

江汉平原不同母质发育水稻土磷含量及其空间分布异质性

——以湖北省荆州区为例

李雅琼¹, 严如玉¹, 司转运², 李鹏慧², 高阳², 邹家龙³, 李继福^{1,2}

(1.长江大学农学院, 湖北荆州 434025; 2.中国农业科学院农田灌溉研究所/农业农村部作物需水与调控重点实验室, 河南新乡 453002; 3.荆州区农业科技服务中心, 湖北荆州 434025)

摘要: [目的] 明确江汉平原不同母质发育水稻土磷含量及其空间分布特征, 为水稻种植区域磷肥合理施用提供科学参考。[方法] 以江汉平原腹地荆州区为例, 测定不同母质发育水稻土磷含量并对其等级进行评价。对荆州区水稻土 3 种成土母质(冲积物母质、次生黄土母质和湖积物母质)分布地区的基本农田进行调查, 共选择 600 个土壤样点进行采样, 测定土壤样品中的总磷(TP)、有机磷(OP)、有效磷(AP)和水溶性磷(WSP)含量。[结果] 荆州区冲积物母质地区、次生黄土母质地区和湖积物母质地区的水稻土总磷含量平均分别为 0.881, 0.427, 0.579 g/kg; 有机磷含量分别为 0.104, 0.058, 0.066 g/kg; 有效磷含量为 24.418, 11.339, 17.043 mg/kg; 水溶性磷含量为 21.157, 13.421, 22.600 mg/kg。水稻土各形态磷含量在荆州区南部(长江沿岸)冲积物母质和湖积物母质发育地区较高, 而中部和北部次生黄土母质发育(丘陵岗地)地区较低。根据第二次土壤普查磷分级标准, 荆州区水稻土总磷处于中等及以上水平, 有效磷以中等水平为主, 且冲积物和湖积物发育水稻土磷量高于次生黄土母质地区。冗余分析和空间插值表明, 荆州区不同母质发育水稻土的地带分布与长江、湖泊和丘陵位置密切相关, 并显著影响土壤磷的空间异质性。[结论] 荆州区可考虑在长江两岸和湖泊周边的冲积物和湖积物母质分布区适度控制磷肥用量, 在丘陵地区的次生黄土母质分布区适当增施磷肥用量以提高土壤肥力和维持作物生产力。

关键词: 水稻土; 母质类型; 土壤磷含量; 空间分布; 肥力评价

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)03-0079-07

中图分类号: S158.5

文献参数: 李雅琼, 严如玉, 司转运, 等. 江汉平原不同母质发育水稻土磷含量及其空间分布异质性[J]. 水土保持通报, 2025, 45(3): 79-85. Li Yaqiong, Yan Ruyi, Si Zhuanyun, et al. Phosphorus content and its spatial heterogeneity in paddy soil with different parent materials at Jianghan Plain[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(3): 79-85. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.03.003; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.03.003.

Phosphorus content and its spatial heterogeneity in paddy soil with different parent materials at Jianghan Plain

—Taking Jingzhou District in Hubei Province as an example

Li Yaqiong¹, Yan Ruyi¹, Si Zhuanyun², Li Penghui², Gao Yang², Zou Jialong³, Li Jifu^{1,2}

(1.College of Agriculture, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434025, China;

2.Institute of Farmland Irrigation, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Crop Water Demand and Regulation of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Xinxiang, Henan 453002,

China; 3.Jingzhou District Agricultural Science and Technology Service Center, Jingzhou, Hubei 434025, China)

Abstract: [Objective] The phosphorus content (P) and spatial distribution of paddy soils developed from different parent materials in the Jianghan Plain were analyzed to provide a reference for the strategic application of phosphorus fertilizer in rice-planting areas. [Methods] Jingzhou area in the hinterland of Jianghan Plain was taken

收稿日期: 2024-12-24

修回日期: 2025-01-19

采用日期: 2025-01-20

资助项目: 农业农村部作物需水与调控重点实验室项目“长江流域水稻干旱复水补偿效应及其叶片光合水分协同调控机制”(ZWS202302)

第一作者: 李雅琼(2002—), 女(土族), 青海省海东市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤养分管理与肥力。Email: 202005333@yangtzeu.edu.cn。

通信作者: 李继福(1987—), 男(汉族), 河南省新乡市人, 博士, 副教授, 主要从事作物养分管理、土壤环境与健康等方面的研究。Email: jifuli@yangtzeu.edu.cn。

as an example to determine the phosphorus content of paddy soil developed from different parent materials and evaluate its grade. A survey was conducted on the farmland in Jingzhou area, focusing on paddy soils developed from three parent materials, namely, alluvial deposits, secondary loess, and lacustrine deposits. A total of 600 soil samples were collected, and total phosphorus (TP), organic phosphorus (OP), available phosphorus (AP), and water-soluble phosphorus (WSP) contents were measured and evaluated. [Results] The average TP contents in paddy soils developed from alluvial, secondary loess, and lacustrine deposits in Jingzhou area were 0.881, 0.427, and 0.579 g/kg, respectively. The OP content was 0.104, 0.058, and 0.066 g/kg, respectively. The AP content was 24.418, 11.339, and 17.043 mg/kg, respectively, and the WSP content was 21.157, 13.421, and 22.600 mg/kg. The phosphorus content in various forms was higher in the southern part of Jingzhou area along the Yangtze River, where paddy soils developed from alluvial and lacustrine deposits. Meanwhile, phosphorus was lower in the central and northern regions, where paddy soils developed from secondary loess on the hilly uplands. According to the phosphorus grading standards from the second national soil survey, the TP content in the paddy soils of Jingzhou area was at a medium or higher level, whereas AP was mainly at a medium level. The phosphorus content in paddy soils developed from alluvial and lacustrine deposits was higher than that in soils developed from secondary loess. Redundancy analysis and spatial interpolation showed that the zonal distribution of paddy soils developed from different parent materials in Jingzhou area was closely related to the locations of the Yangtze River, lakes, and hills, significantly influencing the spatial heterogeneity of soil phosphorus. [Conclusion] In Jingzhou area, it is advisable to moderately control phosphorus fertilizer application in areas with alluvial and lacustrine deposits along the Yangtze River and around lakes while appropriately increasing phosphorus fertilizer application in hilly areas with secondary loess to enhance soil fertility and maintain crop productivity.

Keywords: paddy soil; parent material; soil phosphorus; spatial distribution; fertility evaluation

磷(P)是植物正常生长发育的必需营养元素^[1],土壤磷素生物有效性不仅影响作物生长水平,也是陆地生态系统平衡的重要保障^[2]。目前,全球43%的耕地面临磷缺乏现象,中国亦有2/3的耕地出现磷亏缺^[3]。提高土壤供磷能力是维持作物产量的重要途径,其中施用磷肥是解决农田土壤供磷不足的有效措施,但磷肥当季利用率偏低,而常年持续过量施用磷肥会使土壤磷素积累。南方潮湿多雨情况下,土壤中积累过量磷素易通过淋洗和径流等方式进入河流湖泊,污染水体,造成富营养化,对周围的生态环境、水生动物和人类健康构成威胁,为此,科学施用磷肥显得尤为重要^[4-5]。江汉平原位于我国长江中下游地区,处于第二、三阶梯过渡带,以种植水稻为主,核心区域由长江、汉江冲积物和湖泊沉积物发育形成,北部区域因远离江河湖泊由次生黄土母质发育的丘陵岗地组成,是华中地区重要的粮棉油基地。张浩洋等^[6]研究表明江汉平原中部、长江中下游及湖泊附近土壤有效磷富集,空间上形成高一高聚集;而长江、汉江中上游地区,土壤有效磷呈流失状态,空间上形成低—低聚集。江汉平原以水稻种植为主,水稻土有效磷含量为6~14 mg/kg,平均9.8 mg/kg^[7]。以荆州区为例,邹家龙^[8]研究发现同第二次土壤普查结果相比,该区水稻土土壤有效

磷含量>10.1 mg/kg的面积提高了约80%。土壤是各种母质风化发育而成,其土壤肥力与理化性质都继承了母岩母质特性^[9-10]。不同母岩母质发育形成的水稻土自然肥力差异较大,尤其供磷能力与土壤母质类型密切相关。随着平衡施肥技术不断推广,科学施肥日益受到农户重视^[11-12]。根据区域土壤有效磷水平施用磷肥用量不仅能够增加作物产量,还能维持土壤肥力^[13-14]。然而,不同母质发育的水稻土供磷能力差异较大,施肥效果亦不尽相同^[15-16]。土壤磷既是营养物质又是污染物质,对稻田生产力和稳定性具有不可忽视的影响。因此,研究不同母质水稻土磷含量分布及其组分变化,可为区域水稻种植和磷肥科学管理提供参考依据。

1 材料与amp;方法

1.1 试验区概况

荆州区位于湖北省中南部、长江中游、江汉平原腹地。水稻田样点位于荆州区5个乡镇(川店镇、八岭山镇、马山镇、弥市镇和李埠镇)和2个管理区(太湖港管理区和菱角湖管理区)。地形地貌以荆州古城为界,北部以丘陵岗地为主,包括八岭山、川店、马山和纪南镇,土壤由次生黄土母质发育而成,水田多为马肝泥田;南部以平原为主,分布在长江两岸和临

江区域的四湖(太湖、菱角湖、长湖和西湖)地区,土壤由冲积物和湖积物母质发育而成,水田多为潮泥田和湖泥田。其中,弥市镇和李埠镇为冲积物母质,太湖港管理区和菱角湖管理区土壤多由湖积物母质发育而来。荆州区水田多采用水稻—油菜轮作或水稻—冬闲模式。作物施肥种类以复合肥为主,追肥为复合肥或者尿素。水稻、油菜的区域推荐施肥量氮肥、磷肥和钾肥均为180,90和120 kg/hm²;油菜季增施硼肥(硼砂)15 kg/hm²。作物收获后,秸秆覆盖地表,与基肥一同翻压还田^[17]。

1.2 试验设计

2022年9月水稻收割后,对荆州区3种不同成土母质分布地区(冲积物母质:弥市镇和李埠镇;次生黄土母质:马山镇、八岭山镇和川店镇;湖积物母质:太湖港管理区和菱角湖管理区)的基本农田水稻土进行广泛调查,在结合研究此区域内的土壤类型、农田利用方式,种植规模和所处地理位置及地形特点等信息的前提下布设土壤采样点。采集冲积物母质发育地区样点212个,次生黄土母质发育地区样点286个,湖积物母质发育地区样点102个,共计600份土壤样点。

1.3 样品采集与处理

每个采样单元按照梅花型布点10个,用不锈钢

土钻采集耕层土壤(0—20 cm)混合均匀,四分法保留1 kg样品带回实验室。拣出土壤样品中的碎石、砂砾和植物残体,摊开自然风干。风干后用木槌碾磨,过孔径0.85 mm尼龙筛,装入自封袋,备用。

1.4 样品分析

①测定指标。土壤总磷(total P)、有机磷、有效磷和水溶性磷、pH值、有机质、全氮、有效氮、有效钾、全氮、有效氮(available N)和速效钾(available K)。②测定方法。土壤总磷采用NaOH熔融—钼锑抗比色法,有效磷采用0.5 mol/L NaHCO₃浸提—钼锑抗比色法测定,土壤水溶性磷用纯水浸提—钼锑抗比色法,有机磷采用差减法获取,总磷减去无机磷含量即为有机磷含量。有机质采用重铬酸钾—外加热法,pH值采用电位法测定,全氮采用半微量开氏法测定,有效氮采用碱解扩散法测定,速效钾采用HNO₃溶液浸提—火焰光度计法测定^[18]。

1.5 数据处理及分析

采用MS Excel 2021对数据进行整理,SPSS 20.0进行统计分析和相关性分析。ArcGIS 10.8软件进行样点和评价图件绘制。土壤磷等级评价标准参照第二次全国土壤普查总磷和有效磷分级标准(表1)。

表1 第二次全国土壤普查总磷和有效磷含量分级标准

Table 1 Classification standard of total P and available P content in second national soil survey

指标	1级	2级	3级	4级	5级	6级
总磷/(g·kg ⁻¹)	> 1.0	0.8~1.0	0.6~0.8	0.4~0.6	0.2~0.4	≤0.2
有效磷/(mg·kg ⁻¹)	> 40.0	20.0~40.0	10.0~20.0	5.0~10.0	3.0~5.0	≤3.0

2 结果与分析

2.1 不同母质发育水稻土总磷、有机磷和无机磷分布特征

图1结果显示,荆州区不同成土母质发育水稻土总磷含量分布有显著差异。水稻土总磷范围在0.2~1.0 g/kg,冲积物母质发育水稻土总磷含量水平最高,为0.6~1.0 g/kg;其次是湖积物母质发育水稻土,约为0.4~0.8 g/kg;而次生黄土母质发育水稻土总磷含量最低,为0.2~0.6 g/kg。与总磷含量相比,3种成土母质发育水稻土有机磷含量也表现出相似规律。即,冲积物母质(0.338 g/kg)>湖积物母质>次生黄土母质。无机磷整体含量均值则为:湖积物母质>冲积物母质>次生黄土母质。此外,无机磷和有机磷组分占比可看出次生黄土母质和湖积物母质发育水稻土无机磷所占比例均超过50%。

2.2 不同母质发育水稻土有效磷和水溶性磷分布特征

由图2可知,荆州区不同母质发育水稻土有效磷含量分布范围内9.326~36.841 mg/kg。冲积物母质有效磷含量均值最高,达到21.418 mg/kg;次生黄土母质有效磷整体含量较低,均值为11.339 mg/kg。不同乡镇水稻土的水溶性磷含量分布呈现明显差异,其平均值含量表现为:湖积物母质(22.600 mg/kg)≈冲积物母质(21.157 mg/kg)>次生黄土母质(13.421 mg/kg)。

2.3 不同母质发育水稻土磷分级评价

由图3可知,荆州区冲积物母质发育水稻土样点总磷含量多处于2级和3级水平,所占比例为80%;湖积物母质发育水稻土样点总磷含量以3级和4级为主,所占比例为90%;次生黄土母质总磷以4级(51.9%)和5级(38.9%)为主。有效磷含量在冲积物

母质中 1, 2 和 3 级均有分布, 比例合计 85%; 湖积物母质有效磷在 2, 3 和 4 级分布基本持平, 比例合计

93%; 次生黄土母质有效磷以 3 级和 4 级为主导地位, 所占比例为 85.2%。

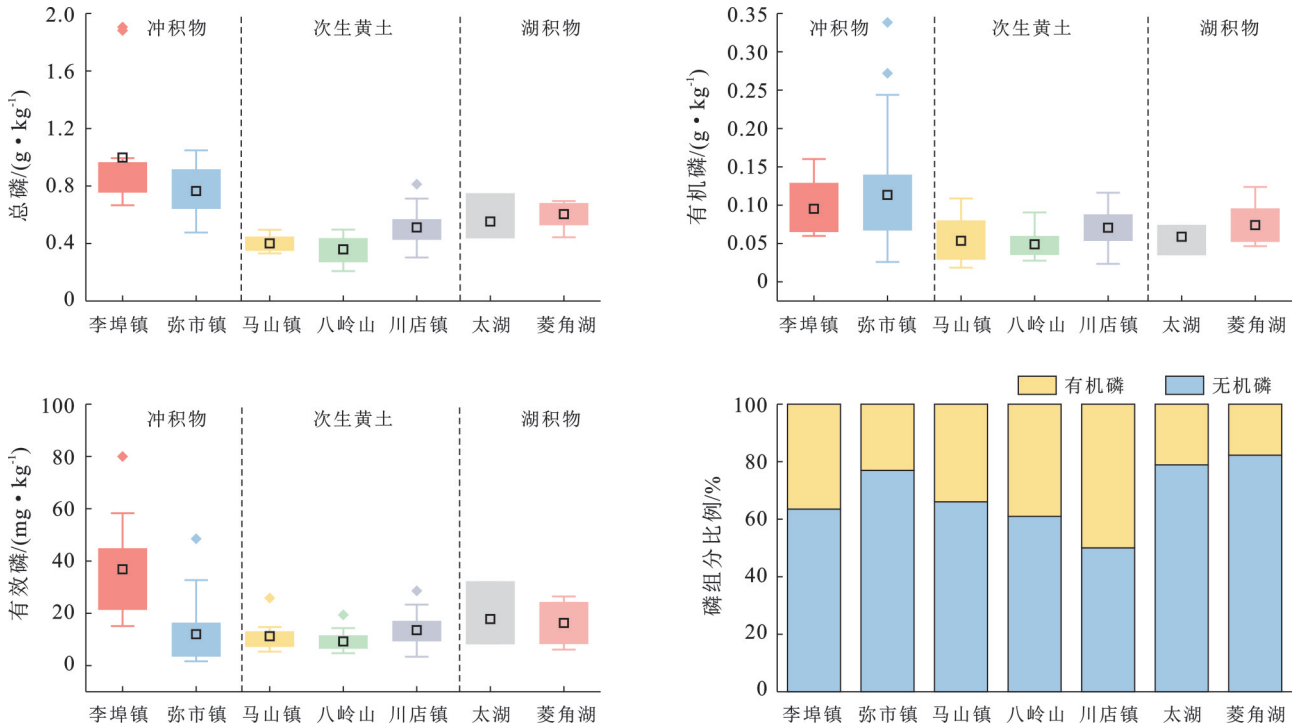


图 1 不同母质发育水稻土总磷、有机磷和无机磷含量分布

Fig.1 Distribution of total P and organic P in paddy soil in different parent materials

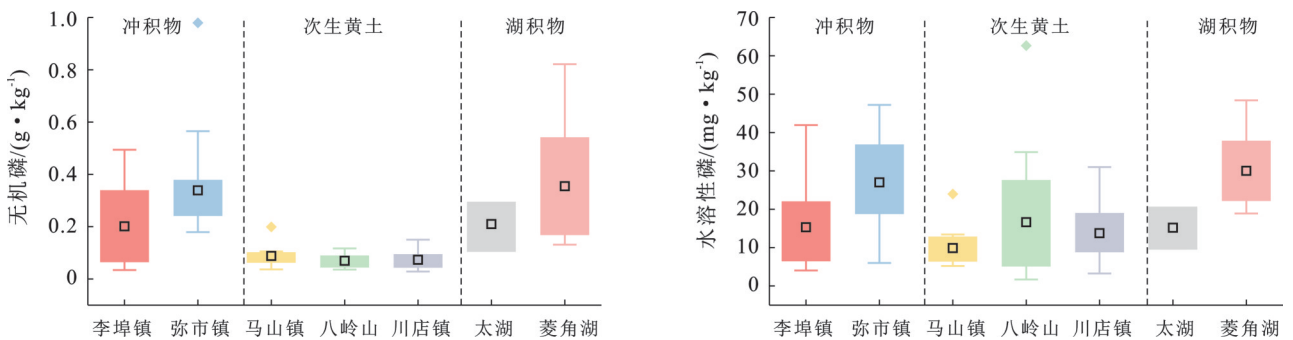


图 2 不同母质发育水稻土有效磷和水溶性磷含量分布

Fig. 2 Distribution of available P and water-soluble P in paddy soil with different parent materials

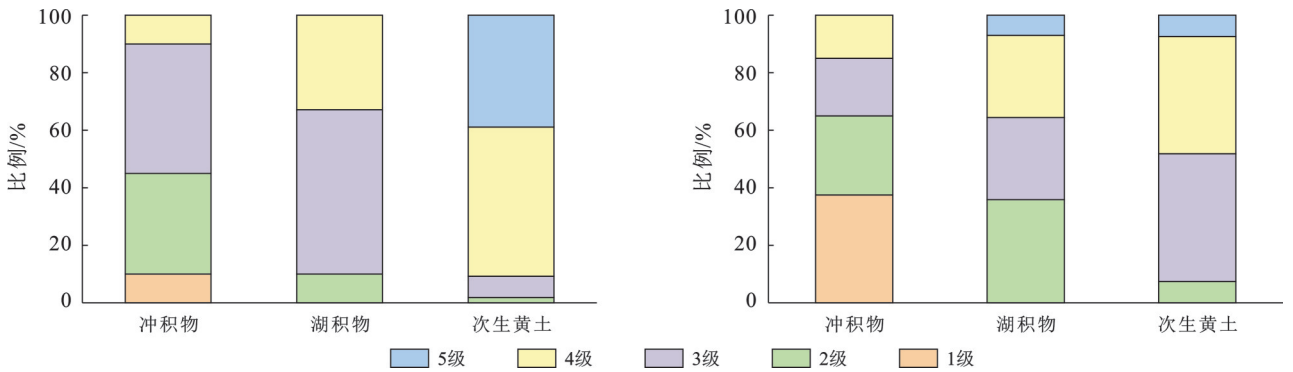


图 3 不同母质发育水稻土总磷和有效磷等级分布

Fig. 3 Distribution of total P and available P in paddy soil with different parent materials

空间插值分析(图 4)结果表明, 荆州区水稻土各形态磷含量在空间分布上具有一定的规律性, 以长

江两岸含量最高, 向北远距离长江过渡到丘陵地带逐渐降低。

水稻土总磷和有机磷含量在荆州区南部冲积物母质分布地区(李埠镇和弥市镇)较高,在北部次生黄土母质分布地区(川店镇、八岭山镇和马山镇等)

较低。水稻土有效磷和水溶性磷含量在湖积物母质(太湖管理区、菱角湖管理区南部)和冲积物母质接壤地区含量较高。

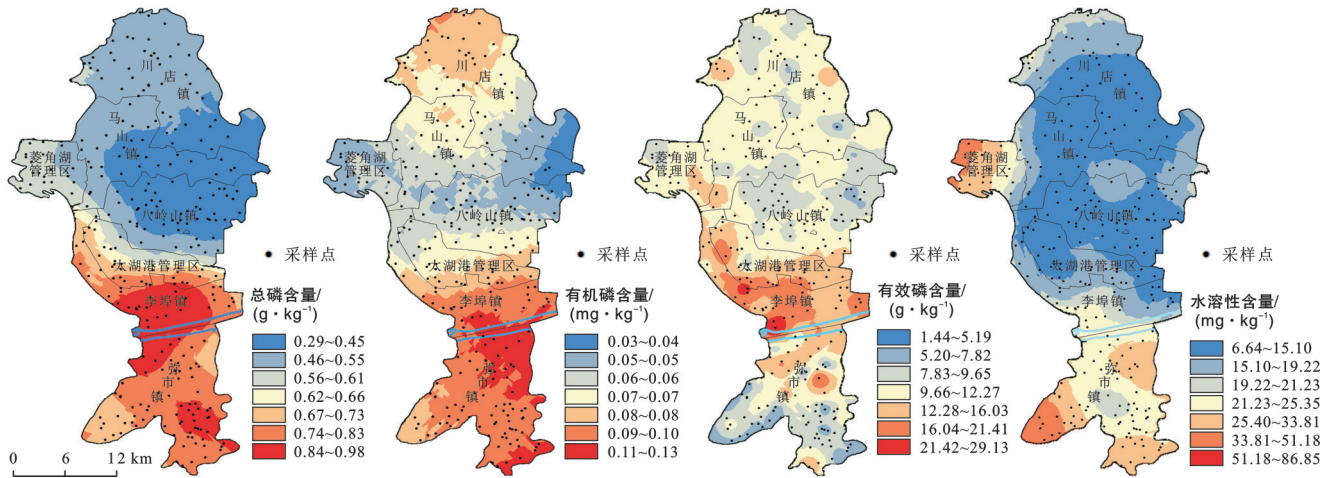


图 4 不同母质发育水稻土磷含量空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of P content in paddy soil in paddy soil with different parent materials

2.4 不同母质发育水稻磷含量与其他指标相关性分析

利用 Canoco 5.0 中的 RDA 模型分析土壤母质、样点与河流、湖泊直线距离,海拔高度和其他养分指标对水稻土总磷和有效磷量的影响(图 5)。结果表明,排序轴 1 和排序轴 2 的解释率分别为 57.6% 和 26.2%,且土壤母质类型和样点距离对总磷、有效磷影响解释率最大($p < 0.01$),而海拔高度基本没有影响。此外,总磷与有机质、全氮显著正相关($p < 0.05$);有效磷与有效钾、有效氮显著正相关($p < 0.05$)。

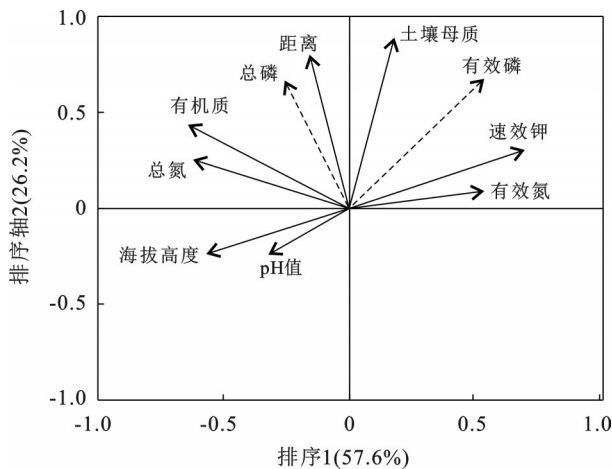
3 讨论

3.1 母质类型对水稻土总磷、有机磷和无机磷分布的影响

研究表明,不同母质土壤总磷含量与地理区位、施肥方式及用量和污染程度有关。由图 4 荆州区土壤磷水平分布格局来看,长江沿岸冲积物母质发育土壤总磷含量相对较高。根据华玲玲^[7]对江汉平原农田土壤分析,总磷含量平均为 0.8 g/kg。本研究(图 3)土壤总磷含量在 0.2~1.0 g/kg,平均 0.6 g/kg,部分点位总磷含量高达 2.9 g/kg。荆州区土壤总磷含量处于中等及以上水平,其分布与河流湖泊的距离有着密切关系。可见,地形因子导致的水热分布差异是造成土壤形成和理化性质空间差异的重要因素,这与叶彩虹等^[19]研究结果相似。土壤有机磷含量受土壤总磷含量、有机质含量、pH 值和土地利用方式等的影响而差异较大。冲积物母质和湖积物母质发育水稻土自身肥力高,长期作物收获后残体归还土壤增加有机质含量,从而提高有机磷含量,而次生黄土母质发育水稻土受到淋洗影响,保肥能力相对较弱,频繁水位变动和强烈的氧化还原反应增加了无机磷固定作用,造成有机物积累不足和相对量降低^[20]。

3.2 母质类型对水稻土有效磷和水溶性磷分布的影响

土壤磷生物有效性受土壤机械组成、酸碱度、有机质含量等土壤性质的影响,同时地形、气温、降雨量、施肥量等外在因素也可对其产生干扰。荆州区



注:距离为样点与河流、湖泊的直线距离。

图 5 不同母质发育水稻土磷与环境、养分因子相关分析
Fig.5 Correlation analysis of P content with environment and nutrient factors in paddy field with different parent materials

水稻土有效磷含量平均为 15.708 mg/kg,整体处于中等水平(图 2),这与张浩洋^[6]对江汉平原耕地土壤测量分析所得出的有效磷含量平均值为 14.746 mg/kg 结果一致。华玲玲^[7]的研究江汉平原排灌单元水旱轮作种植模式下水稻土有效磷含量主要分布在 6~14 mg/kg,平均 9.8 mg/kg,也表明有效磷供应能力相对紧张状态,作物高产条件下,需要额外补充磷肥。在研究范围内,靠近湖泊、河流的冲积物母质地区弥市镇和李埠镇有效磷含量相对较高(图 4),表明河流冲积物对周边土壤的有效磷含量有显著影响。湖泊附近,有效磷呈现富集状态;江汉平原中部呈现大面积富集分布状态;江汉平原的长江下游有效磷富集,引起周围耕地土壤磷素富集;沿江汉平原的长江中上游,有效磷则呈现流失状态,磷素被径流和降水冲洗带到下游,这与柳冬青等^[21]对流域上游越近土壤磷流失量越大的结果相同。土壤有效磷富集量增加,会导致面源污染风险。因此,对于冲积物母质和湖积物母质发育水稻土地区,控制磷肥用量是土壤养分精准化调控和磷素面源污染防治的关键。

3.3 母质类型对水稻土磷分布异质性的影响

地统计分析结果表明,土壤总磷、有效磷、有机磷、水溶性磷空间分布差异显著,与成土母质和地形因素密切相关。荆州区长江沿岸以及靠近其他河流湖泊处土壤含磷量总体较高,而远离河岸的丘陵地区则土壤含磷量相对较低(图 4)。长江沿岸的植被和土壤微生物受水分和其他环境因素影响,加强了呼吸作用和分解速率,导致磷素循环速率加快。此外,水流聚积也为土壤磷积累提供有利的自然条件^[22-23]。克里格插值结果显示,荆州区南部地区总磷含量丰富,其次是中部地区,而北部地区最低。同样,水稻土有效磷含量表现为中部和南部高,向北部逐渐较少的趋势。荆州区土壤磷含量空间分布异质性差异是在多方面因素共同作用下形成的。荆州区属华中盆地江汉平原的西边部分,境内既有垄岗起伏,又有平原,河网交织,渠道纵横。次生黄土母质分布区的农业地貌为低丘岗地,而沿江两岸的冲积物母质地区及湖积物母质地区皆为平原,土壤深厚肥沃。以磷含量较高地区李埠镇、弥市镇和磷含量较低地区川店镇和马山镇为例,川店镇和马山镇土壤类型为次生黄土发育形成的马肝泥田,受地下水影响,次生黄土母质发育水稻土耕层质地黏性强,宜耕期较短,透水性较差,土壤养分偏低。弥市镇和李埠镇土壤类型为潮土性水稻土,通透性好,宜耕期长,肥性相对较好。因此,经过长期人为耕作和施肥

作用,各地区土壤磷水平仍受限于母质本身肥力特征影响。然而,本研究土壤磷评价体系是基于全国第二次土壤普查成果,评价指标和等级划分是否符合当前实际还有待与第三次全国土壤普查结果相结合。土壤肥力是一个动态过程,需要通过二普、测土配方施肥和三普数据共同对比并结合地形特征和土壤类型,才能更好地指导区域科学施肥。

4 结论

荆州区冲积物母质、次生黄土母质和湖积物母质发育的水稻土总磷含量平均分别为 0.881, 0.427, 0.579 g/kg;有机磷含量分别为 0.104, 0.058, 0.066 g/kg;有效磷含量为 24.418, 11.339, 17.043 mg/kg;水溶性磷含量为 21.157, 13.421, 22.600 mg/kg。荆州区不同母质发育水稻土的地带分布与长江、湖泊和丘陵位置密切相关,并显著影响土壤磷的空间异质性。水稻土各形态磷含量在荆州区南部(长江沿岸)冲积物母质和湖积物母质发育地区较高,磷含量处于中等及以上水平,而北部次生黄土母质发育(丘陵岗地)地区较低,磷含量以中等水平为主。因此,针对不同母质发育水稻土应进行磷的差异化化管理,以提高磷肥利用率和维持作物生产力。

参考文献(References)

- [1] 马祥庆,梁霞.植物高效利用磷机制的研究进展[J].应用生态学报,2004,15(4):712-716.
Ma Xiangqing, Liang Xia. Research advances in mechanism of high phosphorus use efficiency of plants [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(4): 712-716.
- [2] 肖作义,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 Zuoyi, Ma Fei, Liu Kailou, 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.
- [3] 黄英梅,梁春梅,许昌超,等.不同类型有机质对高山榕根系形态性状及土壤养分含量的影响[J].江西农业学报,2024,36(12):46-57.
Huang Yingmei, Liang Chunmei, Xu Changchao, et al. Effects of different types of organic matter on root morphological traits of *Ficus altissima* and soil nutrient content [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2024, 36(12): 46-57.
- [4] 刘惠见,邓洪,黄维恒,等.滇池流域不同利用方式下红壤磷素渗漏环境风险评价[J].中国土壤与肥料,2019(2):54-60.
Liu Huijian, Deng Hong, Huang Weiheng, et al. Envi-

- ronmental risk assessment of phosphorus leakage in red soil under different land utilization types in Dianchi basin [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019 (2): 54-60.
- [5] Rashmi I, Biswas A K, Kartika K S, et al. Phosphorus leaching through column study to evaluate P movement and vertical distribution in black, red and alluvial soils of India [J]. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 2020, 19(3):241-248.
- [6] 张浩洋. 江汉平原耕层土壤有效磷时空预测及磷富集影响因素研究[D]. 湖北 武汉: 华中农业大学, 2023.
Zhang Haoyang. Study on spatio-temporal prediction of soil available phosphorus and influencing factors of phosphorus enrichment in Jiangnan Plain [D]. Wuhan, Hubei: Huazhong Agricultural University, 2023.
- [7] 华玲玲. 江汉平原灌排单元稻田磷素运移行为研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2017.
Hua Lingling. Study on phosphorus migration behavior in paddy field of irrigation and drainage unit in Jiangnan Plain [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017.
- [8] 邹家龙. 荆州区耕地地力评价及应用研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
Zou Jialong. Evaluation and application of cultivated land fertility in Jingzhou District [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014.
- [9] 马境菲. 长期施肥和成土母质对红壤有机碳稳定性的影响[D]. 江苏 南京: 南京信息工程大学, 2011.
Ma Jingfei. Effects of long-term fertilization and soil parent material on the stability of organic carbon in red soil [D]. Nanjing, Jiangsu: Nanjing University of Information Science & Technology, 2011.
- [10] 周清, 周斌, 张杨珠, 等. 成土母质对水稻土高光谱特性及其有机质含量光谱参数模型影响的初步研究[J]. *土壤学报*, 2004, 41(6):905-911.
Zhou Qing, Zhou Bin, Zhang Yangzhu, et al. Influence of parent materials on paddy soil hyperspectral characteristics and SOM spectral-parameter-models [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(6):905-911.
- [11] 肖书兴, 白福臣. 长江中下游粮食主产区农业面源污染对粮食经济的生态压力研究[J]. *生态经济*, 2019, 35(7):155-160.
Xiao Shuxing, Bai Fuchen. Effects of agricultural non-point source pollution on ecological pressure of food economy in the main grain production area of the lower Yangtze Region [J]. *Ecological Economy*, 2019, 35(7):155-160.
- [12] Haygarth P M, Jarvie H P, Powers S M, et al. Sustainable phosphorus management and the need for a long-term perspective: The legacy hypothesis [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(15): 8417-8419.
- [13] 吴晓君, 曾子鑫, 郭佩佩, 等. 磷肥用量和石灰对甜玉米产量和磷素吸收利用的影响[J]. *热带作物学报*, 2023, 44(1):133-142.
Wu Xiaojun, Zeng Zixin, Guo Peipei, et al. Effects of phosphorus and lime application on sweet corn yield and phosphorus uptake and utilization [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2023, 44(1):133-142.
- [14] 沈浦. 长期施肥下典型农田土壤有效磷的演变特征及机制[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
Shen Pu. Evolution characteristics and mechanism of soil available phosphorus in typical farmland under long-term fertilization [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014.
- [15] Perillo V L, Ross D S, Wemple B C, et al. Stream corridor soil phosphorus availability in a forested-agricultural mixed land use watershed [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2019, 48(3):783-785.
- [16] 潘复静, 陈英倩, 梁月明, 等. 种植密度对马尾松人工林土壤磷转化功能微生物与细菌群落结构的影响[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(5):1233-1243.
Pan Fujing, Chen Yingqian, Liang Yueming, et al. Effects of stand density on community structure of soil phoD-harboring microorganisms and bacteria in *Pinus massoniana* plantations [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(5):1233-1243.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao Shidan. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis* [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [18] Li Jifu, Gan Guoyu, Zeng Qianqian. Impacts of long-term fertilization on crop yield and microbial communities under rice-rapeseed rotation [J]. *Agronomy Journal*, 2023, 115(1):208-221.
- [19] 叶彩红, 李莹莹, 何茜, 等. 韩江流域中下游林地土壤全磷含量特征及空间分布格局[J]. *林业与环境科学*, 2022, 38(4):23-27.
Ye Caihong, Li Yingying, He Qian, et al. Characteristics and spatial distribution pattern of total phosphorus content in forest soil in the middle and lower reaches of the Hanjiang River basin [J]. *Forestry and Environmental Science*, 2022, 38(4):23-27.
- [20] 黎明, 李伟. 湿地碳循环研究进展[J]. *华中农业大学学报*, 2009, 28(1):116-123.
Li Ming, Li Wei. Review on carbon cycle of wetland ecosystem [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2009, 28(1):116-123.