

贵州锁黄仓湿地沉积物重金属空间分布及生态风险评价

王柏淳, 朱四喜, 赵 斌, 李武江

(贵州民族大学, 喀斯特湿地生态研究中心/生态环境工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要:以贵州锁黄仓湿地表层沉积物为研究对象,利用空间插值分析、主成分分析与相关性分析方法,研究沉积物中镉(Cr)、镍(Ni)、锌(Zn)、砷(As)、铅(Pb)5种重金属元素含量的空间分布特征和来源情况,并通过Tomlinson污染负荷指数法和Hakanson潜在生态风险指数法进行生态风险评价,为锁黄仓湿地公园的生态安全以及有序发展提供基础数据。结果显示,Cr、Ni、Zn、As、Pb平均值分别为98.44、73.14、148.67、21.93、54.32 mg/kg,与土壤重金属背景值(95.90、51.20、99.50、20.00、35.20 mg/kg)相比较,5种重金属含量均偏高;而各重金属变异系数相对较小(13.94%~21.55%)。Cr、Ni、As之间以及Zn与Pb呈极显著正相关($P<0.01$)。主成分分析中,第一主成分(A1)包括Cr、Ni和As,第二主成分(A2)包括Zn和Pb。锁黄仓表层沉积物重金属污染负荷指数为1.348,且上游(1.379)>下游(1.372)>中游(1.303),均属于“中等”污染程度。潜在生态风险评价表明,5种重金属潜在生态风险指数小于下限(RI=150),属于轻度生态污染。Cr、Ni和As的来源途径可能相同,主要受周边农业活动和环境影响;Zn和Pb具有相同输入源的可能性较大,主要受炼锌业和交通运输影响。研究表明,锁黄仓湿地受到中等程度的污染,但生态环境质量属于可控范围。

关键词:锁黄仓湿地;沉积物;重金属;空间分布;生态风险

中图分类号:X508 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2021)01-0049-09

在积水与微生物群影响条件下,湿地潜育出较高生产力的浅水生、湿生、沼生植物,形成了特殊的过渡性生态系统(Vanessa et al, 2019);在维持和调节区域生态平衡、提供生态环境的多样性、生产和提供大量的生态信息等方面有其不可替代的作用(蔡国俊, 2016);在生物生态多样性、水资源贮存、水文和地质的综合治理、水质净化、植被和物种保护、食物链的维持和平衡碳的贮存和释放等方面具有极其重要的意义(殷书柏等, 2014)。由于人们逐步认识到湿地可观的社会、经济和环境效益,促使湿地科学研究从单一的沼泽研究拓展到多种类型的研究当中(申格等, 2016)。然而,经济发展对仅占地球陆地面积不足6.4%的自然湿地造成了不可逆的破坏和污染,使得湿地面积急剧下降,湿地生态系统面临危机(Wang et al, 2009; Wu et al, 2015)。

近年来,地方政府大力发展旅游产业,在自然条件和人文因素的干扰下,不规范地开发导致贵州草

海自然保护区水域的重金属污染加剧(左晓娟等, 2015)。除了区域内水系统中水生生物生产和生活过程中产生的自身残渣沉积外,四周分布村落频繁的农事活动以及养殖活动、交通运输铁路的运营、早年的工厂冶炼、交通尾气排放以及人们生产生活化石燃料的燃烧等方式,导致重金属在大气中扩散,最终沉降至土壤圈与水环境圈,对其造成污染(刘祖发等, 2018);四周外源输入的污染物主要通过大气循环沉降环节、无序的村落排水系统、水土流失、雨水携带污染物流入水体,水下沉积物颗粒富集水中过量的重金属元素,使湿地底泥受到严重污染(Ye et al, 2018);并且人为干扰产生的重金属污染具有高富集效应的特点(Dung et al, 2013);其中,潜在生态危害指数法能充分判定各种重金属元素的不同毒性,并据此综合分析重金属污染现状的优势,因此在近年来有关湿地底泥重金属研究中得到广泛的应用(权轻舟, 2017; 王宏伟等, 2017)。

锁黄仓湿地公园位于草海自然保护区内(草海西北出湖口下游),由于毗邻草海,有着得天独厚的生态优势。威宁县政府希望锁黄仓湿地公园成为具有地方鲜明特色的高原湿地景观区域及居民休闲场所,分担草海的旅游压力,通过其自身的生态湿地优势为周围的动植物以及景观环境提供有力的保障(官加杰和周静, 2013)。锁黄仓流域段沉积物重金

收稿日期:2019-03-14

基金项目:贵州省科技厅科技支撑计划项目(No.黔科合支撑[2018]2807);国家自然科学基金项目(No.31560107)。

作者简介:王柏淳,1994年生,男,硕士研究生,研究方向为喀斯特湿地工程技术。E-mail:714482276@qq.com

通信作者:朱四喜,1972年生,男,教授,主要从事湿地生态学研究。E-mail:zhusixi2011@163.com

属污染影响了湿地公园建成后的生态环境安全和社会效应;锁黄仓湿地位于草海下游,其生态环境评价为草海重金属污染物在环境中的迁移提供了参考(洪江等,2018;赵斌等,2018a;赵斌等,2019);不仅反映了研究区域内各水域、土地等污染空间分布差异性,还能间接反映草海环境生态中的污染局部问题。之前多数学者对草海生态环境十分关注(任秀秀等,2017;赵斌等,2018b);但鲜有考虑锁黄仓湿地公园生态环境对威宁县城市经济发展以及草海国家自然保护区的贡献。本研究在空间分布上对不同的重金属进行评价,探究锁黄仓沉积物重金属元素之间的分布和来源情况,旨在为今后锁黄仓湿地公园的生态安全以及有序发展提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

贵州威宁锁黄仓湿地公园(104°11'51"~104°12'21"E,26°53'14"~26°54'14"N)在草海国家自然保护区下游北部2 km处,规划占地面积244.67 hm²,规划湿地率为31.3%。距威宁县城6.5 km,海拔高度2 200~2 250 m,夏季日照强,冬季较为寒冷,年均气温约10.5℃。锁黄仓湿地物种丰富,消纳上游草海水体,不仅为草海以及威宁县城

流域提供保障,同时也缓解了近年来频繁旅游活动给草海区域带来的生态环境压力。区域四周分布5处村落,内部道路交错,村落内部排水系统无序,四周农田环绕,农业生产频繁,北部运输铁路自西向东横跨出水口处,南部距进水口800 m处横向有一条滨海大道,在农业、交通、生活以及土壤活动背景下,重金属被土壤风化、大气沉降、地表径流等方式最终被水体接纳,部分重金属在水环境中被底泥富集形成沉积物。

1.2 样品采集与测定

2017年8月对锁黄仓进行实地考察和土壤采集,样品均匀布点,根据样点数量均分,大致将锁黄仓分为上游、中游、下游3个研究区域,区域内设置22个采样点(图1)。通过沉积物采集器采取0~20 cm的底泥,每个采样点附近按照3个平行样进行采集,放入已编号的封袋密封,并用GPS记录位置。样品封袋带回实验室,铺在牛皮纸上自然风干,风干后用玛瑙研钵体研磨后,再过100 μm尼龙筛以备分析。采用硝酸-氢氟酸-高氯酸微波消解法(龙加洪等,2013;唐贵才等,2016),把消解样品放在控温170℃电容器中加热至呈现灰白色或者黄色乳胶状,去除多余的酸并定容,每个样品重复3次操作,镉(Cr)、镍(Ni)、锌(Zn)、铅(Pb)用原子吸收

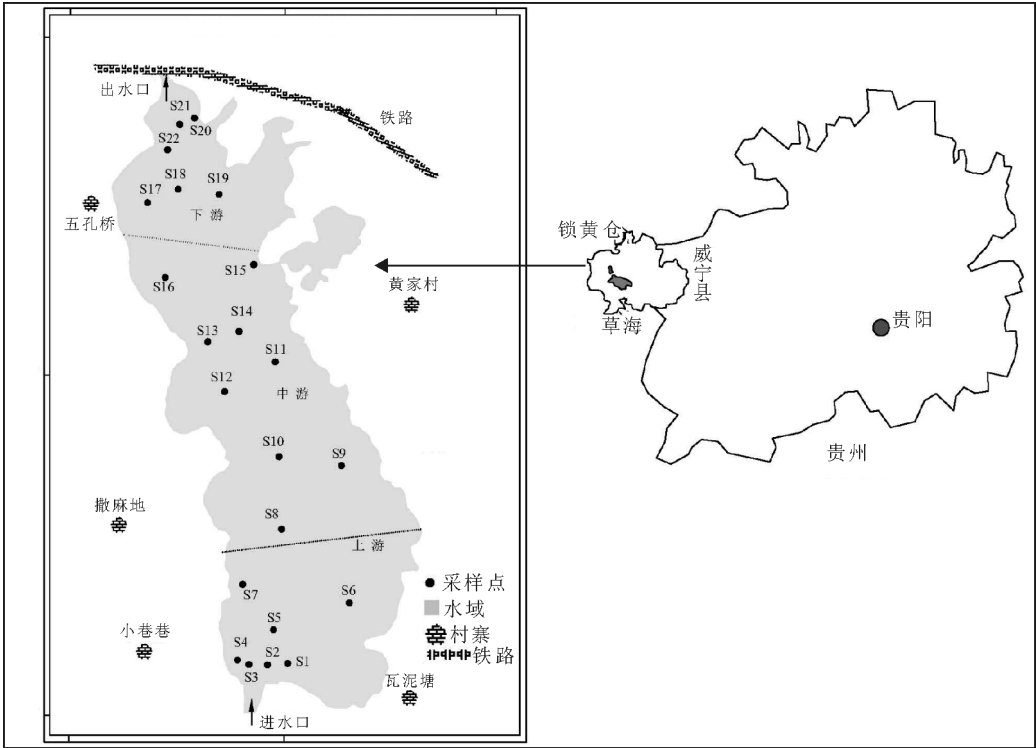


图1 锁黄仓表层沉积物样品采样点

Fig.1 Location of surface sediment sampling sites in Suohuangcang wetland

分光光度计(Perkin Elmer A Analyst 800)测定,砷(As)含量用原子荧光测定仪(AFS-930)测定(林俊杰等,2011;戴尽璇等,2017),数据误差在±5%以内,所测结果有效。

1.3 数据处理及分析

运用 SPSS 17.0 统计处理原始数据,进行相关性和主成分分析,空间插值运用 ArcGIS 10.5 软件以及 Origin 9.1 作图。

1.4 评价方法

1.4.1 污染负荷指数法 采用污染负荷指数法(PLI)(祝培甜等,2017)能判断出重金属元素在区域内的时空变化规律性与各金属提供的污染程度(张清海等,2013;李莹杰等,2016)。

某一实测样品点最高污染系数(CF)的计算公式如下:

$$CF_i = C_i / B_i$$
 ①

式中:CF_{*i*}代表元素*i*的最高污染系数;元素*i*的实测含量为C_{*i*};元素*i*的评价参照标准值,即基线值或背景值为B_{*i*}。

某一实测样品点污染负荷指数(PLI_{site})如下:

$$PLI_{site} = \sqrt[n]{CF_1 \times CF_2 \times \cdots \times CF_n}$$
 ②

式中:PLI_{site}代表某一实测样品点的污染负荷指数;参加评价的元素个数为*n*。

某一区域的污染负荷指数如下:

$$PLI_{zone} = \sqrt[n]{PLI_1 \times PLI_2 \times \cdots \times PLI_n}$$
 ③

式中:PLI_{zone}代表某一区域内的污染负荷指数;该区域内所包含的样点数为*n*。表1为实测样品点沉积物中重金属元素污染负荷指数法(PLI)与污染程度的关系。

表 1 污染程度等级标准

Tab.1 Standards for contamination levels

污染负荷指数	污染等级
PLI<1.0	无污染
1.0≤PLI<2.0	中等污染
2.0≤PLI<3.0	强污染
PLI≥3.0	极强污染

PLI 值通过某一点的沉积物重金属含量与该区域的土壤背景值比较,判断此点在空间范围内的污染程度。

1.4.2 潜在生态风险指数法 采用瑞典科学家 Hakanson(1981)提出的潜在生态风险指数法进行风险评价,计算公式如下。

单项重金属潜在生态危害系数(*E_rⁱ*):

$$E_r^i = T_r^i \frac{C_i}{S_i}$$
 ④

潜在生态风险指数(RI):

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i$$
 ⑤

式中:*E_rⁱ*为某一重金属元素的潜在生态危害系数;*T_rⁱ*为某一重金属元素的毒性系数,本研究中,重金属元素 Zn、Cr、Pb、Ni、As 的毒性系数分别为 1、2、5、5、10(徐争启等,2008)。沉积物中重金属潜在的生态危害系数、危害指数与潜在生态危害程度分级标准见表 2。

表 2 重金属元素的潜在生态危害系数和生态风险指数分级标准

Tab.2 *E_rⁱ* and RI grading criteria

生态危害系数	生态风险指数	危害程度
<i>E_rⁱ</i> <40	RI<150	轻微
40≤ <i>E_rⁱ</i> <80	150≤RI<300	中等
80≤ <i>E_rⁱ</i> <160	300≤RI<600	强
160≤ <i>E_rⁱ</i> <320	RI≥600	很强
<i>E_rⁱ</i> ≥320		极强

*E_rⁱ*与 RI 值根据沉积物重金属含量、种类、毒性条件以及对水体的敏感程度来判断重金属潜在生态危害程度。

1.4.3 相关性分析 相关性分析被用于识别重金属共性来源,推测其存在相似污染源或伴生污染现象(Bastami et al,2015),确定沉积物中重金属含量变化的控制因素(张鹏岩等,2013),检验显著相关的元素之间的近似性和来源差异。通过 Pearson 相关系数衡量两两变量之间的线性关系(张鹏岩等,2017),其计算公式如下:

$$r = \frac{N \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{N \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}}$$
 ⑥

式中:*x_i*与*y_i*表示两个不同变量;*N*表示样本数量;*r*表示两个变量之间的相关性。

2 结果与分析

2.1 重金属分布特征

贵州锁黄仓沉积物中重金属元素的描述性分析见表 3。Cr、Ni、Zn、As、Pb 的平均值分别为 98.44、73.14、148.67、21.93、54.32 mg/kg,平均值含量表现为 Zn>Cr>Ni>Pb>As。根据《土壤环境质量标准(GB15618-1995)》,除 As 以外,其他重金属元素均达到国家二级标准。重金属 As 样品的超标率为 19.70%。与贵州省土壤重金属背景值相比较,5 种重金属含量均偏高;其中,Zn、Pb、Ni 的样品点超省背景值比例均超过 95%以上,Cr 和 As 的样品点超省背景值比例在 60%与 70%左右。

沉积物中重金属元素来源输出一方面由地质中沉积母质组成(马辉英等,2016);另一方面由人类在从事生产过程中或多或少对水域输出影响程度有关(齐鹏等,2015)。水中外部污染物质来源主要有三:一是锁黄仓湿地范围内四周以众多农田环绕,有较频繁的农业活动。As 主要来源于杀虫剂等农业和肥料(靳琪等,2018);Cr 来源受到土壤母质和农业活动的影响(李卫平等,2017)。二是锁黄仓湿地范围内栖息鸟类,区域的鸟类会在栖息于此的同时产生排泄物,排泄物会富集一定的重金属,鸟粪的释放会增加区域内土壤的 Zn、Ni 含量(方凤满等,2018)。三是锁黄仓湿地位于草海下游,且农田所形

成的排水系统为外源污染物创造了条件。威宁县地区曾经采用土法提炼锌,土法炼锌炉留下的废渣分布在草海汇水面积区的低处(任秀秀等,2017),废渣中 Zn、Pb 含量偏高,雨季废渣、废水和废气中残存的重金属通过渗透、地表径流、大气沉降等方式进入河流或湖泊中,导致锁黄仓流域内污染物含量上升(林文杰等,2009)。

变异系数(CV)的大小常被用来表示空间变异的程度。从变异系数上看,各重金属变异系数相对较小(13.94%~21.55%);Ni 的变异系数较小,As 的变异系数较大,表明各样品点的重金属污染程度相对而言比较相似,空间分布相对较均匀。

表 3 锁黄仓表层沉积物重金属描述性统计

Tab.3 Statistics on heavy metal content of surface sediments in Suohuangcang wetland

重金属	最小值/ mg · kg ⁻¹	最大值/ mg · kg ⁻¹	均值/ mg · kg ⁻¹	标准差/ mg · kg ⁻¹	变异系数/ %	偏度	峰度	允许最大值* / mg · kg ⁻¹	背景值/ mg · kg ⁻¹
Cr	53.00	137.00	98.44	16.59	16.86	-0.72	1.35	200.00	95.90
Ni	41.00	93.00	73.14	10.19	13.94	-0.66	0.55	50.00	51.20
Zn	107.00	239.00	148.67	27.72	18.65	1.18	1.94	250.00	99.50
As	12.10	34.9.00	21.93	4.73	21.55	0.32	0.70	25.00	20.00
Pb	32.10	73.00	54.32	8.38	15.43	-0.41	0.43	80.00	35.20

注: * 表示《土壤环境质量标准》(GB15618-1995)国家二级标准下 pH 在 6.5~7.5 的值。

Note: * The secondary standard (pH=6.5-7.5) from Environmental quality standard for soils (GB15618-1995).

5 种重金属元素含量分布如图 2 所示。整体来看,锁黄仓上游区域污染程度较为严重,中游西部区域污染程度相对较轻,呈现自东向西递减的空间分布规律,下游区域较中游区域而言,污染程度相对较为严重。区域内所呈现的空间分布规律与周边自然环境及人为活动有着密切的关系。

重金属 Cr、Ni、Pb 呈现相似的空间分布规律,空间分布相对较均匀,最小值和最大值分别在 53~137 mg/kg、41~93 mg/kg、32~73 mg/kg,3 种重金属元素的最大值均为最小值的 2 倍以上;在进水口处、上中游分界线附近以及下游西北方向均出现较高值,在中游西部方向均出现最小值(S12、S13),较大值区域占到整个区域的 2/3,整个区域 Cr、Ni、Pb 污染比较严重。

Zn 的分布特征主要呈现自南向北递减的趋势,最大值和最小值分别为 239 mg/kg 和 107 mg/kg,高值区域主要集中分布在上游的进水口附近,其余样品较小值区域占到整个区域的 83.3%。

As 的空间分布大致符合整体的分布规律,但下游区域污染程度相对较轻,最大值和最小值分别为 34.9 mg/kg 和 12.1 mg/kg,最大值约为最小值的近 3 倍;空间分布存在相对较大差异,相对较不均匀,

上中游分界线附近出现最大值(S8),较大值区域占到整个区域的 50.0%,可见 As 污染比较严重。

2.2 重金属元素来源解析

两个正态变量之间的积差相关系数是分析其同源性的的重要依据。锁黄仓表层沉积物中重金属含量之间的 Pearson 相关系数分析如表 4 所示。Cr 与 Ni 和 As 呈极显著线性正相关($P<0.01$),相关系数分别为 0.683、0.710、0.507,说明 3 种元素之间有较强的线性关系,3 种金属元素很可能是同一外源输入;Zn 和 Pb 相关系数分别为 0.723,呈极显著线性正相关($P<0.01$),可能来自相同的污染源。5 种重金属出受到自然环境来源影响外,还受到人为因素的干扰。

为了进一步分析锁黄仓沉积物中重金属来源的主控因素,在因子分析中 KMO 和 Bartlett 球形检验计算结果值为 0.575 和 0.000,表明标准化后的数据可以进行因子分析。在主成分分析中,矩阵初始特征值分别为 0.149、0.294、0.474、1.572、2.512,其中大于 1 的有两个初始特征值,且初始特征值的累计贡献率为 81.671%;同时,旋转后因子解的累积贡献率均达到 81.671%,表明重金属 81.671%的来源情况由 2 个主成分反映。

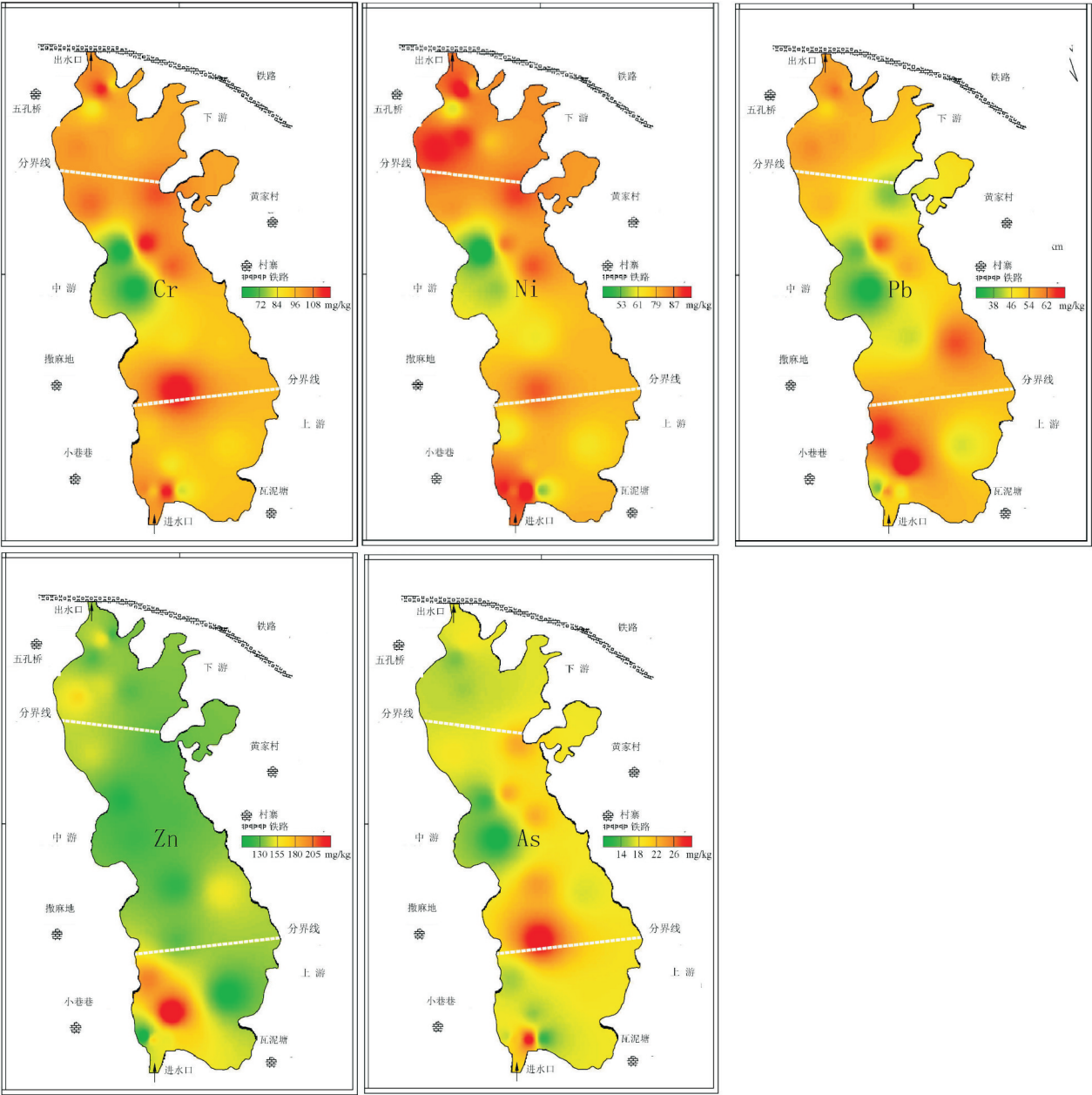


图 2 锁黄仓表层沉积物重金属含量空间分布

Fig.2 Spatial distributions of the five heavy metals in surface sediments of Suohuangcang wetland

表 4 锁黄仓表层沉积物重金属含量之间的相关性
Tab.4 Correlation between heavy metal concentrations in surface sediments of Suohuangcang wetland

重金属	Cr	Ni	Zn	As	Pb
Cr	1				
Ni	0.683 **	1			
Zn	0.069	0.113	1		
As	0.710 **	0.507 **	-0.093	1	
Pb	0.421 **	0.287 *	0.723 **	0.139	1

注：* 和 * 表示在 0.01（双侧）和 0.05（双侧）水平显著相关。
Note: ** highly significant correlation ($P<0.01$, two-tail) ;
* significant correlation ($P<0.05$, two-tail).

重金属含量的主成分分析中,Cr、Ni、As 和 Pb 在成分矩阵中第一主成分(A1)因子负荷达到高值,成分矩阵中第二主成分(A2)Zn 和 Pb 都表现出较高因子负荷;通过对成分矩阵旋转后,旋转成分矩阵 A1 中 Cr、Ni 和 As 都表现出较高因子负荷,成分矩阵 A2 中 Zn 和 Pb 都表现出较高因子负荷,则 A1 包括 Cr、Ni 和 As,A2 包括 Zn 和 Pb,变量主成分分析的结果与相关性分析相一致。

运用 SPSS 17.0 进行锁黄仓表层沉积物重金属主成分荷载分析结果见图 3。

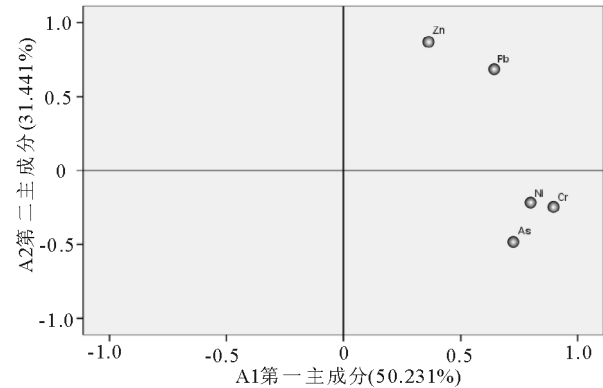


图3 锁黄仓表层沉积物重金属主成分荷载

Fig.3 Heavy metal principal component loading in surface sediment of Suohuangcang wetland

2.3 表层沉积物中重金属污染评价

污染负荷指数法评价结果见表5。锁黄仓研究区域范围内表层沉积物中重金属达到“中等”污染程度(污染指数 1.348)。上游、中游、下游表层沉积物中重金属 PLIzone 值相比较,上游(1.379) > 中游(1.372) > 下游(1.303),均属于“中等”污染程度。评价的 22 个采样点中,只有 1 个采样点达到“无污染”程度,其余采样点均属于“中等”污染程度,表明在空间分布上区域内的污染程度较为均匀。

表5 污染指数与污染程度之间关系

Tab.5 Pollution index and pollution degree of heavy metals for each sampling site and the entire study area

区域	样点	PLI 值	污染等级	PLIzone	综合污染等级
上游	S1	1.257	中等	1.379	中等
	S2	1.595	中等		
	S3	1.425	中等		
	S4	1.238	中等		
	S5	1.501	中等		
	S6	1.248	中等		
	S7	1.429	中等		
中游	S8	1.531	中等	1.303	中等
	S9	1.429	中等		
	S10	1.314	中等		
	S11	1.473	中等		
	S12	0.973	无		
	S13	1.017	中等		
	S14	1.477	中等		
	S15	1.342	中等		
下游	S16	1.41	中等	1.372	中等
	S17	1.418	中等		
	S18	1.386	中等		
	S19	1.285	中等		
	S20	1.343	中等		
	S21	1.534	中等		
	S22	1.244	中等		
锁黄仓	-	-	-	1.348	中等

2.4 表层沉积物中重金属潜在生态风险评价

锁黄仓表层沉积物中,Cr、Ni、Zn、As、Pb 单项重金属潜在生态风险指数在 1~11。整体上看,均值大小为:As(10.964) > Pb(7.717) > Ni(7.142) > Cr(2.053) > Zn(1.494),低于中等单项潜在生态风险指数下限值($E_r^i = 40$),达到轻度污染,综合潜在生态风险指数均值为 29.369,低于下限值(RI = 150),达到轻度污染;区域内上游重金属综合潜在生态风险指数均值较高,下游其次,中游最低,即上游(29.807) > 下游(29.576) > 中游(28.806),与这 5 种重金属在上、中、下游呈现的高低值分布情况相似。

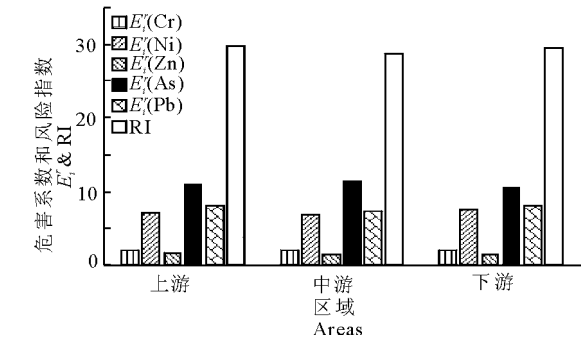


图4 潜在生态风险指数比较

Fig.4 Potential ecological risk index of each metal for each region

3 讨论

3.1 外源输入和人为干扰决定重金属的区域分布

沉积物重金属含量的较大值都集中在进水口处,这与上游的污染物输入有极大关系。研究区域范围的表层沉积物重金属一方面来自上游草海水域以及生态栖息地鸟类的输出,另一方面受到人为因素的干扰,如四周村落生产生活活动、交通运输以及工业生产带来的影响。表层沉积物重金属变异系数在 13.94%~21.55%,Cr、Ni、Pb 具有相似的空间分布且相对较均匀,Zn 主要自南向北递减,As 分布差异较大且出现背景值超标情况,广泛污染源输出下决定了重金属在空间上存在差异性。根据重金属含量空间分布,进水口处 5 种重金属都处于较大值,这与上游草海的输入有极大的关系;且在人为因素和自然环境复合影响下,不难看出在其余区域重金属的分布规律也存在着一定的相似性。

3.2 人类活动和鸟类排泄物是重金属主要污染源

重金属污染来源与人类活动以及鸟类栖息有密切关系。对 Cr、Ni、As、Zn 和 Pb 重金属进行相关性分析与主成分分析,推断 Cr 和 Ni 与 As 可能污染源类似,而 Zn 和 Pb 来源相似可能性较大。得到的

两个主因子中(图3),方差初始贡献在第一主成分达到50.231%,且占有较高正荷载的重金属元素为Cr、Ni、As和Pb。Ni受到栖息地鸟类排泄物的富集效应影响(方凤满等,2018);Cr、As、Pb与较频繁的农事活动相关,如农田施肥、播洒农药等都会导致一定程度的富集(李卫平等,2017;靳琪等,2018),且在该区域Cr与Ni有较高的背景值;第二成分方差初始贡献为31.441%,早年由于不断的土法炼制锌,导致工业活动中所释放的重金属元素Zn与Pb,通过大气沉降、地表径流方式在黔西北地区扩散迁移,受冶炼业影响下的黔西片区如何改善重金属污染现状值得研究;此外,周围铁路以及道路运输也是Zn与Pb的重要来源(王洪涛等,2016),此类重金属污染是较为典型的人为复合扰动。

3.3 生态修复措施可降低湿地公园的生态风险

研究区域内生态环境方面有较为良好表现,属于可控范围。污染负荷指数 PLI_{zone} 值为1.348,受到中等程度污染;综合潜在生态风险指数均值为29.369,远低于下限值($RI=150$),相比于中下游,上游的污染负荷指数较高,且As潜在生态风险表现最为突出($E_r=10.964$)。在锁黄仓湿地公园建成后,仍然需要对现有的生态环境进行有效的保护,特别是需要加强林地的建设、退耕还林、减少肥料对重金属的富集,以恢复良好的湿地水生一体环境;同时,以预防为主,及时杜绝化肥的滥用以及村落生活污水的无处理排放,减少重金属的积累,通过湿地植物逐步净化重金属污染的方式,改善公园水域环境。有研究已对种植湿地植物从而改善土壤重金属的污染状况提供了理论和技术支持(严莉等,2016;李庆华,2017)。但对于高原湿地而言,应结合实际情况,从经济性、可持续性的角度选择湿地植物,高效去除沉积物中重金属,已成为锁黄仓湿地公园下一步的研究方向。

参考文献

蔡国俊,2016. 草海喀斯特高原湿地水体富营养化与水生植物关系研究[D]. 贵阳:贵州大学.

戴尽璇,黄赛杰,徐立高,2017. 微波消解-原子吸收分光光度法测定海洋沉积物中的铜、锌、铅、镉、铬[J]. 化工时刊,31(9):20-25.

方凤满,武慧君,姚有如,等,2018. 鸟粪对同里湿地公园土壤重金属及其形态的影响[J]. 生态学报,38(8):2925-2933.

官加杰,周静,2013. 贵州锁黄仓国家湿地公园规划浅析[J]. 四川林勘设计,(3):86-88.

洪江,张家春,江波,等,2018. 贵州草海湿地生态环境现状及其评价[J]. 贵州科学,36(5):62-66.

靳琪,高红,岳波,等,2018. 村镇生活垃圾重金属含量及其来源分析[J]. 环境科学,39(9):4385-4392.

李庆华,2014. 人工湿地植物重金属分布规律及富集性研究[D]. 西安:长安大学.

李卫平,王非,杨文焕,等,2017. 包头市南海湿地土壤重金属污染评价及来源解析[J]. 生态环境学报,26(11):1977-1984.

李莹杰,张列宇,吴易雯,等,2016. 江苏省浅水湖泊表层沉积物重金属GIS空间分布及生态风险评价[J]. 环境科学,37(4):1321-1329.

林俊杰,王云智,陈国祥,等,2011. 万州老城区楼顶菜地土壤重金属污染特征[J]. 环境科学研究,24(6):679-683.

林文杰,肖唐付,周晚春,等,2009. 黔西土法炼锌区Pb、Zn、Cd地球化学迁移特征[J]. 环境科学,30(7):2065-2070.

刘祖发,陈记臣,卓文珊,等,2018. 龙感湖沉积物中重金属的垂直分布与评价[J]. 水生态学杂志,39(4):31-37.

龙加洪,谭菊,吴银菊,等,2013. 土壤重金属含量测定不同消解方法比较研究[J]. 中国环境监测,29(1):123-126.

马辉英,杨晓东,龚雪伟,等,2016. 乌鲁木齐市水磨河沿岸土壤重金属污染现状及评价[J]. 水土保持学报,30(6):300-307.

齐鹏,余树全,张超,等,2015. 城市地表水表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评估:以永康市为例[J]. 环境科学,36(12):4486-4493.

权轻舟,2017. 国内湿地重金属污染评价的研究进展[J]. 中国农学通报,33(8):60-67.

任秀秀,陈永祥,冯图,等,2017. 贵州威宁草海湿地的研究现状[J]. 贵州工程应用技术学院学报,35(3):18-34.

申格,徐斌,金云翔,等,2016. 若尔盖高原湿地研究进展[J]. 地理与地理信息科学,32(4):76-82,89.

唐贵才,刘明,袁廷香,2016. 贵州城市生活垃圾焚烧过程中重金属分布和迁移特征[J]. 生态环境学报,25(4):686-691.

王宏伟,乔艳珍,王丽平,2017. 天津渤海湾4种重金属的分布及生态风险评价[J]. 水生态学杂志,38(2):38-43.

王洪涛,张俊华,丁少峰,等,2016. 开封城市河流表层沉积物重金属分布、污染来源及风险评估[J]. 环境科学学报,36(12):4520-4530.

徐争启,倪师军,庾先国,等,2008. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术,31(2):112-115.

殷书柏,李冰,沈方,2014. 湿地定义研究进展[J]. 湿地科学,12(4):504-514.

- 严莉, 李龙山, 倪细炉, 等, 2016. 5 种湿地植物对土壤重金属的富集转运特征[J]. 西北植物学报, 36(10): 2078 - 2085.
- 张鹏岩, 秦明周, 闫江虹, 等, 2013. 黄河下游滩区开封段土壤重金属空间分异规律[J]. 地理研究, 32(3): 421 - 430.
- 张鹏岩, 康国华, 庞博, 等, 2017. 宿鸭湖沉积物重金属空间分布及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 38(5): 2125 - 2135.
- 张清海, 林昌虎, 谭红, 等, 2013. 草海典型高原湿地表层沉积物重金属的积累、分布与污染评价[J]. 环境科学, 34(3): 1055 - 1061.
- 赵斌, 朱四喜, 李相兴, 等, 2018a. 贵州草海不同土地利用方式表层土壤重金属污染现状评估[J]. 环境化学, 37(10): 2219 - 2229.
- 赵斌, 朱四喜, 杨秀琴, 等, 2018b. 贵州草海菜地表层土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. 生态环境学报, 27(4): 776 - 784.
- 赵斌, 朱四喜, 杨秀琴, 等, 2019. 草海湖沉积物重金属污染现状及生态风险评价[J]. 环境科学研究, 32(2): 235 - 245.
- 祝培甜, 赵中秋, 陈勇, 等, 2017. 江苏省某镇土壤重金属污染评价[J]. 环境工程学报, 11(4): 2535 - 2541.
- 左晓娟, 于勇, 朱芳, 2015. 旅游开发对湘江流域土壤重金属及水体状况的影响[J]. 水土保持学报, 29(6): 263 - 270.
- Bastami K D, Neyestami M R, Shemirani F, et al, 2015. Heavy metal pollution assessment in relation to sediment properties in the coastal sediment of the southern Caspian Sea[J]. Marine Pollution Bulletin, 92(12): 237 - 243.
- Dung T T, Cappuyns V, Swennen R, et al, 2013. From geochemical background determination to pollution assessment of heavy metals in sediments and soils[J]. Reviews in Environmental Science and Bio-Technology, 12: 335 - 353.
- Hakanson Lars, 1981. An ecological risk index for a aquatic pollution control a sedimentological approach[J]. Water Research, 14(8): 975 - 1001.
- Vanessa Reis, Virgilio Hermoso, Stephen K Hamilton, et al, 2019. Characterizing seasonal dynamics of Amazonian wetlands for conservation and decision making[J]. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 29(7): 1073 - 1082.
- Wang G, Lu Y L, Wang T Y, 2009. Factors Influencing the spatial distribution of organochlorine pesticides in soils surrounding chemical industrial parks[J]. Journal of Environmental Quality, 28(1): 185 - 187.
- Wu L S, Feng S, Nie Y Y, et al, 2015. Soil Cellulase Activity and Fungal Community Responses to Wetland Degradation in the Zoige Plateau, China[J]. Journal of Mountain Science, 12(2): 471 - 482.
- Ye Y M, Huang M J, Zhong B Q, et al, 2018. Wet and dry deposition fluxes of heavy metals in Pearl River Delta Region(China): Characteristics, ecological risk assessment, and source apportionment[J]. Journal of Environmental Sciences, 70(8): 106 - 123.

(责任编辑 万月华)

Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Suohuangcang Wetland in Guizhou Province

WANG Bai-chun, ZHU Si-xi, ZHAO Bin, LI Wu-jiang

(Institute of Karst Wetland Ecology, Guizhou Minzu University & College of Eco-Environment Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, P.R.China)

Abstract: Suohuangcang wetland is located downstream of Caohai National Nature Reserve in Guizhou Province. In this study, we analyzed the spatial distribution of five heavy metals (Cr, Ni, Zn, As and Pb) in surface sediments of Suohuangcang wetland and looked for common sources of heavy metal pollution using a combination of spatial interpolation analysis, principal component analysis and correlation analysis. The ecological risk of the heavy metals was assessed using the Tomlinson pollution load index and Hakan-son potential ecological risk index. The objective was to provide basic data on environmental conditions to support efforts to protect Suohuangcang wetland. The wetland was divided into upstream, midstream and downstream regions and surface sediments were sampled at 22 sampling sites. The mean values of Cr, Ni, Zn, As and Pb were, respectively, 98.44, 73.14, 148.67, 21.93 and 54.32 mg/kg, all higher than back-ground soil concentrations(95.90, 51.20, 99.50, 20.00, 35.20 mg/kg). Heavy metal levels, except for As, met the secondary standard of the national environmental quality standard. The variation coefficients of all five heavy metals were small (13.94%–21.55%), indicating a uniform spatial distribution of heavy metals among sampling sites. Positive correlations between Cr, Ni and As were highly significant ($P<0.01$), as was the correlation between Zn and Pb ($P<0.01$). Principle component analysis returned Cr, Ni and As as the first principal component (A1), and Zn and Pb as the second principal component (A2). The results indicate a common source of Cr, Ni and As pollution, primarily agricultural activities in the surrounding area, and a common source of Zn and Pb pollution, primarily zinc refining and transportation. The average pollution load index of heavy metals in the surface sediments was 1.348, indicating moderate pollution. The average pollution load index of heavy metals for the three regions followed the order: upstream (1.379), downstream (1.372) and midstream (1.303). The potential ecological risk indices of the five heavy metals were all less than the lower limit (RI=150) for moderate pollution, indicating mild ecological pollution. In summary, the Suohuangcang wetland is moderately polluted, but the environment quality can be managed.

Key words: Suohuangcang wetland; surface sediments; heavy metals; spatial distribution; ecological risk