

引用格式:

王军, 许毅隼, 段勋, 涂强, 何寻阳, 张振华, 苏以荣, 陈香碧. 我国东部典型气候区土壤全磷及其活性组分含量特征 [J]. 农业现代化研究, 2025, 46(1): 174-181.

WANG J, XU Y J, DUAN X, TU Q, HE X Y, ZHANG Z H, SU Y R, CHEN X B. Characteristics of total phosphorus content and its active components in soils of typical climate zones in eastern China[J]. Research of Agricultural Modernization, 2025, 46(1): 174-181.

DOI: 10.13872/j.1000-0275.2024.1772

CSTR: 32240.14.1000.0275.2024.1772



我国东部典型气候区土壤全磷及其活性组分含量特征

王军^{1,2}, 许毅隼^{1,2}, 段勋², 涂强³, 何寻阳², 张振华^{1*}, 苏以荣², 陈香碧^{1,2*}

(1. 湖南农业大学资源学院, 湖南长沙 410128; 2. 中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室, 湖南长沙 410125; 3. 中国科学院深圳先进技术研究院, 深圳市基因组操纵及生物合成重点实验室, 广东深圳 518055)

摘要: 土壤磷及其赋存形态对农田施肥管理和磷素利用效率优化具有重要意义。本文以我国东部四个气候区(中温带、暖温带、亚热带、热带)为研究对象, 分析了不同土地利用方式(林地、旱地、水田)下土壤全磷(TP)、有效磷(Olsen P)和微生物量磷(MBP)的含量特征。结果表明, 暖温带土壤 TP 含量较高, 但 Olsen P 和 MBP 较低, 可能与高 pH 条件下磷的固定作用有关。中温带和热带土壤 TP 含量较低, Olsen P 较高, 主要由中温带有机质含量高及热带高温湿润条件促进磷素转化引起。亚热带土壤 TP 和 Olsen P 最低, 可能由于强降水和土壤铁铝氧化物的固定作用。不同土地利用方式中, 农田土壤 TP、Olsen P 和 MBP 普遍高于林地土壤。中温带水田 Olsen P 高于旱地, 但 MBP 低; 暖温带水田和旱地土壤无显著差异; 亚热带和热带旱地土壤 Olsen P 和 MBP 高于水田。总体上, 旱地土壤磷素有效性较高, 微生物同化磷素较强。环境因子分析表明, 土壤 TP、Olsen P 和 MBP 的含量与土壤有机碳、年均温和年降水相关。研究为优化我国东部农田磷素管理策略提供了科学依据。

关键词: 全磷; 有效磷; 微生物量磷; 气候区; 土地利用方式

中图分类号: S153

文献标识码: A

文章编号: 1000-0275(2025)01-0174-08

Characteristics of total phosphorus content and its active components in soils of typical climate zones in eastern China

WANG Jun^{1,2}, XU Yijun^{1,2}, DUAN Xun², TU Qiang³, HE Xunyang², ZHANG Zhenhua¹,
SU Yirong², CHEN Xiangbi^{1,2}

(1. College of Resources, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2. Key Laboratory of Agro-Ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha, Hunan 410125, China; 3. Shenzhen Key Laboratory of Genome Manipulation and Biosynthesis, Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen, Guangdong 518055, China)

Abstract: Soil phosphorus and its forms play a crucial role in farmland fertilization management and optimizing phosphorus utilization efficiency. This study focused on four climate regions in eastern China (mid-temperate, warm-temperate, subtropical, and tropical zones) to analyze the content characteristics of total phosphorus (TP), available phosphorus (Olsen P), and microbial biomass phosphorus (MBP) under different land use types (forest land, dry land, and paddy fields). The results revealed that soils in the warm-temperate zone had relatively high TP but lower Olsen P and MBP, likely due to phosphorus fixation under high pH conditions. In contrast, soils in the mid-temperate and tropical zones exhibited lower TP but higher Olsen P, attributed to high organic matter content in the mid-temperate zone and enhanced phosphorus transformation under high temperature and humidity in the tropical zone. Subtropical soils had the lowest TP and Olsen P levels, possibly due to heavy rainfall and fixation by soil iron and aluminum oxides. Across land use types, farmland soils generally had higher TP, Olsen P, and MBP compared to forest soils. In the mid-temperate zone, paddy fields had higher Olsen P but lower MBP than dry lands; however, no significant differences

收稿日期 Received: 2024-10-24; 接受日期 Accepted: 2024-12-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD1902802); 国家自然科学基金项目(42377348, 42177295); 湖南省自然科学基金项目(2024JJ2052); 深圳市科技计划平台和载体专项筹建启动项目(ZDSYS20220303153551001)。Supported by the National Key Technology Research and Development Program (2023YFD1902802); National Natural Science Foundation of China (42377348, 42177295); Natural Science Foundation of Hunan Province (2024JJ2052); Shenzhen Science and Technology Planning Platform and Carrier Special Preparation and Startup Project (ZDSYS20220303153551001).

* 通信作者 Corresponding author (zhzh1468@163.com; xbchen@isa.ac.cn)

were observed between paddy fields and dry lands in the warm-temperate zone. In the subtropical and tropical zones, dry lands showed higher Olsen P and MBP levels compared to paddy fields. Overall, dry land soils demonstrated greater phosphorus availability and microbial phosphorus assimilation. Environmental factor analysis indicated that soil TP, Olsen P, and MBP were significantly correlated with soil organic carbon, mean annual temperature, and annual precipitation. This study provides scientific insights for optimizing phosphorus management strategies for farmland in eastern China.

Keywords : total phosphorus; available phosphorus; microbial biomass phosphorus; climate zone; land use type

磷是作物生长所需的第二大营养元素，在作物生长代谢过程中发挥着重要作用^[1]。土壤中的磷大部分以有机磷的形式存在，占总磷的 25%~50%^[2]，而有机磷需要通过微生物矿化转化为无机磷才能被作物吸收利用^[3]。在农业生产中，施用的无机磷肥容易被活性矿物吸附固定，导致磷素的有效性降低，当前季利用率仅为 10%~25%^[4]。长期不合理的大量施用磷肥，不仅会导致农田土壤磷素流失和面源污染的风险增加^[5]，还会造成磷资源的巨大浪费。因此，研究农田土壤总磷含量及磷素有效性，对于指导磷肥的施用和田间管理具有重要意义。

我国东部地区涵盖了全国 80% 以上的农田，是水稻、玉米、大豆、油菜籽等大宗农产品的主要生产基地。水稻是我国的主要粮食作物之一，大量种植于东部地区，横跨中温带、暖温带、亚热带和热带四个气候区。我国东部从北到南的气候条件和土壤属性差异较大：北方气温较低、降水较少，在干旱或半干旱的环境中，土壤中的磷常被固定在矿物质中，导致磷的有效性较低；南方气温较高、降水较多，湿润的环境有助于磷的溶解和释放，尤其在酸性土壤中，磷的溶解性和生物可用性通常较高。然而，南方高降水条件下，速效磷甚至矿物结合态磷和闭蓄态磷可能会发生流失^[6-9]。北方地区土壤主要为黑土、黑钙土，多呈中性至碱性，土壤中大量无机磷被钙、镁离子固定，降低了磷素的有效性及微生物对磷素的同化利用。同时，黑土有机质含量较高，能为微生物提供稳定的能量来源，从而提高磷的微生物利用和转化效率，进而提升其有效性^[10-12]；南方地区土壤主要为红壤、黄壤和水稻土，多呈酸性，容易与高活性的铁、铝氧化物反应，形成难溶性磷酸盐沉淀^[13-14]。考虑到气候条件和土壤属性对磷素有效性的复杂影响，气候带尺度上农田土壤活性磷组分含量及其影响因子的研究仍有待深入探讨。

水田和旱地是我国东部地区典型的农业土壤利用方式。与林地相比，由于长期施用含磷无机肥料和有机物料，同时有着特殊的水分管理方式，农田土壤的磷素含量及其赋存形态发生了明显变化^[15]。旱地土壤对无机磷的固定作用较强，而水田土壤则

由于周期性的淹水与排水管理，呈现出不同的磷素行为。旱地土壤中，微生物通过分泌磷酸酶等酶活化无机磷库，持续供给有机磷库，使得旱地土壤中的有机磷底物含量高于水田，且微生物不断分解有机磷，提升磷素的有效性^[16]。水田土壤则经历好氧和厌氧的周期性变化，好氧环境有利于微生物对磷的矿化，而厌氧环境则有助于铁、锰等活性金属结合态磷的释放，从而提高磷素的有效性^[17]。然而，长期淹水会抑制微生物活性，减少微生物对磷的摄取，导致磷素随灌溉、排水等农田水分管理措施而流失^[18]。因此，水田和旱地土壤磷素有效性的普遍规律仍需进一步研究。鉴于此，本研究以我国东部四个气候区（中温带、暖温带、亚热带、热带）为研究对象，选取相邻林地、旱地和水田表层土壤，分析土壤总磷及活性磷组分含量对气候区和土地利用方式的响应特征及其影响因子。研究结果将有助于揭示我国东部区域林地和农田土壤磷素及有效性的普遍规律，为优化区域农业磷肥管理、提高磷肥利用效率及促进作物增产增效提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 土壤样品采集

水稻是我国主要的粮食作物。根据我国东部水稻主产区的分布特征，从北到南选取中温带（黑龙江和吉林）、暖温带（山东和河南）、亚热带（湖南和江西）和热带（广东和海南）四个气候区。采用配对采样原则，在每个气候区采集 60 组林地、水田和旱地表层土壤，共计 240 组土壤样品（720 个）^[19]。采样点经纬度、土壤分类和植被信息如表 1 所示。具体采样设计如下：每个气候区选择 10 个县（市），每个县（市）随机选取 6 个样区，每个样区位于同一景观单元内（相距不超过 500 m），以确保不同土地利用方式下的成土母质和气候因子相对一致。每个样区内选取一块典型的林地、水田和旱地田块，采用“S”型取样法，在每个田块内随机布设 6~8 个样点，采集表层土壤（0~15 cm）。采集时剔除石块及动植物残体，混匀后处理。按照四分法取部分鲜土样品带回实验室，保存在 4℃ 条件下，并过 2 mm 筛，用于测定土壤微生物生物量（MBP）；另取部

表 1 我国东部四个气候区典型土壤类型及植被信息

Table 1 Typical soil types and vegetation information of four climatic regions in eastern China

气候带	经纬度	土壤类型区	植被信息
中温带	108°56'~110°43'E, 18°23'~21°25'N	黑土区	林地: 杨树; 旱地: 小麦或玉米; 水田: 单季稻。
暖温带	110°33'~113°34'E, 26°26'~28°34'N	潮土区	林地: 杨树; 旱地: 小麦 - 玉米; 水田: 单季稻。
亚热带	108°56'~110°43'E, 33°46'~35°50'N	红壤区	林地: 马尾松、杉树、次生林; 旱地: 甘薯 - 油菜、花生 - 油菜、玉米 - 油菜、大豆 - 油菜; 水田: 单季或双季稻。
热带	125°42'~129°53'E, 44°03'~47°37'N	砖红壤区	林地: 次生林、橡胶树; 旱地: 甘蔗 - 菠萝 - 甘薯、甘薯 - 花生 - 玉米; 水田: 双季或三季稻。

分样品风干并过筛,用于测定土壤有机碳(SOC)、全磷(TP)、有效磷(Olsen P)、可溶性有机碳(DOC)、pH、土壤质地等参数。

1.2 指标测定方法

1.2.1 土壤 TP 测定 采用 NaOH 熔融 - 钼锑抗比色法测定土壤 TP^[20]。实验中加入钼锑抗显色剂,摇匀后定容,用分光光度计(UV8500- II 型,日本)进行测定。

1.2.2 土壤 Olsen P 和 MBP 测定 土壤 Olsen P 和 MBP 采用氯仿熏蒸 - NaHCO₃ 法测定^[21],具体步骤如下:1)称取 5.0 g 新鲜土样,加入 40 mL 的 0.5 mol/L NaHCO₃ 溶液(pH = 8.5),在 25 °C 下以 180 r/min 的速度振荡 30 min。振荡后,用无磷滤纸过滤,收集滤液于小白瓶中,分取 5 mL 浸提液,使用连续流动分析仪(AutoAnalyzer 3,德国)测定 Olsen P 含量。2)称取另一份称取 5.0 g 新鲜土样,先用氯仿熏蒸 24~48 h,随后按上述相同方式进行浸提和过滤,并测定浸提液中的 PO₄³⁻ 含量。3)第三份土样中加入 0.5 mL 的 250 μg/mL KH₂PO₄ 溶液(即每克土壤中外加无机磷量为 25 μg),再加入 80 mL 的 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提液,按上述方法浸提和过滤。随后,参考 Brookes 等^[21]研究计算得到土壤 MBP 含量。

1.2.3 土壤其他属性与气象数据获取 用蒸馏水(土水比 1:2.5(溶质/溶剂))振荡 15 min,于 pH 计(Mettler-pH 320,德国)上测定 pH;采用激光粒度分析仪(Mastersizer 2000,英国)测定土壤质地;采用重铬酸钾氧化 - 外加热法测定 SOC 含量;采用氯仿熏蒸 - K₂SO₄ 浸提法测定 DOC 含量;年均温(MAT)和年降水(MAP)数据来源于中国气象数据共享服务系统(<http://data.cma.cn/>)。

1.3 数据处理与统计方法

使用 R-4.2.0 版本中的 ggplot2 包绘制箱线图,并采用 aov 函数进行单因素方差分析(One-way ANOVA),检验气候区和土地利用方式对土壤 TP 及活性磷组分含量及占比的影响。使用 agricolae 包中的 LSD.test 函数进行事后多重比较检验。利用

LinkET 包进行 Pearson 相关分析,检验土壤 TP 含量及活性磷组分含量与占比与环境因子(如 SOC、DOC、pH、土壤质地组成、MAT 和 MAP)的相关性。同时,使用 Random Forest 包建立随机森林模型,分析区域尺度上土壤 TP 含量及活性磷组分含量与占比与环境因子的关系。

2 结果

2.1 土壤 TP、Olsen P 和 MBP 含量

四个气候区土壤 TP 平均含量范围为 0.64~0.92 g/kg。三种土地利用方式下,旱地和水田的 TP 含量均高于林地。中温带和亚热带两种农田土壤 TP 平均含量表现为旱地 > 水田(亚热带旱地是水田的 1.3 倍),而在暖温带和热带则呈现水田 > 旱地的趋势($P > 0.05$);亚热带林地土壤 TP 含量显著低于其他三个气候区($P < 0.05$)(图 1a)。

四个气候区三种土地利用方式下,土壤 Olsen P 含量表现为从北到南先降低后增加(图 1b)。旱地土壤 Olsen P 含量在暖温带最低,水田和林地均在中温带最高。三种土地利用方式下,Olsen P 含量在四个气候区中普遍表现为旱地和水田显著高于林地土壤($P < 0.05$),但不同气候区之间差异程度不一。具体表现为从北到南,旱地和水田土壤 Olsen P 平均含量分别是林地的 2.4 和 3.0 倍、2.9 和 2.1 倍、8.0 和 3.6 倍、4.2 和 3.8 倍。两种农田在不同气候区规律不一致:亚热带旱地 Olsen P 含量显著高于水田($P < 0.05$),热带呈现旱地 > 水田的趋势($P > 0.05$),暖温带水田和旱地无显著差异($P > 0.05$),中温带呈现水田 > 旱地的趋势($P > 0.05$)。

四个气候区三种土地利用方式下土壤 MBP 含量表现为从北到南逐渐降低(图 1c)。总体而言,四个气候区的三种土地利用方式下,土壤 MBP 含量呈现旱地 > 水田 > 林地的趋势。在中温带和亚热带,林地和水田的 MBP 含量无显著差异($P > 0.05$)。从北到南,四个气候区旱地土壤的 MBP 平均含量为 108.4、77.4、88.3、27.5 mg/kg,分别是水田和林地的 3.8 和 2.4 倍、0.8 和 3.3 倍、1.7 和 2.9 倍、1.8

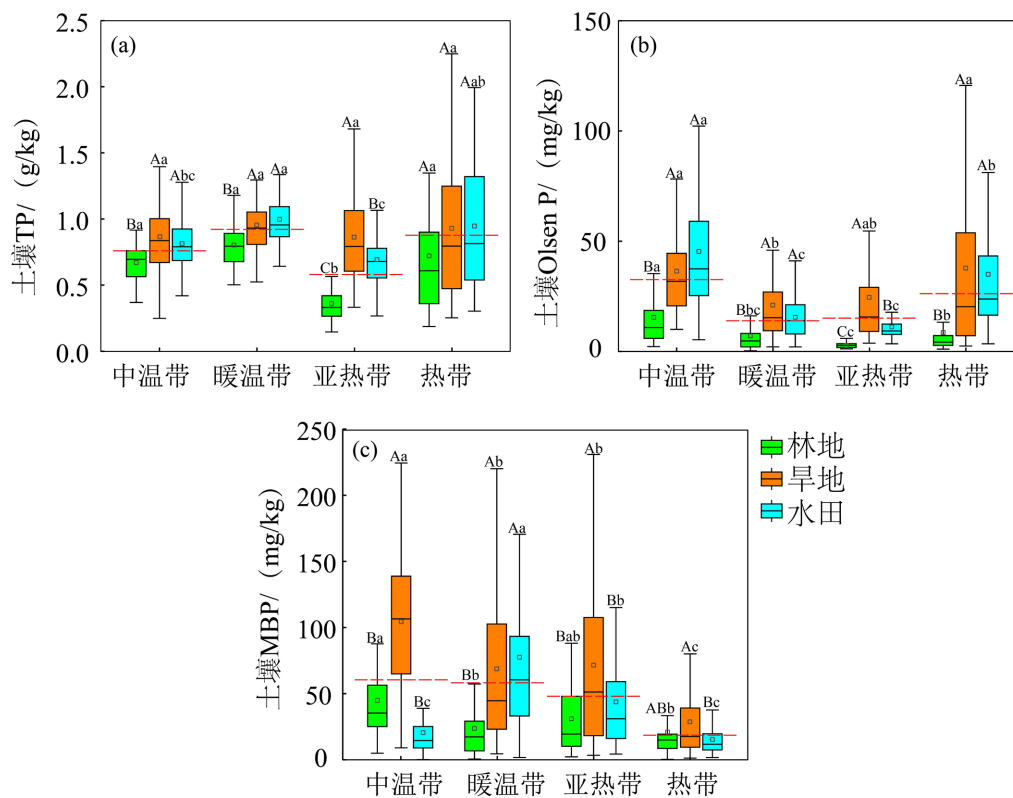


图 1 四个气候带三种土地利用方式下土壤全磷、速效磷和微生物量磷含量 ($n = 60$)

Fig. 1 Contents of total phosphorus, available phosphorus, and microbial biomass phosphorus in soil under four climate zones and three land use patterns ($n = 60$)

注：不同小写字母代表同一土地利用方式下不同气候区之间差异显著；不同大写字母代表同一气候区不同土地利用方式之间差异显著 ($P < 0.05$)；虚线代表不同气候区三种土地利用方式的平均值。下同。

和 1.3 倍。

2.2 土壤速效磷和微生物量磷占全磷比例

四个气候区土壤 Olsen P 占 TP 的比例（以下简称 Olsen P 占比）范围为 1.5%~4.1%。总体上，三种土地利用方式下 Olsen P 占比呈现从北到南先降低后增加的趋势，其中暖温带最低，中温带最高。四个气候区中，旱地和水田土壤 Olsen P 占比显著高于林地 ($P < 0.05$)，为林地土壤的 1.67~2.46 倍；

在暖温带和亚热带地区，旱地土壤 Olsen P 占比显著高于水田 ($P < 0.05$)。中温带和热带旱地和水田土壤 Olsen P 占比无显著差异 ($P > 0.05$) (图 2a)。

四个气候区土壤 MBP 占 TP 的比例（以下简称 MBP 占比）范围为 3.2%~9.1%。在旱地和林地土壤中，MBP 占比表现为中温带和亚热带 > 暖温带和热带 ($P < 0.05$)；在水田中，暖温带和亚热带的 MBP 占比显著高于中温带和热带 ($P < 0.05$)。中温带

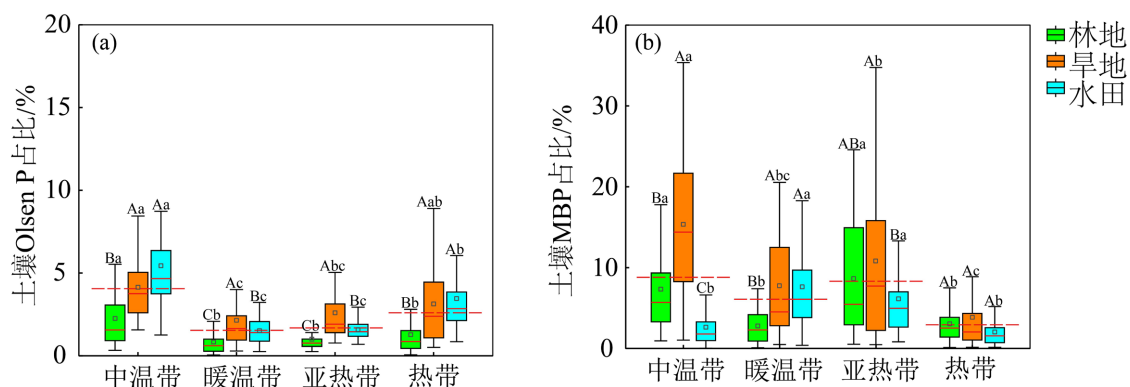


图 2 四个气候带三种土地利用方式下土壤有效磷和微生物量磷占全磷比例 ($n = 60$)

Fig. 2 The proportions of soil available phosphorus and microbial biomass phosphorus to total phosphorus under three land use patterns in four climate zones ($n = 60$)

和亚热带地区的旱地土壤 MBP 占比显著高于水田 ($P < 0.05$), 而暖温带和热带则无显著差异 ($P > 0.05$)。在中温带和亚热带地区, 林地土壤 MBP 占比显著高于水田 ($P < 0.05$), 但在暖温带, 水田的 MBP 占比显著高于林地 ($P < 0.05$), 而热带地区则无显著差异 ($P > 0.05$)。从北到南, 四个气候区旱地土壤 MBP 占比分别是水田的 7.7 倍、1.2 倍、1.8 倍、1.9 倍 (图 2b)。

2.3 土壤总磷及其活性组分含量的影响因素

随机森林分析结果表明, 影响土壤 TP 含量的环境因子主要有 SOC、pH、黏粒 (Clay)、MAT 和 MAP; 影响土壤 Olsen P 和 MBP 含量的主要环境因子为 SOC、pH、MAT 和 MAP。具体而言, SOC 含量与区域尺度上林地、旱地、水田土壤 TP、Olsen P 和 MBP 均呈现显著正相关关系 ($P < 0.05$); pH 与林地 TP 和水田 MBP 含量与呈现显著正相关关系 ($P < 0.05$); MAT 与林地 Olsen P、林地和旱地

MBP 含量呈显著负相关关系 ($P < 0.05$); MAP 与林地 Olsen P、旱地和水田 MBP 呈显著负相关关系 ($P < 0.05$) (图 3)。

3 讨论

3.1 四个气候区土壤 TP、Olsen P 和 MBP 含量特征

本研究探究了我国东部从北到南四个气候区 (中温带、暖温带、亚热带和热带) 三种土地 (林地、旱地和水田) 下土壤 TP、Olsen P 和 MBP 的含量与占比特征。结果表明, 土壤磷素及其有效形态对气候区和土地利用方式的响应较为显著。在暖温带, 林地和农田土壤 TP 含量普遍高于其他三个气候区 (图 2a)。这一现象可能与潮土的发育过程有关, 潮土在水流作用下携带大量无机磷 (如磷酸钙、磷酸铝等), 与土壤颗粒结合并沉积^[22]。亚热带土壤 TP 含量较低, 主要原因是该地区的温度和水分条件有利于微生物将有机磷转化为无机磷, 而无机磷在酸

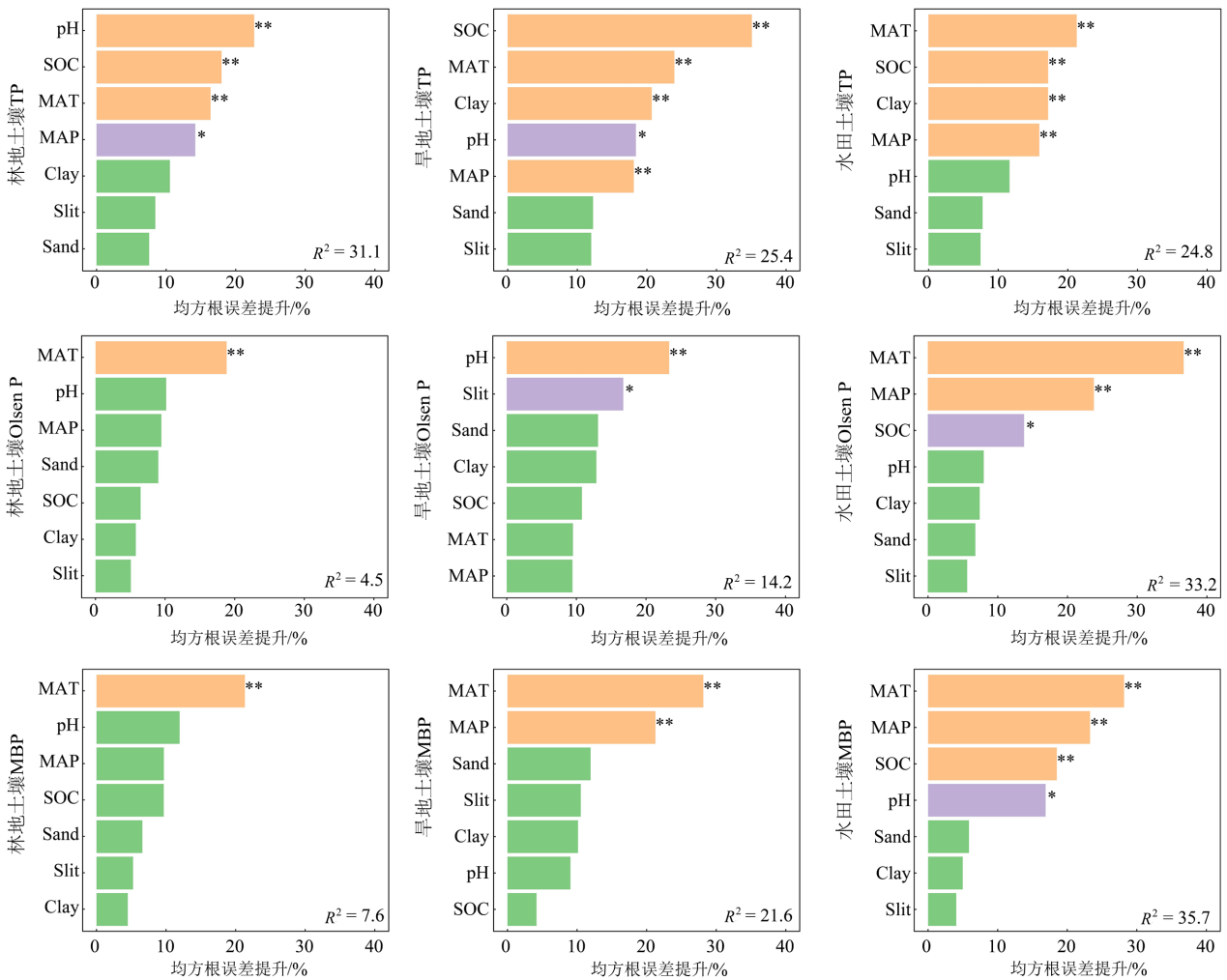


图 3 区域尺度林地、旱地、水田土壤 TP、Olsen P 和 MBP 的环境因子重要性排序

Fig. 3 Ranking of the importance of environmental factors for soil total phosphorus (TP), Olsen phosphorus (Olsen P) and microbial biomass phosphorus (MBP) in forestland, dry farmland, and paddy fields at the regional scale

注: 图中 * 代表 $P < 0.05$, ** 代表 $P < 0.01$, *** 代表 $P < 0.001$ 。

性环境中易溶解并随地表径流流失^[23]。

土壤 Olsen P 的含量及占比在中温带和热带较高，且优于暖温带和亚热带。这可能与中温带主要由黑土构成、土壤有机质含量较高有关。较高的有机质可以与无机磷竞争矿物表面吸附位点，从而减少矿物对磷的固定；同时，有机质为微生物转化有机磷提供了能量和碳源，促进了土壤磷的有效性和微生物对磷的同化（图 2 和图 3）。热带地区由于较高的温度，土壤中活性矿物结合态磷的解吸或溶解过程较强烈^[24]。而暖温带地区的土壤 pH 较高，富含交换态钙、镁离子，这些离子通过吸附、螯合等方式固定无机磷，形成矿物结合态磷，难以被微生物利用；亚热带地区土壤 pH 较低，富含活性铁、铝氧化物，能有效固定施入的无机磷肥，导致磷以植物和微生物不可利用的形态积累^[25]。

暖温带和亚热带地区土壤 TP 含量较高，但 Olsen P 含量及占比较低。这表明，暖温带地区可通过提高土壤有机质含量，减少矿物对磷酸根离子的吸附，进而活矿物结合态磷，增强土壤磷的有效性^[26-27]；而亚热带地区则可通过施用酸化改良剂，提高土壤 pH，促进 Fe-P、Al-P 的转化与释放，从而提高磷素的有效性^[28-29]。此外，秸秆还田、施用有机肥或生物质炭等有机物料已被证明是改良土壤性质、提高土壤有机质含量、减少磷素吸附固定并提高土壤有效磷含量的有效措施^[30-31]，这些方法有助于促进土壤磷循环和提高磷素利用效率。

在林地和旱地的土壤中，从北到南微生物对磷的同化强度逐渐减弱。通常情况下，高温和强降水有助于微生物激活土壤中的无机磷^[32]，但在南方土壤中，由于磷素的固定作用较强，微生物能利用的磷较少，导致 MBP 含量较低。此外，强降水还会加强土壤中有机磷的流失，从而加剧 MBP 含量从北方到南方的递减趋势。

3.2 不同土地利用方式下土壤 TP、Olsen P 和 MBP 含量特征

四个气候区的林地土壤 TP、Olsen P 和 MBP 含量均显著低于农田土壤。这主要是由于农业生产中大量施用磷肥，导致农田土壤中的磷素总量高于林地土壤。同时，秸秆还田等农业管理措施促进了农田土壤中的磷素循环。中温带、暖温带和热带地区，水田和旱地土壤 TP 含量无显著差异；然而，在亚热带地区，旱地土壤 TP 含量显著高于水田土壤。这可能与亚热带地区旱地土壤的干湿交替过程有关。在干早期，磷素通过气相和固相扩散重新分布在土壤颗粒表面和团聚体内部；而在湿润期，旱

地土壤的磷素淋失较少，相较于水田的淹水环境，旱地磷素的淋溶损失较小^[36]。水田长期处于淹水还原状态，土壤中的铁、铝等氧化物会发生还原溶解，磷被释放到土壤溶液中，增加了磷的淋失。尽管在水田的淹水环境下，三价铁的还原过程促进了铁结合态磷和闭合态磷的释放，从而增加了微生物可利用的有效磷^[33-35]，但强烈的淹水环境抑制了微生物的活性，进而抑制了微生物对磷的摄取和同化。中温带水田土壤的 Olsen P 占比略高于旱地，但 MBP 占比大幅低于旱地（图 3）。这一现象表明，水田的淹水条件虽然释放了磷，但也限制了磷的微生物转化。

在暖温带，水田和旱地土壤的 TP 含量及其 Olsen P 占比和 MBP 占比均无显著差异，表明暖温带地区水田和旱地对土壤磷素含量和有效性的影响差异较小。亚热带和热带地区，旱地土壤 Olsen P 含量及其占比均显著高于水田土壤（图 1 和图 2），这可能是由于旱地土壤对磷的亲合性大于水田，对磷素具有更强的吸附作用^[37]。此外，旱地作物如小麦和玉米对磷的需求较高，这也导致旱地施用的磷肥量通常高于水田^[38-39]。MBP 及其占 TP 比例高于水田，可能是因为在水田淹水环境下，磷素通过与铁、铝离子的螯合作用释放难溶性有机磷，从而活化土壤磷素，提高其有效性^[40]。

4 结论

本研究通过分析我国东部四个气候区（中温带、暖温带、亚热带和热带）三种土地利用方式（林地、旱地和水田）下的土壤 TP、Olsen P 和 MBP 含量及其占比特征，得出以下结论：

1) 土壤磷素含量受气候区和土壤类型的显著影响。暖温带地区的土壤 TP 含量最高，但 Olsen P 和 MBP 含量较低；中温带和热带地区土壤 TP 含量较低，但 Olsen P 含量较高；亚热带地区的土壤 TP 和 Olsen P 含量均为最低。不同气候区的这些差异可能源自各地区气候条件、土壤 pH 值、矿物组成以及磷素转化过程的不同。

2) 土地利用方式对土壤磷素含量有显著影响。农田土壤的 TP、Olsen P 和 MBP 含量普遍高于林地土壤，且中温带水田土壤 Olsen P 含量高于旱地，但 MBP 含量则相反。暖温带地区水田和旱地的 Olsen P 和 MBP 含量没有显著差异，亚热带和热带地区旱地土壤的 Olsen P 和 MBP 含量显著高于水田。这些差异主要源自土壤属性、气候条件、农业种植制度以及施肥和水分管理的不同。

3) 总体而言, 各气候区的土壤 Olsen P 占比和 MBP 占比在旱地高于水田, 表明旱地土壤的磷素有效性较高, 且磷素微生物同化作用较强。

本研究结果表明, 土壤磷素的有效性与土地利用方式、气候条件和农业管理密切相关。针对不同气候区的土壤特点, 合理调整磷肥管理和农业技术措施, 将有助于提高土壤磷素的有效性, 促进农业可持续发展。

参考文献:

- [1] GHOSH A, BISWAS D R, BHATTACHARYYA R, et al. Recycling rice straw enhances the solubilisation and plant acquisition of soil phosphorus by altering rhizosphere environment of wheat[J]. *Soil and Tillage Research*, 2023, 228: 105647.
- [2] 孙桂芳, 金继运, 石元亮. 土壤磷素形态及其生物有效性研究进展 [J]. *中国土壤与肥料*, 2011(2): 1-9.
SUN G F, JIN J Y, SHI Y L. Research advance on soil phosphorous forms and their availability to crops in soil[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2011(2): 1-9.
- [3] ACHAT D L, BAKKER M R, AUGUSTO L, et al. Evaluation of the phosphorus status of P-deficient podzols in temperate pine stands: Combining isotopic dilution and extraction methods[J]. *Biogeochemistry*, 2009, 92(3): 183-200.
- [4] BIELESKI R L. Phosphate pools, phosphate transport, and phosphate availability[J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1973, 24(1): 225-252.
- [5] BLAKE L, JOHNSTON A E, POULTON P R, et al. Changes in soil phosphorus fractions following positive and negative phosphorus balances for long periods[J]. *Plant and Soil*, 2003, 254: 245-261.
- [6] HOU E Q, CHEN C R, LUO Y Q, et al. Effects of climate on soil phosphorus cycle and availability in natural terrestrial ecosystems[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(8): 3344-3356.
- [7] YU K H, CHEN X M, PAN G X, et al. Dynamics of soil available phosphorus and its impact factors under simulated climate change in typical farmland of Taihu Lake region, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, 188: 1-8.
- [8] PENG L, XUE X G, TANG Q H, et al. Phosphorus retention and loss in three types of soils with implications for geographical pattern of eutrophication in China[J]. *Water and Environment Journal*, 2020, 34: 9-18.
- [9] 段永蕙, 刘娟, 刘惠见, 等. 红壤性水稻土磷素淋溶流失特征及环境阈值研究 [J]. *云南农业大学学报 (自然科学)*, 2019, 34(6): 1070-1075.
DUAN Y H, LIU J, LIU H J, et al. Characteristics of phosphorus leaching losses and environmental threshold in red paddy soils[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 2019, 34(6): 1070-1075.
- [10] 朱坚, 纪雄辉, 田发祥, 等. 典型双季稻田施磷流失风险及阈值研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(7): 1425-1433.
ZHU J, JI X H, TIAN F X, et al. Research on P loss risk and threshold value in typical double-cropping rice field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36: 1425-1433.
- [11] SONG C, HAN X, WANG E. Phosphorus budget and organic phosphorus fractions in response to long-term applications of chemical fertilisers and pig manure in a Mollisol[J]. *Soil Research*, 2011, 49(3): 253-260.
- [12] WANG B, LI R, WAN Y F, et al. Air warming and CO₂ enrichment cause more ammonia volatilization from rice paddies: an OTC field study[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 752: 142071.
- [13] CHEN A L, XIE X L, GE T D, et al. Rapid decrease of soil carbon after abandonment of subtropical paddy fields[J]. *Plant and Soil*, 2017, 415: 203-214.
- [14] DING C F, DU S Y, MA Y B, et al. Changes in the pH of paddy soils after flooding and drainage: modeling and validation[J]. *Geoderma*, 2019, 337: 511-513.
- [15] TIAN J, WANG X R, TONG Y P, et al. Bioengineering and management for efficient phosphorus utilization in crops and pastures[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2012, 23(6): 866-871.
- [16] FRASER T D, LYNCH D H, BENT E, et al. Soil bacterial phoD gene abundance and expression in response to applied phosphorus and long-term management[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 88: 137-147.
- [17] QIU H S, ZHENG X D, GE T D, et al. Weaker priming and mineralisation of low molecular weight organic substances in paddy than in upland soil[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2017, 83: 9-17.
- [18] VAN GESTEL M, MERCKX R, VLASSAK K. Microbial biomass responses to soil drying and rewetting: the fate of fast- and slow-growing microorganisms in soils from different climates[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1993, 25(1): 109-123.
- [19] ZHENG S M, XIA Y H, HU Y T, et al. Stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus in soil: Effects of agricultural land use and climate at a continental scale[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 209: 104903.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO S D. *Soil and agricultural chemistry analysis*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2003.
- [21] BROOKES P C, POWLSON D S, JENKINSON D S. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1982, 14(4): 319-329.
- [22] 刘岩峰, 崔冠楠, 白鑫宇, 等. 广西武鸣河流域非点源氮磷污染特征及源解析 [J]. *中国环境科学*, 2021, 41(6): 2821-2830.
LIU Y F, CUI G N, BAI X Y, et al. Characteristics and source apportionment of nitrogen and phosphorus non-point source pollution in Wuming River Basin, Guangxi[J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(6): 2821-2830.
- [23] 黄欣欣, 廖文华, 刘建玲, 等. 长期秸秆还田对潮土土壤各形态磷的影响 [J]. *土壤学报*, 2016, 53(3): 779-789.
HUANG X X, LIAO W H, LIU J L, et al. Effects of long-term straw return on various fractions of phosphorus in fluvo-aquic soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(3): 779-789.
- [24] ALI TABATABAI M. Chemistry of sulfur soils[J]. *Chemical Processes in Soils*, 2005, 8:193-226.
- [25] GOU X X, CAI Y, WANG C Q, et al. Effects of different long-

- term cropping systems on phosphorus adsorption and desorption characteristics in red soils[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20: 1371-1382.
- [26] MCCULLY M E. Roots in soil: unearthing the complexities of roots and their rhizospheres[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 1999, 50(1): 695-718.
- [27] EARL K D, SYERS J K, MCLAUGHLIN J R. Origin of the effects of citrate, tartrate, and acetate on phosphate sorption by soils and synthetic gels[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1979, 43(4): 674-678.
- [28] LIE Z Y, LIN W, HUANG W J, et al. Warming changes soil N and P supplies in model tropical[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2019, 55: 751-763.
- [29] 杜雪, 王海燕. 中国森林土壤有机碳活性组分及其影响因素[J]. *世界林业研究*, 2022, 35(1): 76-81.
- DU X, WANG H Y. Active components of forest soil organic carbon and its influencing factors in China[J]. *World Forestry Research*, 2022, 35(1): 76-81.
- [30] DEMISIE W, LIU Z, ZHANG M. Effect of biochar on carbon fractions and enzyme activity of red soil[J]. *CATENA*, 2014, 121: 214-221.
- [31] 郭玉冰. 长期施用磷肥、有机肥对菜地土壤有机磷形态及相关性质的影响[D]. 保定: 河北农业大学, 2021.
- GUO Y B. Effects of long-term application of phosphorus fertilizer and organic fertilizer on the morphology and related properties of organic phosphorus in vegetable soil[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2021.
- [32] MEI L L, YANG X, ZHANG S, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi alleviate phosphorus limitation by reducing plant N: P ratios under warming and nitrogen addition in a temperate meadow ecosystem[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 686: 1129-1139.
- [33] KHAN I, FAHAD S, WU L, et al. Labile organic matter intensifies phosphorous mobilization in paddy soils by microbial iron (III) reduction[J]. *Geoderma*, 2019, 352: 185-196.
- [34] 朱春权, 魏倩倩, 党彩霞, 等. 水杨酸通过一氧化氮途径调控水稻缓解低磷胁迫[J]. *中国水稻科学*, 2022, 36(5): 476-486.
- ZHU C Q, WEI Q Q, DANG C X, et al. Salicylic acid alleviates low phosphorus stress in rice via a nitric oxide-dependent manner[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2022, 36(5): 476-486.
- [35] DIJKSTRA F A, BLUMENTHAL D, MORGAN J A, et al. Contrasting effects of elevated CO₂ and warming on nitrogen cycling in a semiarid grassland[J]. *New Phytologist*, 2010, 187(2): 426-437.
- [36] MARANGUIT D, GUILLAUME T, KUZYAKOV 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.
- [37] RODRIGUES M, WITHERS P J A, SOLTANGHEISI A, et al. Tillage systems and cover crops affecting soil phosphorus bioavailability in Brazilian Cerrado Oxisols[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 205: 104770.
- [38] ZHENG B X, ZHANG D P, WANG Y, et al. Responses to soil pH gradients of inorganic phosphate solubilizing bacteria community[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 25.
- [39] WANG C, LIU J Y, SHEN J L, et al. Effects of biochar amendment on net greenhouse gas emissions and soil fertility in a double rice cropping system: a 4-year field experiment[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 262: 83-96.
- [40] 熊恒多, 李世俊, 范业宽. 酸性水稻土有机磷分组法的探讨[J]. *土壤学报*, 1993, 30(4): 390-399.
- XIONG H D, LI S J, FAN Y K. Discussion on organophosphorus grouping method in acid paddy soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1993, 30(4): 390-399.

(责任编辑: 孟岑)