

DOI: 10.20103/j.stxb.202210233016

夏欣, 宋维峰, 彭正耀. 哈尼梯田湿地土壤不同形态磷的时空分布特征. 生态学报, 2024, 44(2): 676-685.

Xia X, Song W F, Peng Z Y. Spatiotemporal distribution characteristics of different forms of phosphorus in soils of Hani terrace wetland. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(2): 676-685.

哈尼梯田湿地土壤不同形态磷的时空分布特征

夏 欣^{1,2,3}, 宋维峰^{1,2,3,*}, 彭正耀^{1,2,3}

1 西南林业大学国家高原湿地研究中心/湿地学院, 昆明 650224

2 云南省高原湿地保护修复与生态服务重点实验室, 昆明 650224

3 滇池湖泊生态系统云南省野外科学观测研究站, 昆明 650228

摘要: 磷是湿地和农业生态系统中的重要元素之一, 其中土壤磷形态的迁移转化广受关注。以哈尼梯田湿地为例, 分别在哈尼梯田湿地的水稻生长期、收获期和休闲期, 采集湿地不同海拔(梯田区上部、中部和下部)和不同深度的土壤(0—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm, 60—80 cm)进行磷形态分析, 研究了哈尼梯田湿地土壤中不同形态磷的时空分布规律和影响因素。结果表明: (1) 哈尼梯田湿地土壤中总磷(TP)含量均值为 318.74 mg/kg, 在水稻收获期含量最高, 无机磷(IP)含量均值在水稻休闲期最高(85.95 mg/kg), 湿地土壤磷总体呈缺乏状态。(2) 受外源磷输入影响, 铁铝结合态磷(NaOH-P)占无机磷比重最大, 且季节差异性显著($P < 0.05$); 而钙结合态磷(HCl-P)在各季节无显著差异($P > 0.05$), 这与湿地生态环境和地质背景有关。(3) 哈尼梯田湿地对磷的迁移有截留作用, 表现为各形态磷含量总体呈现在上部梯田湿地较高, 并随海拔的降低而降低; 不同形态磷含量在 20—40 cm 土层富集。(4) 除 HCl-P 外, 其余形态磷与土壤粒径在不同土层表现为负相关; 不同土层 TP 和有机磷(OP)与 pH 值呈正相关; 土壤总有机碳(TOC)与不同形态磷在收获期呈显著负相关($P < 0.05$)。研究表明了哈尼梯田湿地立体空间结构和人为活动能影响湿地生态系统中磷的分布与迁移循环, 该结论可为梯田湿地的可持续发展提供参考。

关键词: 哈尼梯田; 湿地; 土壤; 磷形态; 时空分布

Spatiotemporal distribution characteristics of different forms of phosphorus in soils of Hani terrace wetland

XIA Xin^{1,2,3}, SONG Weifeng^{1,2,3,*}, PENG Zhengyao^{1,2,3}

1 National Plateau Wetlands Research Center/College of Wetlands, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

2 Yunnan Key Laboratory of Plateau Wetland Conservation Restoration and Ecological Services, Kunming 650224, China

3 Dianchi Lake Ecosystem Observation and Research Station of Yunnan Province, Kunming 650228, China

Abstract: Phosphorus is an important element of the wetland and agricultural ecosystems, and great attention has been paid to the movement and transformation of phosphorus speciation in soils. The Hani terrace, which is located in Yunnan, a province in southwest China, is unique with its typical mountainous landscape of forests, villages, man-made paddy wetlands and rivers. The aim of the research was to investigate the spatiotemporal distribution of various forms of phosphorus in the soils of Hani terrace wetland and find out its influencing factors. In view of that, this paper conducted a comprehensive analysis of the forms of phosphorus in the soils collected at different altitudes (the upper, middle, and lower terrace areas) and depths (0—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm, 60—80 cm) in the growing, harvest and fallow periods of paddy, respectively. The results indicated that (1) in the soils of Hani terrace wetland, the average content value of total phosphorus (TP) was 318.74 mg/kg and reached its peak in the harvest period. The average content value of inorganic

基金项目: 云南省基础研究重点项目(202001AS070042); 国家自然科学基金项目(41371066); 云南省高原湿地保护修复与生态服务重点实验室开放基金项目(202105AG070002)

收稿日期: 2022-10-23; **网络出版日期:** 2023-10-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: songwf85@126.com

phosphorus (IP) was the highest in the fallow period (85.95 mg/kg), generally presenting a deficiency of phosphorus in the wetland soils. (2) due to the impact of exogenous phosphorus input, iron/aluminum-bound phosphorus (NaOH-P) made up the largest part of IP and showed significant seasonal differences as regards its content ($P<0.05$). Whereas, the content of calcium-bound phosphorus (HCl-P) had no significant difference in each season ($P>0.05$), which was related to the ecological environment and geological background of the wetland. (3) Hani terrace wetland could intercept the movement of phosphorus, manifested in that the contents of various forms of phosphorus were generally higher in the upper terrace area and decreased with the decrease of altitude. In vertical soil profiles, the enrichment of phosphorus in different forms occurred in the 20—40 cm soil layer. (4) all the forms of phosphorus, except HCl-P, were negatively correlated with soil particle size in different soil layers. The TP and organic phosphorus (OP) were positively correlated with pH in different soil layers. There was significant negative correlation between soil total organic carbon (TOC) and different forms of phosphorus during the harvest period ($P<0.05$). Based on the findings summarized above, the research showed that the stereoscopic spatial structure of Hani terrace wetland and human activities could influence phosphorus distribution and cycling in the wetland ecosystem, which could provide a reference for the sustainable development of terrace wetlands.

Key Words: Hani terrace; wetland; soil; forms of phosphorus; spatiotemporal distribution

磷是稻田湿地作物生长所必需的营养元素,对湿地的生态结构和生产功能有着重要影响。土壤是湿地生态系统的重要组成部分,累积着因农业生产而使用的磷肥,充当着“汇”的功能;当环境发生变化时,土壤中的磷会在适当条件下进入水体,土壤转变为湿地磷的“源”^[1]。磷在土壤中存在多种形态,而土壤磷分级能较好地了解土壤磷的迁移转化并掌握土壤对磷的吸收利用作用^[2];不同磷形态释放能力不同,生物有效性不同所造成的环境风险不同,国内外学者对此也进行了大量的研究^[3-4]。

哈尼梯田湿地是世界上著名的稻田人工湿地,主要分布在云南南部红河哀牢山地区,已有 1300 多年的历史,是人与自然和谐共生的典范,具有极高的生态系统服务价值^[5-6]。哈尼梯田湿地“森林-村寨-梯田-河流”的垂直空间格局为肥力输送提供了重要条件,形成了独特的“冲肥”灌溉模式,能使磷元素自上而下传输^[7]。这种对磷的迁移过程不仅保证了哈尼梯田湿地的作物生长,还对哈尼梯田湿地磷循环、功能维持和生态平衡等方面产生深刻影响,所以明晰土壤磷赋存形态及其含量对哈尼梯田湿地物质的迁移过程和环境状态具有重要意义。对于哈尼梯田湿地磷方面有部分前期研究,较多集中于土壤总磷和有效磷等土壤肥力、养分方面^[8-10],对土壤磷形态的具体分析和时空变化特征鲜见报道。

为深入了解哈尼梯田湿地土壤磷随时空变化的迁移与累积情况,本研究对哈尼梯田湿地不同季节、不同海拔和不同土层的土壤磷形态及其影响因素进行分析,并与其它稻田湿地的不同磷形态含量对比,旨在揭示哈尼梯田独特的垂直结构与“冲肥”模式对磷形态随时空变化的影响,以为哈尼梯田湿地土壤磷的合理利用以及磷迁移理论体系提供数据支持,进一步为梯田湿地生态系统的可持续发展提供科学依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区地处云南省红河哈尼族彝族自治州元阳县,位于哈尼梯田湿地核心区域的全福庄小流域(103°43'20"—103°47'30"E,23°05'20"—23°07'20"N),面积为 33.79 km²。研究区上部是森林、草地,次上部是村寨,接着是梯田,下部是河流,形成了“四素同构”的垂直景观结构,见图 1。基本特征为:地势呈南高北低,气候属于亚热带山地季风气候,年平均气温为 16.4 ℃;雨热同季,干湿季分明,年平均降雨量 1397.6 mm(5 月至 10 月为雨季,11 月至次年 4 月为旱季);年平均相对湿度为 68%,年日照时数大于 2000 h。梯田湿地内农业生产活动以种植水稻为主,每年种植一季;同时农户适当养殖猪、牛、鸡、鸭等牲畜和家禽,其粪肥为梯田主要的有机肥,通过人为管理随水流引入湿地,主要是通过沟渠自上而下的流经村庄并向下部梯田进行层层输送,最终汇入江河之中;梯田灌溉沟渠常年有水,但梯田湿地在收获期不放水,并将收获后的水稻秸秆堆积在田中进行焚烧处

理,等到要栽秧或追加肥力的时候将水放进梯田。

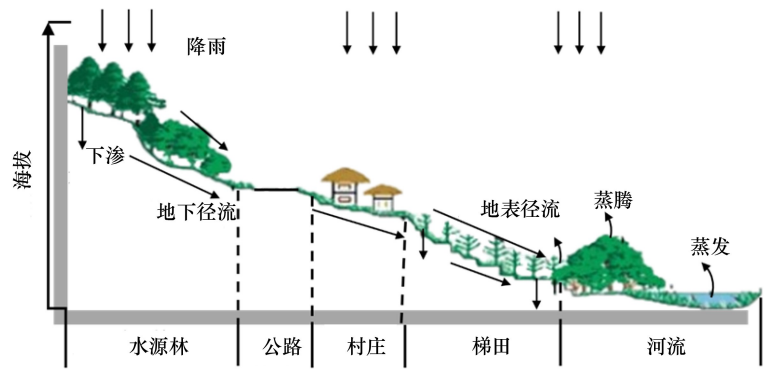


图 1 哈尼梯田立体结构图^[11]
Fig.1 The stereoscopic spatial structure of Hani terrace

1.2 样品采集

根据当地水稻生长特点,分别在水稻收获期(10—12月)、休闲期(1—4月)与生长期(5—10月),采集湿地不同海拔(梯田区上部、中部和下部)和不同深度的土壤(0—20 cm,20—40 cm,40—60 cm,60—80 cm),采样点分布如图2(图中U1、U2、U3为上部梯田采样点;M1、M2、M3为中部梯田采样点;L1、L2、L3为下部梯田采样点)。为了减小采样带来的误差,每个采样点按照五点交叉取样法采集混合土壤。采集到的样品带回实验室后进行风干、研磨和过0.15 mm筛后保存备用。

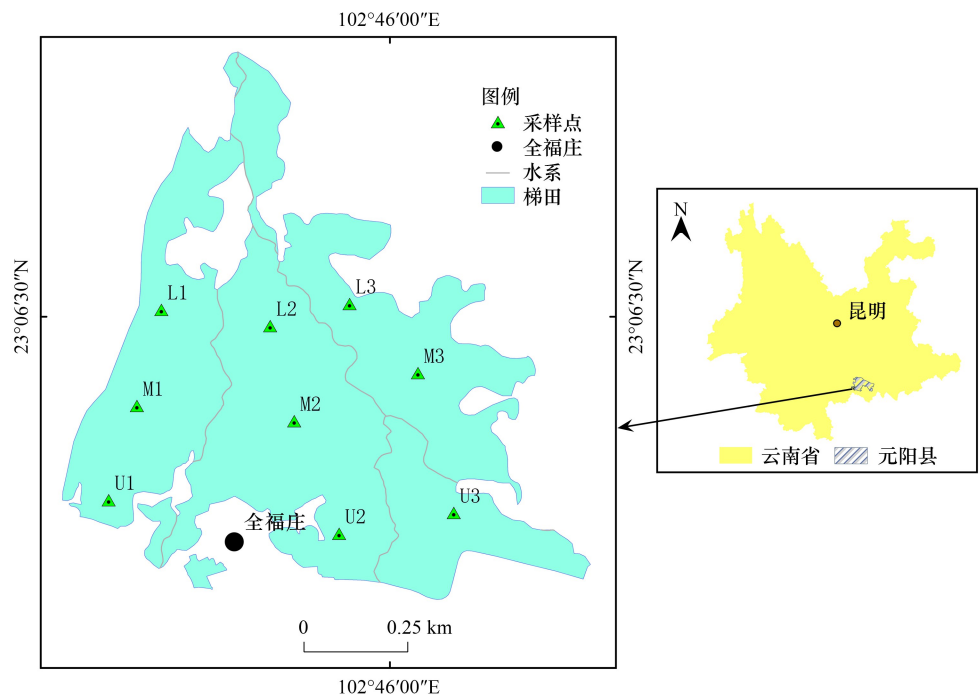


图 2 研究区采样点图
Fig.2 Sampling points in the study

U: 上部梯田采样点 The upper terrace sampling point; M: 中部梯田采样点 The middle terrace sampling point; L: 下部梯田采样点 The lower terrace sampling point

1.3 分析方法

土壤分析参照《土壤农化分析方法》^[12]。土壤总有机碳(TOC)含量使用总有机碳分析仪(VarioTOC,德国)测定,测定前土壤样品需用1 mol/L的盐酸进行酸化并使用锡纸紧密包裹;土壤粒径使用马尔文激光粒度分析仪(HORIBA LA-960S,日本)测定,首先将土样与10%的H₂O₂充分反应除去有机质,然后加入10%的盐酸去除土壤中碳酸盐,用0.5 mol/L的(NaPO₃)₆溶液作为分散剂放入超声仪中分散,最后上机测定土壤的平均粒径;土壤pH使用台式pH仪(Starter3100,美国)测定,水土比为2.5:1。

土壤中磷形态含量采用欧洲标准委员会推荐的SMT法测定^[13],按照SMT法可将土壤中总磷(TP)分为有机磷(OP)和无机磷(IP),IP又可分为铁铝结合态磷(NaOH-P)和钙结合态磷(HCl-P)。主要提取步骤为:称取0.02 g土壤样品,用1 mol/L的NaOH溶液振荡16 h后,取上清液加入3.5 mol/L的HCl溶液,再静置16 h后用钼锑抗分光光度法测定提取液中的磷浓度,得到NaOH-P含量;将NaOH-P提取后的土壤残渣用1 mol/L的NaCl溶液洗涤2次,再加入1 mol/L的HCl溶液振荡16 h,用钼锑抗分光光度法测定提取液中的磷浓度,得到HCl-P含量,IP含量为NaOH-P与HCl-P含量之和;称取0.02 g土壤置于瓷坩埚中,放入马弗炉450℃灼烧3 h,冷却后加入3.5 mol/L的HCl振荡16 h,用钼锑抗分光光度法测定提取液中的磷浓度,得到TP含量,利用TP与IP的含量差值得到OP含量^[14-15]。

1.4 数据统计分析

使用SPSS 26.0和Origin 2021软件进行数据统计分析和图形绘制。统计了理化指标和磷含量的最大值、最小值以及平均值等统计量,数据结果展示形式为均值±标准偏差。用方差分析得到不同时期的土壤磷含量的差异性,相关性分析得到土壤理化指标与不同形态磷之间的相关性。文中磷形态的空间分布图利用ArcGIS 10.2进行插值得到。

2 结果与分析

2.1 哈尼梯田湿地土壤不同磷形态含量的季节分布特征

哈尼梯田湿地各时期土壤不同磷形态含量变化范围和均值如表1所示。哈尼梯田湿地土壤TP和OP含量均值分别为318.74 mg/kg和249.00 mg/kg,各时期含量大小呈现收获期(11月)>休闲期(4月)>生长期(6月),生长期与收获期的土壤TP和OP含量均存在显著差异($P<0.05$),根据第二次全国普查养分分级标准可知哈尼梯田湿地土壤磷总体呈缺乏状态^[16]。IP、NaOH-P和HCl-P含量为休闲期>生长期>收获期;IP在休闲期变化幅度与平均值最大,最小值为21.80 mg/kg,最大值为309.38 mg/kg,均值为85.95 mg/kg,收获期均值最小,为45.73 mg/kg,收获期与其他时期差异性显著($P<0.05$)。NaOH-P含量占IP比重大,随时间变化含量波动较为明显,变化范围为2.85—305.22 mg/kg,各时期变化与IP总体一致,季节差异性显著($P<0.05$)。钙结合态磷(HCl-P)含量均值为6.33 mg/kg,占TP比例为1.8%;HCl-P在不同时期变化差异不显著($P>0.05$)。不同磷形态含量的变异系数均处于0.1至1之间,属于中等变异,在一定程度上反应哈尼梯田湿地土壤磷的空间异质性以及水文特性对磷的迁移、转化行为。

表1 哈尼梯田湿地不同时期磷形态含量及其范围

Table 1 Phosphorus content and range in different periods in Hani terrace wetland

磷形态 Forms of phosphorus	休闲期 Fallow period		生长期 Growth period		收获期 Harvest period		变异系数 Coefficient of variation
	范围 Range/ (mg/kg)	均值 Mean/ (mg/kg)	范围 Range/ (mg/kg)	均值 Mean/ (mg/kg)	范围 Range/ (mg/kg)	均值 Mean/ (mg/kg)	
TP	56.43—580.76	313.70±142.47ab	83.45—752.66	268.50±128.82b	107.73—1031.39	374.03±191.04a	0.34
OP	34.29—464.24	227.76±138.30b	45.90—561.89	190.93±94.51b	102.59—964.87	328.30±176.09a	0.61
IP	21.80—309.38	85.95±51.74a	17.26—190.76	77.57±46.88a	5.14—106.19	45.73±22.81b	0.65
NaOH-P	17.04—305.22	79.36±51.72a	12.74—170.28	71.09±42.93a	2.85—94.23	39.81±21.93b	0.69
HCl-P	2.78—25.84	6.59±5.04a	1.41—40.19	6.48±8.01a	1.54—15.66	5.91±3.53a	0.91

同一行小写字母不同,表示不同时期磷含量差异显著($P<0.05$);TP: 总磷 Total phosphorus; OP: 有机磷 Organic phosphorus; IP: 无机磷 Inorganic phosphorus; NaOH-P: 铁铝结合态磷 Iron/aluminum bound phosphorus; HCl-P: 钙结合态磷 Calcium bound phosphorus

2.2 哈尼梯田湿地土壤不同磷形态含量的空间分布特征

研究区土壤中不同形态磷的空间分布如图 3 所示。在上部和下部梯田湿地的 0—20 cm 土层中, HCl-P 含量相比其他区域的梯田湿地较低, 而该土层的其余各形态磷含量最高值区均集中在上部梯田湿地, 并呈现随海拔的降低而逐渐递减的趋势。20—40 cm 土层中各磷形态含量分布不均, 总体高于其它土层, 该土层 TP 与 OP 含量最高值区主要分布在梯田湿地的上部与中部, IP 含量在生长期和收获期的分布规律与 0—20 cm 土层的磷含量变化较为一致, 但在休闲期最高值区主要集中在下部梯田湿地; 根据图 3, 可看出 20—40 cm 土层中 HCl-P 含量在距离村庄较近的上部梯田湿地中较高, NaOH-P 的分布规律同 IP 的变化相同。不同时期的 HCl-P 含量在 40—60 cm 土层中差异较大, 表现为生长期与收获期的 HCl-P 在上中部梯田湿地中含量略低, 而在休闲期的上中部梯田湿地为 HCl-P 含量最高值区; 除 HCl-P 以外的各形态磷含量在休闲期和生长期最高值区均在湿地东南部, 在收获期表现为梯田湿地西南部磷形态含量较高, 总体呈现沿着水流方向逐渐降低的分布规律。60—80 cm 土层中不同磷形态含量呈现随海拔降低而逐渐减小的趋势, 与 40—60 cm 的分布规律较为相似, 总体上 60—80 cm 土层磷形态含量相对其他土层偏低。

2.3 哈尼梯田湿地土壤磷形态与土壤理化性质相关性分析

从表 2 可知, 研究区土壤为酸性土壤 (5.30—6.03), 收获期土壤 pH 值显著高于其它时期 ($P<0.05$), 与生长期土壤 pH 值差异性显著; 生长期和收获期土壤在除表层以外的 20—80 cm 土层 pH 值表现为随土层深度的增加而增加。土壤 TOC 含量总体呈现收获期>休闲期>生长期, 土层变化不显著; 在收获期变化幅度与含量最高, 其余两个时期土壤 TOC 含量总体呈现随土层深度的增加而减少。土壤粒径在各时期间变化差异不显著 ($P>0.05$), 且随土层加深并无明显规律。

表 2 土壤理化性质
Table 2 Soil physical and chemical properties

时期 Periods	土层深度 Soil depth/cm	TOC/%	粒径 Particle size/ μm	pH
休闲期 Fallow period	0—20	2.58 $\pm$ 0.60Aab	131.46 $\pm$ 33.12Aa	5.60 $\pm$ 0.55Aab
	20—40	2.44 $\pm$ 0.99Aa	124.67 $\pm$ 32.06Aa	5.45 $\pm$ 0.45Aab
	40—60	2.25 $\pm$ 0.76Aa	108.30 $\pm$ 45.46Aa	5.42 $\pm$ 0.23Ab
	60—80	2.30 $\pm$ 0.84Aa	112.44 $\pm$ 35.52Aa	5.38 $\pm$ 0.31Ab
生长期 Growth period	0—20	2.01 $\pm$ 1.54Ab	147.16 $\pm$ 56.35Aa	5.38 $\pm$ 0.32Ab
	20—40	1.53 $\pm$ 0.98Aa	122.85 $\pm$ 56.18Aa	5.30 $\pm$ 0.37Ab
	40—60	1.20 $\pm$ 0.78Aa	128.01 $\pm$ 58.57Aa	5.32 $\pm$ 0.49Ab
	60—80	1.17 $\pm$ 0.80Aa	161.83 $\pm$ 131.74Aa	5.46 $\pm$ 0.57Ab
收获期 Harvest period	0—20	6.62 $\pm$ 7.32Aa	125.91 $\pm$ 49.43Aa	5.83 $\pm$ 0.24Aa
	20—40	5.61 $\pm$ 7.73Aa	122.92 $\pm$ 51.75Aa	5.77 $\pm$ 0.26Aa
	40—60	5.89 $\pm$ 9.11Aa	133.01 $\pm$ 47.86Aa	5.98 $\pm$ 0.43Aa
	60—80	6.56 $\pm$ 10.32Aa	125.45 $\pm$ 50.02Aa	6.03 $\pm$ 0.46Aa

大写英文字母表示同一时期不同土层间的含量差异显著 ($P<0.05$); 小写字母表示同一土层不同时期的含量差异显著 ($P<0.05$); TOC: 总有机碳 Total organic carbon

不同时期土壤中各形态磷与土壤 TOC、粒径以及 pH 值的相关性呈现以下规律 (表 3): TOC、pH、粒径对磷含量的影响在水稻生长期和收获期具有显著性; 生长期各形态磷含量与土壤 pH 值呈显著 ($P<0.05$) 或极显著正相关关系 ($P<0.01$), TP、IP 和 NaOH-P 含量与土壤 TOC 含量呈极显著负相关关系 ($P<0.01$); 收获期不同磷形态含量与土壤 TOC 含量之间均呈现显著负相关 ($P<0.05$), IP 和 NaOH-P 含量与土壤粒径呈现极显著负相关, TP、OP 和 HCl-P 与土壤 pH 值呈现显著正相关且相关系数增大。

不同土层土壤中各形态磷与土壤 TOC、粒径以及 pH 值的相关性分析结果如图 4。pH 与 TP、OP 含量的正相关性系数随土层深度的增加而增加, 在 40—60 cm 与 60—80 cm 土层分别呈现显著 ($P<0.05$) 与极显著

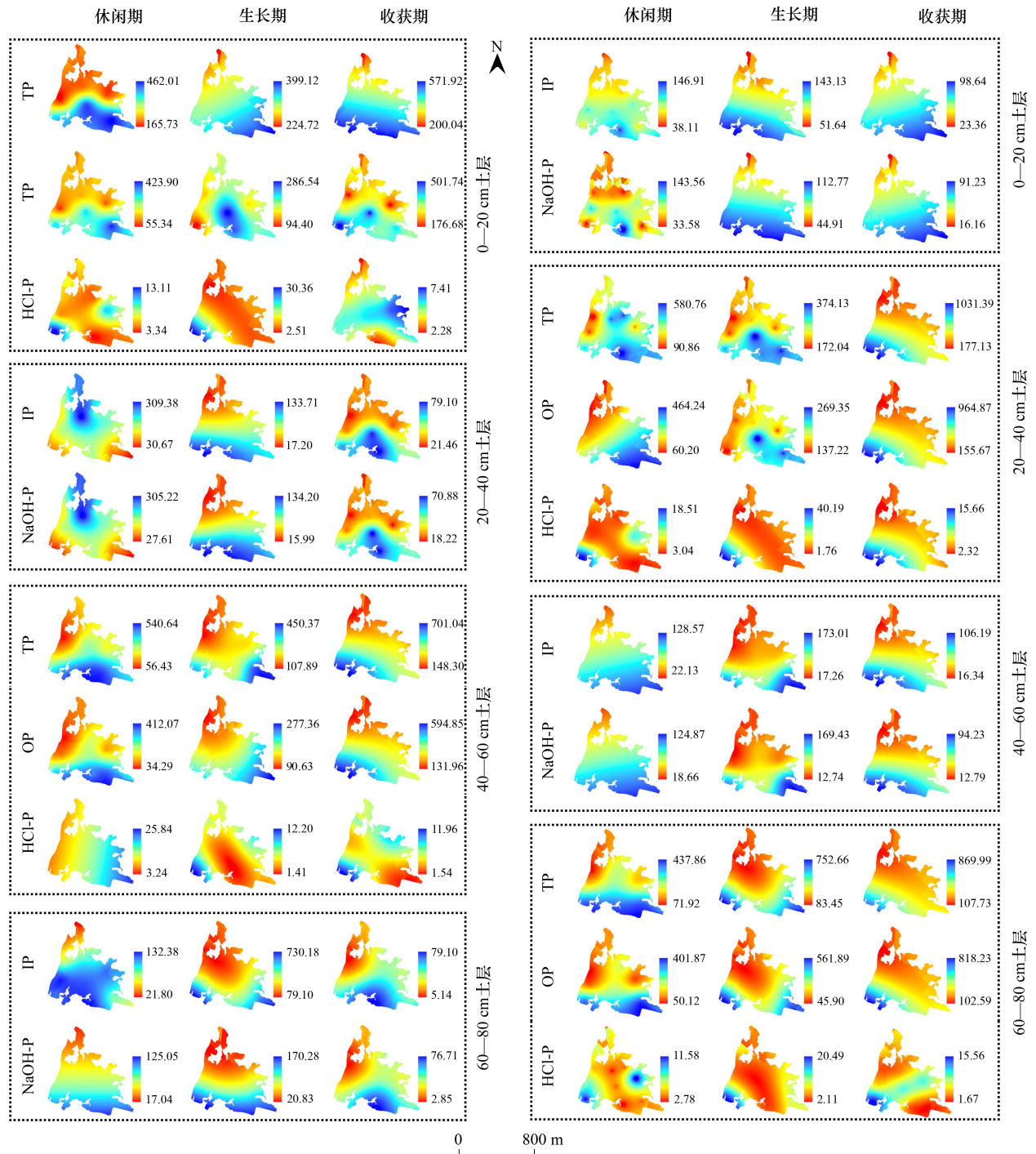


图3 哈尼梯田湿地土壤各形态磷的空间分布图

Fig.3 Spatial distribution of soil phosphorus forms in Hani terrace wetland

图中颜色代表磷含量高低,单位为 mg/kg;TP: 总磷 Total phosphorus; OP: 有机磷 Organic phosphorus; IP: 无机磷 Inorganic phosphorus; NaOH-P: 铁铝结合态磷 Iron/aluminum bound phosphorus; HCl-P: 钙结合态磷 Calcium bound phosphorus

($P < 0.01$) 的相关性,说明 pH 对 TP 和 IP 含量的影响随深度增加而增加;pH 与 IP 和 NaOH-P 的相关性在 0—20 cm 与 60—80 cm 土层呈负相关性,在 20—40 cm 和 40—60 cm 土层呈正相关性;土壤 TOC 与 TP 呈负相关性,并随着土层深度的增加相关系数增大;除 HCl-P 以外,土壤粒径与其余各形态磷之间呈现负相关性,在 20—80 cm 土层中负相关性系数随土层深度的增加而增加,表层土壤粒径与磷含量无明显相关性规律。

表 3 不同时期土壤磷形态含量与土壤 TOC、粒径、pH 的相关性

Table 3 Correlation between different forms of soil phosphorus content and soil TOC, particle size and pH in different periods

磷形态 Forms of phosphorus	休闲期 Fallow period			生长期 Growth period			收获期 Harvest period		
	TOC	粒径 Particle size	pH	TOC	粒径 Particle size	pH	TOC	粒径 Particle size	pH
TP	-0.20	-0.05	-0.12	-0.47 **	-0.25	0.46 **	-0.36 *	-0.25	0.36 *
OP	-0.30	-0.14	-0.21	-0.31	-0.23	0.35 *	-0.34 *	-0.21	0.36 *
IP	0.25	0.25	0.21	-0.68 **	-0.23	0.56 **	-0.38 *	-0.45 **	0.23
NaOH-P	0.24	0.22	0.24	-0.68 **	-0.26	0.51 **	-0.36 *	-0.51 **	0.17
HCl-P	0.12	0.30	-0.27	-0.31	0.08	0.55 **	-0.22 *	0.24	0.42 *

* 表示相关性显著 ($P<0.05$) ; ** 表示相关性极显著 ($P<0.01$)

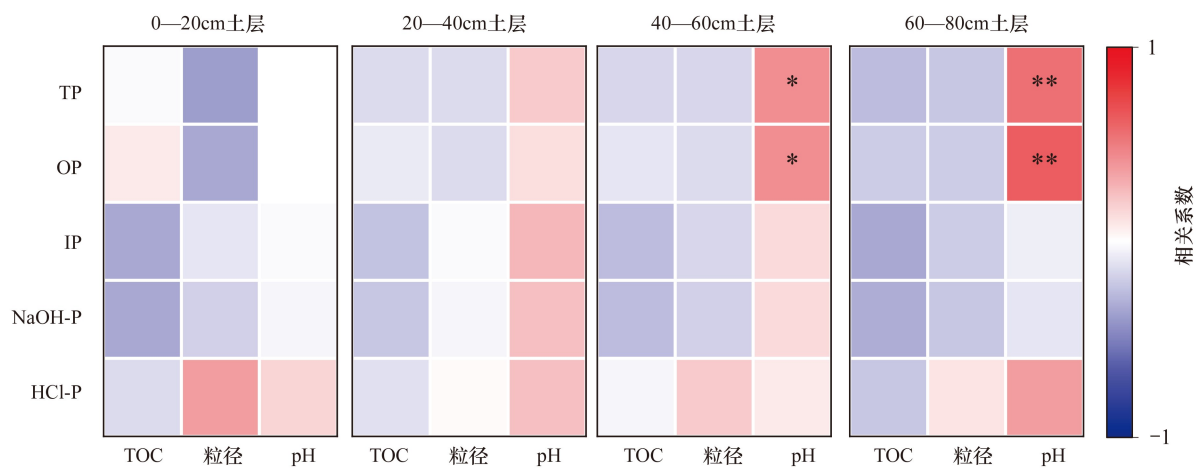


图 4 不同土层土壤磷形态含量与土壤 TOC、粒径、pH 的相关性

Fig.4 Correlation between different forms of phosphorus content and soil TOC, particle size, and pH in different soil layers

* 表示相关性显著 ($P<0.05$) ; ** 表示相关性极显著 ($P<0.01$) ; TOC: 总有机碳 Total organic carbon

3 讨论

3.1 哈尼梯田湿地土壤磷形态的时空分布

土壤中不同形态磷含量的时间分布受环境因素与人类活动影响。淹水条件下秸秆还田能带入丰富的氮磷钾等养分,促进微生物的繁殖,显著提高土壤中 TP 含量^[17]。因此,哈尼梯田湿地收获期秸秆还田是导致收获期 TP 含量高的主要原因;其次,哈尼梯田湿地在收获期不放水,田内水流动力较弱,增加了土壤对上覆水中磷的吸附,导致磷累积。休闲期因育苗和做栽秧前准备,不仅会在梯田湿地里撒一层薄薄的细粪,而且会将村中水塘里积累的牲畜粪便和生活污水经人为管理下放入湿地中,增加了湿地土壤肥力和水势条件^[18],水体富氧更充分,提供了 NaOH-P 在好氧条件下由可溶态转化为不溶态向土壤富集的条件^[19],可出现 NaOH-P 在休闲期的相对高值。HCl-P 被认为是不易释放的磷形态,源于原生碎屑磷或本地自生钙磷,随时间和空间的变化不大,与研究区地质背景有关^[13,20],是 HCl-P 在各时期含量较低且差异不显著的主要原因,这与徐康等^[21]对巢湖流域的 HCl-P 含量较高研究相反。研究区水土流失现象能影响 HCl-P 含量^[22],巢湖流域矿产资源开发与植被破坏较哈尼梯田湿地严重,周围广泛分布含磷变质岩,大量含有矿物态磷的颗粒土壤因雨水冲刷进入巢湖,故巢湖内 HCl-P 含量较高。

各形态磷含量空间分布总体呈现随海拔降低而降低的现象,顺序为上部>中部>下部;湿地的上部梯田距离村庄和公路较近,外源磷的输入与冲肥灌溉更充足,随着海拔的降低,养分供给逐渐减少。不同形态磷含量在 20—40 cm 土层含量最高,呈明显富集现象;哈尼梯田湿地土壤表层 0—20 cm 粒径较 20—40 cm 土层大,

而粒径越大,土壤对磷的吸附量越小^[23],故表层磷含量相对较小;各形态磷含量在 40—80 cm 土层表现为随深度的增加呈现不同程度的降低,可能是随着深度的增加,环境条件处于相对还原状态,有利于磷的解吸^[24],致使土壤中磷含量减少。综上所述,哈尼梯田湿地的立体景观结构以及人为扰动对磷空间分布的影响较大,一定程度上对磷有截留作用。但近些年哈尼梯田湿地人为施肥量增加,降雨及水动力条件不断变化,加剧土壤与上覆水之间磷的迁移转化。因此,为防止土壤磷迁移流失造成湖泊和河流水体的富营养化,应注意防范化肥的大量使用。

3.2 磷形态含量对环境变化的响应

土壤中 TOC 含量、pH、粒径大小等差异都会影响土壤对磷的吸附和释放作用,从而影响土壤中各形态磷的含量与转化。在水动力条件较弱的区域,磷含量与土壤粒径的相关性较为显著^[25],哈尼梯田湿地因常年水分流动,表层受水动力扰动较大,导致磷含量与土壤粒径无明显相关性规律;但总体而言土壤粒径与磷含量呈负相关,而 HCl-P 与土壤粒径呈正相关,主要原因为 HCl-P 源自的碎屑磷存在于较粗的土壤颗粒中,其含量随粒径增大而增大^[26—27]。土壤 pH 影响土壤溶液中离子种类和浓度,对磷的形态有显著影响;pH 值增大,能导致可交换态铝的含量降低,土壤对磷酸盐吸附能力减小,使 pH 值与铁铝结合态磷负相关性增强^[28],解释了收获期 NaOH-P 含量低的现象。但当土壤中羟基铝化合物对磷酸盐的吸持作用超过因 pH 升高而引起土壤对磷的吸持影响时,会出现土壤 pH 增加而增加土壤吸磷量的现象^[29],致使土壤中 TP 含量在不同季节和土层与 pH 值呈现正相关。土壤有机碳的含量越高,土壤对磷的吸持作用越低,两者间呈现负相关性^[30],可能是 IP 和 NaOH-P 在收获期含量较低的原因;本研究中休闲期和各土层土壤磷形态含量变化与 TOC 含量相关性不显著,可能是土壤的高度异质性影响着磷的吸附从而影响土壤中磷的分布变化^[31],具体原因还需进一步研究。

3.3 不同形态磷含量与其它湿地的对比

湿地气候、土壤利用类型与植被条件等是影响磷形态含量差异的重要原因。哈尼梯田湿地的立体空间结构与独特的“冲肥”灌溉是区别于其他湿地的典型特征。哈尼梯田湿地的 TP 浓度与洱海湿地与南四湖湿地两个自然湿地相比较低,但与武河人工湿地相比较高,可能原因与武河湿地是因处理污水、改善环境而建造的人工湿地,其基质对磷具有较高的吸附作用和净化效率^[32],而哈尼梯田湿地对土壤肥力的要求较高,对梯田的养分补给较为充足使土壤磷含量高于武河人工湿地。NaOH-P 反应人类活动对环境的影响,是人为和外源性的,可作为土壤环境质量的判别标志,指示人为污染情况^[19]。哈尼梯田湿地的 NaOH-P 含量仅为洱海湿地的一半,较我国许多湖泊与农田含量较低,说明哈尼梯田湿地土壤环境质量较好,同时,可能梯田湿地土壤因输入有机肥提高土壤有机质含量,可降低土壤对磷的吸附^[33],导致 NaOH-P 含量较洱海湿地低;但当地村内肥水汇入以及土壤含水量高,均有利于土壤养分的自然富集,从而表现出较南四湖湿地和武河湿地中 NaOH-P 含量高。哈尼梯田湿地 HCl-P 含量为洱海湿地 HCl-P 含量的 1%、南四湖湿地的 2%,湿地的地质背景不同可能是影响 HCl-P 含量差异的原因。梯田湿地在建设过程中采取多种水土保持措施来保护湿地的生态环境和可持续发展,例如通过引水和建设塘坝合理利用水资源、利用汇水排路和深沟翻耕等措施对土地进行利用和调整,有效的保护了哈尼梯田湿地生态环境,可能是 HCl-P 含量较低的主要原因。因此,建议 HCl-P 含量较高的湿地应注重水土流失避免湿地内磷污染增加(表 4)。

4 结论

(1) 哈尼梯田湿地土壤 TP 含量均值为 318.74 mg/kg,收获期土壤 TP 和 OP 含量高于休闲期与生长期,根据第二次全国普查养分分级标准,处于磷缺乏状态;受外源磷的输入的影响,哈尼梯田湿地土壤 IP 和 NaOH-P 含量在休闲期最大;而 HCl-P 含量整体较低,季节变化上无显著差异,与哈尼梯田湿地的生态环境和地质背景有关。

表 4 不同湿地中磷含量对比

Table 4 Comparison of phosphorus content with different wetlands

湿地名称 Wetland names	湿地类型 Wetland types	研究区位置 Study area location	主要植物 Main plants	样品来源 Sample source	TP 含量范围 TP content range/ (mg/kg)	TP 含量均值 TP content mean/ (mg/kg)	NaOH-P 含量 NaOH-P content/ (mg/kg)	HCl-P 含量 HCl-P content /(mg/kg)
洱海 ^[34] Erhai lake	自然湿地	云南省大理州	芦苇、香蒲	沉积物	418.71—1108.34	903.64	178.70	265.05
南四湖 ^[15] Nansi lake	自然湿地	山东省济宁市	芦苇、水葱	底泥	441.03—1496.10	745.37	50.42	460.09
武河湿地 ^[32] Wuhe wetland	人工湿地	山东省临沂市	芦苇、菖蒲	沉积物	120.68—342.44	230.77	45.86	104.26
哈尼梯田湿地 Hani terrace wetland	人工湿地	云南省红河州	水稻	水稻土	56.43—1031.39	318.74	63.42	6.33

(2) 哈尼梯田湿地土壤磷形态含量空间分布不均,整体呈现随海拔的降低而降低的趋势,说明湿地对磷的迁移有截留作用;土层垂直剖面中,各形态磷在 20—40 cm 土层富集,40—80 cm 土层磷含量随深度的增加而递减,哈尼梯田湿地“冲肥”灌溉和人为扰动对磷形态分布起重要作用。

(3) 不同土层土壤 TP 和 OP 与 pH 值呈正相关性,相关系数随土壤深度的增加而增加,并在 60—80 cm 土层关系为极显著;除 HCl-P 外,土壤粒径与磷形态之间呈现负相关,且在 20—80 cm 土层相关性系数随土壤深度的增加而增加;不同土层中 TOC 与各形态磷表现为负相关关系,在收获期具有显著相关性。

参考文献 (References):

- [1] Reddy K R, Newman S, Osborne T Z, White J R, Fitz H C. Phosphorous cycling in the greater Everglades ecosystem: legacy phosphorous implications for management and restoration. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2011, 41(sup1): 149-186.
- [2] 李黄维, 吴小红, 刘婷, 何金松, 王钧, 闫文德. 不同林分土壤磷形态与磷酸酶特征. *生态学报*, 2023, 43(3): 1257-1266.
- [3] 刘丹, 游郭虹, 宋小艳, 胡雷, 柳杨, 王长庭. 施磷对川西北高寒草地土壤磷形态及有效性的影响. *生态学报*, 2023, 43(6): 2378-2387.
- [4] Cheng X L, Huang Y N, Pu X C, An R D, Huang W D, Li J A, Wang W, Li R. Spatial and seasonal distribution and transportation of different forms of phosphorus in the middle reaches of the Yarlung Zangbo River. *Water*, 2018, 10(12): 1858.
- [5] 周素, 刘国华, 周维, 苏旭坤. 红河哈尼梯田遗产区生态系统服务价值外溢研究. *生态学报*, 2023, 43(7): 2734-2744.
- [6] 陈安旺. 基于景观格局分析的哈尼梯田文化景观研究——以红河县甲寅镇为例[D]. 昆明: 云南大学, 2017.
- [7] 罗丹. 流动与绵延: 驭水于成的哈尼梯田“族群—生态”命运共同体. *西北民族大学学报: 哲学社会科学版*, 2021(4): 40-48.
- [8] 张德刚, 刘艳红, 王丹, 全舒舟. 云南绿春哈尼梯田不同土地利用方式下土壤养分特征. *广东农业科学*, 2010, 37(7): 81-83.
- [9] 张永慧, 李贝贝, 张紫妍, 刘娟, 常换换, 苏友波. 不同土地利用方式对哈尼梯田土壤肥力的影响. *中国土壤与肥料*, 2021(6): 25-34.
- [10] 顾莹, 苏友波, 何霞红, 鲁绍坤, 高国兴, 唐有福. 元阳梯田养分平衡研究. *云南农业大学学报: 自然科学*, 2013, 28(5): 661-667.
- [11] 姚敏, 崔保山. 哈尼梯田湿地生态系统的垂直特征. *生态学报*, 2006, 26(7): 2115-2124.
- [12] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [13] Ruban V, López-Sánchez J F, Pardo P, Rauret G, Muntau H, Quevauviller P. Harmonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments—A synthesis of recent works. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 2001, 370(2): 224-228.
- [14] 张宪伟, 潘纲, 陈灏, 廖龙标, 郭博书, 王晓丽. 黄河沉积物磷形态沿程分布特征. *环境科学学报*, 2009, 29(1): 191-198.
- [15] 张志斌, 徐国栋, 张晓蕊, 鞠颂, 林建伟, 张彦浩, 孙杰, 王书义, 张向阳, 时延锋. 南四湖消落带底泥磷形态分布特征、影响因素及释放风险. *湖泊科学*, 2022, 34(6): 1912-1922.
- [16] 全国土壤普查办公室. 中国土壤. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [17] 何梦欣. 淹水条件下秸秆还田后磷的迁移与转化特征[D]. 武汉: 华中农业大学, 2021.
- [18] 付丽红. 人与自然的融合——云南哈尼梯田造田文化活动的田野考察[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2019.
- [19] 戴纪翠, 宋金明, 李学刚, 郑国侠, 袁华茂. 胶州湾沉积物中的磷及其环境指示意义. *环境科学*, 2006, 27(10): 1953-1962.
- [20] 刘鹏, 张紫霞, 张超, 王妍, 杨波, 张叶飞. 普者黑河流-湖泊湿地表层沉积物磷素时空分布及影响因素. *农业环境科学学报*, 2019, 38(11): 2553-2562.

- [21] 徐康, 刘付程, 安宗胜, 高毅, 韩曦, 孙庆业. 巢湖表层沉积物中磷赋存形态的时空变化. 环境科学, 2011, 32(11): 3255-3263.
- [22] 李煜, 陶涛, 武金坤, 程瑶, 王金, 蒋小满. 漳河上游流域沉积物中磷的空间分布特征及其影响因素. 中国环境监测, 2022, 38(4): 127-138.
- [23] 黄慧倩, 胡浩鹏, 杨斌, 宁志铭, Solomon Felix Dan, 李嘉玉, 沈奇健. 亚热带海湾表层沉积物对磷的吸附解析特征研究. 环境科学研究, 2023, 36(2): 363-372.
- [24] 向速林, 李松贵, 张旭, 付成钢, 吴蓓. 小型浅水湖泊沉积物磷的赋存形态及其相关性分析. 生态科学, 2019, 38(1): 33-41.
- [25] 李原, 李任伟, 尚榆民, 李宁波, 卢家烂. 洱海环境沉积学研究——表层沉积物营养盐与粒度分布. 沉积学报, 2000, 18(3): 346-348.
- [26] 马金玉, 罗千里, 王文才, 范中亚, 李伟杰, 罗艳. 华阳河湖群表层沉积物磷形态及生物有效性. 长江流域资源与环境, 2021, 30(12): 2962-2971.
- [27] Yao Q Z, Du J T, Chen H T, Yu Z G. Particle-size distribution and phosphorus forms as a function of hydrological forcing in the Yellow River. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(4): 3385-3398.
- [28] Lopez-herandez D, Burnham C P. The effect of pH on phosphate adsorption in soils. Journal of Soil Science, 1974, 25(2): 207-216.
- [29] 王光火, 朱祖祥. pH 对土壤吸持磷酸根的影响及其原因. 土壤学报, 1991, 28(1): 1-6.
- [30] Schwarzenbach R P, Gschwend P M, Imboden D M. Environmental Organic Chemistry. Country New York: John Wiley & Sons, 2002.
- [31] 潘峰, 郭占荣, 刘花台, 王博, 李志伟, 庄振杰. 潮滩沉积物-水界面磷、铁的高分辨率分布特征及生物地球化学行为. 地球科学, 2018, 43(11): 4109-4119.
- [32] 李肖正, 李宝, 屈杰, 林政全, 李凯旋, 王凤良. 山东武河人工湿地对磷净化的长效性及其内源磷分布与释放. 土壤通报, 2019, 50(2): 449-456.
- [33] Yu W, Ding X, Xue S, Li S, Liao X, Wang R. Effects of organic-matter application on phosphorus adsorption of three soil parent materials. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2013, 13(4): 1003-1017.
- [34] 赵海超, 王圣瑞, 焦立新, 杨苏文, 刘文斌. 洱海沉积物中不同形态磷的时空分布特征. 环境科学研究, 2013, 26(3): 227-234.