

刘鹏, 张紫霞, 张超, 等. 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[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(11): 2553-2562.
LIU Peng, ZHANG Zi-xia, ZHANG Chao, et al. Spatial and Temporal distribution and factors influencing phosphorus in surface sediments of Puzhehei river and lake wetland, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(11): 2553-2562.

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

刘鹏¹, 张紫霞¹, 张超^{2*}, 王妍¹, 杨波¹, 张叶飞¹

(1. 西南林业大学生态与环境学院, 昆明 650224; 2. 西南林业大学林学院, 昆明 650224)

摘要:应用四步连续提取法和冗余分析(RDA),对总磷(TP)时空分布及各形态磷的环境影响因素进行深入探讨。结果表明:河流和湖泊湿地表层沉积物TP含量分别为415~1903、244~2474 mg·kg⁻¹,均为中度污染水平,响水河与中段湖区为高含磷区域,枯水期TP含量较丰水期和平水期要高;两类湿地表层沉积物中各形态磷含量排序为:铁铝氧化态磷(NaOH-rP) > 难溶性磷(Res-P) > 有机质结合态磷(NaOH-nrP) > 可还原态磷(BD-P) > 钙磷(HCl-P) > 弱吸附态磷(NH₄Cl-P)。其中,NaOH-rP、Res-P两者之和占TP比例达55.4%,而HCl-P、NH₄Cl-P占TP均不足3%,潜在环境风险较高;从影响因素来看,NH₄Cl-P受环境因子影响较大,BD-P、NaOH-rP与pH为负相关关系,与氧化还原电位(OPR)为正相关,总有机碳(TOC)的附着作用对NaOH-nrP的固定产生很大干扰,HCl-P与pH负相关,Res-P则相对稳定。

关键词:普者黑;湿地;沉积物;磷形态;时空分布;环境因子

中图分类号:X52 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2019)11-2553-10 doi:10.11654/jaes.2019-0555

Spatial and Temporal distribution and factors influencing phosphorus in surface sediments of Puzhehei river and lake wetland, China

LIU Peng¹, ZHANG Zi-xia¹, ZHANG Chao^{2*}, WANG Yan¹, YANG Bo¹, ZHANG Ye-fei¹

(1. College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2. Forestry Institute, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

Abstract: It is crucial to investigate the total phosphorus (TP) temporal and spatial distributions in the surface sediments and the factors affecting phosphorus species to understand the eutrophication of Puzhehei wetland. As such, the four-step continuous extraction and redundancy analysis were employed to study the TP spatial and temporal distributions and related factors. Our data showed that TP content in the surface sediments of rivers and lakes was 415~1903 and 244~2474 mg·kg⁻¹, respectively, indicating moderate pollution levels. However, TP content in both Xiangshui River and the middle lake showed higher levels as follows: low-water period > high-water period > normal-water period. In addition, the concentrations of phosphorus species in two wetlands were: NaOH-rP > Res-P > NaOH-nrP > BD-P > HCl-P > NH₄Cl-P. The sum of NaOH-rP and Res-P accounted for 55.4%, whereas HCl-P and NH₄Cl-P accounted for less than 3% of TP suggesting a high environmental risk. Moreover, NH₄Cl-P was affected by environmental factors. BD-P and NaOH-rP were negatively correlated with pH, but positively correlated with oxidation-reduction potential (OPR) and the adhesion of total organic carbon (TOC) to NaOH-nrP. HCl-P was negatively affected by pH. But, Res-P was relatively stable.

Keywords: Puzhehei; wetland; sediments; phosphorus species; temporal and spatial distribution; environmental factors

收稿日期: 2019-05-20 录用日期: 2019-09-08

作者简介: 刘鹏(1995-),男,云南楚雄人,硕士研究生,从事脆弱生态系统修复研究。E-mail: 1564385618@qq.com

*通信作者: 张超 E-mail: zhchgis@126.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(31560237, 31760245)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(31560237, 31760245)

湿地是水陆交互作用形成的地貌单元,在净化污染物、改善资源状况和维护生态平衡等方面发挥着重要作用^[1-2]。沉积物是湿地生态系统的重要组成部分,是营养元素的主要截留区和汇聚地,很大程度影响营养物质的吸收、储存和转化等过程^[3-4],进而影响湿地生态系统的结构和功能。其中,表层沉积物是对环境变化的响应最敏感脆弱的部分^[5],且承载着碳、氮、磷等外源营养盐的输入。磷是限制湖泊富营养化及藻类生长的主要营养元素^[6],在湿地中,大多数外源磷通过溶解性磷吸附作用或与有机颗粒物结合在沉积物中一起沉降下来,但是沉积物对磷的吸附是有限的^[7]。当外源磷输入减少时,沉积物中吸附的磷会再次释放到上覆水中^[8]。因而沉积物内源磷的滞留是水体富营养化的一个重要来源,长期以往将会影响湿地水体质量,进而影响退化湿地的恢复进程。因此通过比较磷在沉积物中的赋存形态和含量,探求磷在沉积物中的行为特征和分布规律,对于湿地水体环境质量评估具有重要意义。国内外对湿地沉积物磷形态分布特征及释放风险等进行了大量研究,如夏威夷滨海湿地、黄河口湿地、扎龙湿地、闽江口湿地等^[9-12]。

普者黑流域内分布有河流、湖泊、沼泽、人工湿地等,湿地总面积为1917 hm²,湿地率达5.8%^[13]。该区域集喀斯特孤峰群、湖泊群、溶洞群和湖滨湿地等多种地貌于一体,所代表的高原湖泊湿地自然景观和特殊的岩溶湖泊湿地生态系统,具有极高的研究及保护价值。近年来,关于普者黑湿地的研究主要集中于景观格局演变^[14-15]、磷素在沉积物-水-植物界面的迁移转化^[16]和水环境质量评价上^[17-18],有关表层沉积物磷素时空分布及其影响因素分析的研究则未见报道。为此,本研究运用四步连续提取法,对普者黑河流和湖泊湿地表层沉积物中总磷及其赋存形态进行了测试分析,并结合沉积物理化性质,探讨了沉积物总磷时空分布特征及各磷形态的影响因素。旨在为普者黑水环境保护、退化湿地生态修复提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

普者黑位于滇东南丘北县境内(103°55′~104°13′E,24°05′~24°12′N),地处云贵高原向桂西平原斜坡地带的滇东南褶皱带中山峰丛洼地岩溶区,流域面积388 km²,海拔1446~1462 m,是典型的湖泊、孤峰、峰林复合生态系统。湖区面积约为13 km²,容水

总量约为7000万m³,水深3~8 m,为南盘江上游,属于珠江水系。该研究区属于低纬度季风气候,多年平均气温为16.4℃,雨季多集中在5—10月,多年平均降雨量为1207 mm。

根据调查,研究区内有农业用地9 121.47 hm²,主要集中在北部(板桥河水系)和西南部(响水河、增产渠水系),主产三七、辣椒和烤烟等,农业生产总产值占全县总产值比重达60%以上。此外,响水河、板桥河还分别是八道哨乡和双龙营镇的水产养殖、生活污水等所产生的外源磷传输通道。旅游区和餐饮区主要集中在普者黑和仙人洞村附近,旅游人次由2012年的151.8万增加到2018年的215.6万,5—8月份为旅游旺季。流域内并无较大的工业布局,且污染程度不高,仅有少量的砖厂、酿酒厂和有机肥厂等。

普者黑湖是滇东南岩溶区最大的湖泊,已列入全国优质水源地保护范围,为当地重要饮用水源地。同时,普者黑湿地已作为重点保护对象纳入云南省湿地保护规划。目前水质状况良好,其中总氮含量为0.34~1.61 mg·L⁻¹,总磷为0.01~0.046 mg·L⁻¹^[18],符合Ⅲ类水标准。

1.2 样点布设与样品采集

为研究普者黑河流-湖泊湿地表层沉积物TP时空分布特征,运用GPS设定了21个采样点(图1)。各入湖河流的上游(u)、中游(m)和下游(d)均有采样点分布,具体为:曰者渠(YZ-u、YZ-m和YZ-d)、增产渠(ZC-u、ZC-m和ZC-d)、响水河(XS-u、XS-m和XS-d)和板桥河(BQ-u、BQ-m和BQ-d),共计12个。湖泊湿地以水利监测站为界,上段(L1~L3)、中段(L4~L6)和下段(L7~L9)共9个样点。采集了2018年枯水期、丰水期和平水期的沉积物样品进行TP含量测定;为研究沉积物中磷的赋存形态及影响因素,选取了枯水期样品进行磷形态分级提取;采样时使用多点混合法(同一样点采集3个平行样,现场混匀为1个样品,取2 kg左右),每个样点区的范围约为5 m×5 m。使用彼得森采泥器抓取表层(0~15 cm)沉积物,样品带回实验室后置于阴凉透风处使其自然风干。经研磨、过100目筛后,室温下密封保存,供测试分析使用。

1.3 样品分析及数据处理

沉积物总磷(TP)指标分析方法采用酸熔-钼锑抗比色法^[16];沉积物磷分级提取参照王圣瑞^[19]所使用的方法。将磷形态分为弱吸附态磷(NH₄Cl-P)、可还原态磷(BD-P)、铁铝氧化态磷(NaOH-rP)、有机质结

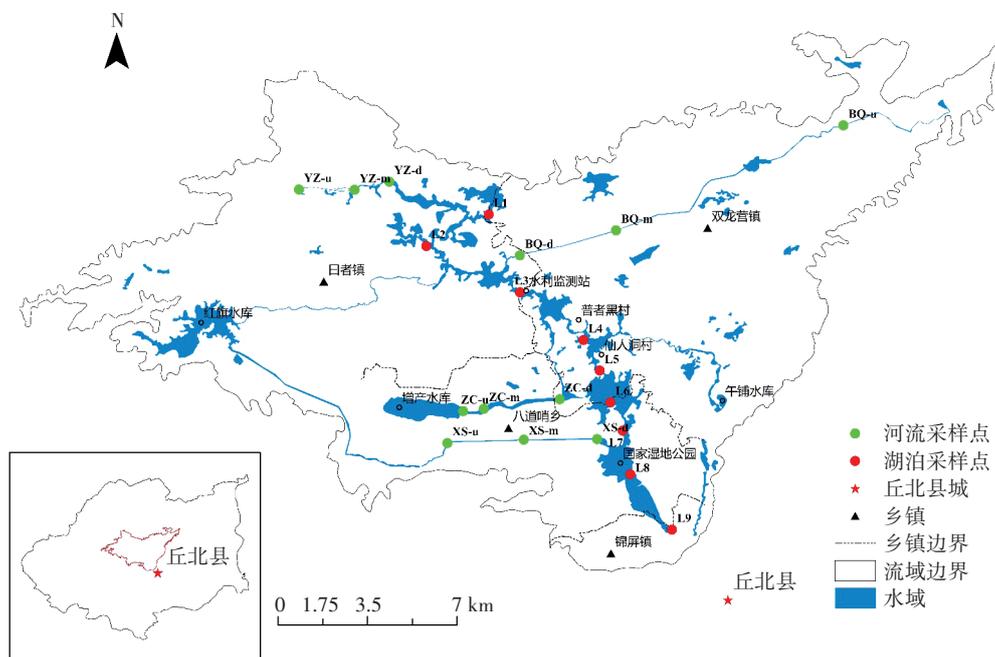


图1 采样点位置图

Figure 1 Location of sampling points

合态磷(NaOH-nrP)、钙结合态磷(HCl-P)和难溶性磷(Res-P)6种。其中, $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 、BD-P、NaOH-nrP为潜在可移动磷形态, NaOH-rP、HCl-P、Res-P为稳定磷形态^[20];总有机碳(TOC)测定采用重铬酸钾法^[21];沉积物pH、溶解氧(DO)、氧化还原电位(OPR)和电导率(Eh)参照《土壤理化分析》^[22]。试验数据采用Excel进行初步分析并建立数据库,利用软件Canoco 4.5进行冗余分析(Redundancy analysis, RDA),使用ArcGIS 10.2制图。

2 结果与讨论

2.1 表层沉积物总磷含量时空分布特征

2.1.1 河流湿地总磷含量及分布

从图2可以看出,河流湿地不同时期表层沉积物TP含量均值为枯水期>丰水期>平水期。其中,枯水期TP含量为611~1684 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均值为1167 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。丰水期TP含量差异较大,介于478~1903 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均值为970 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。平水期TP含量为415~994 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均值为772 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。从变异系数来看,丰水期(0.36)要高于枯水期(0.26)和平水期(0.23)。枯水期流域内降雨量少,但工农业活动却并未减弱,水量的锐减使稀释作用降低,表层沉积物中营养盐浓度显著升高^[23]。丰水期河流受降雨、径流等外力作用的影

响较大,易于沉积物-水界面的磷素进行迁移转化^[24],导致这一时期总磷含量变化幅度较大。

空间分布上,响水河TP含量最高,其次是增产渠,分别为1147、1029 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,曰者渠较低(792 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。这是因为增产渠和响水河集水产养殖、农业生产和生活污水排入于一体,外源磷输入量大。此外,同一河流的不同断面TP含量也具差异性(图2)。枯水期和丰水期均为下游(入湖口)>上游>中游,平水期依旧是下游最高,而中游、上游却无显著规律。余成等^[25]的研究发现河流入湖口水体流速缓慢,大量物质在入湖口沉积,导致河口地区沉积物TP含量较高。许志波等^[26]认为河口区水较浅,容易受到风浪的扰动和人为活动的干扰,容易发生沉积物悬浮扩散与营养盐释放。总之,普者黑河流入湖口因其特殊的地理位置及多变的水流条件,是湖泊富营养化控制的重点区域。

2.1.2 湖泊湿地总磷含量及分布

从图3可以看出,湖泊湿地不同时期表层沉积物TP含量均值为枯水期>丰水期>平水期。其中,枯水期TP含量介于337~2474 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均值为1042 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。丰水期介于244~1798 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均值为725 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。平水期介于343~1440 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均值为688 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。丰水期降雨充沛,湖区周边果园和耕地大量施用

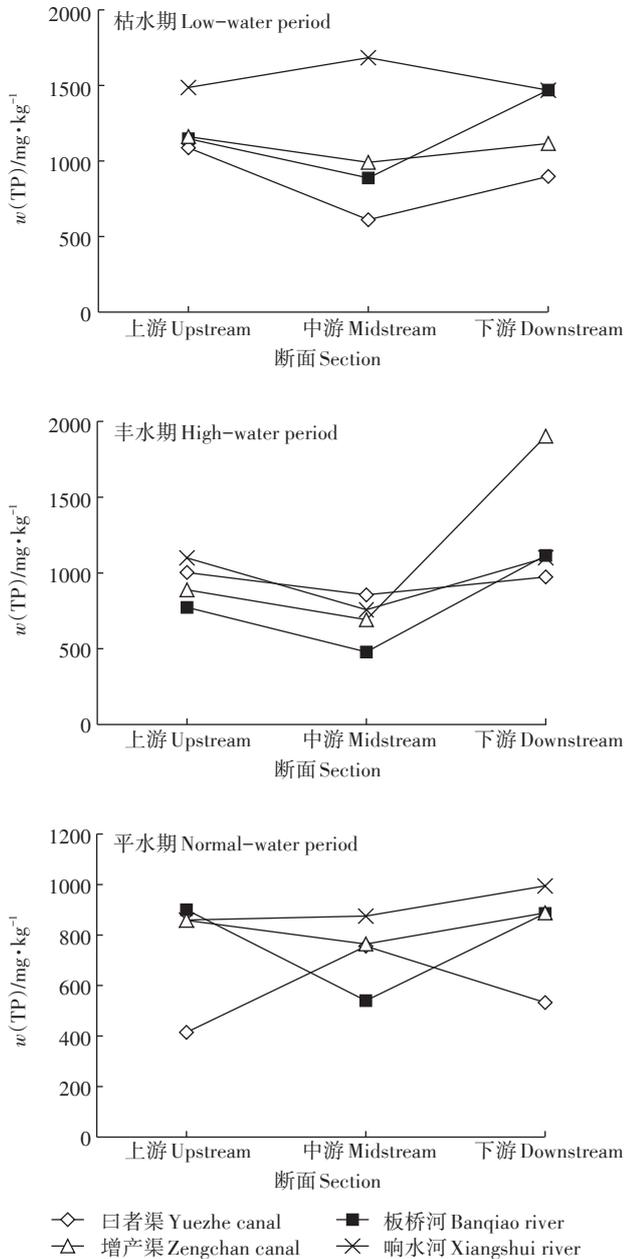
图2 不同时期河流湿地表层沉积物 $w(\text{TP})$ 空间分布

Figure 2 Spatial distribution of $w(\text{TP})$ in surface sediments of rivers wetlands

化肥和农药,且这一时期正值普者黑旅游旺季,生活污水和农业面源污染使得大量磷素沉降于表层沉积物中,致使丰水期表层沉积物TP含量高于平水期。

空间分布上,TP含量呈中段>下段>上段。上段沉积物TP含量偏低且差异不大,介于244~656 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,变异系数为0.32,均值为454 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;湖泊中段TP含量偏高且差异大,介于549~2474 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,变异系数为0.49,均值为1201 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。其中,L4点位更是高达1904 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,接近高富营养化水平;湖泊下

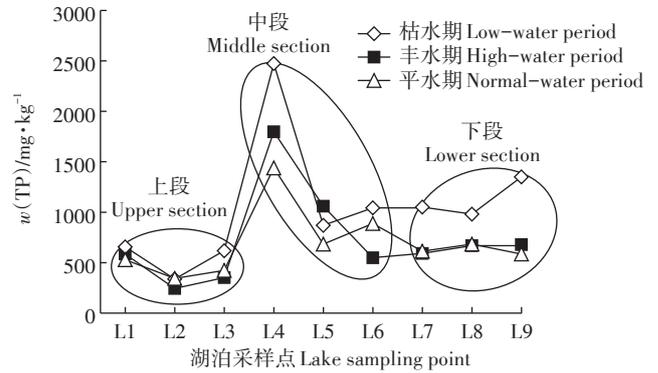
图3 不同时期湖泊湿地表层沉积物 $w(\text{TP})$ 空间分布

Figure 3 Spatial distribution of $w(\text{TP})$ in surface sediments of lakes wetlands

段TP含量介于586~1350 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,变异系数为0.33,平均值为801 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。湖泊上段是主要的作物种植区,坡耕地分布多,坡面水土流失量较大,但由于湖面狭窄水流流速快,磷素不会在此区域长期停留继而往下迁移,造成这一区域TP含量整体偏低;湖泊下段的泄洪闸、古水利工程和水上桥等工程措施将湖泊逐级分割开,阻挡水流正常流出,悬浮物包括泥沙及藻类颗粒中所含营养物质在此处停留,常年不断累积导致TP含量略有升高;从变异系数来看,湖泊中段明显高于上、下段,是因为该区域人口集中、旅游资源丰富,受人为活动干扰较大,沉积物界面不稳定^[27]。

2.2 枯水期表层沉积物磷赋存形态及空间分布

2.2.1 河流湿地各形态磷含量及分布

由图4及表1可知,河流湿地表层沉积物磷赋存形态以NaOH-rP和Res-P为主,NaOH-rP含量在170~455 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均为303 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均含量占TP(970 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)比重为31.3%,Res-P为69~468 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均为247 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,占TP的25.4%; $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 含量在0.1~22 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均为3 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,HCl-P为0.3~28 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均为9 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,这两种磷形态占TP比例均不足1%;BD-P含量在8~104 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均为42 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,占TP的4.3%,NaOH-nrP为37~125 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为71 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,占TP含量的7.3%。

各入湖河流中 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 含量较低,均小于5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (XS-d除外);BD-P在沉积物-上覆水界面非常活跃,该磷形态具有明显的空间差异性,在曰者渠中富集较多;NaOH-nrP主要集中在响水河与增产渠,该磷形态部分可被生物利用,主要来源于植物残体和腐殖质类有机物^[20],这两条河流周边分布有大量稻田和

蔬菜大棚,受农业活动影响较大;NaOH-rP含量高值出现在响水河中下游,该区域的八道哨乡分布有门窗加工厂,油漆、黏合剂中的可还原性物质汇入河流,促使了这一现象的发生;Res-P主要为大分子有机磷或其他难溶性磷,被认为是永久结合态磷^[20],曰者渠中Res-P的富集程度较低;HCl-P含量整体较低,且在4条河流中分布均匀。

2.2.2 湖泊湿地各形态磷含量及分布

由图4及表1可知,普者黑湖泊湿地表层沉积物NH₄Cl-P平均含量为7 mg·kg⁻¹,仅占TP含量(819 mg·kg⁻¹)的0.8%,是河流湿地的2.5倍;HCl-P平均含量为19 mg·kg⁻¹,占TP的2.3%;BD-P平均含量为23 mg·kg⁻¹,占TP的2.9%,仅为河流湿地的1/2;NaOH-nrP平均含量为70 mg·kg⁻¹,占TP的8.5%,与河流湿地含量相近;Res-P平均含量为157 mg·kg⁻¹,占TP的19.2%,低于河流湿地;NaOH-rP平均含量为262 mg·

kg⁻¹,占TP含量的29.3%。综上,各形态磷含量为NaOH-rP>Res-P>NaOH-nrP>BD-P>HCl-P>NH₄Cl-P,此结果与剑湖^[20]表层沉积物各形态磷含量排序结果出入较大,剑湖各形态磷含量从高到低排序为:HCl-P>Res-P>NaOH-rP>NaOH-nrP>BD-P>NH₄Cl-P。这可能和地质背景有关,本研究区属于典型的喀斯特岩溶地貌,水体中钙离子含量较高,可能会对磷赋存形态产生影响,其发生机理尚需深入研究。

空间分布上,湖泊下段是NH₄Cl-P含量较高的区域;BD-P和NaOH-rP空间分布上具有一致性,主要集中于中、下段湖区。最高值均出现在普者黑村(L4)采样点,分别为68、719 mg·kg⁻¹。两种磷形态受外源磷输入的影响较大,来源主要为生活污水、工业废水和部分农业面源流失的磷^[24],这与研究区内人口及旅游布局情况相符;中段湖区NaOH-nrP含量较高,上、下段含量低且无明显差异。该区域水生植物

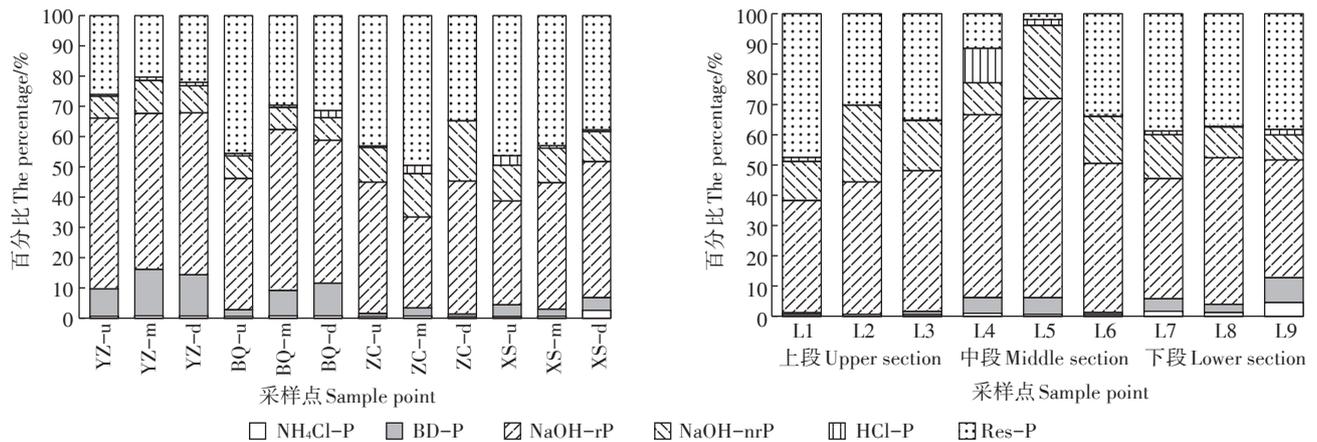


图4 各形态磷相对质量浓度的空间分布

Figure 4 Spatial distribution of relative mass concentrations of phosphorus in differ

表1 表层沉积物中各形态磷含量

Table 1 Contents of various phosphorus species in surface sediments

湿地类型 Wetland types	项目 Item	磷赋存形态 Phosphorus species/mg·kg ⁻¹					
		NH ₄ Cl-P	BD-P	NaOH-rP	NaOH-nrP	HCl-P	Res-P
河流湿地 River wetland	最小值 Min	0.13	8.00	170.22	37.06	0.34	69.05
	最大值 Max	21.73	104.24	454.81	125.17	27.97	468.31
	平均值 Average	3.15	41.54	307.93	73.20	8.98	256.22
	标准差 SD	5.97	29.08	89.15	30.78	8.55	117.39
	变异系数 CV	1.89	0.70	0.29	0.42	0.95	0.46
湖泊湿地 Lake wetland	最小值 Min	0.04	0.11	53.11	30.53	0.04	4.99
	最大值 Max	39.11	71.18	718.91	125.88	135.76	331.47
	平均值 Average	6.76	23.45	261.86	69.74	18.96	157.17
	标准差 SD	12.64	27.23	194.23	30.19	44.09	100.17
	变异系数 CV	1.87	1.16	0.74	0.43	2.33	0.64

较其他湖区生长旺盛,生物残体较多,有机质含量高,对沉积物磷的固定产生很大影响;HCl-P仅在中段L4采样点出现高值($136 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),其他区域均处于较低水平;Res-P从上至下呈逐渐减小趋势,这与 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 和BD-P等潜在活性磷的相对含量呈相反趋势。

NaOH-rP和Res-P是普者黑湿地沉积物中最主要的磷赋存形态,两者之和占沉积物TP比例为55.4%,与贵州红枫湖^[28]情况类似,该湖泊这一比例高达75.0%以上。此外,洱海^[29]沉积中NaOH-rP占TP比例为29.6%与本研究的31.8%相接近,不同的是洱海沉积物中HCl-P含量介于 $172\sim 420 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,平均值占TP含量达43.9%,远高于本研究3.1%的水平。这可能是因为在普者黑湿地沉积物在部分时间段处于厌氧环境,使BD-P得以释放,并且部分转化为NaOH-rP,致使沉积物中NaOH-rP含量增加^[30]。王振华等^[31]从沉积物的角度分析,认为在切断外源污染的情况下,沉积物中BD-P与NaOH-rP含量高而HCl-P含量低的湖泊易于富营养化,因此普者黑湿地上层沉积物磷释放风险较大。

2.3 影响沉积物磷赋存形态的环境因子分析

2.3.1 综合环境因子与各磷形态RDA排序

从RDA二维排序(图5)可以看出沉积物TOC和Eh的箭头连线最长,这说明沉积物TOC和Eh这2个因子能对这6种磷形态的变化差异起到很好的解释作用。河流湿地中,TOC和Eh与 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 、NaOH-nrP与HCl-P均具有正相关关系,但相关性都不大,说明该3种磷形态受多个环境因子的叠加影响。pH与HCl-P、DO与NaOH-nrP之间箭头方向相反且夹角接近 180° ,呈极显著负相关,表明pH、DO分别是影响河流湿地HCl-P和NaOH-nrP的主导因子;湖泊湿地

中,TOC、OPR和Eh与所有磷形态(除Res-P外)之间箭头方向一致且夹角很小,表现为正相关关系,其余因子(pH和DO)为负相关。

2.3.2 单一因子与各形态磷的相关关系

对DO的分析如图6(a)所示,BD-P和NaOH-rP穿过白线圈,表明DO与BD-P和NaOH-rP有正相关关系。对Eh的分析如图6(b)所示, $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 、NaOH-nrP和HCl-P均穿过白线圈,表明Eh与这3种磷形态有正相关关系。而对OPR的分析如图6(c)所示,BD-P、NaOH-rP和HCl-P穿过白线圈,表明OPR与BD-P、NaOH-rP和HCl-P有正相关关系。对pH和TOC的分析如图6(d)和6(e)所示,其中,对pH的分析显示BD-P、NaOH-rP和HCl-P均穿过灰线圈,与pH具有负相关关系,而对TOC的分析显示, $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 、NaOH-nrP和HCl-P均穿过白线圈,与TOC均有正相关关系。

对DO的分析如图7(a)所示,仅 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 穿过灰线圈,表明DO与 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 有负相关关系。对Eh的分析如图7(b)所示,所有磷形态均穿过白线圈,表明Eh与6种磷形态有正相关关系。而对OPR的分析如图7(c)所示,除HCl-P外,所有磷形态均穿过白线圈,表明OPR与除HCl-P外所有磷形态有正相关关系。对pH和TOC的分析如图7(d)和图7(e)所示,其中,对pH的分析显示所有磷形态均穿过灰线圈,与pH具有负相关关系,而对TOC的分析显示, $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 、NaOH-nrP和NaOH-rP均穿过白线圈,与TOC均有正相关关系。

2.3.3 各形态磷的主要环境影响因子

$\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 是生物可利用性磷的重要组成部分,极易受pH、氧化还原电位、水动力条件等外界因素的影

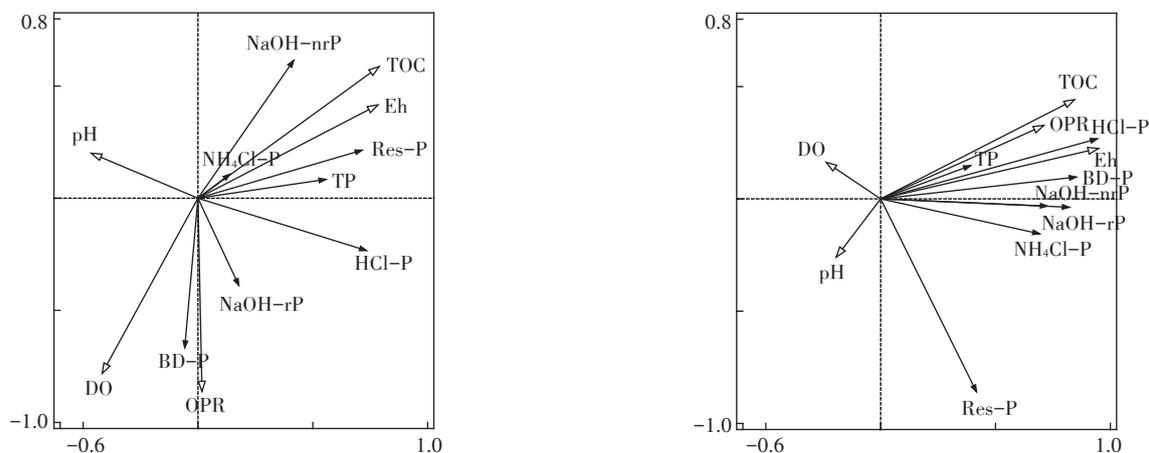


图5 磷形态与环境因子的冗余分析

Figure 5 Redundancy analysis(RDA) of phosphorus species and environmental factors

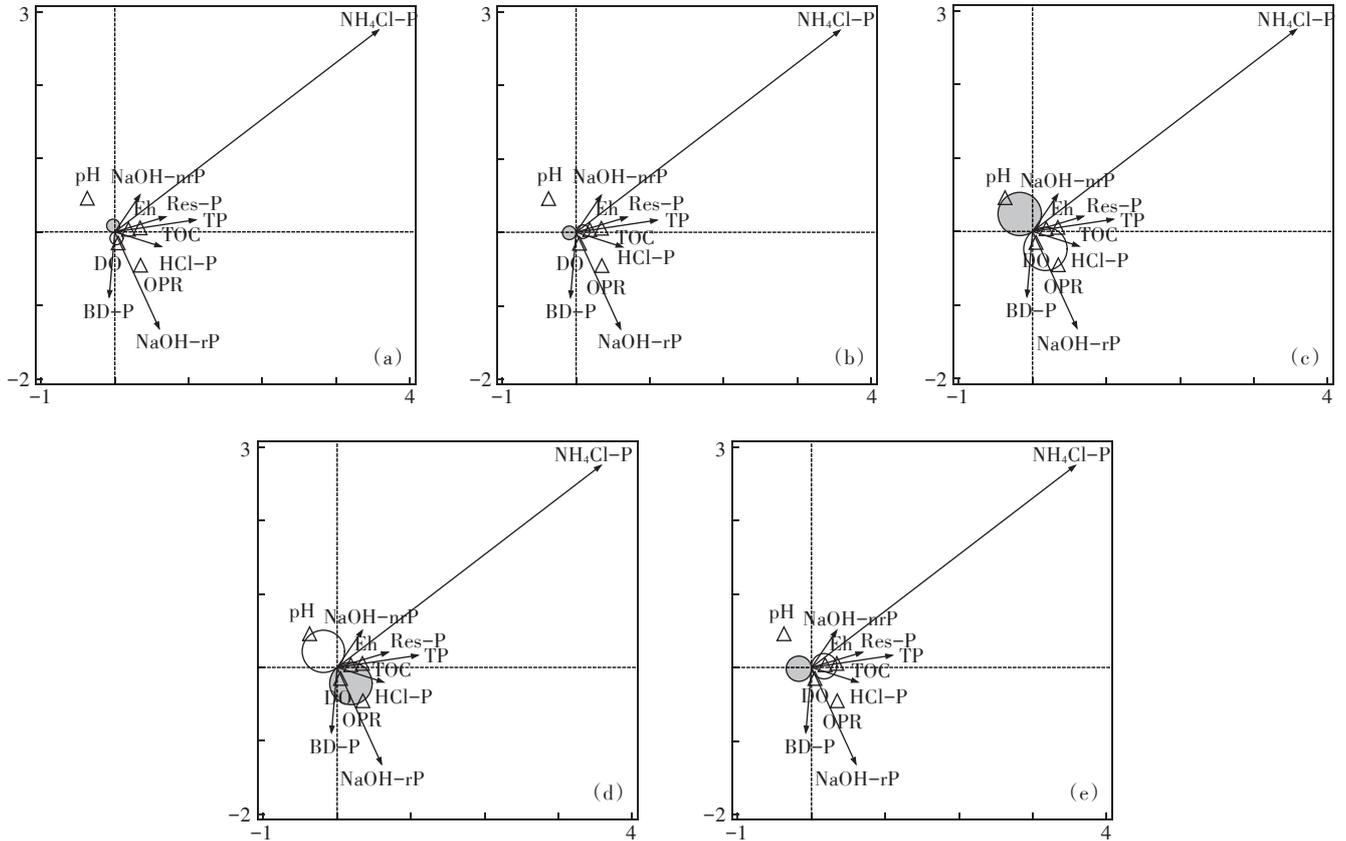


图6 单一因子对河流湿地沉积物磷形态影响的检验结果

Figure 6 The *t*-value for a single factor influencing phosphorus species in river wetland sediments

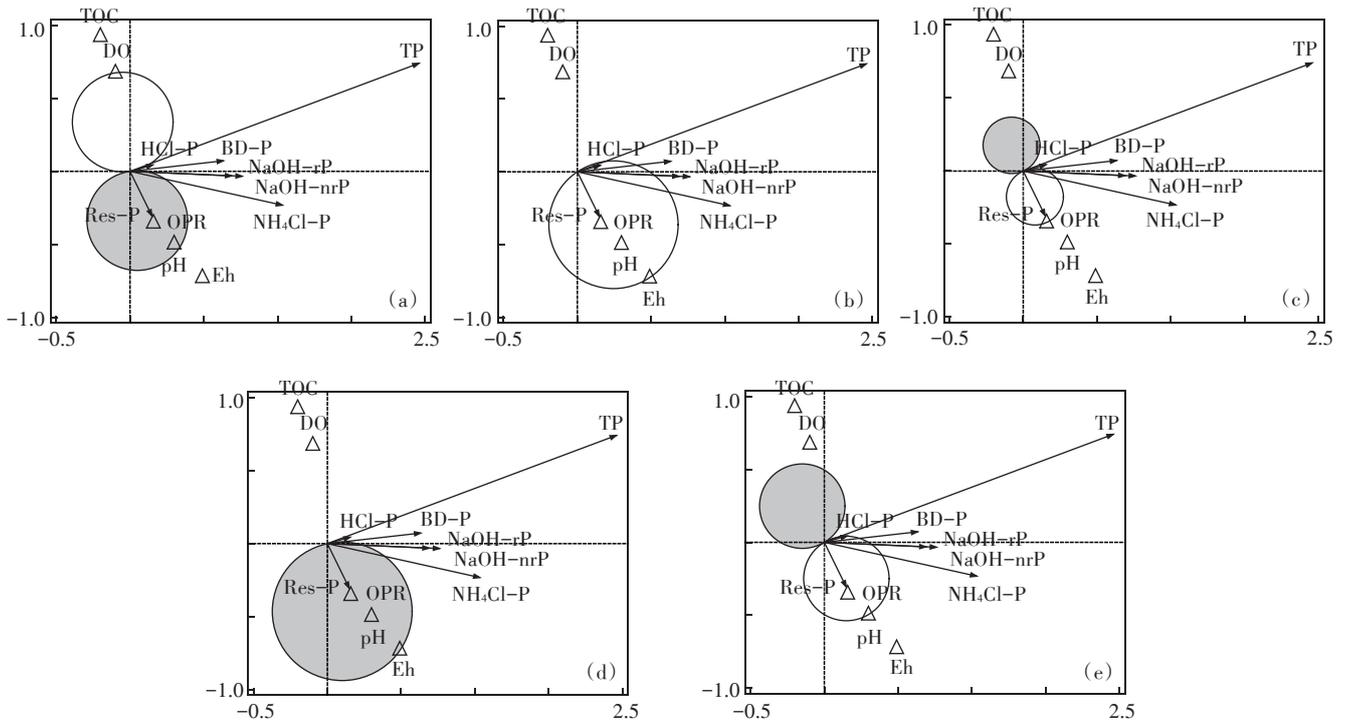


图7 单一因子对湖泊湿地沉积物磷形态影响的检验结果

Figure 7 The *t*-value for a single factor influencing phosphorus species in lake wetland sediments

响而迁移进入上覆水体,从而影响上覆水的磷浓度^[32]。本文中,两类湿地的 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 与 TOC 、 Eh 均呈正相关关系,且河流湿地中 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 与 pH 、 DO 为负相关关系。说明研究区内 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 的含量和分布特征受环境因子的影响较大,其对于水体富营养化的影响不容忽视。

BD-P 最能体现沉积物中磷的生物稳定性,在碱性和厌氧条件下易发生溶解、迁移^[33]。当上覆水呈还原条件或底泥出现贫氧状态时, Fe^{3+} 被还原成 Fe^{2+} ,从而释放出磷^[23],底泥中存在的厌氧细菌也会促进这一过程的发生^[34],对水-沉积物界面的磷素循环起主要作用。本文中,两类湿地 BD-P 与 pH 均为负相关关系,与 OPR 则表现为正相关。

有机质是 NaOH-nrP 的重要载体,其附着作用直接影响着有机质结合态磷的含量^[35]。本文中,两类湿地 NaOH-nrP 与 TOC 均为正相关关系,与张奇等^[20]的研究结果一致。

NaOH-rP 是受铁铝金属氧化物约束的磷,该形态磷的沉淀与溶解是决定沉积物内源磷释放与否的关键^[36-37],对磷的滞留具有较大贡献,可反映出区域磷污染情况。徐洋等^[38]的研究表明厌氧条件下沉积物含氧量下降、硫还原活动强烈是导致 NaOH-rP 释放的主要原因。也有研究表明,碱性($\text{pH}=9.5$ 、 11.8)条件下利于磷的释放^[39],主要是 NaOH-rP 释放,部分可发生再沉淀,转化为 HCl-P 。检验结果表明,两类湿地 NaOH-rP 与 pH 和 OPR 之间均有相关关系,也印证了前人的结论。

HCl-P 是一种典型的惰性磷,与潜在活性磷有很大的不同,它稳定存在于各种岩土矿物中,含量随着时间和空间的变化不大,对水体富营养化贡献很小。Jin等^[40]认为只有在酸性条件下,才会促进钙磷的释放。检验结果表明,两类湿地中 HCl-P 与 pH 均为负相关关系,与徐洋等^[38]的研究结果相似,黄清辉等^[41]也曾在研究中指出,湖泊底层水体的酸化会导致 HCl-P 的释放。

Res-P 活性较差,很难被生物再利用,是最稳定的磷形态,环境条件变化基本不会造成其释放^[32],可以认为 Res-P 对于水体的富营养化基本没有影响。

3 结论

(1)普者黑河流湿地表层沉积物总磷(TP)含量为 $415\sim 1903\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,高于湖泊湿地($244\sim 2474\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),均为中度污染水平,响水河与中段湖区为高含磷区域。枯水期 TP 含量较丰水期和平水期要高。各

形态磷质量分数排序为: $\text{NaOH-rP} > \text{Res-P} > \text{NaOH-nrP} > \text{BD-P} > \text{HCl-P} > \text{NH}_4\text{Cl-P}$ 。

(2)磷形态空间分布特征:河流湿地中, $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 与 HCl-P 在4条河流中分布均匀且含量较低,曰者渠中 BD-P 富集较多但 Res-P 含量较低, NaOH-nrP 和 NaOH-rP 则主要集中在响水河。湖泊湿地中, BD-P 和 NaOH-rP 空间分布具有一致性,主要集中于中、下段湖区,湖泊下段是 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 含量较高的区域,中段湖区 NaOH-nrP 含量较高, HCl-P 仅在中段 L4 采样点出现高值($136\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),其他区域均处于较低水平; Res-P 由上至下逐渐递减。

(3)冗余分析表明, $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 受环境因子的影响较大,易与上覆水发生磷素交换。 BD-P 、 NaOH-rP 与 pH 为负相关关系,与 OPR 为正相关。 TOC 的附着作用对 NaOH-nrP 的固定产生很大干扰,具体表现为正相关关系。 HCl-P 与 pH 为负相关。 Res-P 相对稳定,与各环境因子间无明显相关关系。

参考文献:

- [1] Wolanski E, Brinson M M, Cahoon D R, et al. Coastal wetlands: A synthesis[M]//Coastal wetlands: An integrated ecosystem approach. Amsterdam: Elsevier, 2009: 1-62.
- [2] 韩大勇, 杨永兴, 杨 杨, 等. 湿地退化研究进展[J]. 生态学报, 2012, 32(4): 1293-1307.
HAN Da-yong, YANG Yong-xing, YANG Yang, et al. Recent advances in wetland degradation research[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(4): 1293-1307.
- [3] 赖月婷, 吴如林, 龚开晟, 等. 闽江口湿地沉积物各形态磷分布特征及风险评估[J]. 水土保持学报, 2019, 33(1): 171-177, 185.
LAI Yue-ting, WU Ru-lin, GONG Kai-sheng, et al. Distribution characteristics and risk assessment of phosphorus speciation in the sediment of Min River estuary wetland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(1): 171-177, 185.
- [4] Percuoco V P, Kalnejais L H, Officer L V. Nutrient release from the sediments of the Great Bay Estuary, N. H. USA[J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2015, 161: 76-87.
- [5] 王书锦, 刘云根, 张 超, 等. 洱海流域入湖河口湿地沉积物氮、磷、有机质分布及污染风险评估[J]. 湖泊科学, 2017, 29(1): 69-77.
WANG Shu-jing, LIU Yun-gen, ZHANG Chao, et al. Distribution and pollution risk assessment of nitrogen, phosphorus and organic matter in inlet rivers of Erhai Basin[J]. *J Lake Sci*, 2017, 29(1): 69-77.
- [6] Banaszuk P, Wysocka-Czubaszek. A phosphorus dynamics and fluxes in a lowland river: The Narew anastomosing river system, NE Poland [J]. *Ecological Engineering*, 2005, 25(4): 429-441.
- [7] Hupfer M, Lewandowski J. Oxygen controls the phosphorus release from lake sediments—a long-lasting paradigm in limnology[J]. *International Review of Hydrobiology*, 2008, 93(4/5): 415-432.

- [8] Kelderman P, Kansime F, Tola M A, et al. The role of sediments for phosphorus retention in the Kirinya wetland (Uganda) [J]. *Wetlands Ecology and Management*, 2007, 15(6):481-488.
- [9] Bruland G L, DeMent G. Phosphorus sorption dynamics of Hawaii's coastal wetlands[J]. *Estuaries and Coasts*, 2009, 32(5):844-854.
- [10] 于子洋, 杜俊涛, 姚庆祯, 等. 黄河口湿地表层沉积物中磷赋存形态的分析[J]. *环境科学*, 2014, 35(3):942-950.
YU Zi-yang, DU Jun-tao, YAO Qing-zhen, et al. Distribution of phosphorus in surface sediments from the Yellow River estuary wetland[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(3):942-950.
- [11] 叶华香, 臧淑英, 贾晓丹, 等. 扎龙湿地表层沉积物磷的赋存形态及空间分布特征[J]. *地理与地理信息科学*, 2012, 28(2):112-116.
YE Hua-xiang, ZANG Shu-ying, JIA Xiao-dan, et al. Phosphorous forms and its spatial distribution characteristics in surface sediment of Zhalong wetland[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2012, 28(2):112-116.
- [12] 胡敏杰, 邹芳芳, 全川, 等. 闽江河口短叶荇沼泽湿地沉积物磷的赋存形态和空间分布[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(11):2815-2822.
HU Min-jie, ZOU Fang-fang, TONG Chuan, et al. Fractions and spatial distribution of phosphorus in sediments of the *Cyperus malaccensis* marshes in the Min River estuary[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(11):2815-2822.
- [13] 高正文, 于德, 付晓, 等. 云南省普者黑循环经济型旅游景观生态规划[J]. *生态经济*, 2012(9):103-106.
GAO Zheng-wen, YU De, FU Xiao, et al. Landscape ecological planning of recycling economy on tourism in Puzhehei of Yunnan Province [J]. *Ecological Economy*, 2012(9):103-106.
- [14] 王妍, 刘云根, 梁启斌, 等. 1977-2014年枯水期普者黑湖面积的变化[J]. *湿地科学*, 2016, 14(4):471-476.
WANG Yan, LIU Yun-gen, LIANG Qi-bin, et al. Variation of Puzhehei Lake area in dry season from 1977 to 2014[J]. *Wetland Science*, 2016, 14(4):471-476.
- [15] 闻国静, 刘云根, 王妍, 等. 普者黑河流域景观格局及生态风险时空演变[J]. *浙江农林大学学报*, 2017, 34(6):1095-1103.
WEN Guo-jing, LIU Yun-gen, WANG Yan, et al. Temporal and spatial evolution of landscape patterns and ecological risk in the Puzhehei Lake basin[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2017, 34(6):1095-1103.
- [16] 詹乃才, 王妍, 刘云根, 等. 滇东南典型岩溶湖滨湿地水体-沉积物-植物总磷分布特征[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(3):50-60.
ZHAN Nai-cai, WANG Yan, LIU Yun-gen, et al. Distribution characteristics of total phosphorous in water-sediment-vegetable system of typical karst lakeside wetland in southeast Yunnan[J]. *Journal of Northwest A&F University (Net Sci Ed)* 2018, 46(3):50-60.
- [17] 梅涵一, 刘云根, 郑寒, 等. 云南分散畜禽养殖密集型农村污水特征及污染风险评价[J]. *环境工程*, 2016, 34(7):46-51.
MEI Han-yi, LIU Yun-gen, ZHENG Han, et al. Characteristics of sewage pollution and environmental risk assessment of dispersion livestock intensive village in Yunnan[J]. *Environmental Engineering*, 2016, 34(7):46-51.
- [18] 郭玉静, 王妍, 刘云根, 等. 普者黑岩溶湖泊湿地湖滨带景观格局演变对水质的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38(5):1711-1721.
GUO Yu-jing, WANG Yan, LIU Yun-gen, et al. The effects of landscape pattern evolution in Puzhehei karst lake wetland littoral zone on water quality[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(5):1711-1721.
- [19] 王圣瑞. 湖泊沉积物-水界面过程基本理论与常用测定方法[M]. 北京:科学出版社, 2014.
WANG Shen-rui. Sediment-water interface process of lakes[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [20] 张奇, 喻庆国, 王胜龙, 等. 滇西北剑湖沉积物磷形态、空间分布及释放贡献[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(10):3792-3803.
ZHANG Qi, YU Qing-guo, WANG Sheng-long, et al. Phosphorus fractions, spatial distribution and release contributions in sediments of Jianhu Lake, Northwestern Yunnan Plateau, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(10):3792-3803.
- [21] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. 二版. 北京:中国环境科学出版社, 1990:323-330.
JIN Xiang-can, TU Qing-ying. Criteria for investigation of lake eutrophication[M]. 2nd Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 1990:323-330.
- [22] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1978.
Nanjing Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Soil physicochemical analysis[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978.
- [23] 赵建刚, 乔永民. 汕头湾沉积物磷的形态分布与季节变化特征研究[J]. *环境科学*, 2012, 33(6):1823-1831.
ZHAO Jian-gang, QIAO Yong-min. Distribution characteristics of phosphorus forms in surface sediments of the Shantou Bay in China [J]. *Environmental Science*, 2012, 33(6):1823-1831.
- [24] 史丽琼. 滇池水体及表层沉积物-水界面各形态磷分布特征研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2011.
SHI Li-qiong. Study on distribution characteristics of different phosphorus pools in water body and surface sediment of Dianchi Lake[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2011.
- [25] 余成, 陈爽, 张路, 等. 坦噶尼喀湖东北部入湖河流表层沉积物中磷的形态和分布特征[J]. *湖泊科学*, 2017, 29(2):334-342.
YU Cheng, CHEN Shuang, ZHANG Lu, et al. Phosphorous fraction and their spatial distribution in surface sediment of inflow rivers in the northeastern Lake Tanganyika[J]. *J Lake Sci*, 2017, 29(2):334-342.
- [26] 许志波, 卢信, 胡维平, 等. 风浪作用下入湖河口内源释放特征[J]. *水科学进展*, 2011, 22(4):574-579.
XU Zhi-bo, LU Xin, HU Wei-ping, et al. Release characteristic of nutrient from sediment in the estuary driven by wind and wave[J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(4):574-579.
- [27] 孙慧卿. 影响湖泊沉积物表层磷行为的关键因素研究[D]. 南京:南京林业大学, 2012.
SUN Hui-qing. The effect of the key factors on the phosphorus behavior of the sediment surface in Taihu Lake[D]. Nanjing: Nanjing Forest-

- ry University, 2012.
- [28] 王敬富, 陈敬安, 曾艳, 等. 贵州红枫湖沉积物磷赋存形态的空间变化特征[J]. 湖泊科学, 2012, 24(5):789-796.
WANG Jing-fu, CHEN Jing-an, ZENG Yan, et al. Spatial distribution characteristics of phosphorus forms in sediment of Lake Hongfeng, Guizhou Province[J]. *J Lake Sci*, 2012, 24(5):789-796.
- [29] 赵海超, 王圣瑞, 焦立新, 等. 洱海沉积物中不同形态磷的时空分布特征[J]. 环境科学研究, 2013, 26(3):227-234.
ZHAO Hai-chao, WANG Sheng-rui, JIAO Li-xin, et al. Characteristics of temporal and spatial distribution of different forms of phosphorus in the sediments of Erhai Lake[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, 26(3):227-234.
- [30] Kopaček J, Borovec J, Hejzlar J, et al. Aluminum control of phosphorus sorption by lake sediments[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(22):8784-8789.
- [31] 王振华, 王圣瑞, 刘元英, 等. Fe和Al对湖泊沉积物中磷赋存形态的影响[J]. 环境科学研究, 2012, 25(5):556-562.
WANG Zhen-hua, WANG Sheng-rui, LIU Yuan-ying, et al. Effects of iron and aluminum on phosphorus fractions in lake sediments[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, 25(5):556-562.
- [32] Rydin E. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment[J]. *Water Research*, 2000, 34(7):2037-2042.
- [33] Hupfer M, Dollan A. Immobilisation of phosphorus by iron-coated roots of submerged macrophytes[J]. *Hydrobiologia*, 2003, 506-509(1/2/3):635-640.
- [34] Lake B A, Kyle M C, Stephen A N, et al. Factors contributing to the internal loading of phosphorus from anoxic sediments in six Maine, USA, lakes[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 373(2):534-541.
- [35] Petticrew E L, Arocena J M. Evaluation of iron-phosphate as a source of internal lake phosphorus loadings[J]. *Science of the Total Environment*, 2001, 266(1):87-93.
- [36] 史静, 俎晓静, 张乃明, 等. 滇池草海沉积物磷形态、空间分布特征及影响因素[J]. 中国环境科学, 2013, 33(10):1808-1813.
SHI Jing, ZU Xiao-jing, ZHANG Nai-ming, et al. Sediment phosphorus form, space distribution characteristic and influencing factor of Cao Hai in Dian Lake, Yunnan, China[J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(10):1808-1813.
- [37] 步青云. 浅水湖泊溶解氧变化对沉积物磷、氮的影响[D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2006.
BU Qing-yun. Effects of dissolved oxygen concentration on phosphorus and nitrogen in the sediment from shallow lakes[D]. Beijing: Chinese Academy of Environmental Sciences, 2006.
- [38] 徐洋, 陈敬安, 王敬富, 等. 氧化还原条件对红枫湖沉积物磷释放影响的微尺度分[J]. 湖泊科学, 2016, 28(1):68-74.
XU Yang, CHEN Jing-an, WANG Jing-fu, et al. The micro-scale investigation on the effect of redox condition on the release of the sediment phosphorus in Lake Hongfeng[J]. *J Lake Sci*, 2016, 28(1):68-74.
- [39] 袁和忠, 沈吉, 刘恩峰, 等. 模拟水体pH控制条件下太湖梅梁湾沉积物中磷的释放特征[J]. 湖泊科学, 2009, 21(5):663-668.
YUAN He-zhong, SHEN Ji, LIU En-feng, et al. Characteristic of phosphorus release with the control of pH of sediments from Meiliang Bay, Lake Taihu[J]. *J Lake Sci*, 2009, 21(5):663-668.
- [40] Jin X, Wang S, Pang Y, et al. Phosphorus fractions and the effect of pH on the phosphorus release of the sediments from different trophic areas in Taihu Lake, China[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 139(2):288-295.
- [41] 黄清辉, 王东红, 王春霞, 等. 沉积物中磷形态与湖泊富营养化的关系[J]. 中国环境科学, 2003(6):24-27.
HUANG Qing-hui, WANG Dong-hong, WANG Chun-xia, et al. Relation between phosphorus forms in the sediments and lake eutrophication[J]. *China Environmental Science*, 2003(6):24-27.