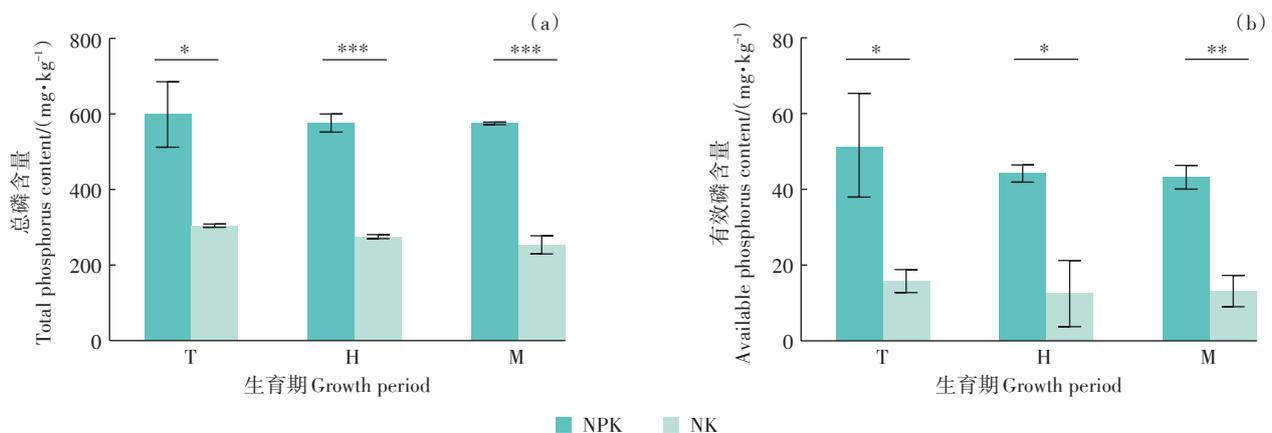
## 2 结果与分析

### 2.1 长期施肥对稻田土壤磷含量的影响

试验田经过40 a的长期施磷(稻麦季均施P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 60 kg·hm<sup>-2</sup>)后,NPK处理土壤总磷含量大幅提升,由试验起始的430.00 mg·kg<sup>-1</sup>显著提升到589.58 mg·kg<sup>-1</sup>,增加了37.11%,而NK处理总磷含量则显著下降到260.17 mg·kg<sup>-1</sup>,仅为NPK处理的44.13%(图1a),差异达到显著水平。土壤有效磷含量经过长期施磷后快速累积,高达43.83~51.67 mg·kg<sup>-1</sup>,相比NK处理增加216.41%~239.79%,比试验开始前显著增加了5~6倍,年平均增长率达到了11.41%。而NK处理的有效磷含量在13.17~16.33 mg·kg<sup>-1</sup>之间,为NPK处理的29.43%~31.60%,与NPK处理差异达到显著水平(图1b),与初始有效磷含量相比有所提高。

### 2.2 长期施磷对稻田土壤无机磷和有机磷含量及形态的影响

NPK处理土壤无机磷含量在279.40~338.34 mg·kg<sup>-1</sup>之间,在总磷含量中占比47.97%~55.92%(表1)。如图2a所示,水稻3个关键生育期都以Fe-P为主,其在无机磷中的相对含量占比为54.83%~63.78%;其次为Ca-P,相对含量占比为13.74%~24.52%。而NK处理土壤无机磷含量在99.98~120.55 mg·kg<sup>-1</sup>,占总磷含量的37.03%~38.97%,显著低于NPK处理,其形态也以Fe-P和Ca-P为主,相对含量分别是34.69%~46.14%和24.26%~38.55%。随着水稻的生长,相比



T: 分蘖期, H: 抽穗期, M: 成熟期; \*  $P < 0.05$ , \*\*  $P < 0.01$ , \*\*\*  $P < 0.001$ 。下同  
T: tillering stage, H: heading stage, M: maturity stage; \*  $P < 0.05$ , \*\*  $P < 0.01$ , \*\*\*  $P < 0.001$ . The same below

图1 2020年水稻不同生育期土壤总磷和有效磷含量

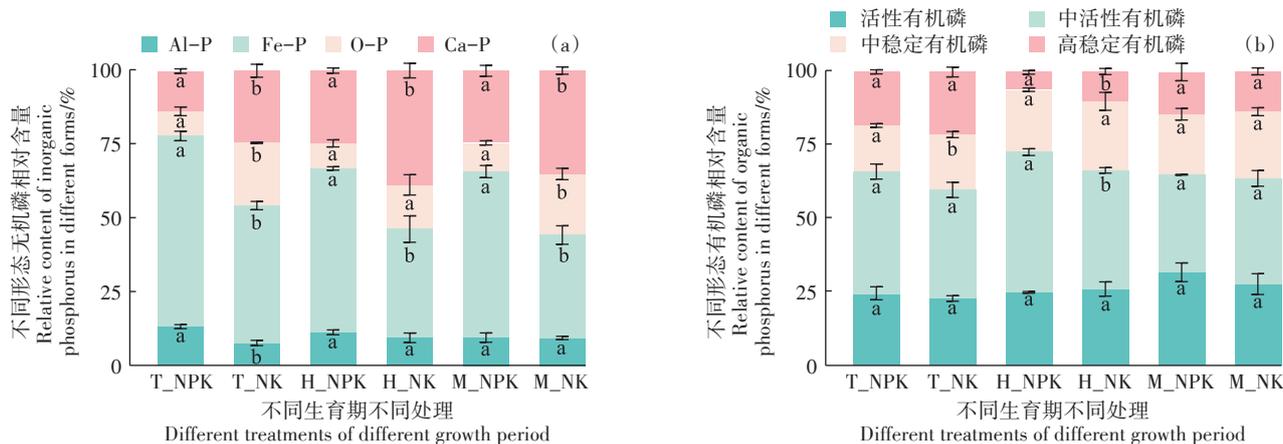
Figure 1 Total phosphorus and available phosphorus content in paddy soils at different rice growth stages in 2020

表1 水稻不同生育期土壤无机磷含量及形态分布( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )Table 1 Soil inorganic phosphorus content and speciation distribution at different rice growth stages( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

时期/Period	处理/Treatment	Al-P	Fe-P	O-P	Ca-P	总无机磷/Total inorganic phosphorus
分蘖期/Tillering stage	NPK	46.75a	215.79a	29.31a	46.50a	338.34a
	NK	9.71b	55.62b	25.97a	29.25b	120.55b
抽穗期/Heading stage	NPK	32.88a	153.21a	24.81a	68.50a	279.40a
	NK	10.25b	37.85b	15.65a	40.00b	103.75b
成熟期/Maturity stage	NPK	29.71a	163.77a	29.75a	72.00a	295.23a
	NK	9.71b	34.68b	20.78b	34.83b	99.98b

注:同列不同字母表示同一时期不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

Note: Different letters in the same column indicate significant differences between different treatments in the same period ( $P<0.05$ ). The same below.



不同字母表示相同时期不同处理间磷组分占比差异显著( $P<0.05$ )

Different letters represent significant difference in the proportion of phosphorus components between different treatments during the same period ( $P<0.05$ )

图2 水稻不同生育期不同形态无机磷和有机磷相对占比

Figure 2 The relative proportions of different forms of inorganic phosphorus and organic phosphorus at different rice growth stages

于分蘖期,抽穗期NPK处理土壤Fe-P和Al-P含量显著下降,Ca-P含量显著上升( $P<0.05$ ),NK处理表现为抽穗期Fe-P和O-P含量显著下降( $P<0.05$ ),Ca-P含量显著升高( $P<0.05$ ),两处理成熟期与抽穗期相比各无机磷组分含量变化不显著,表明水稻生育期的磷转化过程主要存在于其快速生长的分蘖期和抽穗期。NPK处理各形态无机磷含量均高于NK处理,分蘖期和抽穗期Al-P、Fe-P和Ca-P含量差异达到显著水平,成熟期4种无机磷含量均达到显著水平。不同无机磷含量占比中,NK处理的Fe-P含量占比显著低于NPK处理,而Ca-P和O-P含量占比要高于NPK处理,约占50%左右,Al-P含量占比总体差异不显著。

NPK处理有机磷含量为 $174.77\sim 253.82\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (表2),分蘖期显著高于NK处理,其他时期的处理差异不显著。两处理有机磷组分以中活性有机磷和活性有机磷为主,其相对含量分别达到 $33.07\%\sim 47.23\%$

和 $22.94\%\sim 31.82\%$ 。分蘖期NPK处理活性有机磷和中活性有机磷含量均显著高于NK处理( $P<0.05$ ),而抽穗期只有中活性有机磷差异显著( $P<0.05$ ),成熟期各组分有机磷差异均不显著。NPK处理分蘖期至抽穗期活性有机磷显著降低,中活性有机磷和中稳定有机磷略有降低,而高稳定有机磷由 $46.96\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降低至 $11.07\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,显著降低了 $76.40\%$ ( $P<0.001$ ),说明施磷处理在水稻快速生长期活性较高的有机磷被迅速转化吸收,同时也可能存在磷活化的过程。NK处理高稳定有机磷在水稻不同生育期有显著变化,抽穗期显著下降,成熟期又有所上升( $P<0.05$ ),活性和中活性有机磷相对含量只有轻微变化,表明不施磷处理可能依靠有机磷活化获取有效磷。与NPK相比,分蘖期和抽穗期NK处理的中活性有机磷占比较低,而高稳定有机磷相对含量高于NPK处理,其中抽穗期的处理差异显著( $P<0.05$ ,图2b)。

表2 水稻不同生育期土壤有机磷及其组分含量(mg·kg<sup>-1</sup>)

Table 2 Contents of organic phosphorus and its components in paddy soils at different rice growth stages(mg·kg<sup>-1</sup>)

时期 Period	处理 Treatment	活性有机磷 Active organic phosphorus	中度活性有机磷 Moderately active organic phosphorus	中稳定有机磷 Moderately stable organic phosphorus	高稳定有机磷 Highly stable organic phosphorus	总有机磷 Total organic phosphorus
分蘖期 Tillering stage	NPK	62.51a	104.64a	39.70a	46.96a	253.82a
	NK	44.23b	70.77b	36.55a	41.25a	192.80b
抽穗期 Heading stage	NPK	44.00a	82.56a	37.14a	11.07a	174.77a
	NK	41.41a	63.66b	37.08a	16.34a	158.49a
成熟期 Maturity stage	NPK	56.88a	59.11a	36.67a	26.07a	178.72a
	NK	49.14a	62.98a	40.36a	24.20a	176.67a

2.3 土壤磷转化酶活性

水稻3个关键生育期内土壤酸性磷酸酶活性相对稳定,NK处理酸性磷酸酶活性在水稻快速生长的分蘖期( $P<0.05$ )和抽穗期( $P<0.001$ )均显著高于NPK处理,成熟期高于NPK处理但差异不显著(图3),表明磷酸酶对有机磷的活化作用主要发生在分蘖期和抽穗期。

2.4 相关性分析

由图4可知,苏州试验田总磷含量与有效磷、各级无机磷和中活性有机磷显著正相关,有效磷与各级无机磷和中活性有机磷显著正相关,说明该地区土壤有效磷源主要是无机磷和有机磷中的中活性有机磷,其中Fe-P、Al-P和Ca-P与有效磷的相关性达极显著水平( $P<0.001$ ),是最主要的有效磷源。无机磷组分与活性、中活性有机磷之间相互也存在显著正相关关

系,说明各磷组分之间存在相互转化关系。中活性有机磷仅和Al-P、Fe-P显著正相关,表明中活性有机磷

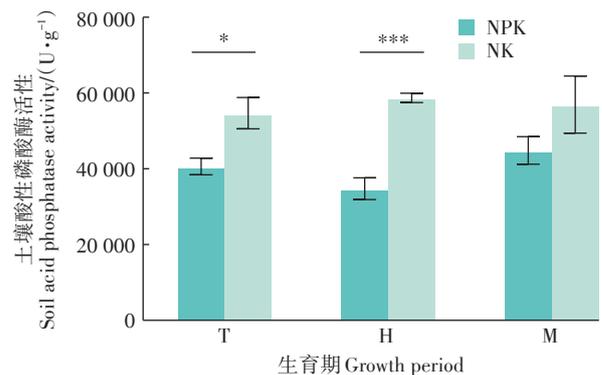


图3 水稻不同生育期土壤酸性磷酸酶活性

Figure 3 Soil acid phosphatase activity at different rice growth stages

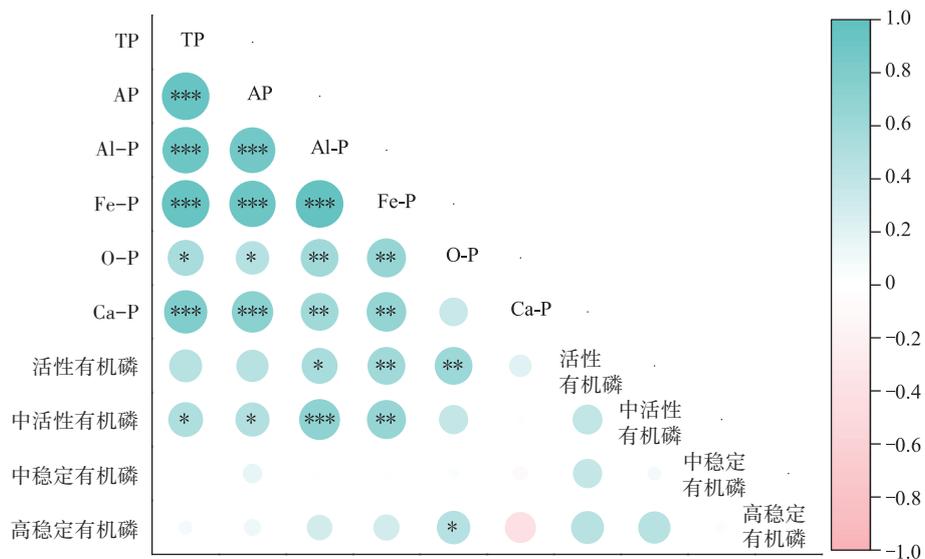


图4 各磷组分相关性分析

Figure 4 Correlation analysis of phosphorus components

主要向两者转化,活性有机磷则和 Al-P、Fe-P 和 O-P 显著相关。

### 2.5 长期施磷对水稻产量及作物吸磷量的影响

NPK 处理显著促进了水稻对磷的吸收,稻谷和秸秆磷含量均显著高于 NK 处理 ( $P < 0.05$ ),涨幅分别为 50.75% 和 235.29% (表 3)。NPK 处理的水稻植株磷累积量为  $30.78 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,是 NK 处理的 3.69 倍。而 NPK 处理磷肥吸收利用率为 37.4%,表明大部分磷被固定在土壤或流失到环境中。NK 处理的水稻产量显著低于 NPK 处理 ( $P < 0.05$ ),表明长期不施磷导致土壤磷库的亏缺已经影响了水稻的正常产量。

表 3 水稻植株磷含量及产量

Table 3 Phosphorus content and yield of rice plants

处理 Treatment	稻谷磷含量 Grain P content/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	秸秆磷含量 Straw P content/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	产量 Yield/ ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	作物吸磷量 P uptake by crops/( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )
NPK	3.00a	1.71a	6 794.65a	30.78a
NK	1.99b	0.51b	3 424.27b	8.33b

## 3 讨论

### 3.1 长期施磷对稻田土壤磷含量的影响

前人研究发现,长期施用磷肥使土壤总磷和有效磷含量增加<sup>[20]</sup>,且增幅随着施磷量的增加而加大<sup>[21]</sup>。本研究中对太湖流域黄泥土长期定位试验田的结果也同样显示长期施磷肥(NPK)导致土壤总磷和有效磷含量显著高于不施磷肥的土壤,长期施磷肥(稻麦季均为  $60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,以  $\text{P}_2\text{O}_5$  计)导致其稻季土壤平均有效磷含量增至  $46.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,平均年增长率达到 11.4%。鲁如坤<sup>[22]</sup>认为土壤有效磷含量达到  $25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时即能满足作物高产,而土壤有效磷达到  $50 \sim 70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时磷通过渗漏等途径流失风险加大<sup>[23]</sup>,而南方高产田块土壤有效磷高于  $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  就已经威胁到当地水体环境<sup>[24]</sup>,汪玉等<sup>[25]</sup>认为太湖流域典型农田的土壤有效磷阈值为  $30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,说明本试验田经过长期施磷后土壤磷流失风险急剧增加,对水环境的潜在影响较大。当前太湖流域稻麦轮作农田平均施磷量(以 P 计)为  $62.80 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,而磷平均随作物收获支出  $38.90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ <sup>[15]</sup>。杨坤<sup>[26]</sup>通过对太湖流域不同施磷量(稻麦季施磷量相同)对稻麦产量、籽粒吸磷量及磷肥利用效率等的影响研究认为,应当以  $75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  的施磷( $\text{P}_2\text{O}_5$ )量作为该区域磷肥的最高限量施用标准。潘根兴等<sup>[18]</sup>发现太湖地区黄泥土在连续 13 a 稻季不施磷,仅旱季施无机磷肥 ( $45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,

以  $\text{P}_2\text{O}_5$  计)的情况下,土壤总磷含量由 1987 年的  $490 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  降低到  $320 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,土壤磷库出现了耗竭现象。而本研究在连续 40 a 稻麦周年施磷  $55.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (稻麦季均  $60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,以  $\text{P}_2\text{O}_5$  计)的情况下,土壤磷库出现了显著的累积现象,表明当前稻季的磷用量还应当适当减少。王慎强等<sup>[16]</sup>研究认为在太湖流域水稻土壤磷库充裕的前提下,为有效降低磷流失带来的水环境风险,可以稻季不施磷;4 a 定位试验也证实稻季不施磷可在保证稻麦高产的前提下有效降低 10.5%~36.7% 的土壤有效磷含量,从而降低径流磷损失。具体施磷量还应统筹考虑麦季施肥情况而定,黄泥土土壤磷库降低至何种程度需要施用磷肥仍有待深入研究。

### 3.2 长期施磷对稻田土壤磷形态及有效性的影响

施磷肥可不同程度地增加各形态无机磷的含量及无机磷在总磷中的占比,这与以往的研究结果一致<sup>[21,27]</sup>。与不施磷相比,施磷主要增加 Al-P 和 Fe-P 的含量及占比,这与李中阳等<sup>[28]</sup>的试验结果一致,且 Fe-P 在含量与相对占比上都是主要的无机磷组分,这可能是由于本研究试验地的气候原因和弱酸性的供试土壤导致土壤中铁铝离子含量较高<sup>[29]</sup>,使磷肥施入土壤后会首先转化为 Fe-P 和 Al-P,其中部分 Al-P 也会继续转化为 Fe-P<sup>[30]</sup>,进而使其含量和占比都大幅增加。长期施磷也使 Ca-P 含量显著增加,但与不施磷相比其相对占比却有所下降,可能是因为 Ca-P 是无机磷中最容易被农作物吸收利用的组分<sup>[31]</sup>,其优先被作物吸收利用而导致其相对占比下降。施磷虽降低了 O-P 的相对占比但对其含量无显著影响,说明 O-P 相比其他无机磷更加稳定,施肥对其影响较小<sup>[27]</sup>。对于有机磷组分而言,施磷可使稻田分蘖期各组分有机磷增加,其中主要增加了中活性有机磷的含量及相对占比,这与前人的研究结果一致<sup>[13,32-34]</sup>。这主要是因为施磷增加了土壤微生物的活性从而增加了其固定作用进而导致有机磷含量上升。总体来看,施磷对稳定性有机磷的影响较小,其含量和相对占比的变化可能是因为微生物固定和磷酸酶或磷活化微生物的活化作用。

在土壤磷素循环中,各形态磷的相互转化及分布情况都不同程度地影响有效磷的含量<sup>[35]</sup>。土壤不同形态磷与有效磷相关性越显著,则认为该形态磷有效性越高,其相对有效性也越高<sup>[36]</sup>。本研究相关性分析结果显示苏州黄泥土试验田有效磷与各无机磷组分均呈显著正相关关系,说明施磷条件下土壤无机磷是

该区域有效磷的主要来源,其中Al-P、Fe-P和Ca-P与有效磷呈极显著正相关关系( $P<0.001$ ),说明Al-P、Fe-P和Ca-P是最主要的有效磷源,这与以往对红壤性稻田磷素有效性的研究结果一致<sup>[37]</sup>,可能是因为施磷大幅增加了黄泥土中Al-P和Fe-P的含量,进而增加了其相对有效性,而Ca-P虽增幅较小,但由于本研究弱酸性水稻土中 $H^+$ 促进了磷酸钙盐的溶解从而增加了其有效性<sup>[27]</sup>。O-P由于其较高的稳定性而表现出较低的有效性,但也有研究表明O-P也是酸性土壤潜在的有效磷源<sup>[38]</sup>。本研究土壤中活性有机磷与有效磷显著正相关,说明中活性有机磷可能是土壤磷酸酶等活化的主要有机磷组分,而不施磷处理的酸性磷酸酶活性在分蘖期和抽穗期均显著高于施磷处理,以及中活性有机磷与Fe-P和Al-P间的显著相关性可以支撑这一点,表明活化有机磷也是土壤有效磷的重要来源之一。

此外,不同生育期不同形态磷含量的变化也能间接说明其有效程度。与分蘖期相比,抽穗期长期施磷和不施磷处理的Fe-P含量分别下降了 $52.02\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $17.77\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,降幅高达29%和32%,而Ca-P含量上升,表明Fe-P不断地转化成Ca-P以供水稻吸收利用,Fe-P是黄泥土最主要的有效磷源。此外,抽穗期无论是长期施磷还是不施磷处理,活性有机磷和中活性有机磷含量与分蘖期相比均呈降低趋势,长期施磷处理显著降低了29.6%和21.1%,但其相对含量占比均呈现增加趋势,说明两者也是水稻的有效磷源。而两种处理中抽穗期高稳定有机磷的绝对含量和相对含量均明显低于分蘖期,说明此期间在水稻根系分泌物或土壤磷酸酶等的作用下发生了稳定性有机磷向活性有机磷甚至无机磷的转化。尤其是不施磷处理,40 a不施磷后土壤磷库(总磷含量)与试验开始相比下降了一半左右,而有效磷含量却增加,说明高稳定有机磷的活化起到了重要作用。成熟期中活性有机磷相对含量降低而高稳定有机磷相对含量上升,说明此期间过多的有效磷素再次被固定成稳定态磷,而其他微生物活动也可能导致活性较高的磷素之间的相互转化。

潘根兴等<sup>[18]</sup>的研究发现,太湖流域黄泥土在低量施磷水平下,有机肥配施不仅可提高水稻产量,而且其磷流失率也远低于单施化肥处理。王静等<sup>[39]</sup>的研究发现有机、无机肥配施不仅显著提高土壤有机磷含量,而且土壤磷酸酶活性及磷活化微生物丰度等也有显著提升。杨坤<sup>[26]</sup>的研究结果表明无机磷肥合理搭

配有有机肥施用显著提升了磷肥吸收利用率。因此,稻田施磷时,除了根据土壤磷素含量合理确定施磷量的同时,还应综合考虑采用有机肥替代(注意有机肥中的磷投入应计算在内)措施来增加土壤磷酸酶及磷活化微生物等的活性,从而提高磷肥利用率,降低磷流失风险。

## 4 结论

(1)长期施用无机磷肥显著增加了稻田土壤总磷和有效磷含量,其中主要增加了不同形态无机磷的含量。

(2)无机磷以Fe-P为主要成分,长期施磷显著增加了Al-P和Fe-P的相对含量,降低了O-P和Ca-P的相对含量;有机磷组分中中活性有机磷占比最高,施磷主要增加中活性有机磷的含量及占比。

(3)黄泥土稻田最主要的有效磷源是Al-P、Fe-P和Ca-P,中活性有机磷的转化也是稻田土壤有效磷的重要来源之一,尤其在长期不施磷情况下。

(4)长期施磷( $60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,以 $P_2O_5$ 计)使得黄泥土稻田磷库累积严重,有效磷含量已超环境风险阈值,因此应当合理降低磷肥施入量并适当以有机磷肥进行替代,以提高磷素利用率,降低磷流失风险。

## 参考文献:

- [1] 王淑英, 樊廷录, 丁宁平, 等. 黄土旱塬黑垆土长期肥料试验土壤磷素和磷肥效率的演变特征[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(7): 1038-1047. WANG S Y, FAN T L, DING N P, et al. Change characteristics of soil phosphorus and phosphorus fertilizer efficiency in black loessial soil of dryland in the Loess Plateau under long-term fertilization[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(7): 1038-1047.
- [2] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924. ZHANG F S, WANG J Q, ZHANG W F, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915-924.
- [3] 吴璐璐, 张水清, 黄绍敏, 等. 长期定位施肥对潮土磷素形态和有效性的影响[J]. 土壤通报, 2021, 52(2): 379-386. WU L L, ZHANG S Q, HUANG S M, et al. Effects of long-term fertilization on phosphorus forms and availability in fluvo-aquic soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52(2): 379-386.
- [4] MACDONALD G K, BENNETT E M, POTTER P A, et al. Agronomic phosphorus imbalances across the world's croplands[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 2011, 108(7): 3086-3091.
- [5] LIU X, SHENG H, JIANG S, et al. Intensification of phosphorus cycling in China since the 1600s[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 2016, 113(10): 2609-2614.
- [6] ALEWELL C, RINGEVAL B, BALLABIO C, et al. Global phosphorus

- shortage will be aggravated by soil erosion[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1):4546.
- [7] POWERS S M, BRUULSEMA T W, BURT T P, et al. Long-term accumulation and transport of anthropogenic phosphorus in three river basins[J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(5):353-356.
- [8] 汪洪, 宋书会, 张金尧, 等. 土壤磷形态组分分级及<sup>31</sup>P-NMR技术应用研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(2):512-523. WANG H, SONG S H, ZHANG J Y, et al. Research advance in soil phosphorus fractionations and their characterization by chemical sequential methods and <sup>31</sup>P-NMR techniques[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(2):512-523.
- [9] CHANG S C, JACKSON M L. Fractionation of soil phosphorus[J]. *Soil Science*, 1957, 84(2):133-144.
- [10] BOWMAN R A, COLE C V. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils[J]. *Soil Science*, 1978, 125(2):95-101.
- [11] 戚瑞生, 党廷辉, 杨绍琼, 等. 长期轮作与施肥对农田土壤磷素形态和吸持特性的影响[J]. 土壤学报, 2012, 49(6):1136-1146. QI R S, DANG T H, YANG S Q, et al. Forms of soil phosphorus and P adsorption in soils under long-term crop rotation and fertilization systems[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(6):1136-1146.
- [12] 施林林, 陆长婴, 王海候, 等. 水分管理对太湖地区水稻土无机磷转化的影响[J]. 江西农业学报, 2012, 24(8):1-5, 9. SHI L L, LU C Y, WANG H H, et al. Effect of water management on transformation of inorganic phosphorus in paddy soil in Taihu Lake district[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2012, 24(8):1-5, 9.
- [13] 赵吴琼, 李菊梅, 徐明岗, 等. 长期不同施肥下灰漠土有机磷组分的变化[J]. 生态环境, 2007, 16(2):569-572. ZHAO W Q, LI J M, XU M G, et al. Changes of organic phosphorus components in grey desert soil under long-term different fertilization[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(2):569-572.
- [14] GAIND S, SINGH Y V. Soil organic phosphorus fractions in response to long-term fertilization with composted manures under rice-wheat cropping system[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2016, 39(9):1336-1347.
- [15] 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 Y, ZHAO X, WANG L, 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.
- [16] 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肥初探[J]. 土壤, 2012, 44(1):158-162. WANG S Q, ZHAO X, XING G X, et al. Phosphorus pool in paddy soil and scientific fertilization in typical areas of Taihu Lake watershed, China[J]. *Soils*, 2012, 44(1):158-162.
- [17] 邱多生, 李恋卿, 焦少俊, 等. 长期不同施肥下太湖地区黄泥土肥力的变化[J]. 土壤肥料, 2005(4):28-32. QIU D S, LI L Q, JIAO S J, et al. Change of soil fertility under long-term different fertilization practices in a paddy soil from the Tai Lake region[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2005(4):28-32.
- [18] 潘根兴, 焦少俊, 李恋卿, 等. 低施磷水平下不同施肥对太湖地区黄泥土磷迁移性的影响[J]. 环境科学, 2003, 24(3):91-95. PAN G X, JIAO S J, LI L Q, et al. Effect of long-term fertilization practices on mobility of phosphorus in a Huangnitu paddy soil receiving low P input in the Taihu Lake region, Jiangsu Province[J]. *Environmental Science*, 2003, 24(3):91-95.
- [19] 何竹, 许琛, 周贝贝, 等. 长期不施磷对稻田温室气体排放的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(3):942-950. HE Z, XU C, ZHOU B B, et al. Effects of long-term fertilization without phosphorus on greenhouse gas emissions from paddy fields[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(3):942-950.
- [20] 黄晶. 基于几个长期定位试验的长江上、中游水稻土磷素肥力与磷肥肥效的演变规律[D]. 长沙:湖南农业大学, 2017. HUANG J. Evolution of soil phosphorus fertility and phosphate fertilizer efficiency of paddy soils in the upper and middle reaches of the Yangtze River based on several stationary experiments[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2017.
- [21] 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):318-324. WANG H L, ZHANG M, LIU Z G, et al. Effects of different phosphorus application levels on the inorganic phosphorus fraction under multi-year location experiment[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(5):318-324.
- [22] 鲁如坤. 土壤磷素水平和水体环境保护[J]. 磷肥与复肥, 2003(1):4-8. LU R K. The phosphorus level of soil and environmental protection of water body[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2003(1):4-8.
- [23] 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 W B, WANG Y, WANG S Q, 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.
- [24] HIGGS B, JOHNSTON A E, SALTER J L, et al. Some aspects of achieving sustainable phosphorus use in agriculture[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29(1):80-87.
- [25] 汪玉, 袁佳慧, 陈浩, 等. 太湖流域典型农田土壤磷库演变特征及环境风险预测[J/OL]. 土壤学报:1-11[2022-02-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20210809.1259.004.html>. WANG Y, YUAN J H, CHEN H, et al. Soil phosphorus pool evolution and environmental risk prediction of paddy soil in the Taihu lake region[J]. *Acta Pedologica Sinica*:1-11[2022-02-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20210809.1259.004.html>.
- [26] 杨坤. 磷肥减施增效对太湖流域稻麦产量及磷肥利用率的影响[D]. 南京:南京农业大学, 2019. YANG K. Effect of optimized management of phosphate fertilizer on rice-wheat yield and phosphate use efficiency in Taihu Lake basin[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019.
- [27] 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(中英文), 2020, 28(7):960-968. WANG F, LI Q H, LIN C, et al. Yellow-mud paddy soil pro-

- ductivity and phosphorus fractions under long-term different phosphorus supply levels in southern China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(7):960-968.
- [28] 李中阳, 徐明岗, 李菊梅, 等. 长期施用化肥有机肥下我国典型土壤无机磷的变化特征[J]. 土壤通报, 2010, 41(6):1434-1439. LI Z Y, XU M G, LI J M, et al. Changes of inorganic phosphorus in typical soils of China under long-term combined application of chemical and organic fertilizer[J]. *Journal of Soil Science*, 2010, 41(6):1434-1439.
- [29] 徐仁扣, 季国亮. pH对酸性土壤中铝的溶出和铝离子形态分布的影响[J]. 土壤学报, 1998(2):162-171. XU R K, JI G L. Influence of pH on dissolution of aluminum in acid soils and the distribution of aluminum ion species[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1998(2):162-171.
- [30] 邱亚群. 湖南典型土壤磷的吸附解吸机制及磷流失控制研究[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2012. QIU Y Q. A study on characteristics of phosphate adsorption-desorption and the control of phosphorus loss under typical soils in Hunan[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2012.
- [31] 陈凤, 王晓双, 甘国渝, 等. 长期施用磷肥对稻-油轮作土壤磷组分及微生物多样性的影响[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(1):168-178. CHEN F, WANG X S, GAN G Y, et al. Effects of long-term application of phosphorus fertilizer on soil phosphorus fractions and microbial diversity in rice-rapeseed rotation[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2021, 40(1):168-178.
- [32] ZHANG Y S, WERNER W, SCHERER H W, et al. Effect of organic manure on organic phosphorus fractions in two paddy soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1994, 17(1):64-68.
- [33] 冯跃华, 张杨珠, 黄运湘. 湖南稻田土壤有机磷组分的施磷效应、季节变化及生物有效性研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(3):634-641. FENG Y H, ZHANG Y Z, HUANG Y X. Effects of phosphate on organic phosphorus fractions and their seasonal variations and bioavailabilities of paddy soils in Hunan Province[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2010, 16(3):634-641.
- [34] 徐阳春, 沈其荣, 茆泽圣. 长期施用有机肥对土壤及不同粒径中有机磷含量与分配的影响[J]. 土壤学报, 2003(4):593-598. XU Y C, SHEN Q R, MAO Z S. Influence of long-term fertilization on the contents and distributions of forms of organic P in soil and soil particle sizes[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003(4):593-598.
- [35] 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. ZHANG L, WU N, WU Y, et al. Soil phosphorus form and fractionation scheme: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(7):1775-1782.
- [36] 吕家珑, 张一平, 陶国树, 等. 23年肥料定位试验0-100 cm土壤剖面中各形态磷之间的关系研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3):48-50. LÜ J L, ZHANG Y P, TAO G S, et al. Relationship among phosphorus forms in 0-100 cm soil profiles after 23 year application of fertilizers[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(3):48-50.
- [37] 龚松贵, 王兴祥, 张桃林, 等. 低分子量有机酸对红壤无机磷活化的作用[J]. 土壤学报, 2010, 47(4):692-697. GONG S G, WANG X X, ZHANG T L, et al. Release of inorganic phosphorus from red soils induced by low molecular weight organic acids[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(4):692-697.
- [38] 雷宏军, 刘鑫, 朱端卫. 酸性土壤磷分级新方法建立与生物学评价[J]. 土壤学报, 2007(5):860-866. LEI H J, LIU X, ZHU D W. Development of a new phosphorus fractionation scheme in acid soils and biological evaluation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007(5):860-866.
- [39] 王静, 王磊, 张爱君, 等. 长期增施有机肥对土壤不同组分有机磷含量及微生物丰度的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(9):1161-1168. WANG J, WANG L, ZHANG A J, et al. Effects of long-term organic fertilization on the content of soil organic phosphorus fractions and abundance of soil microorganism[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(9):1161-1168.