

滨海湿地土壤生物有效性磷分级方法的比较分析

林旺^{1,2}, 韩润泽^{1,3}, 张雅棉^{1,2}, 黄凌风^{1,2}, 钟宏韬^{1,2*}

(1. 厦门大学环境与生态学院, 福建 厦门 361102; 2. 滨海湿地生态系统教育部重点实验室, 福建 厦门 361102;
3. 自然资源部第三海洋研究所, 福建 厦门 361005)

摘要: [目的] 土壤生物有效性磷是滨海湿地土壤养分循环的关键指标. 本研究旨在通过对两种目前常用生物有效性磷分级方法的比较, 探究更为合理的滨海湿地土壤生物有效性磷分级方法. [方法] 以福建省漳江口红树林国家级自然保护区的光滩、红树林和互花米草(*Spartina alterniflora*) 除治区 3 类湿地土壤为研究对象, 使用改进的 Hedley 分级方法和基于生物有效性的磷素(biologically-based phosphorus, BBP) 分级方法对土壤磷生物有效性特征进行分析. [结果] 1) Hedley 法结果显示光滩的 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 含量显著高于红树林和互花米草除治区($P < 0.05$), 红树林的 NaOH-P (有机磷) 含量显著高于光滩和互花米草除治区($P < 0.05$), 互花米草除治区的 HCl-P 含量显著高于光滩和红树林($P < 0.05$); BBP 法结果显示光滩的 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量显著高于红树林和互花米草除治区($P < 0.05$), 红树林的 HCl-P 含量显著高于光滩和互花米草除治区($P < 0.05$), 两种方法结果都表明红树林湿地总生物有效性磷含量最高. 2) 两种方法最主要的差别在于中等生物有效性有机磷含量, Hedley 法远高于 BBP 法; 同时易利用磷、中等生物有效性无机磷和顽固态磷含量也存在显著差异($P < 0.05$), 前两者 Hedley 法较高, 而顽固态磷含量则 BBP 法较高. [结论] 本研究结果显示 Hedley 法与 BBP 法在滨海湿地生物有效性磷分级分析上有显著差异, 但现有证据还不足以论证哪一种方法更准确, 需要在后续研究中增加样本量和环境参数并结合时空尺度以获取更多关键证据. 尽管如此, 本研究为红树林等滨海生态系统的保护提供了科学依据.

关键词: 滨海湿地; 红树林; 土壤磷; 生物有效性分级方法

中图分类号: S151.9

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2025)03-0501-10

Comparative analyses of soil bioavailable phosphorus fractionation methods for the coastal wetlands

LIN Wang^{1,2}, HAN Runze^{1,3}, ZHANG Yamian^{1,2}, HUANG Lingfeng^{1,2}, ZHONG Hongtao^{1,2*}

(1. College of the Environment & Ecology, Xiamen University, Xiamen 361102, China; 2. Key Laboratory of the Coastal and Wetland Ecosystems, Ministry of Education, Xiamen 361102, China; 3. Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Xiamen 361005, China)

Abstract: [Objective] Phosphorus (P) is a vital element for life as it plays a fundamental role in various biological processes and ecosystem functions. Coastal wetlands are particularly important, acting as both sources and sinks of P within the global P cycle. In these unique environments, the bioavailability of soil P directly impacts vegetation growth, microbial activity, and nutrient cycling, thereby shaping the structure and function of wetland ecosystems. Despite the ecological significance of bioavailable soil P, there is a paucity of comparative studies evaluating commonly used methods of bioavailable P fractionation. Therefore, this study aimed to investigate a more appropriate P fractionation method for evaluating soil P bioavailability in coastal wetlands. [Methods] The research

收稿日期: 2024-12-09 录用日期: 2025-03-25

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1406306); 厦门市自然科学基金(3502Z202473011)

* 通信作者: zhonght@xmu.edu.cn

引文格式: 林旺, 韩润泽, 张雅棉, 等. 滨海湿地土壤生物有效性磷分级方法的比较分析[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2025, 64(3): 501-510.

Citation: LIN W, HAN R Z, ZHANG Y M, et al. Comparative analyses of soil bioavailable phosphorus fractionation methods for the coastal wetlands[J]. J Xiamen Univ Nat Sci, 2025, 64(3): 501-510. (in Chinese)



was conducted in the Zhangjiang Estuary Mangrove National Nature Reserve, located in Fujian Province, China, a region characterized by diverse coastal wetland ecosystems. Three distinct wetland types were selected for investigation: mudflats ($n=9$), representing unvegetated intertidal zones; mangrove wetlands ($n=6$), dominated by mangrove vegetation; and areas cleared of *Spartina alterniflora* ($n=10$), an invasive species known to influence soil properties. The present study employed the modified Hedley P fractionation method and the biologically-based P (BBP) fractionation method to extract a total of 25 soil samples from three wetland types individually. The Hedley fractionation method was conducted by using four extractions sequentially: 1 mol/L NH_4Cl (labile P), 0.1 mol/L NaHCO_3 (moderately bioavailable P, including inorganic and organic forms), 0.1 mol/L NaOH (moderately bioavailable P, including inorganic and organic forms), and 1 mol/L HCl (recalcitrant P). The BBP fractionation method was conducted by using four extractions sequentially: 10 mmol/L CaCl_2 (labile P), 10 mmol/L citric acid (moderately bioavailable inorganic P), 0.02 U/mL phytase and phosphatase mixed solution (moderately bioavailable organic P), and 1 mol/L HCl (recalcitrant P). The study then proceeded to assess the differences in soil P fractions among the wetlands, along with the applicability of both methods. [Results] 1) The Hedley method indicated that the NH_4Cl -P content was significantly higher in mudflats than in mangrove wetlands and areas cleared of *S. alterniflora* ($P<0.05$). The NaOH- P_o (organic P) content was significantly higher in mangrove wetlands than in mudflats and areas cleared of *S. alterniflora* ($P<0.05$), and the HCl-P content was significantly higher in areas cleared of *S. alterniflora* than in mudflats and mangrove wetlands ($P<0.05$). The BBP method showed that the CaCl_2 -P content was also significantly higher in mudflats ($P<0.05$), while HCl-P content was significantly higher in mangrove wetlands ($P<0.05$). Both methods indicated that mangrove wetlands contained the highest total biologically available P content. 2) The primary distinction between the two methodologies lies in the extraction of moderately bioavailable organic P, with the Hedley method yielding significantly higher values compared to the BBP method. This overestimation likely results from the Hedley method's reliance on chemical extraction techniques that solubilize P forms that are not readily available under natural conditions. Additionally, considerable differences were observed in labile P, moderately bioavailable inorganic P, and recalcitrant P fractions. The first two P contents were higher in the Hedley method, while the recalcitrant P content was higher in the BBP method. [Conclusion] The findings of this study showed significant differences between the Hedley and BBP methods in fractionating bioavailable P in coastal wetlands soils. However, current evidence is inadequate to definitively determine the relative accuracy of the two methods. Future studies should increase sample sizes, including broader environmental parameters, and incorporate spatial-temporal scales to validate and refine fractionation methods. Nevertheless, the findings of this study provide a scientific basis for the management and conservation of mangrove forests and other coastal wetland ecosystems.

Keywords: coastal wetland; mangrove; soil phosphorus; bioavailability fractionation method

磷(phosphorus, P)是地球上所有生命形式不可或缺的营养元素之一. 对于植物而言, 磷不仅是细胞的重要组成部分, 还参与光合作用和呼吸作用等关键生化过程, 并在这些过程中发挥重要调控作用^[1-2]. 磷主要以无机磷(inorganic P, P_i)和有机磷(organic P, P_o)两种形式存在, 分别以无机磷酸盐矿物和有机磷酸盐衍生物的形态分布于岩石和土壤中. 磷不同形态间的转化过程直接影响植物对它的获取和利用, 并作为限制植物生长的重要因子, 最终对生态系统结构和功能产生深远影响^[3-4]. 植物主要通过吸收土壤溶液中以 HPO_4^{2-} 和 H_2PO_4^- 形式存在的可溶性磷酸盐获取磷. 然而, 由于土壤溶液中可溶性磷酸盐的浓度通常极低, 难以满足植物的生长需求. 因此, 植物需通过一系列适应性机制或策略, 将土壤中难以直接利用的磷形态转化为植物可吸收的形态, 以提高其对土壤磷的利用效率^[5].

为研究土壤磷的生物有效性, 有关学者利用具有不同提取能力的化学提取剂将土壤中不同化学组分

或活化难易程度相近的 P_i 或 P_o 化合物划分为相同组分, 此即土壤磷分级^[6]. 目前常用的土壤磷分级方法包括 Chang-Jackson^[7] 土壤 P_i 分级体系、Bowman-Cole^[8] P_o 分级体系、Hedley^[9] 分级方法、欧盟委员会标准测量方法^[10] (Standards Measurements and Testing Program of the European Commission, SMT) 以及基于生物有效性的磷素^[11] (biologically-based P, BBP) 分级方法等, 后 3 种方法均包含 P_i 和 P_o . 其中 Hedley 分级方法为 Hedley 等^[9] 于 1982 年提出, 包含了树脂交换磷(resin-P, 土壤溶液中游离的 P_i)、微生物量磷、 NaHCO_3 -P (土壤表面吸附的不稳定 P_i 和 P_o)、NaOH-P (土壤表面铁和铝强吸附的 P_i 和 P_o)、土壤团聚体内磷(sonic-P, 属于 P_i)、磷灰石磷(HCl-P, 属于 P_i)及残留磷(residual-P, 包含 P_i 和 P_o), 该方法首次兼顾了 P_i 和 P_o 的分级提取. 长期以来, Hedley 分级方法被认为是较为合理的土壤磷分级方法, 有助于全面评估土壤磷的生物有效性. 因此, 该方法及其改进方法被广泛

应用于农业和非农业土壤^[12-14]. BBP 分级方法为 2015 年 Deluca 等^[11]通过模拟植物根区磷活化过程所设计的,将土壤磷划分为 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ (模拟能被根截留或土壤溶液中游离的 P_i)、柠檬酸提取磷(citrate-P, 模拟能被植物和微生物分泌的有机酸释放的 P_i)、酶提取磷(enzyme-P, 模拟能被植物和微生物分泌的酶水解的 P_o)、 HCl-P (模拟能被植物和微生物分泌的质子活化的更加稳定的 P_i),这与植物能够直接利用的土壤磷实际状况较为贴近. BBP 分级方法近年来也逐渐在对各种农业和自然生态系统的生物有效性磷赋存特征描述及影响因子分析的研究中得到广泛应用^[15-18].

滨海湿地是海洋和陆地间的缓冲地带,受陆地和海洋的双重作用影响,其生态过程复杂多变,是易受外力干扰影响的生态敏感区^[18-19]. 植物通过吸收、沉积和转化等作用影响磷的形态,使其具有源和汇的双重功能,在磷循环过程中发挥着重要作用,因此,研究滨海湿地土壤磷的赋存特征具有重要意义^[20-21]. 然而人类活动、外来物种入侵正在极大地影响滨海湿地生态系统,损害其功能和服务^[22-23].

漳江口红树林保护区是我国北回归线以北重要的原生态红树林湿地,因长期以来受人类活动和互花米草(*Spartina alterniflora*)入侵的破坏而饱受关注,然而目前对其磷养分动态变化的研究较少^[24-26]. 对于某类生态系统土壤磷的赋存特征研究,根据研究目的选择适当的分级方法是首要问题. 在多种土壤磷分级方法中, Hedley 分级方法和 BBP 分级方法能够从 P_i 和 P_o 两方面综合评价土壤磷生物有效性特征,且操作便捷、应用广泛. 但就滨海湿地而言,这两种方法的差异还不明朗. 为此,本研究以漳江口红树林保护区不同类型湿地为研究对象,使用 Hedley 分级方法与 BBP 分级方法进行土壤磷生物有效性特征研究,旨在确定不同湿地类型的土壤磷生物有效性特征及两种磷分级方法的具体差异,为滨海湿地土壤磷生物有效性评估方法的选择提供实验依据,以期为更加科学合理地保护和修复滨海湿地提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于福建省漳江口红树林国家级自然保护区($23^{\circ}53'45''\sim 23^{\circ}56'00''\text{N}$, $117^{\circ}24'07''\sim 117^{\circ}30'00''\text{E}$),属亚热带海洋性季风气候,气候温暖湿润,年均气温为 $21.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,年均降水量为 $1\,714.5\text{ mm}$ ^[27]. 保护区总

面积为 $2\,360\text{ hm}^2$,是以红树植物、湿地水鸟和珍稀水产种质资源为主要对象的湿地类型自然保护区. 主要植被类型有秋茄(*Kandelia obovate*)、白骨壤(*Avicennia marina*)、桐花树(*Aegiceras corniculatum*)、木榄(*Bruguiera gymnorhiza*)等. 2013—2022 年期间,互花米草也是此潮间带的主要物种之一,与红树林存在竞争关系^[27-28].

1.2 土壤样品采集与处理

2023 年 8 月 17—18 日,在漳江口选择光滩、红树林及互花米草除治区 3 种湿地类型,其中互花米草除治区采用机械和人工方法进行清除,并将残体就地掩埋. 分别设置样带,并且每种湿地类型中分别选取 9、6 和 10 个样方. 利用取土钻(XDB-XR6, 常州康华)在每个样方采集表层 $0\sim 15\text{ cm}$ 的土壤样品,样品被装入密封袋妥善保存,同时详细记录湿地类型、采样点经纬度及采样日期等信息.

采集的土壤样品经自然风干约 1 个月后,手工去除其中的石块及动植物残体. 随后,使用陶瓷研钵对样品进行充分研磨,过 10 目筛(银河测试),所得细土样品被妥善保存.

1.3 分析方法

使用多参数测试仪(SE S470-K, Mettler Toledo)测定土壤 pH 和电导率(electrical conductivity, EC),采用去离子水浸提,土水质量比为 $1:5$.

本研究采用基于 Tiessen 等改进的 Hedley 分级方法(图 1)^[29]. 考虑到植物难以利用 residual-P 以及实验室现有条件的限制,未检测 residual-P,并用 NH_4Cl 替换树脂提取游离态 P_i ($\text{NH}_4\text{Cl-P}$)^[7,29]. 按照植物能够获取的难易程度对提取的磷组分进行分类:1) 易利用磷 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$; 2) 中等生物有效性 P_i ,包括 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 和 NaOH-P_i ; 3) 中等生物有效性 P_o ,包括 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_o$ 和 NaOH-P_o . P_o 含量由提取的总磷(total P, P_t) 含量减去 P_i 含量计算得出; 4) 顽固态磷 HCl-P .

本研究采用改进的 BBP 分级方法(图 2). 植物和微生物能够通过分泌羧化物,即有机酸阴离子,如柠檬酸根、苹果酸根和草酸根等,来解吸土壤 P_o ^[30-31]. 解吸释放后的 P_o 可被植物和微生物分泌的磷酸酶水解矿化为 P_i ,从而被植物吸收^[32]. 考虑到 BBP 法未涉及柠檬酸对 P_o 的作用,并且原方法并非顺序提取方法,本研究参考 Darch 等^[33]的改进流程对 BBP 法进行修改. 同样按照植物能够获取的难易程度对提取的磷组分进行分类:1) 易利用磷 $\text{CaCl}_2\text{-P}$; 2) 中等生物有效性 P_i citrate-P; 3) 中等生物有效性 P_o enzyme-P; 4) 顽

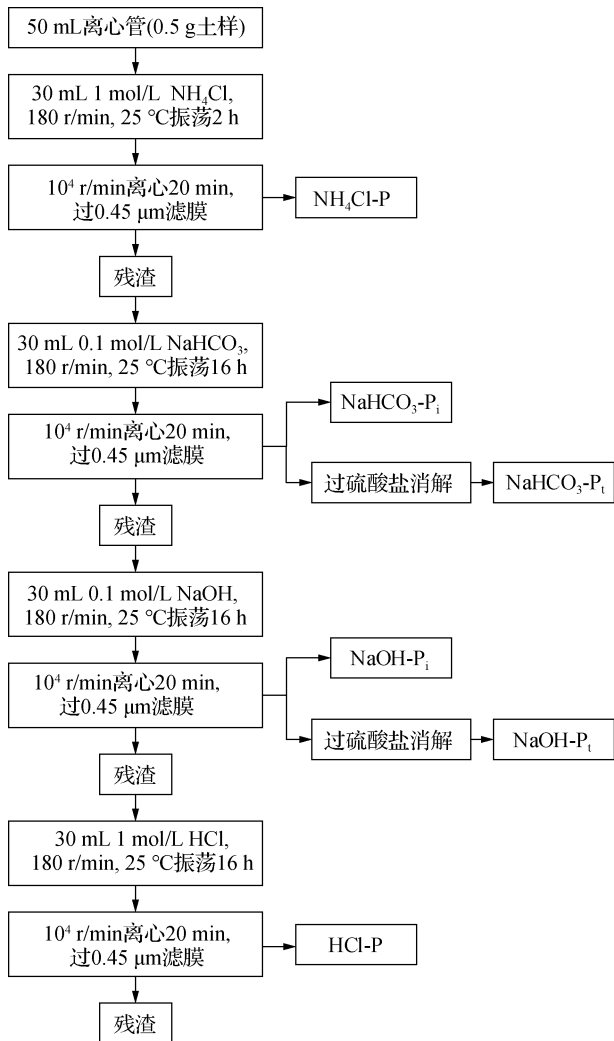


图 1 改进的 Hedley 分级方法提取流程

Fig. 1 Extraction procedure of modified Hedley fractionation method

固态磷 HCl-P. 需要注意的是,本研究使用的植酸酶(R151021,罗恩)含有大量磷酸盐,使用前需要进行透析,透析方法参照 He 等^[34]使用的方法. 酸性磷酸酶采用 Sigma-Aldrich 的 P3627-5G.

运用 Excel2024 对数据进行预处理,采用 R version 4. 4. 1 [R Core Team (2024). R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>] 进行统计分析和绘图. 采用方差分析研究不同湿地类型间土壤特征和有效磷组分差异,采用相关性分析研究各类生物有效性磷组分之间的组成相似性.

2 结果与分析

2.1 漳江口各湿地类型土壤 pH 和 EC

如表 1 所示,不同类型滨海湿地之间的土壤 pH

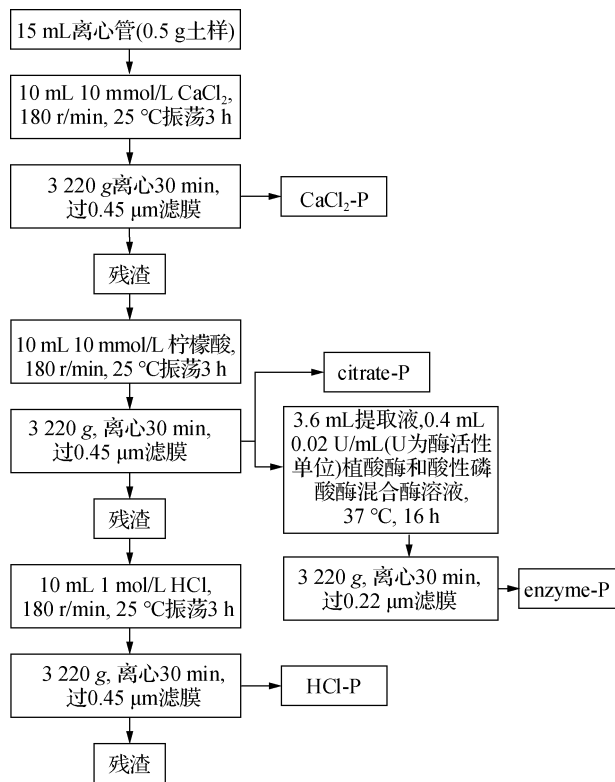


图 2 改进的 BBP 分级方法提取流程

Fig. 2 Extraction procedure of modified BBP fractionation method

和 EC 没有显著差异,但从平均值看,pH 的趋势表现为光滩>红树林>互花米草除治区,EC 的趋势表现为互花米草除治区>光滩>红树林.

表 1 漳江口不同湿地类型的土壤 pH 和 EC

Tab. 1 Soil pH and EC of different wetland types of Zhangjiang Estuary

湿地类型	pH	EC/(mS · cm ⁻¹)
光滩	7.02 ± 0.05 ^a	3.34 ± 0.07 ^a
红树林	6.54 ± 0.19 ^a	2.89 ± 0.54 ^a
互花米草除治区	6.02 ± 0.38 ^a	4.12 ± 0.34 ^a

注:数据为平均值±标准差,同列上标不同字母代表采样点间差异显著($P < 0.05$),下同.

2.2 不同湿地间两种方法提取各磷组分含量对比

由表 2 可知,Hedley 法提取的漳江口湿地土壤生物有效性磷以 NaHCO₃-P、NaOH-P 和 HCl-P 这三种磷组分为主. 光滩土壤的 NH₄Cl-P 含量显著高于红树林和互花米草除治区 ($P < 0.05$),红树林土壤的 NaOH-P 含量显著高于光滩和互花米草除治区 ($P <$

0.05),互花米草除治区土壤的 HCl-P 含量显著高于光滩和红树林($P < 0.05$). 3 种滨海湿地生境的其他磷组分无显著差异. 总生物有效性磷含量表现为红树林显著高于光滩和互花米草除治区($P < 0.05$). 和同样使用 Hedley 法的黄河三角洲河口滨海湿地研究所得结果^[35-36]相比,漳江口湿地的游离 P_i 和 HCl-P 含量较低,而 $NaHCO_3$ -P 和 NaOH-P 含量较高.

由表 3 可知,BBP 法提取的漳江口湿地土壤生物有效性磷组分以 citrate-P 和 HCl-P 为主. 其中光滩的

$CaCl_2$ -P 含量显著高于红树林和互花米草除治区($P < 0.05$),红树林的 HCl-P 含量显著高于光滩和互花米草除治区($P < 0.05$),各湿地类型间的 citrate-P 和 enzyme-P 含量未表现出显著差异. 总生物有效性磷含量表现为红树林显著高于光滩和互花米草除治区($P < 0.05$). 与江苏大丰麋鹿自然保护区用 BBP 法平行提取结果^[18]相比,虽然本研究采用的是修改后的顺序提取方法,但是漳江口湿地土壤的生物有效性磷组分整体上都表现出较高水平.

表 2 漳江口滨海湿地与其他研究区域滨海湿地 Hedley 法提取的土壤生物有效性磷组分含量
Tab. 2 Content of soil bioavailable P components extracted by Hedley method in coastal wetlands of Zhangjiang Estuary and other study region

研究区域	植被类型	NH_4Cl -P 或 resin-P	$NaHCO_3$ - P_i	$NaHCO_3$ - P_o	NaOH- P_i	NaOH- P_o	HCl-P	总生物有效性磷
漳江口红树林自然保护区	光滩	5.64±0.61 ^b	76.12±3.50 ^a	46.81±2.83 ^a	101.53±3.72 ^a	100.94±2.29 ^a	138.89±4.69 ^a	446.94±6.98 ^a
	红树林	2.41±0.81 ^a	93.99±1.92 ^a	56.95±4.64 ^a	124.17±17.47 ^a	117.44±6.65 ^b	134.05±9.92 ^a	529.02±22.11 ^b
	互花米草除治区	2.83±0.86 ^a	66.43±4.57 ^a	53.31±3.95 ^a	98.06±8.56 ^a	99.89±3.55 ^a	165.75±10.25 ^b	486.26±9.24 ^a
黄河三角洲河口 ^[35]	碱蓬(<i>Suaeda glauca</i>)	14.7	10.1	31.2	7.6	24.7	431.5	519.8
	柽柳(<i>Tamarix chinensis</i>)	13.7	8.1	35.1	6.9	35.5	429.6	528.9
	芦苇(<i>Phragmites australis</i>)	10.2	4.1	24.1	3.8	29.0	398.9	470.1
黄河三角洲河口 ^[36]	光滩	17.7	8.0	45.3	4.7	16.5	441.4	533.6
	碱蓬	17.3	7.9	42.3	7.2	34.8	397.7	507.2
	碱蓬和柽柳	13.7	5.1	13.6	5.5	15.0	425.2	478.1
	碱蓬和柽柳	14.9	5.6	14.4	5.9	15.9	452.6	509.3
	碱蓬和芦苇	15.2	6.6	38.4	5.7	46.3	414.3	526.5
	芦苇	11.1	5.1	44.7	6.6	34.4	406.4	508.3

注:参考文献^[35-36]采用的是原 Hedley 法,其游离态 P_i 采用树脂提取即 resin-P.

表 3 漳江口滨海湿地与其他研究区域滨海湿地 BBP 法提取的土壤生物有效性磷组分含量
Tab. 3 Content of soil bioavailable P components extracted by BBP method in coastal wetlands of Zhangjiang Estuary and other study region

研究区域	植被类型	$CaCl_2$ -P	citrate-P	enzyme-P	HCl-P	总生物有效性磷
漳江口红树林自然保护区	光滩	0.83±0.06 ^b	132.90±4.30 ^a	1.64±0.87 ^a	221.54±10.32 ^a	356.91±9.51 ^a
	红树林	0.46±0.07 ^a	138.92±22.53 ^a	0.67±0.28 ^a	321.97±28.41 ^b	462.02±33.46 ^b
	互花米草除治区	0.48±0.09 ^a	107.82±7.77 ^a	0.56±0.31 ^a	244.38±12.14 ^a	353.23±10.71 ^a
江苏大丰麋鹿自然保护区 ^[18]		0.36	1.30	2.45	31.37	

注:参考文献^[18]采用的是原 Deluca 的平行提取方法,无法计算总生物有效性磷.

2.3 两种方法提取土壤各生物有效性磷组分对比

由表 4 可知:在所有湿地类型中 Hedley 法提取的易利用磷、中等生物有效性 P_o 及总生物有效性磷含量均显著高于 BBP 法($P < 0.05$),且中等生物有效性 P_o 之间的差距最大;顽固态磷组分则表现为 BBP 法提

取量显著高于 Hedley 法($P < 0.05$).在光滩和互花米草除治区,Hedley 法提取的中等生物有效性 P_i 含量均显著高于 BBP 法($P < 0.05$).在红树林,尽管 Hedley 法提取的中等生物有效性 P_i 含量均值高于 BBP 法,但统计分析结果显示二者之间并无显著差异.

表 4 漳江口不同湿地类型 Hedley 法和 BBP 法提取的不同生物有效性磷组分对比

Tab. 4 Comparison of different bioavailable P components extracted by Hedley and BBP methods in different wetland types of Zhangjiang Estuary

湿地类型	方法	易利用磷	中等生物有效性 P_i	中等生物有效性 P_o	顽固态磷	总生物有效性磷
光滩	Hedley	5.64±0.61 ^b	177.65±5.68 ^b	147.75±3.73 ^b	138.89±14.07 ^a	446.94±6.98 ^b
	BBP	0.83±0.06 ^a	132.90±4.30 ^a	1.64±0.87 ^a	221.54±10.32 ^b	356.91±9.51 ^a
红树林	Hedley	2.41±0.81 ^b	218.16±27.20 ^a	174.39±13.22 ^b	134.05±9.92 ^a	529.02±22.11 ^b
	BBP	0.46±0.07 ^a	138.92±22.53 ^a	0.67±0.28 ^a	321.97±28.41 ^b	462.02±33.46 ^a
互花米草除治区	Hedley	2.83±0.86 ^b	164.48±10.40 ^b	153.20±14.03 ^b	165.75±10.25 ^a	486.26±9.24 ^b
	BBP	0.48±0.09 ^a	107.82±7.77 ^a	0.56±0.31 ^a	244.38±12.14 ^b	353.23±10.71 ^a

注:不同字母代表各湿地类型不同提取方法提取的某类有效性磷组分间差异显著($P < 0.05$).

由图 3 可知:在所有湿地类型中 Hedley 法提取的磷组分主要为中等生物有效性 P_i 、中等生物有效性 P_o 和顽固态磷,且三者占比相近;而 BBP 法提取的磷

组分主要为中等生物有效性 P_i 和顽固态磷,其中又以顽固态磷居多,BBP 法提取的中等生物有效性 P_o 占比则非常低.两种方法提取的易利用磷占比都非常低.

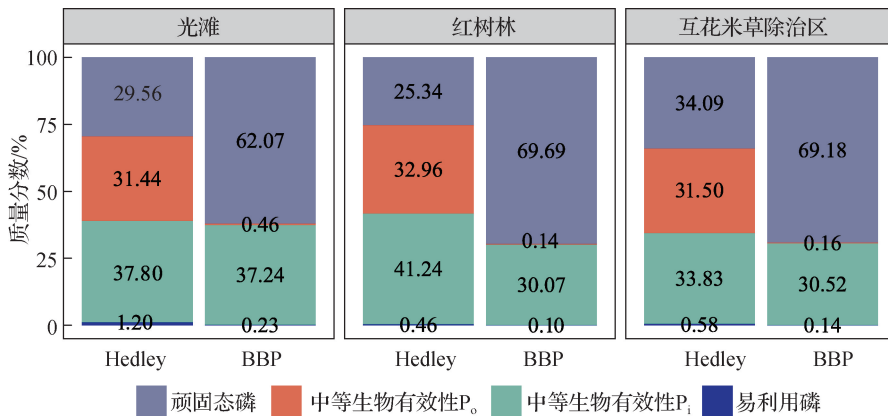


图 3 漳江口不同湿地类型 Hedley 法和 BBP 法提取的各类生物有效性磷组分占总生物有效性磷的比例

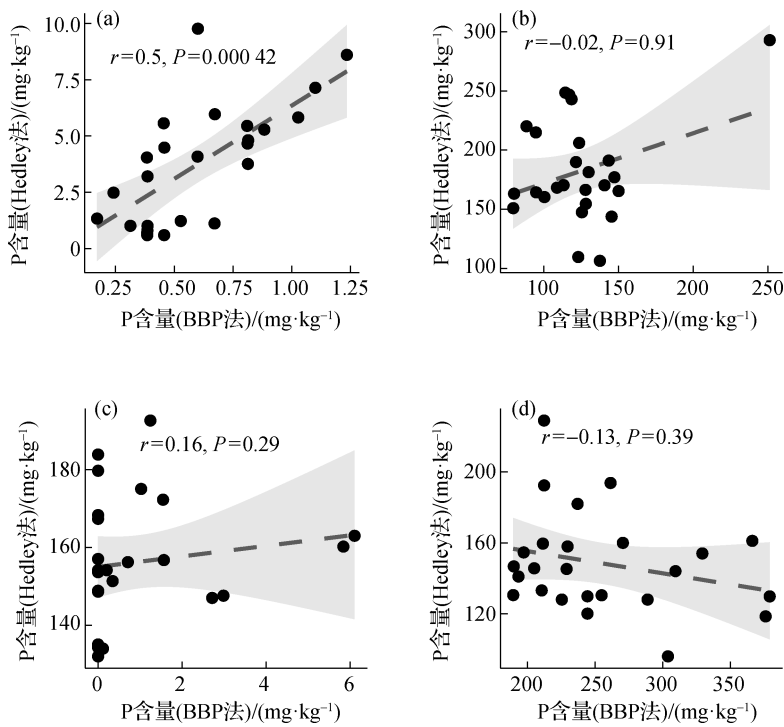
Fig. 3 Proportion of various bioavailable P components in the total bioavailable P extracted by Hedley and BBP methods in different wetland types of Zhangjiang Estuary

为了解两种方法所测得各生物有效性磷组分组成的相似性,对各组分进行相关性分析.相关性分析结果显示:两种方法提取的不同生物有效性磷组分中仅易利用磷存在显著相关性($P < 0.05$),表明二者的组成相近;其余有效性磷组分无显著相关性,表明其组成差异较大,有效性程度不同(图 4).

3 讨论

3.1 漳江口不同湿地类型间土壤生物有效性磷分级特征对比

结果分析表明不同湿地的磷组分组成特征相似,仅部分组分有所区别.各湿地类型间的 pH 和 EC 未



(a)易利用磷;(b)中等生物有效性 P_1 ;(c)中等生物有效性 P_0 ;(d)顽固态磷。

图 4 漳江口不同湿地类型 Hedley 法和 BBP 法提取各类生物有效性磷组分间的相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis between certain bioavailable P components extracted by Hedley and BBP methods in different wetland types of Zhangjiang Estuary

表现出显著差异,由此推测可能是植被覆盖的区别导致湿地生物有效性磷组分含量差异.植被影响土壤磷组分构成,在土壤磷生物有效性动态变化方面发挥着重要作用^[36-38].

NH_4Cl-P 与 $CaCl_2-P$ 均表征土壤中可被植物根系直接吸收的活性磷酸根离子,因而二者含量的差异反映了植物根系获取磷能力的不同^[7,11,39].红树林湿地因红树植物对土壤溶液中游离 P_i 的吸收降低了土壤中 NH_4Cl-P 与 $CaCl_2-P$ 的含量.互花米草除治区推测因治理时间较短,土壤中游离磷酸根尚未得到补充,故 NH_4Cl-P 与 $CaCl_2-P$ 的含量也较低.

Hedley法提取的磷组分中, $NaHCO_3-P_1$ 被定义为较易被植物利用的磷, $NaHCO_3-P_0$ 被定义为易被溶解和矿化并及时补充土壤溶液中磷的缺失,二者可作为评价土壤有效磷含量的指标^[40].本研究结果显示不同湿地类型间 $NaHCO_3-P$ 含量无显著差异,揭示了湿地植物对该组分磷的利用能力可能较低. $NaOH-P$ 的活化相对较难,需要的时间更长,反映出土壤磷的长期供应潜力,其中 $NaOH-P_0$ 主要依靠外部有机物输入,例如植物凋落物和残体^[40].相比于光滩和互花米草除治区,红树林湿地具有更多的植物凋落物,因此其

$NaOH-P_0$ 的含量更高.Hedley法提取的 $HCl-P$ 被认为主要是钙结合磷,受pH影响较大^[41].Qu等^[35]对黄河口各湿地土壤的研究表明pH与 $HCl-P$ 呈显著负相关.由表1可知,互花米草除治区的pH与光滩和红树林湿地相比较低,与该湿地 $HCl-P$ 含量更高相对应.与发育时间较短的黄河三角洲河口滨海湿地相比,漳江口湿地的顽固态磷($HCl-P$)含量较低,而 P_0 含量较高.由于土壤在长期发育过程中 P_i 会逐渐转变为 P_0 ^[42],推测漳江口湿地土壤较长的发展时间是引起上述差异的主要原因.

BBP法提取的磷组分中,citrate-P表征能被有机酸活化的 P_i ,enzyme-P表征能被酸性磷酸酶和植酸酶水解矿化的 P_0 ,二者含量的差异取决于植物和微生物分泌有机酸和相关酶的能力^[11,43].统计分析结果表明不同湿地类型间的citrate-P和enzyme-P含量无显著差异,表明3种湿地的植物或微生物分泌有机酸和胞外磷酸酶的能力相近.通过BBP法提取的漳江口湿地土壤生物有效性磷组分整体上高于江苏大丰麋鹿自然保护区,这可能是由于两处湿地成土母质不同,而土壤总体磷供应水平主要由成土母质决定^[44].

3.2 漳江口不同湿地两种磷分级方法比较

Hedley 连续提取法是根据不同化学结合强度来划分磷组分的生物有效性程度,一直以来被认为是比较合理的磷分级方法,广泛运用于评估土壤磷的生物有效性水平^[9,14].然而,本研究结果表明 Hedley 法提取的易利用磷和中等生物有效性磷均显著高于 BBP 法($P < 0.05$),其中又以 P_o 组分的差异最为明显.这可能主要是因为高盐度环境下 Hedley 法所用的 NH_4Cl 和 $NaOH$ 的化学提取能力强于 BBP 法所用的 $CaCl_2$ 和柠檬酸,且过硫酸盐消解方法对 P_o 的分解能力远高于磷酸酶.同时相关性分析结果显示两种方法提取的磷组分中仅易利用磷(即 NH_4Cl-P 和 $CaCl_2-P$)表现出显著相关性,即两种方法所提取的易利用磷组分组成类似,而中等生物有效性磷组分和顽固态磷组分组成差别较大,未表现出显著相关关系.

长期以来 Hedley 分级方法中被定义为植物和微生物可利用的磷组分,仅包括 NH_4Cl-P 、 $NaHCO_3-P_i$ 和 $NaHCO_3-P_o$,其余磷组分被认为无法在短时间内被直接获取^[45-46].但实际上,植物可以通过释放质子或有机酸来实现对磷的高效获取,即同时获取一般认为的难利用磷组分^[47-48],如 $NaOH-P$ 和 $HCl-P$. 先前研究也表明 $NaHCO_3-P_o$ 中仅有相当小一部分 P_o 能够被酶水解,过硫酸盐消解法夸大了土壤中 P_o 组分的生物有效性,而柠檬酸提取的 P_o 中大部分都能被酶水解^[43,49-50]. 本研究结果也表明,在漳江口湿地土壤中柠檬酸提取的能够被酶水解的 P_o 组分含量远低于过硫酸盐消解得到的 $NaHCO_3-P_o$ 组分.

尽管对 3 种湿地土壤 pH 和 EC 的分析未发现显著差异,但许多相关研究表明滨海湿地特殊的水文条件对土壤磷形态有着重要的调控作用,尤其是潮汐导致的盐度和氧化还原电位的变化.研究表明,高盐度和还原条件会促进土壤中各种形态 P_i 的释放,被植物和微生物高效利用,这会导致滨海湿地土壤中有效磷浓度降低^[51-53].且土壤氧化还原状态和盐度变化较大可能影响磷的化学结合状态及生物可利用性.因此,Hedley 法在滨海湿地土壤中可能会受盐度变化影响较大,Xie 等^[52]对中国江苏沿海湿地的研究发现高盐度会导致 Hedley 法提取的顽固态磷含量增加,而易利用磷和中等生物有效性磷含量降低.BBP 法通过模拟植物磷捕获策略,可能更适合反映植物实际可利用的磷组分.然而,BBP 法中的酶解步骤可能受到滨海湿地高盐度的抑制,导致 enzyme-P 被低估^[54].此外,目前对于滨海湿地植物磷吸收的具体过程尚不明确,BBP 法模拟过程是否符合自然过程还有待进一步验证.

综上,在湿地土壤生物有效性磷评价方面,基于植物磷活化策略的 BBP 法的结果具有一定优势,但滨海湿地生物有效性磷分级方法的影响因素及植物磷吸收机制还需要进一步研究阐明.

4 结 论

在本研究选取的漳江口红树林国家级自然保护区的 3 种湿地类型中,红树林湿地具有更高的生物有效性磷水平.3 种湿地类型间生物有效性磷组分组成总体上差别不大,均以中等生物有效性磷和顽固态磷组分为主.与相关研究相比,土壤发育时间和母质类型是滨海湿地生物有效性磷分级特征的重要影响因素.

通过使用 Hedley 和 BBP 两种磷分级方法对漳江口不同生境土壤生物有效性磷赋存状况进行比较,发现 Hedley 法测得的中等生物有效性磷组分含量远高于以植物磷活化策略为基础的 BBP 法,可能并不适合应用于对滨海湿地土壤生物有效性磷的研究.然而,鉴于方法学研究涉及的因素较多,本研究一方面对影响湿地土壤磷分级的关键环境因素还缺乏研究,另一方面对滨海湿地植物磷吸收的具体过程还缺乏了解,因此以上结论尚缺乏关键证据支撑.

综上所述,在滨海湿地土壤生物有效性磷分级分析中,Hedley 法与 BBP 法存在显著差异,二者的相对准确性需要在后续研究中增加样本量和环境参数并结合时空尺度加以明确.

参考文献:

- [1] XU X Y, ZHU T T, NIKONOROVA N, et al. Phosphorylation-mediated signalling in plants [J]. Annual Plant Reviews Online, 2019, 2(3): 909-932.
- [2] HAWKESFORD M, HORST W, KICHEY T, et al. Functions of macronutrients [M] // Marschner's mineral nutrition of higher plants. [S. l.]: Elsevier, 2012: 135-189.
- [3] PAYTAN A, MCLAUGHLIN K. The oceanic phosphorus cycle [J]. Chemical Reviews, 2007, 107(2): 563-576.
- [4] FILIPPELLI G M. The global phosphorus cycle: past, present, and future [J]. Elements, 2008, 4(2): 89-95.
- [5] LAMBERS H. Phosphorus acquisition and utilization in plants [J]. Annual Review of Plant Biology, 2022, 73(1): 17-42.
- [6] 汪洪, 宋书会, 张金尧, 等. 土壤磷形态组分分级及 ^{31}P -NMR 技术应用研究进展 [J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(2): 512-523.

- [7] CHANG S C, JACKSON M L. Fractionation of soil phosphorus[J]. *Soil Science*, 1957, 84(2):133-144.
- [8] BOWMAN R A, COLE C V. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils [J]. *Soil Science*, 1978, 125(2):95-101.
- [9] HEDLEY M J, STEWART J W B, CHAUHAN B S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1982, 46(5):970-976.
- [10] RUBAN V, LÓPEZ-SÁNCHEZ J F, PARDO P, et al. Harmonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments; a synthesis of recent works[J]. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 2001, 370(2/3):224-228.
- [11] DELUCA T H, GLANVILLE H C, HARRIS M, et al. A novel biologically-based approach to evaluating soil phosphorus availability across complex landscapes[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 88:110-119.
- [12] HOU E Q, TAN X, HEENAN M, et al. A global dataset of plant available and unavailable phosphorus in natural soils derived by Hedley method [J]. *Scientific Data*, 2018, 5(1):180166.
- [13] JOHNSON A H, FRIZANO J, VANN D R. Biogeochemical implications of labile phosphorus in forest soils determined by the Hedley fractionation procedure[J]. *Oecologia*, 2003, 135(4):487-499.
- [14] 张林, 吴宁, 吴彦, 等. 土壤磷素形态及其分级方法研究进展[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(7):1775-1782.
- [15] 李金凤, 王晖, 尤业明, 等. 南亚热带人工林树种配置对根际土壤生物有效磷的影响[J]. *应用生态学报*, 2024, 35(6):1492-1500.
- [16] 蔡观, 胡亚军, 王婷婷, 等. 基于生物有效性的农田土壤磷素组分特征及其影响因素分析[J]. *环境科学*, 2017, 38(4):1606-1612.
- [17] YUAN J, WANG L, WANG S, et al. The use of biologically based phosphorus fractions to evaluate soil P availability in reduced P-input paddy soils[J]. *Soil Use and Management*, 2018, 34(3):326-334.
- [18] 黄翊兰, 崔丽娟, 李春义, 等. 滨海滩涂湿地不同植被土壤磷的生物有效性及其影响因子分析[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(10):1999-2005.
- [19] 李苏青, 管冬兴, 李希媛, 等. 天津滨海湿地土壤有机碳和有效磷的盐度响应及影响因素[J]. *生态学杂志*, 2024, 43(5):1381-1389.
- [20] 倪冉旭, 胡敏杰, 钟懿, 等. 闽江河口湿地土壤磷形态变化对盐度增加的响应及其影响因素[J]. *生态学报*, 2024, 44(16):7140-7149.
- [21] ZHANG W L, ZENG C S, TONG C, et al. Spatial distribution of phosphorus speciation in marsh sediments along a hydrologic gradient in a subtropical estuarine wetland, China[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2015, 154:30-38.
- [22] 沙梦乔, 柴娜, 赵洪涛, 等. 互花米草入侵对胶州湾湿地土壤磷赋存形态的影响[J]. *环境科学*, 2021, 42(11):5414-5423.
- [23] CUI B S, HE Q, GU B H, et al. China's coastal wetlands: understanding environmental changes and human impacts for management and conservation[J]. *Wetlands*, 2016, 36(Sup1):S1-S9.
- [24] 黄央央, 杨毕铨, 戴桂香. 互花米草入侵对漳江口红树林保护区的影响研究[J]. *海洋开发与管理*, 2023, 40(2):115-124.
- [25] 张和钰, 陈传明, 郑行洋, 等. 漳江口红树林国家级自然保护区湿地生态系统服务价值评估[J]. *湿地科学*, 2013, 11(1):108-113.
- [26] 何凌炜, 周小成. 基于 GIS 和 RS 的漳江口红树林湿地人类活动干扰与景观格局变化分析[J]. *测绘与空间地理信息*, 2021, 44(6):123-128.
- [27] 周在明, 陈本清, 徐冉, 等. 基于无人机高光谱特征的红树林种群识别研究:以漳江口红树林国家级自然保护区为例[J]. *海洋学报*, 2021, 43(9):137-145.
- [28] 黄敏敏, 张宜辉, 周泽友, 等. 2013—2022 年福建漳江口红树林互花米草分布无人机遥感数据集[J]. *中国科学数据*, 2023, 8(4):152-161.
- [29] TIESSEN H, STEWART J W B, MOIR J O. Changes in organic and inorganic phosphorus composition of two grassland soils and their particle size fractions during 60 - 90 years of cultivation[J]. *Journal of Soil Science*, 1983, 34(4):815-823.
- [30] WU L J, KOBAYASHI Y, WASAKI J, et al. Organic acid excretion from roots: a plant mechanism for enhancing phosphorus acquisition, enhancing aluminum tolerance, and recruiting beneficial rhizobacteria[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2018, 64(6):697-704.
- [31] BEGUM H H, ISLAM M T. Role of synthesis and exudation of organic acids in phosphorus nutrition in plants in tropical soils[J]. *Biotechnology*, 2005, 4(4):333-340.
- [32] NASH D M, HAYGARTH P M, TURNER B L, et al. Using organic phosphorus to sustain pasture productivity: a perspective[J]. *Geoderma*, 2014, 221/222:11-19.
- [33] DARCH T, BLACKWELL M S A, CHADWICK D, et al. Assessment of bioavailable organic phosphorus in tropical forest soils by organic acid extraction and

- phosphatase hydrolysis [J]. *Geoderma*, 2016, 284: 93-102.
- [34] HE Z Q, HONEYCUTT C W. Enzymatic characterization of organic phosphorus in animal manure[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30(5): 1685-1692.
- [35] QU F Z, MENG L, XIA J B, et al. Soil phosphorus fractions and distributions in estuarine wetlands with different climax vegetation covers in the Yellow River Delta[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 125: 107497.
- [36] QU F Z, SHAO H B, MENG L, et al. Forms and vertical distributions of soil phosphorus in newly formed coastal wetlands in the Yellow River Delta Estuary[J]. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(11): 4219-4226.
- [37] MARANGUIT D, GUILLAUME T, KUZYAKOV Y. Land-use change affects phosphorus fractions in highly weathered tropical soils[J]. *Catena*, 2017, 149: 385-393.
- [38] TUCHMAN N C, LARKIN D J, GEDDES P, et al. Patterns of environmental change associated with *Typha* × *glauca* invasion in a Great Lakes coastal wetland[J]. *Wetlands*, 2009, 29(3): 964-975.
- [39] MCDOWELL R W, CONDRON L M. Chemical nature and potential mobility of phosphorus in fertilized grassland soils [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 57(3): 225-233.
- [40] RICHTER D D, LEE ALLEN H, LI J W, et al. Bioavailability of slowly cycling soil phosphorus: major restructuring of soil P fractions over four decades in an aggrading forest[J]. *Oecologia*, 2006, 150(2): 259-271.
- [41] CARTER M R, GREGORICH E G. Soil sampling and methods of analysis[M]. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2007.
- [42] VITOUSEK P M, PORDER S, HOULTON B Z, et al. Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions[J]. *Ecological Applications*, 2010, 20(1): 5-15.
- [43] HAYES J E, RICHARDSON A E, SIMPSON R J. Components of organic phosphorus in soil extracts that are hydrolysed by phytase and acid phosphatase[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 32(4): 279-286.
- [44] AUGUSTO L, ACHAT D L, JONARD M, et al. Soil parent material: a major driver of plant nutrient limitations in terrestrial ecosystems [J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(9): 3808-3824.
- [45] NAKAYAMA Y, WADE J, MARGENOT A J. Does soil phosphomonoesterase activity reflect phosphorus pools estimated by Hedley phosphorus fractionation? [J]. *Geoderma*, 2021, 401: 115279.
- [46] YANG X, POST W M. Phosphorus transformations as a function of pedogenesis: a synthesis of soil phosphorus data using Hedley fractionation method [J]. *Biogeochemistry*, 2011, 8(10): 2907-2916.
- [47] GAHOONIA T S, CLAASSEN N, JUNGK A. Mobilization of phosphate in different soils by ryegrass supplied with ammonium or nitrate[J]. *Plant and Soil*, 1992, 140(2): 241-248.
- [48] RAGHOTHAMA K G. Phosphorus and plant nutrition: an overview [M] // Phosphorus: agriculture and the environment. Madison: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America, 2005: 353-378.
- [49] RICHARDSON A E, GEORGE T S, HENS M, et al. Organic anions facilitate the mobilization of soil organic phosphorus and its subsequent lability to phosphatases [J]. *Plant and Soil*, 2022, 476(1): 161-180.
- [50] TURNER B L, CADE-MENUN B J, WESTERMANN D T. Organic phosphorus composition and potential bioavailability in semi-arid arable soils of the western United States [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(4): 1168-1179.
- [51] QIN J F, YANG J S, ZHANG J P, et al. Effects of tidal hydrology on soil phosphorus forms in the Yellow River Estuary wetland: a field study of soil core translocation [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 922: 171360.
- [52] XIE W P, YANG J S, GAO S, et al. The effect and influence mechanism of soil salinity on phosphorus availability in coastal salt-affected soils[J]. *Water*, 2022, 14(18): 2804.
- [53] PATRICK W H, DELAUNE R D. Chemical and biological redox systems affecting nutrient availability in the coastal wetlands[J]. *Geoscience and Man*, 1977, 18: 131-137.
- [54] 孙一萍, 罗敏, 刘育秀, 等. 盐分和淹水增加对河口潮汐淡水沼泽湿地土壤磷形态和磷酸酶活性的影响[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(12): 5150-5160.

(责任编辑:曾礼娜)