

坡位与利用方式对红壤磷素储存容量的影响差异——以江西鹰潭孙家小流域为例

郑奕, 王艳玲, 刘卓玲

引用本文:

郑奕, 王艳玲, 刘卓玲. 坡位与利用方式对红壤磷素储存容量的影响差异——以江西鹰潭孙家小流域为例[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(3): 636–643.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0763>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

种植方式对稻田氨挥发及氮磷流失风险的影响

杨振宇, 罗功文, 赵杭, 胡旺, 王艺哲, 张含丰, 张玉平

农业环境科学学报. 2021, 40(7): 1529–1537 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1481>

喀斯特地区坡面不同土地利用方式水土流失及磷素输出对次降雨特征的响应

彭宏佳, 吴起鑫, 任斐鹏, 安艳玲, 付宇文, 刘瑞禄, 吕婕梅

农业环境科学学报. 2018, 37(4): 756–765 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1486>

不同措施黄绵土坡地暴雨侵蚀及磷素流失特点

迟宇博, 吴磊, 李蕊, 高爽

农业环境科学学报. 2020, 39(12): 2833–2843 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0357>

典型双季稻田施磷流失风险及阈值研究

朱坚, 纪雄辉, 田发祥, 吴家梅, 刘昭兵, 彭华, 柳赛花, 官迪, 谢运河

农业环境科学学报. 2017, 36(7): 1425–1433 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0314>

不同农艺管理措施下双季稻田氮磷径流流失特征及其主控因子研究

杨坤宇, 王美慧, 王毅, 尹黎明, 李勇, 吴金水

农业环境科学学报. 2019, 38(8): 1723–1734 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0609>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

郑奕, 王艳玲, 刘卓玲. 坡位与利用方式对红壤磷素储存容量的影响差异——以江西鹰潭孙家小流域为例[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(3): 636–643.

ZHENG Y, WANG Y L, LIU Z L. Differential effects of slope position and land use on red soil phosphorus storage capacity: a case study of the Sunjia Small Watershed in Yingtan, Jiangxi, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(3): 636–643.



开放科学 OSID

坡位与利用方式对红壤磷素储存容量的影响差异 ——以江西鹰潭孙家小流域为例

郑奕, 王艳玲*, 刘卓玲

(南京信息工程大学生态与应用气象学院, 南京 210044)

摘要:为明确坡位与利用方式对土壤磷素储存容量(SPSC)的影响差异,以更加准确地评估坡耕地红壤磷的流失风险,本研究以江西鹰潭孙家小流域内不同坡位(坡顶、坡上、坡中、坡底)及不同利用方式(稻田、花生旱地、橘园)的表层土壤为研究对象,对比分析了SPSC的变化规律与差异,探讨了土壤全碳、全氮、全磷、有效磷、铁铝氧化物含量等因子对SPSC的影响。结果表明:不同坡位的稻田、花生旱地与橘园的SPSC变化范围分别为 $-410.9 \sim -137.8$ 、 $-283.8 \sim -128.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 及 $-280.6 \sim -36.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;且随坡位的降低,稻田(坡底除外)与橘园SPSC显著降低,而花生旱地SPSC则增加。与稻田土壤相比,同一坡位花生旱地与橘园SPSC相对增加;相关分析表明,不同坡位的稻田、花生旱地及橘园SPSC与土壤非晶质铁铝氧化物、游离态铁铝氧化物极显著正相关,且游离态氧化铝的影响相对最大,而与有效磷、总碳、总氮则显著负相关。江西鹰潭孙家小流域内红壤坡耕地SPSC均为负值,意味着此时的土壤均为磷源,土壤磷均具有流失风险;坡底的稻田及橘园、坡顶花生旱地土壤磷的流失风险相对较高,应及时采取相应的调控措施以有效降低土壤磷素的流失潜能与风险。

关键词:红壤坡耕地;土壤磷储存容量;利用方式;磷流失风险;孙家小流域

中图分类号:S153.6 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2024)03-0636-08 doi:10.11654/jaes.2023-0763

Differential effects of slope position and land use on red soil phosphorus storage capacity: a case study of the Sunjia Small Watershed in Yingtan, Jiangxi, China

ZHENG Yi, WANG Yanling*, LIU Zhuoling

(College of Ecology and Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: In this study, we aimed at providing a detailed analysis of the differential effects of slope position and land use on soil phosphorus storage capacity (SPSC) in red soil, offering a precise P loss risk evaluation in sloping cultivated land. Our study focused on the surface soil of various slope positions (i.e., hilltop, upslope, mid-slope, and downslope) and diverse land use types (i.e., paddy fields, peanut uplands, and citrus orchards) in the Sunjia Small Watershed in Yingtan, Jiangxi. We compared and analyzed the variations and differences in SPSC, investigating how various factors, such as total carbon (TC), total nitrogen (TN), total P (TP), available P, and iron-aluminum oxide content, could affect SPSC. Our results revealed SPSC ranges for paddy fields, peanut uplands, and citrus orchards soils as follows: -410.9 to $-137.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, -283.8 to $-128.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, and -280.6 to $-36.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. With slope position reduction, SPSC significantly decreased in paddy fields (except for the positions at the bottom of the slope) and citrus orchard soils, while it increased in peanut uplands. Compared to paddy field soil, the peanut upland and citrus orchard SPSCs were relatively higher at the same slope position. Our correlation analysis revealed a significant positive correlation between the SPSCs in different slope positions of paddy fields, peanut upland, and citrus orchards with soil iron-aluminum oxides and with free iron-aluminum oxide influence being relatively the largest. Moreover, we also observed a significant negative correlation between available P, TC, and TN. The paddy field, peanut upland, and

收稿日期: 2023-09-17 录用日期: 2023-12-22

作者简介: 郑奕 (1997—), 男, 四川乐山人, 硕士研究生, 主要从事土壤磷的环境行为研究。E-mail: 823424040@qq.com

*通信作者: 王艳玲 E-mail: ylwang@nuist.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42077087)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (42077087)

citrus orchard SPSCs were negative at different slope positions in the Sunjia watershed of Yingtian, indicating that the soil represents a P source and displays P loss risk. Moreover, paddy fields and citrus orchards at the bottom of the slope and peanut uplands at the hilltop display a relatively higher P loss risk, requiring timely and appropriate control measures to effectively reduce the potential and soil P loss risk, requiring timely and appropriate control measures to effectively reduce the potential and soil P loss risk.

Keywords: red soil sloping cultivated land; soil phosphorus storage capacity; land use; phosphorus loss risk; Sunjia small watershed

《第一次全国污染源普查公报(2010)》显示我国农业源磷的流失量占全国磷排放总量的67.4%,而土壤磷向环境大量释放是导致农业源磷流失量日益增加的主要原因。农业生产中,外源磷肥被长期大量地施入农田以确保作物的高产稳产,但磷肥的当季利用率一般仅有10%~25%^[1],大部分外源磷被残留在土壤中而成为遗存磷^[2];随着土壤遗存磷累积量的增加,土壤磷向周围环境释放潜能与流失风险也随之增大^[3]。因此,如何快速有效地评估与判断土壤遗存磷的流失风险、合理估算土壤可继续容纳外源磷的“安全容量”是农业源磷释放与流失管控的重要方面。

土壤磷饱和度(DPS)是指土壤中可提取态磷占土壤磷吸附容量的百分比^[4],被广泛用来评价土壤磷的流失风险^[5-7],当土壤DPS超过DPS的临界阈值(Threshold DPS)时,土壤磷极易流失进入水体环境^[8-9]。DPS计算公式中的饱和系数 a 是受土壤因子影响且通过试验得到的经验值,其取值的大小将直接影响土壤DPS的准确计算与土壤磷流失风险的精准判断;虽然 $a=0.5$ 被广泛采用,但统一取值的 a 则意味着供试土壤具有相同或近似的理化性质,这是不科学的^[5]。为了克服DPS计算中 a 取值的波动性及土壤磷素流失风险评估的精准度,Nair等^[10]基于DPS理论提出并建立了土壤磷素储存容量(Soil phosphorus storage capacity, SPSC)的概念及计算方法,首次忽略了饱和系数 a 直接采用磷饱和度(PSR)对SPSC进行计算,使得SPSC的计算值可以直接评估与预测土壤磷饱和状态及流失风险。SPSC是指在土壤磷达到环境淋失风险前土壤可继续容纳外源磷的数量,SPSC=0是判断土壤磷是否具有淋失风险的转折点,也是判断土壤是磷的“源”或“汇”的拐点^[11]。SPSC>0时,土壤为磷的汇、可以继续容纳外源磷;SPSC<0时,土壤为磷的源、不能继续容纳外源磷^[12]。SPSC计算公式中的土壤磷饱和度(PSR)的临界阈值(Threshold PSR)是由土壤PSR与水溶性磷($\text{CaCl}_2\text{-P}$)含量拟合曲线的“拐点”坐标值确定的^[13],即当土壤PSR超过Threshold PSR时, $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 的浓度急剧增加,土壤磷的流失风险也随之增大^[14]。与DPS计算结果相比,SPSC的计算

结果相对更加准确且受土壤因子影响相对较小,通过SPSC值不仅能识别土壤低磷吸附能力引起的流失风险,避免因土壤磷含量高而固持能力低导致对磷流失风险的错误估计,还可以准确预测土壤磷达到流失风险阈值前土壤具有继续容纳外源磷的容量,弥补了DPS不能估算土壤磷“安全容量”的不足^[15]。随着SPSC概念的提出,国外学者们基于SPSC理论在土壤磷的固持容量及流失风险的探索与研究中发现,SPSC具有广泛的适用性与磷素流失风险判断的准确性^[15-18],但国内应用SPSC理论开展的相关研究仍显不足。

红壤是我国南方地区最主要的土壤类型,所分布区域是粮食生产基地,且多分布于丘陵岗地,区域降雨强度大、分布集中、水土流失与土壤侵蚀频发,因土壤磷释放导致的水体污染现象日益严重^[19-20]。红壤小流域是构成南方红壤丘陵山地最基本的地形地貌单元,复杂的水文过程及时空分异特征显著的土壤水是土壤磷迁移淋失的重要驱动力;土地利用方式多样及土壤水环境多变也为土壤磷分布、转化与流失创造了条件。为了更好地开展小流域多尺度上水文过程中土壤养分循环与迁移研究,中国科学院南京土壤研究所建立了江西鹰潭孙家典型红壤小流域观测站。因此,本研究以孙家小流域观测站为平台,以位于坡顶、坡上、坡中及坡底的花生旱地、稻田及橘园表层土壤为研究对象,对比分析了土壤磷储存容量(SPSC)的变化差异及影响因素,探讨了坡位与利用方式变化下坡耕地红壤磷素的流失潜能与环境风险,旨在为坡耕地红壤磷素的高效管理与流失风险管控提供理论依据与合理化建议。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

孙家典型红壤小流域观测站($28^{\circ}15'20''\text{N}$, $116^{\circ}55'30''\text{E}$)位于江西省鹰潭市当地刘家站垦殖三分场,流域面积为 50.5 hm^2 ,海拔 $34\sim55\text{ m}$,坡度小于 8° 。流域内土壤类型为第四纪红黏土发育形成的红壤,主要利用方式有花生旱地、稻田、橘园及林地等。本研

究选择了分别位于坡顶、坡上、坡中及坡底的花生旱地、稻田及橘园为研究样地。旱地花生种植时间为每年的4月上旬至8月下旬;水稻种植以双季稻为主,早稻与晚稻分别在每年4月上旬与7月下旬种植;橘园分布面积占小流域总面积的5.7%,橘树为当地典型品种,株高约3~4 m,行距为4 m×4 m,枝叶繁茂期为5—8月。花生旱地、稻田、橘园的常规施肥种类及数量见表1。

表1 孙家小流域内花生旱地、稻田及橘园的常规施肥种类及数量(kg·hm⁻²)

Table 1 Types and quantities of conventional fertilization for peanut uplands, paddy fields, and citrus orchards in the Sunjia small watershed(kg·hm⁻²)

土地利用方式 Land use	施肥时间 Fertilization time	复合肥 Compound fertilizer	尿素 Urea	钾肥 Potassium fertilizer	磷肥 Phosphate fertilizer
花生旱地	每年一次	750	500	225	750
稻田	每年一次	1 500	750	75	—
橘园	两年一次	525	300	—	—

注:复合肥为N:P₂O₅:K₂O=15:15:15,尿素含氮量为46.67%,钾肥K₂O含量为60%,磷肥P₂O₅含量≥12%。

Note: Compound fertilizer (N: P₂O₅: K₂O=15: 15: 15), urea (nitrogen content is 46.67%), potassium fertilizer (K₂O content is 60%) and phosphate fertilizer (P₂O₅≥12%).

1.2 土壤样品的采集及制备

2020年12月,按小流域坡度变化方向(坡度小于8°),自上而下地选择了坡顶、坡上、坡中、坡底的花生旱地(UP,种植年限20~30 a)、稻田(PF,种植年限50~60 a)、橘园(O,种植年限20~30 a)各3处样地,各坡位样地间距约30~40 m,在每个样地点地势平坦的中心位置划分出20 m×20 m的样方,在每个样方内按“S”形采集表层土壤(0~15 cm)8~10点、混合均匀后采用四分法保留约1 kg土样带回室内风干、磨细、过筛、备用。

1.3 土壤磷储存容量(SPSC)测定

称取1.00 g过2 mm筛的风干土壤样品置于50 mL离心管中,加入50 mL 0.2 mol·L⁻¹的草酸铵提取液(pH=3.0),用橡皮塞将瓶口塞紧后,将瓶装入里红外黑的双层布袋以防止光化学反应,置于25℃的室温下振荡2 h后,离心、过0.45 μm滤膜,使用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP)测定提取液中的铁(Fe_{ox})、铝(Al_{ox})及磷(P_{ox})含量(mg·kg⁻¹),并依据以下公式^[12]计算得到土壤磷饱和率(Soil PSR)及土壤磷素储存容量(SPSC):

$$\text{Soil PSR} = \frac{(P_{ox}/31)}{[Fe_{ox}/56 + Al_{ox}/27]} \quad (1)$$

$$\text{SPSC}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}) = (\text{Threshold PSR} - \text{Soil PSR}) \times (Fe_{ox}/56 + Al_{ox}/27) \times 31 \quad (2)$$

式中:P_{ox}、Fe_{ox}、Al_{ox}为草酸铵溶液提取态磷、铁、铝的量,mg·kg⁻¹;Threshold PSR为Soil PSR的临界阈值,本研究中将通过Soil PSR与土壤水溶性磷(CaCl₂-P)进行分段线性拟合后获得的“拐点”坐标值确定;31、56、27分别为磷、铁、铝的相对原子质量。

1.4 土壤磷及基本理化性质分析

土壤全磷(TP)采用高氯酸-硫酸外加热法消解,有效磷(Bray-P)采用盐酸-氟化铵(0.03 mol·L⁻¹ NH₄F+0.025 mol·L⁻¹ HCl,pH=2.7)法提取,消解液与提取液中的磷浓度用钼锑抗比色法测定。土壤水溶性磷(CaCl₂-P)采用0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂溶液浸提(液土比为20:1),提取液中的磷浓度用孔雀石绿法测定。土壤pH采用电位法测定,浸提液为KCl溶液,液土比为2.5:1;土壤全碳(TC)、土壤全氮(TN)及碳氮比(C/N)使用碳氮元素分析仪(Vario EL cube,Elementar,德国)测定。游离态铁铝氧化物(Fe_d,Al_d)采用DCB(连二亚硫酸钠-柠檬酸铵-重碳酸氢钠)法提取,非晶质铁铝氧化物(Fe_o,Al_o)采用酸性草酸铵溶液(pH=3.0)提取,提取液中的铁铝含量使用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP)测定。以上测试指标的具体实验操作步骤参照鲁如坤^[21]主编的《土壤农业化学分析方法》。

1.5 数据统计与计算

采用Excel 2019软件进行数据整理与计算,采用SPSS软件进行相关性分析及显著性差异分析,采用Origin 2021软件绘图。

2 结果与分析

2.1 坡位与利用方式对土壤基本理化性质的影响

不同坡位稻田、花生旱地及橘园土壤基本理化性质变化差异显著(表2)。坡顶、坡上、坡中及坡底稻田土壤pH、总碳(TC)、总氮(TN)及非晶质铁铝氧化物含量均显著高于相同坡位的花生旱地与橘园土壤;而随着坡位的降低,稻田土壤中非晶质氧化铝和游离态氧化铁铝、花生旱地土壤中游离态氧化铝及橘园土壤中非晶质铁铝氧化物含量均呈显著降低趋势(表2)。

2.2 坡位与利用方式对土壤全磷(TP)及有效磷(Bray-P)的影响

不同坡位稻田、花生旱地与橘园土壤全磷(TP)含量变化范围分别为557~818、398~607 mg·kg⁻¹及282~519 mg·kg⁻¹。与坡顶稻田相比,只有坡底稻田土壤TP显著降低了31.7%,而坡上及坡中稻田土壤TP

表2 不同坡位稻田、花生旱地及橘园土壤的基本理化性质($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 2 Basic physical and chemical properties of paddy fields, peanut upland and citrus orchard soils at different slope positions($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

样地 Sample plot	坡位 Slope position	pH	总碳 Total carbon	总氮 Total nitrogen	C:N	非晶质氧化铁 Amorphous iron oxide(Fe_o)	非晶质氧化铝 Amorphous aluminum oxide(Al_o)	游离态氧化铁 Free iron oxide(Fe_d)	游离态氧化铝 Free aluminum oxide(Al_d)
稻田 (Paddy field, PF)	坡顶(FT)	3.97±0.01Ab	31.5±0.63Ab	3.60±0.07Ab	8.75±0.38Aa	4.63±0.05Aa	4.64±0.05Aa	24.5±0.34Ca	10.34±0.20Aa
	坡上(T)	4.03±0.01Aa	28.9±0.58Ac	3.30±0.07Ac	8.76±0.35Aa	2.96±0.01Ac	4.51±0.08Aab	22.8±1.11Bb	10.13±0.39Aa
	坡中(M)	3.91±0.01Ac	33.6±0.67Aa	3.80±0.08Aa	8.84±0.36Aa	3.68±0.05Ab	4.42±0.10Ab	18.1±0.72Cc	7.68±0.26Cb
	坡底(B)	3.97±0.01Ab	30.6±0.61Ab	3.50±0.07Ab	8.75±0.35Aa	2.74±0.03Ad	3.41±0.06Ac	15.0±0.07Cd	6.21±0.10Cc
花生旱地 (Peanut upland, UP)	坡顶(FT)	3.87±0.02Bb	10.5±0.21Ba	1.10±0.02Ba	9.55±0.38Aa	2.30±0.03Bb	3.74±0.05Bb	36.1±0.24Ac	9.47±0.10Ba
	坡上(T)	3.93±0.02Ba	9.10±0.18Bb	1.10±0.02Ca	8.28±0.33Ab	2.52±0.06Ba	3.90±0.04Ba	41.4±0.76Aa	9.72±0.15Aa
	坡中(M)	3.89±0.01Bab	6.70±0.13Bc	0.90±0.02Bb	7.45±0.30Bc	1.93±0.04Bc	2.84±0.01Bc	38.1±1.42Bb	8.42±0.37Bb
	坡底(B)	3.91±0.01Ba	6.90±0.14Cc	0.90±0.02Cb	7.67±0.31Bbc	1.50±0.12Bd	2.25±0.02Bd	31.2±0.61Bd	7.39±0.03Bc
橘园 (Citrus orchard, O)	坡顶(FT)	3.72±0.03Cb	7.30±0.15Cc	0.80±0.02Cd	9.13±0.37Aa	2.29±0.14Ba	2.78±0.06Ca	29.1±0.06Bc	9.12±0.43Bb
	坡上(T)	3.67±0.01Cc	9.20±0.18Bb	1.30±0.03Bb	7.08±0.28Bc	1.67±0.04Cb	2.52±0.08Cb	23.9±0.11Bd	8.24±0.02Bc
	坡中(M)	3.64±0.01Cd	5.90±0.12Bd	0.90±0.02Bc	6.56±0.26Cc	1.13±0.05Cc	2.62±0.02Cb	50.5±0.86Aa	9.86±0.25Aa
	坡底(B)	3.80±0.01Ca	12.8±0.26Ba	1.60±0.03Ba	8.00±0.32Bb	1.11±0.01Cc	2.09±0.01Cc	39.4±2.10Ab	7.91±0.10Ac

注:不同小写字母表示相同利用方式不同坡位土壤间变化差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示相同坡位不同利用方式间变化差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate that there are significant differences among different slope positions at the same land use type ($P<0.05$). Different uppercase letters indicate that there are significant differences among different land use types at the same slope position ($P<0.05$).

则无显著变化;与坡顶旱地相比,坡上、坡中及坡底旱地土壤TP含量分别显著降低了19.7%、34.4%及32.8%;而与坡顶橘园相比,坡中橘园土壤TP显著降低了33.3%,而坡底橘园土壤TP显著增加了23.8%,坡上橘园土壤TP则无显著变化(图1)。与不同坡位稻田土壤相比,旱地及橘园土壤TP均显著降低了21.9%~51.4%及41.5%~65.5%(除坡底橘园)(图1)。

不同坡位稻田、花生旱地与橘园红壤Bray-P变化范围分别为13.4~26.6、12.2~21.3 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 及9.5~25.6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。与坡顶稻田相比,坡上及坡底稻田土壤Bray-P显著降低了19.7%及47.3%,坡中稻田土壤Bray-P则显著增加了4.3%;与坡顶旱地相比,坡上、坡中及坡底旱地Bray-P分别显著降低了42.9%、24.2%及33.5%;而与坡顶橘园相比,坡上及坡中橘园土壤Bray-P分别显著降低了26.1%及56.0%,坡底橘园土壤Bray-P则显著增加了18.3%(图1)。与不同坡位稻田土壤相比,旱地及橘园土壤Bray-P均显著降低了16.3%~40.5%(除坡底旱地)及15.0%~64.2%(除坡底橘园)(图1)。

2.3 坡位及利用方式对土壤磷素储存容量的影响

2.3.1 土壤磷饱和度(PSR)

不同坡位稻田、花生旱地与橘园土壤磷饱和度(PSR)变化范围分别为0.14~0.22、0.15~0.18及0.14~0.32。与坡顶稻田相比,坡上、坡中及坡底稻田土壤PSR分别显著增加了11.4%、50.0%及27.1%;与坡顶

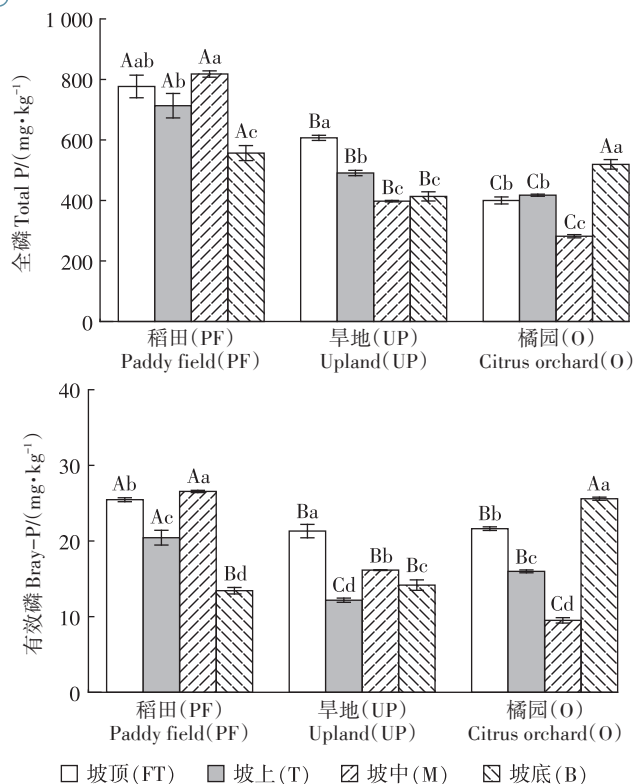
旱地相比,坡上及坡中旱地土壤PSR分别显著降低了22.2%及21.1%,而坡底旱地土壤PSR则无显著变化;而与坡顶橘园相比,坡中及坡底橘园土壤PSR分别显著增加了11.7%及126.3%,而坡上橘园土壤PSR则无显著变化(图2)。与不同坡位稻田土壤相比,旱地及橘园土壤PSR均显著降低了10.3%~32.4%及11.8%~74.2%(除坡底旱地)(图2)。

2.3.2 磷饱和度阈值(Threshold PSR)

将土壤PSR与 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 进行分段线性拟合后获得的“拐点”坐标值,即为土壤磷饱和度阈值(Threshold PSR)。不同坡位稻田、花生旱地与橘园土壤的Threshold PSR分别为0.11、0.09、0.12,相对应的 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量分别为0.45、0.37、0.80 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图3)。

2.3.3 土壤磷储存容量(SPSC)

不同坡位稻田、花生旱地与橘园SPSC变化范围分别为-410.9~-137.8、-283.8~-128.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 及-280.6~-36.3 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均为负值。稻田SPSC随着坡位降低呈显著降低趋势(坡底除外),与坡顶稻田相比,坡上、坡中及坡底稻田SPSC显著降低了32.8%、198.1%及54.8%(图4)。花生旱地SPSC随坡位的下移呈显著增大趋势,与坡顶旱地相比,坡上、坡中及坡底旱地SPSC显著增加了41.6%、54.9%及35.6%。橘园SPSC随着坡位的下移呈显著降低趋势,与坡顶橘园相比,坡中及坡底橘园SPSC显著降低了83.5%及618.6%。与不同坡位稻田土壤相比,旱地及橘园SPSC均显著



不同小写字母表示相同利用方式不同坡位间差异显著 ($P<0.05$), 不同大写字母表示相同坡位不同利用方式间差异显著 ($P<0.05$), 下同。Different lowercase letters indicate that there are significant differences among different slope positions at the same land use type ($P<0.05$). Different uppercase letters indicate that there are significant differences among different land use types at the same slope position ($P<0.05$). The same below.

图1 不同坡位稻田、花生旱地与橘园土壤全磷及有效磷变化

Figure 1 Changes of soil total phosphorus and Bray-P in paddy fields, peanut uplands, citrus orchards at different slope positions

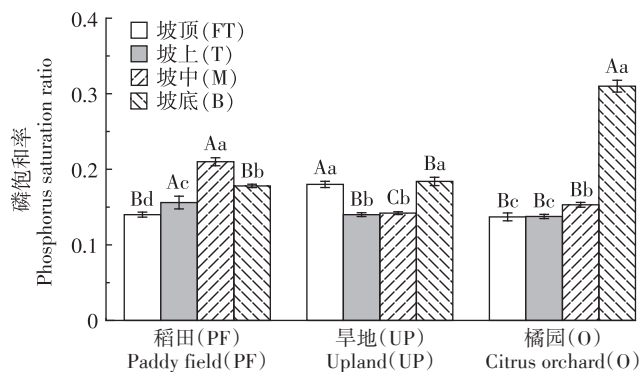


图2 不同坡位稻田、花生旱地与橘园土壤磷饱和率(PSR)变化

Figure 2 Changes of soil PSR in paddy fields, peanut uplands and citrus orchards at different slope positions

增大了9.5%~68.8% (除坡顶旱地) 及73.7%~83.8% (除坡底橘园)。

2.4 影响因子分析

热图分析发现, 不同坡位稻田、花生旱地及橘园

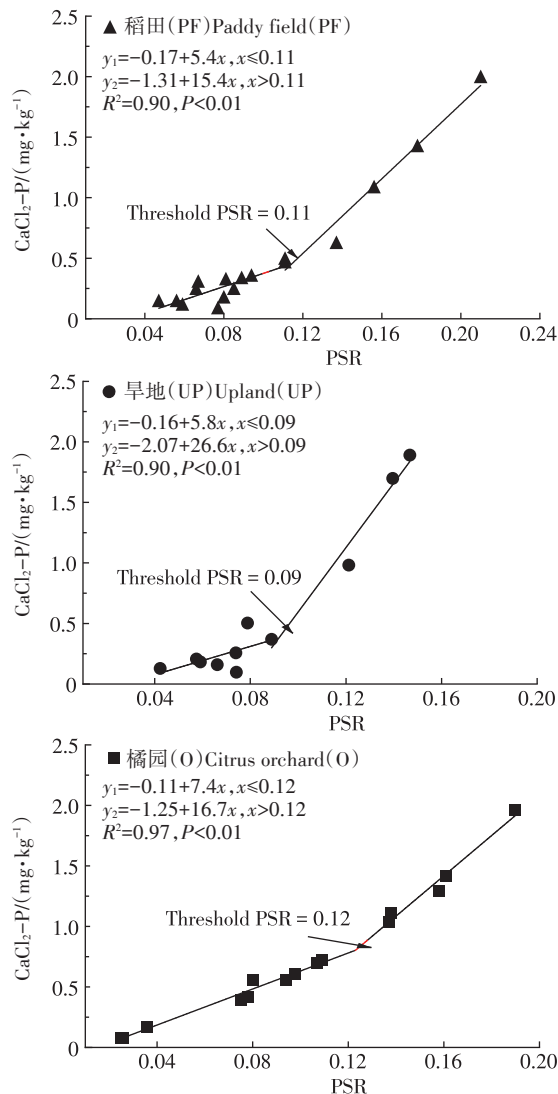


图3 稻田、花生旱地与橘园土壤水溶性磷($\text{CaCl}_2\text{-P}$)与磷饱和率(PSR)的分段拟合

Figure 3 Piecewise fitting of $\text{CaCl}_2\text{-P}$ and PSR in paddy fields, peanut uplands and citrus orchards

SPSC 与 Fe_0 、 Al_0 、 Fe_d 、 Al_d 呈极显著正相关关系 ($P<0.01$), 与 Bray-P、PSR、TC、TN、TP 呈极显著负相关关系 ($P<0.01$)。说明随着土壤 Fe_0 、 Al_0 、 Fe_d 及 Al_d 的增加, 土壤 Bray-P、PSR、TC、TN、TP 的降低, SPSC 显著增加(图5)。

3 讨论

3.1 坡位与利用方式对土壤全磷及有效磷的影响

江西鹰潭孙家典型红壤小流域观测站内稻田及橘园土壤全磷(TP)含量均随着坡位下移而增加, 而花生旱地土壤TP则随着坡位下移而降低(图1)。可见, 坡位变化对土壤TP含量影响较为显著, 有研究证实在固定坡度的地形条件下, 随着坡位下移, 土壤磷

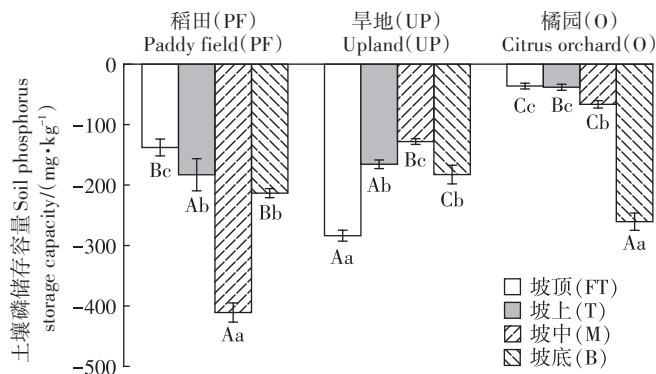
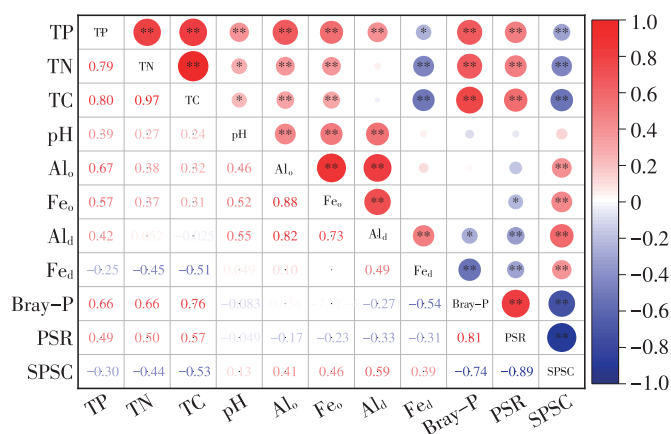


图4 不同坡位稻田、花生旱地与橘园土壤磷储存容量(SPSC)的变化

Figure 4 Changes of soil phosphorus storage capacity (SPSC) in paddy fields, peanut uplands, citrus orchards at different slope positions



**表示在0.01水平(双尾)上显著相关,*表示在0.05(双尾)水平上显著相关。

**represents a significant correlation at 0.01 level(two-tailed),

*represents a significant correlation at 0.05 level(two-tailed).

图5 热图分析

Figure 5 Heat map analysis

会在地表径流作用下沿坡地向下迁移并在坡底堆积,从而使低坡位处土壤TP含量增加显著^[22-24]。不同坡位稻田土壤TP及Bray-P含量显著高于花生旱地及橘园土壤(图1),这可能是因为稻田土壤长期处于水耕状态且频繁受人为活动影响,大量肥料的不断施入及作物根系还田使得土壤有机质不断增多,土壤磷含量也随着土壤有机质累积量的增加而增大^[25]。另外,长期淹水下稻田土壤Eh降低^[26]引起的铁还原溶解或厌氧微生物介导铁氧化物还原溶解,会促使沉淀铁磷酸盐向可溶性铁磷酸盐转化,从而提高土壤中Bray-P的累积量^[27];而淹水后稻田土壤pH升高会加强酸性土壤中磷酸盐的水解作用,有机质在土壤磷酸酶的催化下矿化分解释放大量的磷酸盐,进而提高土壤中有有效磷的累积量^[28-29]。

3.2 坡位及利用方式对土壤磷素储存容量的影响分析

土壤TP与Bray-P虽然也可以用于预测与判断土壤磷素的流失潜能^[30],但TP对人为活动和环境因子的响应相对较慢^[31],而Bray-P又受环境因子扰动影响较大、且不能准确判断土壤磷素的流失风险。而SPSC值可以有效估测出土壤磷达到环境流失风险前土壤可继续容纳外源磷的“安全容量”;SPSC<0时,土壤为磷源,土壤磷具有流失风险;反之,土壤为磷汇,土壤可继续容纳外源磷^[12]。孙家小流域内稻田及橘园土壤磷素储存容量(SPSC)均随着坡位的下移而降低(图4),这与李欢等^[32]的研究结果一致。稻田土壤容重大且在长期耕作下受机械压实形成质地紧实的犁底层^[33],在坡地地形条件下,雨水受犁底层阻挡导致垂直渗漏量较少,会更快地流过土壤表面,产生沿斜坡向下的侧向流^[34],将土壤中的磷素等营养物质冲刷走^[35],使磷素沿坡面向下转移并最终在坡底聚集,从而使低坡位处稻田SPSC显著降低,磷流失风险显著增大;而橘园虽通过植被根系减少侵蚀泥沙量,截留部分径流,但在大雨强的冲刷作用下,土壤表层容易形成沟蚀^[22],土壤磷素以物理冲刷的形式被带走,沿坡面向下转移并最终在坡底聚集,从而使低坡位处橘园SPSC显著降低。因此,在管理稻田和橘园时,需及时采取措施以减小土壤在降雨等水分过程中沿坡地方向的磷素流失。

另外,不同坡位稻田、花生旱地与橘园SPSC均为负值(图4),表明土壤均为磷源、土壤磷均存在不同程度的流失风险^[13]。与花生旱地及橘园土壤相比,稻田SPSC显著降低(图4),这可能是因为稻田土壤长期大量施肥(表1),磷累积量相对高于旱地及橘园土壤,土壤磷吸持能力降低,土壤磷饱和率逐渐增大,进而降低稻田SPSC^[36]。同时有研究表明,随着植稻年限的增长,稻田土壤磷释放潜力增加、磷肥的固持能力下降,稻田需要更多的磷肥投入来维持其生产力,过量地施用磷肥又会导致更高的磷流失风险,因此稻田土壤磷素流失风险较大,应对其表层径流磷浓度进行监测,及时调整施肥策略以降低土壤的磷流失风险,保证稻田的可持续利用^[37]。

3.3 不同坡位与利用方式下土壤磷素储存容量的影响因素分析

热图分析表明稻田、花生旱地及橘园土壤SPSC均与土壤中非晶质氧化铁铝(Fe_0 , Al_0)及游离氧化铁铝(Fe_a , Al_a)呈极显著正相关关系($P<0.01$)(图5),可见铁铝氧化物是红壤固存磷的重要载体;铁铝氧化物

具有很强的吸附能力,能够吸附土壤中的磷并与之形成稳定的复合物,从而使土壤中的磷元素不易溶解和流失^[38]。而土壤中游离态氧化铝对磷流失风险的影响最为显著,这与颜晓等^[39]的研究结果一致,酸性土壤中的铁铝氧化物含量是影响土壤固磷能力的关键因素,进而影响土壤磷流失风险,其中又以游离态氧化铝的影响最显著。不同坡位稻田、花生旱地及橘园土壤TP、Bray-P、TC、TN均与SPSC呈极显著负相关关系($P<0.01$)(图5),表明高含量的全磷、有效磷及有机质均会增大坡耕地红壤磷的流失风险,而有机质的增加会竞争磷的吸附位点,同时有机质同金属离子的络合也会降低其对磷的吸附固定能力^[40]。此外,有研究发现 Mehlich 3 提取液中的钙镁浓度与SPSC显著负相关,可能是因为土壤中钙镁结合态磷酸盐会在与水接触时释放土壤中的磷,从而降低SPSC、增大土壤磷素流失风险^[36],而土壤中较低的盐度也会促进磷结合离子的活化,增大SPSC^[41]。

4 结论

江西鹰潭孙家小流域内稻田及橘园土壤全磷含量均随着坡位下移而增加,而花生旱地土壤全磷则随着坡位下移而降低。土壤磷素储存容量均为负值、即稻田、花生旱地及橘园土壤均为磷源,土壤磷均具有不同程度的流失风险;而坡底的稻田与橘园、坡顶的花生旱地土壤磷流失风险相对较高。孙家小流域内坡耕地红壤磷的流失风险受土壤中游离态氧化铝与有机质含量的影响最为显著。应根据坡位及利用方式的不同及时调整相应田块的施磷策略(如停施或减施等)并采取有效措施阻隔或降低土壤磷素的流失风险。

参考文献:

- [1] 王一锟,蔡泽江,冯固.不同磷肥调控措施下红壤磷素有效性和利用率的变化[J].土壤学报,2023,60(1):235-246. WANG Y K, CAI Z J, FENG G. Effects of different phosphorus application techniques on phosphorus availability in a rape system in a red soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(1): 235-246.
- [2] LE NOË J, ROUX N, BILLEN G, et al. The phosphorus legacy offers opportunities for agro-ecological transition (France 1850—2075) [J]. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(6):064022.
- [3] 吴昊,陈丁江.流域非点源磷污染的遗留效应研究进展[J].农业环境科学学报,2022,41(11):2352-2364. WU H, CHEN D J. Progress on legacy effects of watershed non-point source phosphorus pollution[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(11): 2352-2364.
- [4] MAGUIRE R O, FOY R H, BAILEY J S, et al. Estimation of the phosphorus sorption capacity of acidic soils in Ireland[J]. *European Journal of Soil Science*, 2001, 52(3):479-487.
- [5] 许杏红,王艳玲,殷丹,等.长期施肥对旱地红壤磷素饱和度的影响[J].土壤通报,2019,50(4):870-877. XU X H, WANG Y L, YIN D, et al. Effects of long-term fertilization on the degree of phosphorus saturation in upland red soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50(4):870-877.
- [6] WU Q H, HUANG Z R, ZHU P, et al. Long-term change in phosphorus behavior and the degree of P saturation in typical cropland after different fertilization practices[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2022, 68(1):202-214.
- [7] PRADHAN S N, GHOSH A K, SEEMA, et al. Changes in degree of phosphorus saturation and risk of P loss upon twelve years of manuring and reduced tillage[J]. *Geoderma*, 2021, 404:115277.
- [8] FISCHER P, PÖTHIG R, VENOHR M. The degree of phosphorus saturation of agricultural soils in Germany: current and future risk of diffuse P loss and implications for soil P management in Europe[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 599-600:1130-1139.
- [9] 习斌,周萍,翟丽梅,等.土壤磷素吸持饱和度(DPS)评价土壤磷素流失风险研究[J].土壤通报,2014,45(6):1471-1476. XI B, ZHOU P, ZHAI L M, et al. Study on potential evaluation index of soil P loss evaluated by degree of P sorption saturation (DPSS) [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(6):1471-1476.
- [10] NAIR V D, HARRIS W G. A capacity factor as an alternative to soil test phosphorus in phosphorus risk assessment[J]. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 2004, 47(4):491-497.
- [11] NAIR V D, HARRIS W G. Soil phosphorus storage capacity for environmental risk assessment[J]. *Advances in Agriculture*, 2014:1-9.
- [12] NAIR V D, CLARK M W, REDDY K R. Evaluation of legacy phosphorus storage and release from wetland soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2015, 44(6):1956-1964.
- [13] NAIR V D. Soil phosphorus saturation ratio for risk assessment in land use systems[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2014, 2:6.
- [14] ANDRES A S, SIMS J T. Assessing potential impacts of a wastewater rapid infiltration basin system on groundwater quality: a delaware case study[J]. *Journal of Environment Quality*, 2013, 42(2):391-404.
- [15] CHAKRABORTY D, NAIR V D, CHRYSOSTOME M, et al. Soil phosphorus storage capacity in manure-impacted aquifers: implications for water table management[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 142(3/4):167-175.
- [16] LIAO X L, NAIR V D, CANION A, et al. Subsurface transport and potential risk of phosphorus to groundwater across different land uses in a karst springs basin, Florida, USA[J]. *Geoderma*, 2019, 338:97-106.
- [17] VANZOMEREN C M, BERKOWITZ J F, LEMKE A M, et al. Soil P storage capacity in agricultural treatment wetlands: can a system designed for N reduction also retain P? [J]. *Wetlands*, 2020, 40:503-514.
- [18] DARI B, NAIR V D, SHARPLEY A N, et al. Consistency of the threshold phosphorus saturation ratio across a wide geographic range of acid soils[J]. *Agroecosystems, Geosciences & Environment*, 2018, 1(1):1-8.
- [19] 侯红波,刘伟,李恩尧,等.不同覆盖方式对红壤坡耕地氮磷流失的影响[J].湖南生态科学学报,2019,6(1):16-20. HOU H B, LIU W, LI E Y, et al. Effects of different mulching methods on nitro-

- gen and phosphorus loss of sloping farmland in red soil[J]. *Journal of Hunan Ecological Science*, 2019, 6(1): 16–20.
- [20] 毛妍婷, 刘宏斌, 郭树芳, 等. 耕作措施对坡耕地红壤地表径流氮磷流失的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(5): 26–33. MAO Y T, LIU H B, GUO S F, et al. Effects of tillage measures on nitrogen and phosphorus loss from surface runoff in red-soil on slope farmland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(5): 26–33.
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 166–187. LU R K. Agricultural chemical analysis method of soil[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 166–187.
- [22] 范晓娟, 张丽萍, 邓龙洲, 等. 植被覆盖和施肥对不同坡长坡地总磷流失的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(6): 27–32. FAN X J, ZHANG L P, DENG L Z, et al. Effects of vegetation and fertilization on total phosphorus loss in slopes with different slope length[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(6): 27–32.
- [23] 杨红宾, 王胜, 殷溶, 等. 紫色土坡耕地农桑系统对土壤磷素流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(6): 1316–1326. YANG H B, WANG S, YIN R, et al. Effects of crop-mulberry system on phosphorus loss in sloping cropland with purple soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(6): 1316–1326.
- [24] 潘旭鸣, 丁森, 周宇诚, 等. 蔬菜地氮磷径流流失量及其规律研究[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(10): 2262–2268. PAN X M, DING M, ZHOU Y C, et al. The amounts of nitrogen and phosphorus losses from a vegetable field via runoff[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(10): 2262–2268.
- [25] 黄金生, 谢如林, 曾艳, 等. 长期不同施肥对赤红壤稻田区肥力的影响[J]. 西南农业学报, 2016, 29(5): 1144–1149. HUANG J S, XIE R L, ZENG Y, et al. Effects of long-term fertilization on fertility of lateritic red loams paddy[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 29(5): 1144–1149.
- [26] 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. 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.
- [27] 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. JIANG B S, SHEN J L, WANG J, et al. Soil bioavailability of phosphorus and phosphorus uptake by rice after straw returning[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(6): 309–317.
- [28] MARANGUIT D, GUILLAUME T, KUZYSKOV Y. Effects of flooding on phosphorus and iron mobilization in highly weathered soils under different land-use types: short-term effects and mechanisms[J]. *Catena*, 2017, 158: 161–170.
- [29] 刘彦伶, 李渝, 张雅蓉, 等. 长期施肥对黄壤稻田和旱地土壤磷酸酶活性的影响[J]. 土壤通报, 2022, 53(4): 948–955. LIU Y L, LI Y, ZHANG Y R, et al. Effects of long-term fertilization on phosphatase activities in paddy and dryland of yellow soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(4): 948–955.
- [30] 肖作文, 马飞, 柳开楼, 等. 红壤区旱地和水田土壤磷素状况及其流失风险[J]. 中国土壤与肥料, 2021(1): 282–288. XIAO Z Y, MA F, LIU K L, et al. Current phosphorus status of red soil in drylands and paddy fields and its loss risks[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(1): 282–288.
- [31] DODD R J, SHARPLEY A N. Conservation practice effectiveness and adoption: unintended consequences and implications for sustainable phosphorus management[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2016, 104(3): 373–392.
- [32] 李欢, 樊慧琳, 张佳敏, 等. 坡耕地红壤剖面磷的储存容量及其流失风险研究[J]. 土壤学报, 2024, 61(1): 98–109. LI H, FAN H L, ZHANG J M, et al. Study on phosphorus storage capacity and loss risk of red soil profile in sloping farmland[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61(1): 98–109.
- [33] 李胜龙, 易军, 刘目兴, 等. 稻田-田埂过渡区土壤优先流特征研究[J]. 土壤学报, 2018, 55(5): 1131–1142. LI S L, YI J, LIU M X, et al. Study on the characteristics of soil preferential flow in the transition zone between paddy field and ridge[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(5): 1131–1142.
- [34] 杨燕, 易军, 刘目兴, 等. 不同水耕年限稻田土壤水分运动特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(2): 257–263. YANG Y, YI J, LIU M X, et al. Study on the characteristics of soil moisture movement in paddy fields with different years of hydroponics[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, 26(2): 257–263.
- [35] 左继超, 郑海金, 奚同行, 等. 自然降雨条件下红壤坡地磷素随径流垂向分层输出特征[J]. 环境科学, 2017, 38(10): 4178–4186. ZUO J C, ZHENG H J, XI T X, et al. Vertical layered output characteristics of phosphorus with runoff on red soil slope under natural rainfall[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(10): 4178–4186.
- [36] DARI B, NAIR V D, HARRIS W G. Approaches for evaluating sub-surface phosphorus loss potential from soil profiles[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 245: 92–99.
- [37] HUANG L M, THOMPSON A, ZHANG G L. Long-term paddy cultivation significantly alters topsoil phosphorus transformation and degrades phosphorus sorption capacity[J]. *Soil Tillage Research*, 2014, 142: 32–41.
- [38] 冶康康, 俄胜哲, 陈政宇, 等. 土壤中磷的存在形态及分级方法研究进展[J]. 中国农学通报, 2023, 39(1): 96–102. YE G K, E S Z, CHEN Z Y, et al. Research progress on existing forms and classification methods of phosphorus in soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2023, 39(1): 96–102.
- [39] 颜晓, 卢志红, 魏宗强, 等. 几种典型酸性旱地土壤磷吸附的关键影响因素[J]. 中国土壤与肥料, 2019(3): 1–7. YAN X, LU Z H, WEI Z Q, et al. Key factors influencing phosphorus sorption for several acid upland soils[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019(3): 1–7.
- [40] GUPPY C N, MENZIES N, MOODY P W, et al. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: a review[J]. *Soil Research*, 2005, 43(2): 189–202.
- [41] 宋佳伟. 黄河三角洲恢复湿地磷的存储容量及其影响因素研究[D]. 烟台: 中国科学院大学(中国科学院烟台海岸带研究所), 2021: 26. SONG J W. Study on phosphorus storage capacity and its influencing factors in restored wetland in the Yellow River Delta, China[D]. Yantai: University of Chinese Academy of Sciences(Yantai Institute of Coastal Zone, Chinese Academy of Sciences), 2021: 26.

(责任编辑:叶飞)