

DOI: 10.11766/trxb202108060406

杨娇, 信秀丽, 钟新月, 丁世杰, 张先凤, 任国翠, 朱安宁. 长期不同施肥对潮土磷素吸附特征的影响[J]. 土壤学报, 2023, 60(4): 1047–1057.

YANG Jiao, XIN Xiuli, ZHONG Xinyue, DING Shijie, ZHANG Xianfeng, REN Guocui, ZHU Anning. Effects of Long-term Fertilization on Phosphorus Adsorption Characteristics of Fluvo-aquic Soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(4): 1047–1057.

长期不同施肥对潮土磷素吸附特征的影响*

杨 娇^{1, 2}, 信秀丽^{1, 2}, 钟新月¹, 丁世杰^{1, 2}, 张先凤^{1, 2}, 任国翠^{1, 2},
朱安宁^{1, 2†}

(1. 土壤与农业可持续发展国家重点实验室/封丘农业生态实验站(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 土壤磷素是限制潮土生产力提高的重要营养元素。研究不同施肥处理磷素的吸附特征及其与土壤理化性质的关系, 可以为提高潮土磷素有效性和合理施肥提供科学依据。本研究基于封丘长期定位施肥试验, 选用七种处理: 不施肥(CK)、氮钾施肥(NK)、氮磷施肥(NP)、磷钾施肥(PK)、氮磷钾施肥(NPK)、1/2 有机肥+1/2 氮磷钾(1/2OM)和有机肥(OM), 通过测定土壤理化性质和磷素吸附量, 利用 Langmuir 和 Freundlich 等温吸附模型拟合了吸附曲线, 并结合方程计算了最大吸附量(Q_m)、亲和力常数(K)、最大缓冲能力(MBC)、吸附饱和强度(DPS)、Freundlich 吸附常数(a)和吸附指数(b); 运用相关分析和冗余分析(RDA)探讨了影响土壤磷素吸附特征变化的主要因素。结果表明: 随着平衡溶液磷浓度的增加, 不同施肥处理的磷素吸附量均表现出先快速增加, 后缓慢增加的趋势。与 CK 和 NK 处理相比, NP、PK 和 NPK 处理的磷素吸附能力增强, Q_m 和 MBC 分别增加了 15.62%~23.60%和 2.94%~23.46%; 而 1/2OM 和 OM 处理的磷素吸附能力下降, K 和 MBC 分别降低了 39.60%~49.57%和 36.09%~56.15%。相关分析和 RDA 结果表明: 有机质(SOM)、pH、游离氧化铝(Al_d)和 C/P 是影响潮土磷素吸附特征的主要因素。此外, 1/2OM 处理的 DPS 值相较于 OM 处理降低了 30.92%。长期有机无机肥料配施可以增加有机质含量, 降低磷素吸附能力, 且相较于单施有机肥可以减少磷素流失风险。

关键词: 磷素吸附; 长期施肥; 潮土; 土壤性质

中图分类号: S158; S153 **文献标志码:** A

Effects of Long-term Fertilization on Phosphorus Adsorption Characteristics of Fluvo-aquic Soils

YANG Jiao^{1, 2}, XIN Xiuli^{1, 2}, ZHONG Xinyue¹, DING Shijie^{1, 2}, ZHANG Xianfeng^{1, 2}, REN Guocui^{1, 2}, ZHU Anning^{1, 2†}

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture/State Experimental Station of Agro-Ecosystem in Fengqiu, Institute of Soil

* 国家自然科学基金项目(41877023)、国家重点研发计划项目(2016YFD0200304, 2018YFD0200601)和江苏省农业科技自主创新基金项目(CX(20)2003)共同资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41877023), National Key Research and Development Projects (Nos. 2016YFD0200304, 2018YFD0200601) and Jiangsu Agriculture Science and Technology Innovation Fund (No. CX(20)2003)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: anzhu@issas.ac.cn

作者简介: 杨 娇(1996—), 女, 河南平顶山人, 博士, 主要从事土壤地力培育。E-mail: yangjiao@issas.ac.cn

收稿日期: 2021-08-06; 收到修改稿日期: 2021-10-31; 网络首发日期(www.cnki.net): 2022-04-26

Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: 【Objective】 The availability of soil phosphorus (P) usually limits the productivity of fluvo-aquic soil. In order to provide a scientific basis for improving P use efficiency and rational fertilization in fluvo-aquic soils, the adsorption characteristics of P and its relationship with soil properties under long-term fertilization were studied. 【Method】 We selected seven treatments: no fertilizer (CK), no P fertilizer (NK), no potassium fertilizer (NP), no nitrogen fertilizer (PK), mineral fertilizer NPK (NPK), half compost plus half mineral fertilizer NPK (1/2OM) and compost alone (OM) in a long-term fertilization experiment at Fengqiu, to determine soil properties and P adsorption capacity. The Langmuir and Freundlich equations were used to fit the isothermal adsorption curves. Furthermore, the maximum adsorption capacity (Q_m), adsorption constant (K), maximum buffer capacity (MBC), P adsorption saturation (DPS), Freundlich adsorption constant (a) and adsorption index (b) were calculated. Correlation analysis and redundancy analysis (RDA) were used to explore the vital factors affecting the soil P adsorption characteristics. 【Result】 The results showed that P adsorption in fluvo-aquic soil fitted both the Langmuir ($R^2 = 0.80$) and Freundlich ($R^2 = 0.89$) isotherms. With the increase of P concentration in the equilibrium solution, P adsorption capacity rapidly increased at first and then slowly afterwards. Compared with CK and NK, Q_m and MBC of NP, PK and NPK increased by 15.62%–23.60% and 2.94%–23.46%, respectively, however, K and MBC of 1/2OM and OM reduced by 39.60%–49.57% and 36.09%–56.15%, respectively. Correlation analysis and RDA results showed that organic matter (SOM), pH, free Al oxides (Al_d) and C/P were the main factors affecting P adsorption characteristics of fluvo-aquic soil. In addition, the DPS of 1/2OM was 30.92% lower than that of OM. 【Conclusion】 Long-term combined NPK fertilizer with compost can increase the content of SOM, reduce P adsorption capacity and reduce the risk of P loss compared with OM.

Key words: Phosphorus adsorption ; Long-term fertilization ; Fluvo-aquic soil ; Soil properties

磷是作物生长必需的大量营养元素之一，同时也是生物体内许多重要有机化合物（如：磷脂、核酸、ATP 酶等）的关键组成成分，直接参与作物的新陈代谢过程，在改善农产品品质、提高作物产量等方面具有重要作用^[1]。由于磷素在土壤中固定性强，移动性弱，导致磷肥当季利用率仅有 15%~20%。因此，为满足作物需求以及增加粮食产量，我国磷肥的施用量在过去的三十年间增加了两倍^[2]。但是作物产量并不会随着施磷量的增加而一直增加，当土壤有效磷含量超过农学阈值时，继续施用磷肥并不会显著提高作物产量^[3]，反而会增加磷素淋失的风险，造成水体富营养化等环境问题^[4]。此外，磷矿石是不可再生资源，按照目前的消耗速度，在未来的 50~400 年间，磷矿资源将会枯竭^[1]。因此，如何减少土壤对磷素的吸附固定作用，提高磷肥利用率以及磷素有效性一直是土壤磷素研究领域非常重要的研究热点。

磷素吸附过程是其在土壤中被固定的主要机理之一，直接影响磷素有效性。研究表明，长期不同施肥处理会影响土壤磷素的吸附特征^[5-7]。刘彦伶等^[7]研究了长期不同施肥处理下黄壤磷素吸附解吸特

征，结果显示，施肥模式对土壤磷素吸附解吸特征的影响大于施磷量的影响，长期施用有机肥可以降低土壤对磷素的吸附，提高磷素有效性。也有研究表明，相较于长期施用化肥，施用有机肥提高了黑土对磷素的吸附能力^[8]。由此可见，受土壤类型的影响，施肥对土壤磷素吸附特征影响的研究结果不尽相同。此外，长期不同施肥处理也会对土壤理化性质产生重要影响。比如施用有机肥可以显著提高石灰性土壤有机质含量，降低土壤 pH^[9]；施用无机肥可以增加土壤铁铝氧化物的含量^[10]等。进一步研究发现，pH、速效磷、有机质、铁铝氧化物、土壤黏粒含量等土壤理化性质会对磷素吸附产生不同程度的影响^[11-16]。

黄淮海平原是我国高度集约化农区和重要粮食主产区，现有耕地 $2.44 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ，约占全国的 15.9%，主要种植模式是冬小麦-夏玉米一年两熟轮作制，小麦和玉米年产量分别占全国总产量的 70% 和 30% 左右，在中国粮食安全战略中具有举足轻重的地位^[17]。潮土作为黄淮海平原最主要的农业土壤，磷素是限制其生产力提高的重要因子之一^[18]。前期研究表明，长期施用磷肥可以显著提高潮土全磷和速效磷

含量^[19]，但对于长期不同施肥处理下潮土磷素吸附特征以及定量分析土壤理化性质对磷素吸附影响的研究相对较少。

因此，本文以黄淮海平原典型潮土为研究对象，借助封丘长期定位施肥试验平台，研究长期不同施肥 25 年后的潮土磷素吸附特征，并采用相关分析和冗余分析定量研究土壤性质对磷吸附的影响，以期为潮土制定合理的施肥方案和提高磷肥有效性提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

本研究基于黄淮海平原典型潮土区的长期定位施肥试验平台开展，该试验位于河南省封丘县中国科学院封丘农田生态实验站内(35°00'N, 114°24'E)。该地区的气候类型属于典型的半干旱半湿润的暖温带大陆性季风气候，多年平均降雨量为 615 mm，主要集中于 7—8 月份，年均气温为 14.2℃，月均最低气温出现在 1 月份，为 -2.97℃，月均最高气温出现在 7 月份，为 28.7℃，无霜期 220 d 左右。土壤类型主要是黄河冲积物发育形成的典型潮土，耕层土壤质地为砂壤土(砂粒 52%、粉粒 33%和黏粒 15%)。农作物种植制度采用黄淮海平原典型的冬小麦-夏玉米一年两熟制。

1.2 试验设计

长期定位施肥试验开始于 1989 年秋季，在试验前连续匀地三年，不施用任何肥料。试验开始前耕层(0~20 cm)土壤的基础理化性质为：有机质 5.83 g·kg⁻¹、全氮 0.45 g·kg⁻¹、全磷 0.50 g·kg⁻¹、全钾 18.60 g·kg⁻¹、速效氮 9.51 mg·kg⁻¹、速效磷 1.93 mg·kg⁻¹、速效钾 78.8 mg·kg⁻¹、pH 为 8.65。

试验采用随机区组设计，共设 7 个处理：不施肥(CK)、氮钾施肥(NK)、氮磷施肥(NP)、磷钾施肥(PK)、氮磷钾施肥(NPK)、1/2 有机肥+1/2 氮磷钾(1/2OM)和有机肥(OM)，每个处理设 4 组重复，共 28 个小区，小区面积为 9.5×5 m²。小麦季和玉米季氮肥(以 N 计)和钾肥(以 K₂O 计)施用 150 kg·hm⁻²；磷肥(以 P₂O₅ 计)分别施用 75 kg·hm⁻² 和 60 kg·hm⁻²。供试化肥：氮肥为尿素；磷肥为过磷酸钙；钾肥为硫酸钾。供试有机肥是由秸秆、大

豆饼和棉籽饼以 100:45:40 的比例混合均匀，发酵两个月而成。有机肥在施用之前测定其 N、P、K 含量，以等氮量为标准，磷钾不足的部分由磷肥和钾肥补足。磷肥和钾肥只用做基肥，而氮肥采用基肥+追肥的施肥方式，小麦季和玉米季氮肥的基追比分别为 2:3 和 3:2。

1.3 土壤样品采集与分析

玉米收获完成后，按照五点采样法在每个小区采集耕层土壤(0~20 cm)混合样品，风干后挑出根系和石砾等杂质，根据分析项目需要磨碎过筛。土壤理化性质测定方法如下：土壤全磷采用 H₂SO₄-HClO₄ 消煮，钼锑抗比色法测定；土壤速效磷采用 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 浸提，钼锑抗比色法测定；土壤有机质含量采用重铬酸钾氧化—外加加热法测定；土壤 pH 采用土水比 1:1 测定；土壤碳酸钙采用容量滴定法测定；土壤游离铁铝氧化物采用连二亚硫酸钠-柠檬酸钠-碳酸氢钠(DCB)浸提，ICP-OES 测定。

磷素等温吸附实验^[20]：称取过 2 mm 筛的风干土样 2.50 g 于 100 mL 离心管中，加入 30 mL 含磷量分别为 0、3、5、7、9、12、18、24、30、40、50 mg·L⁻¹ 的溶液(0.01 mol·L⁻¹ KCl 配制定容)。为防止微生物活动，在每个离心管内加入 3 滴氯仿，于 25℃ 恒温振荡 24 h，振荡速率为 180 r·min⁻¹。振荡结束后，以 3 000 r·min⁻¹ 的转速离心 10 min，采用钼锑抗比色法测定上清液中的磷含量即为平衡溶液中的磷浓度。初始溶液磷浓度与平衡溶液磷浓度之差即为土壤磷素吸附量。以平衡溶液磷浓度为横坐标，土壤磷吸附量为纵坐标拟合磷等温吸附曲线。

1.4 磷素等温吸附模型及参数计算

目前，采用等温吸附模型(Langmuir 和 Freundlich 模型)模拟磷素吸附行为是研究磷素吸附特征最常用的方法，同时还可以获得一些吸附参数来评价土壤胶体对磷素的吸附能力^[21-24]。

Langmuir 等温吸附方程：

$$\frac{C}{Q} = \frac{1}{K \times Q_m} + \frac{C}{Q_m} \quad (1)$$

式中， C 为平衡溶液磷浓度(mg·L⁻¹)； Q 为土壤磷吸附量(mg·kg⁻¹)； K 为吸附亲和力常数； Q_m 为土壤磷最大吸附量(mg·kg⁻¹)。

依据 Langmuir 模型可以进一步计算得到磷素吸附参数, 计算公式如下:

$$\text{MBC} = K \times Q_m \quad (2)$$

$$\text{DPS} = \text{Olsen-P} / Q_m \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{AE} = Q/Q_0 \times 100\% \quad (4)$$

式中, MBC 为土壤磷最大缓冲容量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); DPS 为磷吸附饱和度 (%); Olsen-P 为土壤速效磷含量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); AE 为土壤磷吸附率 (%); Q_0 为初始溶液磷浓度 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

Freundlich 等温吸附方程:

$$Q = aC^b \quad (5)$$

式中, a 为 Freundlich 吸附常数, b 为吸附指数。

1.5 数据统计分析

采用 Microsoft Excel2019 进行数据计算与处理, SPSS23.0 进行单因素方差分析和相关分析, Origin 9.0 进行图形绘制。其中均值多重比较采用 Duncan 法进行显著性检验, 相关分析采用 Spearman 双尾检验结果, 显著性水平设定为 $P=0.05$ 。

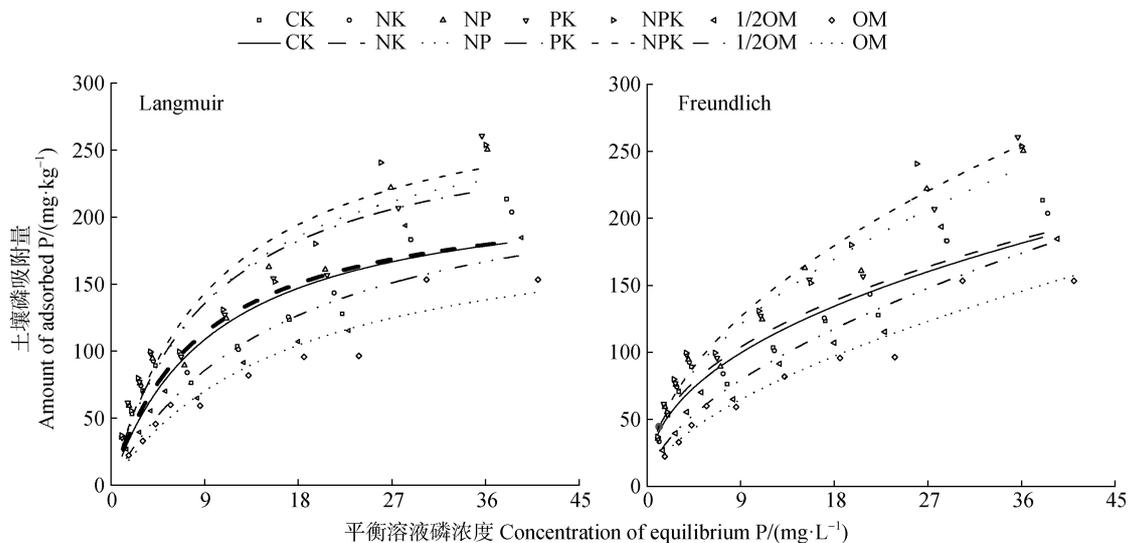
采用 R 语言中的 vegan 包进行冗余分析 (RDA), 以建立并展示土壤性质和吸附参数之间的关系。采

用 999 次蒙特卡罗置换检验进行全模型和各约束轴的显著性检验, “vif.cca ()” 函数用于判断解释变量 (土壤性质) 的共线性程度, “envfit ()” 函数检验解释变量的显著性。最后提取物种和解释变量的排序坐标, 采用 Origin 9.0 进行 RDA 绘图。

2 结果

2.1 长期不同施肥处理下土壤磷素的吸附特征

通过拟合等温吸附曲线, 对磷素吸附特征进行研究。如图 1 所示, 不同施肥处理的磷素等温吸附曲线呈现出相似的变化趋势, 即随着平衡溶液磷浓度的增加, 磷吸附量先快速增加, 后缓慢增加。与 CK 和 NK 处理相比, 在相同的平衡溶液磷浓度下, 1/2OM 和 OM 处理具有较低的土壤磷吸附量, 而 NP、PK 和 NPK 处理的土壤磷吸附量较高。土壤磷吸附率变化如图 2 所示, 在外源磷添加浓度为 $0\sim 9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 随着添加磷浓度的增加, 磷吸附率呈现出急剧下降的趋势, 此时, 1/2OM 和 OM 处理的磷吸附率为 $34.39\%\sim 47.21\%$, 而其余 5 种处理的磷吸附率达到了 $51.12\%\sim 65.40\%$; 当外源磷添加浓度为 $9\sim 30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 磷吸附率开始缓慢降低; 当磷添加浓度大于 $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 磷吸附率逐渐趋于稳定。



注: CK-不施肥、NK-氮钾施肥、NP-氮磷施肥、PK-磷钾施肥、NPK-氮磷钾施肥、1/2OM-1/2 有机肥+1/2 氮磷钾、OM-有机肥。下同。Note: CK-no fertilizer, NK-no P fertilizer, NP-no potassium fertilizer, PK-no nitrogen fertilizer, NPK-mineral fertilizer NPK, 1/2OM-half compost plus half mineral fertilizer NPK, OM-compost alone. The same below.

图 1 长期不同施肥处理磷吸附等温线

Fig. 1 Phosphorus adsorption isotherms under different long-term fertilization treatments

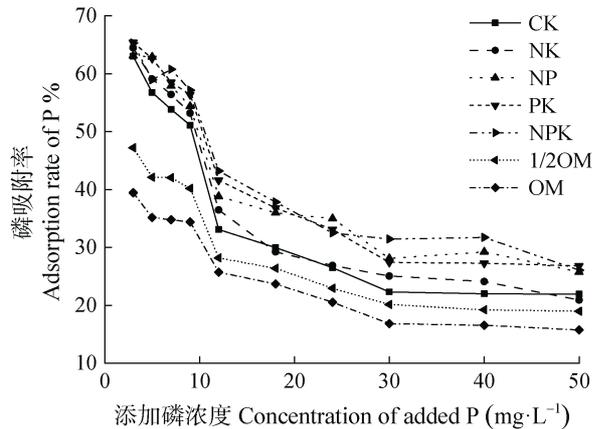


图 2 土壤磷吸附率曲线

Fig. 2 Dynamic changes of soil phosphorus adsorption rate

此外，通过评价吸附参数，可以更好地量化不同施肥处理对磷素吸附特征的影响。本研究选用 Langmuir 和 Freundlich 等温吸附方程拟合各处理平衡溶液磷浓度和土壤磷吸附量之间的关系，并通过计算得到磷素等温吸附参数。如表 1 所示，Langmuir 和 Freundlich 等温吸附方程均可以很好地拟合土壤磷素吸附过程。Langmuir 拟合的决定系数 R^2 在 0.80~0.90 之间，Freundlich 拟合的 R^2 在 0.89~0.96 之间，表明 Freundlich 模型可以更好地模拟潮土磷素吸附行为。

各个施肥处理的等温吸附参数如表 2 所示。在 Freundlich 模型中，参数 a 的大小表示吸附程度。

表 1 长期不同施肥处理磷素等温吸附方程

Table 1 Isothermal adsorption equation of different long-term fertilization treatments

处理 Treatment	Langmuir		Freundlich	
	等温吸附方程		等温吸附方程	
	Adsorption isotherm equation	R^2	Adsorption isotherm equation	R^2
CK	$C/Q=0.0044C+0.0433$	0.84	$\lg Q=1.5842+0.4334\lg C$	0.92
NK	$C/Q=0.0045C+0.0387$	0.90	$\lg Q=1.6211+0.4144\lg C$	0.89
NP	$C/Q=0.0034C+0.0358$	0.89	$\lg Q=1.6175+0.4871\lg C$	0.95
PK	$C/Q=0.0036C+0.0340$	0.88	$\lg Q=1.6337+0.4726\lg C$	0.94
NPK	$C/Q=0.0033C+0.0332$	0.90	$\lg Q=1.6203+0.5050\lg C$	0.95
1/2OM	$C/Q=0.0041C+0.0683$	0.80	$\lg Q=1.3594+0.5661\lg C$	0.94
OM	$C/Q=0.0049C+0.0843$	0.86	$\lg Q=1.2531+0.5846\lg C$	0.96

表 2 长期不同施肥处理磷素等温吸附参数

Table 2 Isothermal adsorption parameters of different long-term fertilization treatments

处理 Treatment	最大吸附量	亲和力常数	最大缓冲容量	磷吸附饱和度	a	b
	Maximum	Adsorption	Max buffering	Phosphorus sorption		
	adsorption capacity	constant	capacity	saturation		
	$Q_m/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	K	MBC/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	DPS/%		
CK	229.5±7.7 b	0.10±0.11 b	23.05±0.39 d	0.54±0.04 e	38.37±0.67 a	0.43±0.00 cd
NK	236.6±16.9 b	0.12±0.01 a	27.08±0.58 c	0.58±0.04 e	42.77±3.07 a	0.41±0.02 d
NP	289.1±9.8 a	0.10±0.00 b	27.90±0.47 bc	2.41±0.26 d	40.87±0.67 a	0.49±0.00 b
PK	280.4±2.7 a	0.11±0.00 b	29.42±0.95 ab	7.32±0.02 a	43.02±0.32 a	0.47±0.00 bc
NPK	300.4±7.8 a	0.10±0.01 b	30.12±0.94 a	2.11±0.06 d	35.57±7.80 a	0.50±0.02 b
1/2OM	244.7±10.4 b	0.06±0.01 c	14.73±0.88 e	4.09±0.18 c	22.89±1.49 b	0.57±0.02 a
OM	204.3±4.1 c	0.06±0.00 c	11.87±0.29 f	5.91±0.21 b	17.92±1.35 b	0.59±0.01 a

注：同列不同字母表示不同施肥处理间差异显著 ($P<0.05$)，下同。Note: The different letters within a column indicate a significant difference ($P<0.05$) between treatments. The same as below.

1/2OM 和 OM 处理的 a 值低于其余各处理 ($P<0.05$)。其中以 OM 处理的 a 值最小, 为 17.92, PK 处理的 a 值最大, 为 43.02。参数 b 反映了吸附质吸附位点的能量分布特征^[13]。本研究的 7 个处理中, b 值在 0.408~0.585 之间, 均小于 1, 这表明磷吸附位点在土壤胶体上的分布具有异质性, 土壤对磷的吸附呈现非线性趋势。此外, Langmuir 模型还可以拟合出 Q_m 、 K 、MBC 和 DPS 四个吸附特征参数。

Q_m 是土壤磷库容量的标志, 反映了土壤磷素吸附点位的多少^[11]。各处理的 Q_m 值在 204.3~300.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间。与 CK 和 NK 处理相比, NP、PK 和 NPK 处理的 Q_m 值增加了 15.62%~23.60% ($P<0.05$), OM 处理的 Q_m 值降低了 11.00%~13.68% ($P<0.05$), 而 1/2OM 处理的 Q_m 值没有显著变化。

K 是反映土壤胶体对磷酸根离子吸附亲和力高低的指标。 K 值越大, 表明吸附作用越强, 供磷能力越弱^[25]。此外, K 也表示土壤磷素吸附反应的自发程度, $K>0$ 表明吸附反应在常温下是自发进行的^[26]。本研究中, 7 种处理的 K 值在 0.06~0.12 之间, 这表明各处理的磷素吸附反应均可以在常温下自发进行。相较于 CK 和 NK 处理, 1/2OM 和 OM 处理的 K 值降低了 39.60%~49.57% ($P<0.05$)。CK 处理的 K 值与 NP、PK 和 NPK 处理无显著性差异。然而, NK 处理的 K 值分别较 NP、PK 和 NPK 处理增加了 16.26%、9.06% 和 12.94% ($P<0.05$)。

MBC 是表示供磷特性的综合指标, 同时反映了吸附容量和吸附强度两个因子^[11]。MBC 越大, 表明土壤贮存磷的能力越强。相较于 CK 和 NK 处理,

NP、PK 和 NPK 处理的 MBC 增加了 2.94%~23.46%, 并以 NPK 处理的增幅最大, 而 1/2OM 和 OM 处理的 MBC 降低了 36.09%~56.15% ($P<0.05$)。

DPS 是评价土壤磷素流失风险的指标, DPS 越大, 土壤胶体对磷素的吸附作用越低, 磷素越易从土壤固相迁移至液相, 导致土壤水溶态磷含量增加, 同时磷素流失风险升高^[27]。本研究中, CK 处理的 DPS 最低, PK 处理的 DPS 最高。1/2OM 处理的 DPS 值相较于 OM 处理降低了 30.92% ($P<0.05$)。

2.2 磷素吸附参数与土壤性质的响应关系

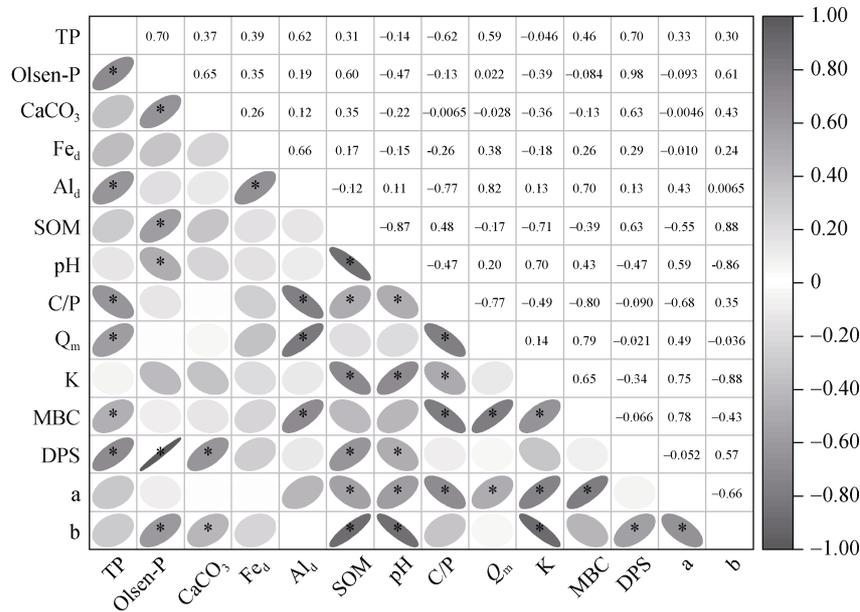
不同施肥处理下土壤理化性质的分析结果如表 3 所示。与 CK 和 NK 处理相比, NP、PK 和 NPK 处理的土壤全磷 (TP) 和速效磷 (Olsen-P) 含量分别增加了 42.00%~65.44% 和 3.52 倍~15.24 倍 ($P<0.05$), 并且以 PK 处理的增加幅度最大; 游离氧化铝 (Al_d) 含量增加了 7.32%~15.38% ($P<0.05$), 以 NPK 处理增幅最大。NK 处理的碳酸钙 (CaCO_3) 含量显著低于其余各处理。相较于 CK 和 NK 处理, 1/2OM 和 OM 处理的有机质 (SOM) 含量提高了 67.72%~109.42% ($P<0.05$); 而 pH 降低了 0.60%~3.75% ($P<0.05$), C/P 增加了 26.24%~58.06% ($P<0.05$)。

为了确定土壤性质对磷素吸附行为的影响, 本研究将土壤性质和磷素吸附特征参数进行了相关分析 (图 3) 和冗余分析 (图 4)。如图 3 所示, TP 和 Q_m 、MBC、DPS 呈显著正相关 ($R^2=0.579^{**}$ 、 $R^2=0.441^*$ 和 $R^2=0.716^{**}$)。Olsen-P 与 DPS 和 b 呈极显著正相关 ($R^2=0.980^{**}$ 和 $R^2=0.612^{**}$)。 CaCO_3 与 DPS 和 b

表 3 长期不同施肥处理对土壤性质的影响

Table 3 Effects of different long-term fertilization treatments on soil properties

处理 Treatment	全磷 TP/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效磷 Olsen-P/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	碳酸钙 CaCO_3 / ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	游离氧化铁 Fe_d / ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	游离氧化铝 Al_d / ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有机质 SOM/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	pH	C/P
CK	0.50±0.02 d	1.27±0.12 e	80.47±2.32 a	4.12±0.15 b	0.47±0.02 b	7.59±0.66 d	8.53±0.10 a	15.09±1.69 c
NK	0.50±0.01 d	1.52±0.19 e	78.22±1.74 b	4.33±0.08 ab	0.51±0.00 b	7.54±0.43 d	8.46±0.04 a	14.96±1.08 cd
NP	0.72±0.00 b	7.10±1.01 d	80.38±1.75 a	4.28±0.05 ab	0.54±0.01 a	9.34±0.59 c	8.32±0.03 b	13.03±0.83 d
PK	0.83±0.02 a	20.63±0.87 a	81.44±0.07 a	4.47±0.11 ab	0.54±0.01 a	8.19±0.68 d	8.50±0.05 a	9.81±0.79 e
NPK	0.72±0.01 b	6.87±0.66 d	79.25±1.33 a	4.54±0.11 a	0.56±0.02 a	9.58±0.36 c	8.30±0.01 b	13.35±0.56 cd
1/2OM	0.67±0.04 c	9.22±0.87 c	80.56±1.79 a	4.25±0.13 ab	0.48±0.03 b	12.73±0.88 b	8.25±0.02 b c	19.05±2.26 b
OM	0.67±0.01 c	12.44±0.71 b	81.59±1.34 a	4.39±0.13 ab	0.48±0.02 b	15.79±0.75 a	8.21±0.02 c	23.64±1.29 a



注：图中左下角表示正相关关系，表示负相关关系，且颜色越深，相关性越显著；*表示对应的两组数据相关关系显著。右上角的数字表示对应两组数据的相关系数。Note: In the lower-left corner of the figure, represents a positive correlation, represents a negative correlation. The darker the color, the more significant the correlation; * indicates that the corresponding two groups of data have a significant correlation. The numbers in the upper right corner represent the correlation coefficients corresponding to the two sets of data.

图 3 土壤性质与吸附参数相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis between soil properties and adsorption parameters

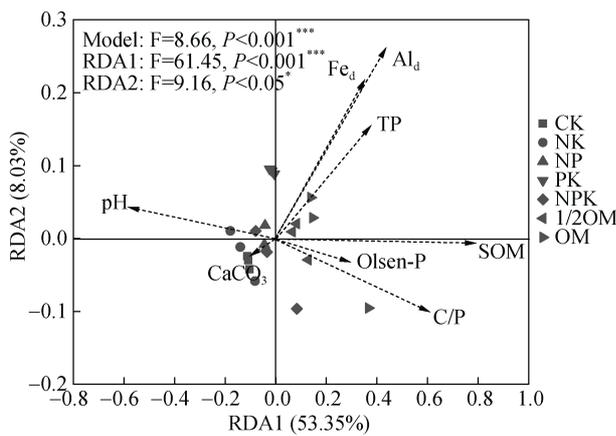


图 4 长期不同施肥处理磷素吸附特征参数与土壤性质

RDA 分析

Fig. 4 RDA analysis of phosphorus adsorption characteristics and soil properties under different long-term fertilization treatments

也呈显著正相关 ($R^2=0.631^{**}$ 和 $R^2=0.434^*$)。Al_d 与 Q_m、MBC 呈极显著正相关 ($R^2=0.805^{**}$ 和 $R^2=0.695^{**}$)。SOM 与 K、a 呈极显著负相关 ($R^2=-0.694^{**}$ 和 $R^2=-0.552^{**}$)，与 DPS、b 呈极显著正相关 ($R^2=0.628^{**}$ 和 $R^2=0.884^{**}$)。C/P 与 Q_m、K、MBC 和 a 呈

极显著负相关 ($R^2=-0.769^{**}$ 、 $R^2=-0.562^{**}$ 、 $R^2=-0.795^{**}$ 和 $R^2=-0.681^{**}$)。此外，不同的土壤性质之间也存在显著相关关系。TP 和 Olsen-P、Al_d 具有极显著正相关关系 ($R^2=0.724^{**}$ 和 $R^2=0.620^{**}$)。SOM 和 pH 呈极显著负相关 ($R^2=-0.874^{**}$)，与 Olsen-P 呈极显著正相关 ($R^2=0.597^{**}$)。CaCO₃ 与 Olsen-P 呈极显著正相关 ($R^2=0.654^{**}$)。Al_d 与游离氧化铁 (Fe_d) 呈极显著正相关 ($R^2=0.656^{**}$)。

RDA 分析结果显示，全模型具有统计显著性 ($P<0.001$)。此外，所有约束轴中仅 RDA1 ($P<0.001$) 和 RDA2 ($P<0.05$) 具有统计显著性。如图 4 所示，所有土壤性质的前两个约束轴能够解释磷素吸附特征参数全部方差的 61.38%，其中 RDA1 可以解释 53.35%，主要与 SOM、pH 和 C/P 有关；RDA2 可以解释 8.03%，主要与 Al_d、Fe_d 和 TP 有关。通过对所有环境因子进行显著性分析，结果表明 TP、SOM、pH、Al_d 和 C/P 是影响潮土磷素吸附特征的限制性环境因子 ($P<0.05$ 、 $P<0.001$ 、 $P<0.01$ 、 $P<0.001$ 、 $P<0.001$)。

3 讨 论

从图 1 的吸附等温线可以看出,不同施肥处理土壤对磷的吸附均包含两个过程,分别是快速过程和慢速过程,这与前人的研究结果一致^[26]。此外,磷素吸附还可以分为物理吸附和化学吸附。吸附刚开始时,磷酸根离子与土壤中的无定形物质发生化学反应,导致磷素在土壤胶体表面的吸附位点大量聚集,此过程的结合力强,属于化学吸附。离子交换和配体交换可能是导致高吸附率的主要机制。随着吸附过程的进行,土壤胶体吸附位点逐渐饱和,化学吸附力减弱,转而以物理-化学吸附和物理吸附为主^[28]。因此,本研究中的快速吸附过程是化学吸附,之后的慢速吸附过程是物理-化学吸附和物理吸附。

长期 NK 处理的土壤磷素吸附特征与 CK 处理一致。然而增施无机肥或有机肥之后,土壤磷素的吸附特征产生了明显的变化。长期施用无机肥提高了土壤对磷素的吸附能力,主要表现为较高的 Q_m 值和 MBC 值;而长期施用有机肥和有机无机肥配施降低了土壤对磷素的吸附能力,增加了土壤磷素的有效性,主要表现为较低的 K 值和 MBC 值。此外,施用等量磷肥时,OM 处理相较于 1/2OM 处理降低了土壤对磷素的吸附能力。这表明,施磷量和施肥模式均会对土壤磷素吸附特征产生影响。这与 Nobile 等^[22]利用 10 年的长期田间试验对不同施肥处理下土壤磷素吸附特征的研究结果一致。

土壤理化性质是影响磷素吸附特征的关键因素,比如磷含量、有机质含量、pH 和铁铝氧化物含量等等。相较于 CK 和 NK 处理,1/2OM 和 OM 处理的 SOM 含量显著增加, Q_m 值、K 值和 MBC 值均显著下降,表现出较低的磷素吸附能力。这与张微微^[29]在河南郑州利用长期定位施肥试验研究土壤磷素吸附解吸特征的结果一致。因此,本研究中有有机质含量的增加减弱了土壤胶体对磷素的吸附作用。这可能是因为有机质分解产生的低分子量有机酸使土壤胶体表面的负电荷增加,磷酸盐的静电排斥力增加,进而很大程度地降低了土壤胶体对磷酸盐的吸附能力^[30];同时,有机酸还可以与磷酸根离子竞争吸附位点,从而取代结合力相对较低的磷酸根离子,减弱土壤胶体对磷素的吸附作用^[30]。此外,

1/2OM 和 OM 处理的 Al_d 含量低于其余处理,这可能是由于有机质,特别是腐殖酸,含有很多活性基团,具有凝胶作用,可以与 Al_d 结合形成有机-无机复合体,减少磷素吸附位点,从而降低土壤胶体对磷素的吸附能力^[31]。本研究中,土壤 pH 对磷素吸附具有重要作用,这是由于不同施肥处理对 SOM 和 pH 具有相反的影响,有机质含量高的土壤,其 pH 越低。如:1/2OM 和 OM 处理有机质含量显著增加,而 pH 却显著降低。在石灰性土壤中,pH 降低有利于减少土壤胶体对磷素的吸附作用,提高土壤磷素利用率^[32]。

研究表明,铁铝氧化物对土壤磷素的吸附作用具有非常重要的影响^[33]。一般认为,磷酸根离子可以与金属氧化物表面的羟基官能团发生配位交换形成内圈型络合物^[34]。本研究中 Al_d 与 Q_m 值表现出极显著的正相关关系,这与 Broggi 等^[35]的研究结果一致。NP、PK 和 NPK 处理的 Al_d 含量显著高于其余处理,因此施用无机磷肥处理的 Q_m 值显著增加,土壤对磷素的吸附能力增强。这可能是由于土壤 C/P 值与 Al_d 呈显著负相关,而施用无机肥降低了土壤 C/P 值,所以导致腐殖质的聚合作用下降,腐殖酸分子的芳构化程度变差,土壤对游离氧化铝的固持能力降低;也可能是由于无机肥中的很多元素会替代腐殖质中的活性基团,降低了土壤的固持能力^[36]。此外,Beveridge 等^[37]研究发现,细菌和其生物产物的细胞壁带有负电荷,对游离态的金属氧化物具有很强的络合能力。因此,无机磷肥相较于有机磷肥通过降低土壤细菌群落丰度^[38],减少了对游离氧化铝的络合。传统土壤化学认为,相较于铁铝氧化物, $CaCO_3$ 在石灰性土壤的固磷机制中具有更加重要的作用。但本研究结果显示, $CaCO_3$ 含量与土壤吸附参数没有显著的相关关系,并且其含量对吸附参数变异的贡献不显著。这可能是由于 $CaCO_3$ 的吸附作用随着磷浓度的增加逐渐增强^[39],而本研究中外源添加磷浓度偏低,所以此时 $CaCO_3$ 的吸附作用并未体现出来。李祖荫和吕家珑^[40]研究发现在石灰性土壤磷浓度低于 $1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (以 P 计)时,黏土矿物的固磷数量远远大于 $CaCO_3$ 。Samadi^[41]的研究结果表明 $CaCO_3$ 是影响石灰性土壤吸附固磷能力的次要因子,而土壤黏粒含量与土壤磷素吸附指数显著相关,与该研究结果相一致。

土壤磷素水平是影响农田磷素流失风险大小的重要因素之一。分析预测磷素环境阈值可以有效地避免土壤磷素流失风险, 为优化土壤磷素管理提供重要科学依据。不同类型土壤的磷素环境阈值也不尽相同。刘娟等^[42]研究表明, 潮土速效磷环境阈值为 $24.65 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。本研究中 PK 处理的速效磷含量高达 $20.63 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 非常接近环境阈值, 具有很高的磷素流失风险。此外, 由于 OM 处理具有较大的 Olsen-P 和较低的 Q_m 值, 导致其 DPS 显著高于 1/2OM 处理, 土壤磷素流失风险升高。本团队前期的研究结果显示^[43]: NPK、1/2OM 和 OM 处理的磷肥利用率依次增加, 但是三者的作物产量表现为 $\text{NPK}\approx 1/2\text{OM}>\text{OM}$, 因此当施用等量磷含量的肥料时, 以提高作物产量和磷肥利用率, 降低磷素流失风险为前提, 有机无机肥配施是最佳选择。通过调节有机无机肥的配比, 可以实现在提高土壤供磷能力的同时, 将土壤速效磷含量合理限制在环境阈值内, 这将是今后土壤磷素研究的重点之一。

4 结 论

长期不同施肥处理通过影响土壤理化性质, 改变了磷素吸附特征, 对潮土磷素有效性的提高产生了重要影响。Langmuir 和 Freundlich 模型均可以很好地拟合潮土磷素吸附过程。相较于 CK 和 NK 处理, 长期施用无机肥通过提高 Al_d 的含量并降低 C/P 值, 增强了土壤磷素的吸附能力, 表现为 Q_m 值和 MBC 值的增加; 长期施用有机肥和有机无机肥配施通过提高 SOM 含量和降低土壤 pH, 减少了土壤胶体对磷素的吸附, 表现为 Q_m 值、K 值、MBC 值和 a 值的降低。此外, 1/2OM 处理相较于 OM 处理的磷素流失风险更低。因此, 长期有机无机肥配施不仅可以降低潮土磷素吸附能力, 提高磷素有效性, 还可以降低磷素流失风险。

参考文献 (References)

- [1] Childers D L, Corman J, Edwards M, et al. Sustainability challenges of phosphorus and food: Solutions from closing the human phosphorus cycle[J]. *BioScience*, 2011, 61 (2): 117—124.
- [2] Miao Y X, Stewart B A, Zhang F S. Long-term experiments for sustainable nutrient management in China. A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2011, 31 (2): 397—414.
- [3] Johnston A E, Poulton P R, White R P. Plant-available soil phosphorus. Part II: The response of arable crops to Olsen P on a sandy clay loam and a silty clay loam[J]. *Soil Use and Management*, 2013, 29 (1): 12—21.
- [4] van der Salm C, van Middelkoop J C, Ehlert P A I. Changes in soil phosphorus pools of grasslands following 17 yrs of balanced application of manure and fertilizer[J]. *Soil Use and Management*, 2017, 33 (1): 2—12.
- [5] Wang Q, Zhan X Y, Zhang S X, et al. Phosphorus adsorption and desorption characteristics and its response to soil properties of black soil under long-term different fertilization[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52 (21): 3866—3877. [王琼, 展晓莹, 张淑香, 等. 长期不同施肥处理黑土磷的吸附-解吸特征及对土壤性质的响应[J]. *中国农业科学*, 2019, 52 (21): 3866—3877.]
- [6] Xia W J, Ji J H, Liu J, et al. Effect of long-term fertilization on soil phosphorus characteristics and loss risk of red soil[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26 (12): 1876—1886. [夏文建, 冀建华, 刘佳, 等. 长期不同施肥红壤磷素特征和流失风险研究[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26 (12): 1876—1886.]
- [7] Liu Y L, Li Y, Zhang M, et al. Effects of long-term fertilization on phosphorus adsorption and desorption characters in yellow soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27 (3): 450—459. [刘彦伶, 李渝, 张萌, 等. 长期不同施肥对黄壤磷素吸附-解吸特性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27 (3): 450—459.]
- [8] Yang X Y, Chen X W, Yang X T. Effect of organic matter on phosphorus adsorption and desorption in a black soil from Northeast China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 187: 85—91.
- [9] Ma Y L, Ma J, Peng H, et al. Effects of iron, calcium, and organic matter on phosphorus behavior in fluvo-aquic soil: Farmland investigation and aging experiments[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19 (12): 3994—4004.
- [10] Wen Y L. Mechanisms of mineral transformation and soil organic matter sequestration in the upland red earth under long-term different fertilization regimes[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017. [文永莉. 不同施肥条件下旱地红壤铁铝氧化物转化与固碳机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2017.]
- [11] Ahmed W, Huang J, Liu K L, et al. Impacts of long-term inorganic and organic fertilization on phosphorus adsorption and desorption characteristics in red paddies in Southern China[J]. *PLoS One*, 2021, 16(1): e0246428.
- [12] Dutta D, Meena A L, G C K, et al. Long term effect of organic, inorganic and integrated nutrient management on phosphorous dynamics under different cropping systems of typic ustochrept soil of India[J]. *Communications in*

- Soil Science and Plant Analysis, 2020, 51 (21): 2746—2763.
- [13] Fan Y X, Zhong X J, Lin F, et al. Responses of soil phosphorus fractions after nitrogen addition in a subtropical forest ecosystem: Insights from decreased Fe and Al oxides and increased plant roots[J]. Geoderma, 2019, 337: 246—255.
- [14] Kedir A J, Nyiraneza J, Galagedara L, et al. Phosphorus adsorption characteristics in forested and managed podzolic soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2021, 85 (2): 249—262.
- [15] de Souza Nunes R, de Sousa D M G, Goedert W J, et al. Distribution of soil phosphorus fractions as a function of long-term soil tillage and phosphate fertilization management[J]. Frontiers in Earth Science, 2020, 8: 350.
- [16] Yan C, Yan S S, Hou Z F, et al. Phosphorus adsorption characteristics of soil with rice straw retention in northeast china[J]. Ekoloji, 2019, 28(107): 1671—1678.
- [17] Li X X. The impact of future climate change on winter wheat and the adaptive capacity of technologies to drought risks in the Huang-Huai-Hai Plain[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017. [李翔翔. 未来气候变化对黄淮海平原冬小麦的影响及干旱适应技术补偿能力研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2017.]
- [18] Huang S M, Guo D D, Zhang S Q. Effects of long-term application of organic fertilizer and superphosphate on accumulation and leaching of Olsen-P in Fluvo-aquic soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22 (1): 93—98. [黄绍敏, 郭斗斗, 张水清. 长期施用有机肥和过磷酸钙对潮土有效磷积累与淋溶的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22 (1): 93—98.]
- [19] Xin X L, Qin S W, Zhang J B, et al. Dynamics of phosphorus in fluvo-aquic soil under long-term fertilization[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21 (6): 1514—1520. [信秀丽, 钦绳武, 张佳宝, 等. 长期不同施肥下潮土磷素的演变特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21 (6): 1514—1520.]
- [20] Jalali M, Goharpour M, Moharami S. Contrasting effects of four plant residues on phosphorus sorption-desorption in some phosphorus fertilized calcareous soils[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2018, 49 (9): 1022—1031.
- [21] Lv H Y, Yang H T. Effects of long-term fertilization on the form of inorganic phosphorus and the characteristic of adsorption and desorption in black soil[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2019, 50 (6): 763—771.
- [22] Nobile C M, Bravin M N, Becquer T, et al. Phosphorus sorption and availability in an andosol after a decade of organic or mineral fertilizer applications: Importance of pH and organic carbon modifications in soil as compared to phosphorus accumulation[J]. Chemosphere, 2020, 239: 124709.
- [23] Szara E, Sosulski T, Szymańska M. Soil phosphorus sorption properties in different fertilization systems[J]. Plant, Soil and Environment, 2019, 65 (2): 78—82.
- [24] Zhang Y H, Huang S M, Guo D D, et al. Phosphorus adsorption and desorption characteristics of different textural fluvoaquic soils under long-term fertilization[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19 (3): 1306—1318.
- [25] Eslamian F, Qi Z M, Qian C. Lime amendments to enhance soil phosphorus adsorption capacity and to reduce phosphate desorption[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2021, 232 (2): 1—14.
- [26] Wang L Q, Liang T. Effects of exogenous rare earth elements on phosphorus adsorption and desorption in different types of soils[J]. Chemosphere, 2014, 103: 148—155.
- [27] Wang B, Liu H, Li Y H, et al. Phosphorus adsorption and desorption characteristics of gray desert soil under long-term fertilization[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50 (4): 726—733. [王斌, 刘骅, 李耀辉, 等. 长期施肥条件下灰漠土磷的吸附与解吸特征[J]. 土壤学报, 2013, 50 (4): 726—733.]
- [28] Shapiro R E, Fried M. Relative release and retentiveness of soil phosphates[J]. Soil Science Society of America Journal, 1959, 23 (3): 195—198.
- [29] Zhang W W. The difference and mechanism of the relation between soil Olsen-P and P budget of fluvo-aquic soil under long-term fertilization[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020. [张微微. 长期不同施肥下潮土有效磷对磷盈亏的响应关系及差异机制[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020.]
- [30] Jiao Y, Whalen J K, Hendershot W H. Phosphate sorption and release in a sandy-loam soil as influenced by fertilizer sources[J]. Soil Science Society of America Journal, 2007, 71 (1): 118—124.
- [31] Wang Y L, Zhang Y H, He Y Q. Effect of soil matrix components on phosphate sorption index in red soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49 (3): 552—559. [王艳玲, 章永辉, 何园球. 红壤基质组分对磷吸持指数的影响[J]. 土壤学报, 2012, 49 (3): 552—559.]
- [32] Guo S L, Dang T H, Hao M D. Phosphorus changes and sorption characteristics in a calcareous soil under long-term fertilization[J]. Pedosphere, 2008, 18(2): 248—256.
- [33] Gérard F. Clay minerals, iron/aluminum oxides, and their contribution to phosphate sorption in soils—A myth revisited[J]. Geoderma, 2016, 262: 213—226.
- [34] Yan Y P, Wang X M, Xiong J, et al. Progresses in studies on sorption mechanisms of phosphate on minerals using multiple analytic approaches[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 (1): 22—35. [严玉鹏, 王小明, 熊娟, 等. 基

- 于不同分析方法研究磷酸根在矿物表面吸附机制的进展[J]. 土壤学报, 2020, 57 (1): 22—35.]
- [35] Broggi F, de Oliveira A C, Freire F J, et al. Phosphate capacity factor in mineralogically different soils in Pernambuco and the influence of pH on the maximum capacity of adsorption[J]. *Ciência e Agrotecnologia*, 2011, 35 (1): 77—83.
- [36] Mu Y. Effects of tea polyphenols and organic acid on transformation of iron and aluminum in tea garden soil[D]. Yaan, Sichuan: Sichuan Agricultural University, 2016. [母媛. 茶多酚和有机酸对茶园土壤铁铝形态转化的影响[D]. 四川雅安: 四川农业大学, 2016.]
- [37] Beveridge T J, Hughes M N, Lee H, et al. Metal-microbe interactions: Contemporary approaches[J]. *Advances in Microbial Physiology*, 1996, 38: 177—243.
- [38] Bi Q F. Different fertilization modes and cultivation years affect soil phosphorus availability and carbon-nitrogen-phosphorus coupling transformations and their microbial mechanisms[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020. [毕庆芳. 施肥模式和耕作年限影响土壤磷有效性和碳氮磷耦合转化的微生物学机制[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.]
- [39] Tang X X, Yang H, Sheng J D, et al. Study on the characteristics of phosphorus sorption in cotton field under different phosphorus application treatments[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021 (2): 8—16. [唐雪霞, 杨浩, 盛建东, 等. 不同施磷处理下棉田土壤磷素吸持特征研究[J]. 中国土壤与肥料, 2021(2): 8—16.]
- [40] Li Z Y, Lü J L. Research on calcium carbonate and physical clay phosphorus fixation characteristics [J]. *Soils*, 1995, 27 (6): 304—310. [李祖荫, 吕家珑. 碳酸钙与物理粘粒固磷特性的研究[J]. 土壤, 1995, 27 (6): 304—310.]
- [41] Samadi A. Phosphorus sorption characteristics in relation to soil properties in some calcareous soils of western azarbaijan Province[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2006, 8: 251—264.
- [42] Liu J, Zhang N M, Zhang S X. Accumulative loss risk of phosphorus and its environmental threshold in fluvo-aquic soil [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36 (20): 8—16. [刘娟, 张乃明, 张淑香. 潮土磷素累积流失风险及环境阈值[J]. 农业工程学报, 2020, 36 (20): 8—16.]
- [43] Xin X L, Qin S W, Zhang J B, et al. Yield, phosphorus use efficiency and balance response to substituting long-term chemical fertilizer use with organic manure in a wheat-maize system[J]. *Field Crops Research*, 2017, 208: 27—33.

(责任编辑: 檀满枝)