



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

杞麓湖径流区不同湿地沉积物重金属污染特征及潜在生态风险评价

浦江, 张翠萍, 刘淑娟, 杨小燕, 赵斌, 李淑英, 陆轶峰, 王媛媛, 周元清

引用本文:

浦江, 张翠萍, 刘淑娟, 等. 杞麓湖径流区不同湿地沉积物重金属污染特征及潜在生态风险评价[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(5): 755–763.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0484>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

典型喀斯特地区土壤重金属累积特征及环境风险评价

刘南婷, 刘鸿雁, 吴攀, 罗广飞, 李学先

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 797–809 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0434>

宁夏贺兰县土壤重金属分布特征及其生态风险评价

周勤利, 王学东, 李志涛, 王夏晖, 何俊, 季国华

农业资源与环境学报. 2019, 36(4): 513–521 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0191>

安徽省某县农田土壤重金属污染及潜在生态风险评价

江宏, 马友华, 尹国庆, 王强, 聂静茹, 马铁铮, 胡宏祥

农业资源与环境学报. 2017, 34(4): 352–359 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0302>

湘江株洲-湘潭-长沙段河床沉积物重金属污染特征及生态风险评价

张坤, 杨霞, 吴雅雯, 吴蓓娟, 匡晓亮

农业资源与环境学报. 2015(1): 62–67 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2014.0230>

云南会泽铅锌冶炼厂周边土壤重金属污染特征及健康风险评价

刘小燕, 陈棉彪, 李良忠, 胡国成, 黄建洪, 刘珊, 张丽娟, 于云江

农业资源与环境学报. 2016, 33(3): 221–229 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0306>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

浦江, 张翠萍, 刘淑娟, 等. 杞麓湖径流区不同湿地沉积物重金属污染特征及潜在生态风险评价[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(5): 755–763.

PU J, ZHANG C P, LIU S J, et al. Spatial differentiation characteristics and environmental risk assessment of heavy metals in wetland sediment in an agricultural runoff area in the Qilu Lake basin[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(5): 755–763.



开放科学 OSID

杞麓湖径流区不同湿地沉积物 重金属污染特征及潜在生态风险评价

浦江^{1,2}, 张翠萍², 刘淑娟^{2,3}, 杨小燕⁴, 赵斌², 李淑英², 陆轶峰^{1*}, 王媛媛⁵, 周元清^{2*}

(1. 云南大学生态与环境学院, 昆明 650091; 2. 玉溪师范学院污染控制与生态修复研究中心, 云南 玉溪 653100; 3. 云南农业大学动物科学技术学院, 昆明 650201; 4. 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201; 5. 玉溪市抚仙湖保护开发投资有限责任公司, 云南 玉溪 653100)

摘要: 为了解杞麓湖农业径流区低污染水所致湖滨带湿地重金属空间分异特征及潜在危害, 采集湖滨带农业径流区 32 个不同类型湿地(河流湿地 $n=13$ 、人工湿地 $n=10$ 、湖泊湿地 $n=9$) 的表层沉积物, 检测重金属 Cu、Zn、Pb、Cr、Cd、Ni 和 Hg 含量, 利用 ArcGIS 反距离权重插值法(IDW)分析 7 种重金属空间分布特征, 采用 Hakanson 潜在生态风险指数法评价杞麓湖农业径流区湿地重金属污染。结果表明: 不同类型湿地 7 种重金属污染程度存在差异, 平均含量由高到低依次为河流湿地>人工湿地>湖泊湿地, 各重金属平均含量由大到小依次为 $Zn>Cr>Cu>Ni>Pb>Cd>Hg$, 除 Pb 外, 其余 6 种重金属平均含量均超过云南省土壤背景值, Cd 超背景值样点比例高达 100%。单因子污染指数表明重金属 Cd 和 Hg 呈重度污染, 存在危害风险; 农业径流区潜在生态风险指数介于 112~1 241, 平均 264, 属中度风险水平; 重金属含量分布存在明显空间差异, 北部高于南部、西部高于东部, 含量分布高值区与潜在生态风险评价结果一致。相关性分析表明 Cu、Ni、Cr 和 Zn 污染源主要是农业活动; Pb 来源主要与道路交通有关, 还受工业活动影响; Cd 主要受农业活动和工业活动影响。研究表明, 杞麓湖农业径流区不同类型湿地重金属污染存在空间差异, Cd 和 Hg 污染严重, 生态风险高值区出现在西北部 and 西南部。

关键词: 杞麓湖径流区; 低污染水; 重金属; 空间分异特征; 生态风险

中图分类号: X52; X826

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2021)05-0755-09

doi: 10.13254/j.jare.2020.0484

Spatial differentiation characteristics and environmental risk assessment of heavy metals in wetland sediment in an agricultural runoff area in the Qilu Lake basin

PU Jiang^{1,2}, ZHANG Cuiping², LIU Shujuan^{2,3}, YANG Xiaoyan⁴, ZHAO Bin², LI Shuying², LU Yifeng^{1*}, WANG Yuanyuan⁵, ZHOU Yuanqing^{2*}

(1. School of Ecology and Environmental Sciences, Yunnan University, Kunming 650091, China; 2. Research Center for Pollution Control and Ecological Restoration, Yuxi Normal University, Yuxi 653100, China; 3. Faculty of Animal Science and Technology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 4. School of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 5. Yuxi Fuxian Lake Protection Development Investment Co., Ltd., Yuxi 653100, China)

Abstract: To understand the spatial differentiation characteristics and potential hazards of heavy metals in lakeside wetlands caused by low-pollution water in the agricultural runoff area of Qilu Lake, the surface sediments of 32 different types of wetlands (river wetlands $n=13$, constructed wetlands $n=10$, and lake wetlands $n=9$) in the lakeside agricultural runoff area were collected to detect the contents of the

收稿日期: 2020-09-01 录用日期: 2020-10-27

作者简介: 浦江(1992—), 女, 云南曲靖人, 硕士研究生, 主要从事高原湖泊污染生态学研究。E-mail: 283267446@qq.com

*通信作者: 陆轶峰 E-mail: lyftoday@126.com; 周元清 E-mail: yqzhou@ynnu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(31960263); 云南省科技厅地方本科高校(部分)基础研究联合专项(2017FH001-125, 2017FH001-043)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (31960263); The Yunnan Province Local Undergraduate Universities (Part) Joint Special Funds for Basic Research (2017FH001-125, 2017FH001-043)

heavy metals Cu, Zn, Pb, Cr, Cd, Ni, and Hg. The spatial distribution characteristics of the seven heavy metals were analyzed by inverse distance weighted interpolation in ArcGIS, and the Hakanson potential ecological risk index method was used to evaluate the risks of heavy metal pollution in the Qilu Lake agricultural runoff area. The results showed that the degree of pollution of the seven heavy metals in different types of wetlands was different, and the average content was in the order of river wetlands>constructed wetlands>lake wetlands. The average content of heavy metals was in the order of Zn>Cr>Cu>Ni>Pb>Cd>Hg. Except for Pb, the heavy metals exceeded the background value of Yunnan soil, and the proportion of Cd samples exceeding background value was as high as 100%. The risk index of the agricultural runoff area ranged from 112 to 1 241, with an average of 264, which indicated a moderate risk level. There were clear differences in the distribution of heavy metals, which was higher in the north than in the south and higher in the west than in the east. The areas with a high distribution were consistent with the results of the potential ecological risk assessment. The correlation analysis showed that the sources of Cu, Ni, Cr, and Zn pollution were mainly agricultural activities; the sources of Pb pollution were mainly related to road traffic, but were also affected by industrial activities; and the sources of Cd pollution were mainly agricultural activities and industrial activities. There were spatial differences in heavy metal pollution among the different types of wetlands in the Qilu Lake agricultural runoff area, among which Cd and Hg pollution were serious. High ecological risk areas appeared in the northwest and southwest, which should be given more attention.

Keywords: Qilu Lake runoff area; low-pollution water; heavy metals; spatial differentiation characteristics; ecological risks

湖泊富营养化和重金属污染一直是生态学和环境科学研究的重要课题^[1]。2016年以来,随着湖泊污染控制与生态修复工程推进,农业面源污染治理效果显著,湖泊生态环境明显改善,低污染水治理已成为我国湖泊水环境保护的重要组成部分。山水林田湖草生命共同体的理念将湖泊生态环境扩展为集水区-湿地-汇水河流等有机结合的开放水系统。享有“地球之肾”美誉的湿地,具有重要生态系统服务价值和多种生态功能^[2]。湿地是各类污染物重要的“汇”^[3-4],也是研究污染物迁移转化的敏感过渡带,作为流域低污染水入湖生态屏障,对拦截、过滤、削减入湖污染物和改善水环境质量至关重要。农业径流区农药化肥大量施用所导致的重金属污染不容忽视。低污染水中重金属经絮凝沉降、氧化还原等过程积累于沉积物中,当环境因素变化时,部分重金属会释放进入水体,并通过食物链富集,危害人类健康^[3,5-6]。

重金属作为低污染水中典型污染物,其空间分布和生态风险是湿地生态环境中的关键问题^[7]。湿地受人类活动和土地利用方式等影响^[8],沉积物中重金属具有一定空间分异特征,摸清湖滨带低污染水不同类型湿地沉积物重金属空间分布特征和生态风险,对湖泊水环境保护具有重要指导意义^[9]。国内外关于湖滨带低污染水的研究,主要集中在水处理技术和氮磷去除^[10-11],JIANG等^[12]基于PMF-RI和PMF-HHR方法对湿地土壤进行环境风险评价,但流域低污染水对湖滨带湿地重金属污染的贡献不容忽视^[13]。

杞麓湖为云南省九大高原湖泊之一,通海县是云南最大蔬菜种植和集散地^[14],流域内蔬菜花卉复种指数较高,农业面源污染负荷较重^[15],杞麓湖农田径流

区是研究低污染水所致重金属污染的典型区。近年来,随着杞麓湖“以渔净水”项目和国家湿地公园恢复工程的实施,湿地成为“山-城-林-田-湖”空间格局的重要节点,湿地面临的污染形势更严峻,保护湿地生态环境尤为迫切。因此,本研究以农业径流区作为探究低污染水对不同类型湿地重金属污染的切入点,摸清杞麓湖农业径流区湿地沉积物重金属空间分布和生态风险,旨在为杞麓湖流域环保预警和低污染水治理提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

杞麓湖(102°30'25"~102°52'53"E,23°55'11"~24°14'49"N)属珠江流域南盘江水系,滇中高原封闭型断陷湖泊,径流面积354.94 km²,总人口24万,流域四周高、中部低,湖周为平坝区^[15]。湖泊长轴呈东西向新月形,长10.4 km,南北较窄,平均宽3.5 km,湖岸线全长32 km,最大水深6.84 m,平均4 m。湖泊海拔高程多在1 979~2 100 m之间,属亚热带湿润高原季风气候,流域年均气温15.5℃,水源主要来自降雨径流补给,年降雨量800~1 100 mm,蒸发量小,气候湿润^[16]。杞麓湖属典型富营养老龄化湖泊,是关系通海县社会经济发展主体的“母亲湖”,湖盆内分布着通海县90%人口,流域内包含4条主要入湖河流,即红旗河、者湾河、中河和大新河,覆盖了全县7个乡镇。水质长期处于劣V类,水质污染以有机污染和氮、磷为主^[17]。

1.2 采样点布设与指标分析

结合杞麓湖流域现状及地形地貌,于2017—2019

年8月(丰水期)在杞麓湖农业径流区设32个采样点(其中河流湿地 $n=13$ 、人工湿地 $n=10$ 、湖泊湿地 $n=9$,图1)。在不同类型湿地样地内,用抓斗式采泥器采集0~30 cm表层沉积物,用手持式GPS(GARMIN Oregon 739,上海佳明)记录采样点经纬度。每个湿地按梅花形采集5个以上沉积物样品,混匀为2 kg,去除杂质后装入封口袋,带回实验室制样,待测。土壤重金属Cu、Zn、Pb、Cd、Cr、Ni用王水回流消解原子吸收法(NY/T 1613—2008)测定;Hg用原子荧光法(GB/T 220105.1—2008)测定;全氮(TN)用半微量凯氏蒸馏定氮法(NY/T 53—1987)测定;全磷(TP)用钼锑抗比色法(NY/T 88—1988)测定;pH用PHS-3C型酸度计测定;有机质(OM)用硫酸与重铬酸钾氧化-外加热-容量法(NY/T 1121.6—2006)测定。实验室加入空白样品和标准物质进行质量控制,各测试项目相对标准偏差(RSD)小于10%,每个样品三组平行实验,平行样间的误差小于10%,按平均值统计。

1.3 评价方法

1.3.1 单因子污染评价

以云南省土壤重金属背景值^[18](表1)作为参比值,用单因子污染指数法评价湿地沉积物中重金属对环境的污染程度^[19]。

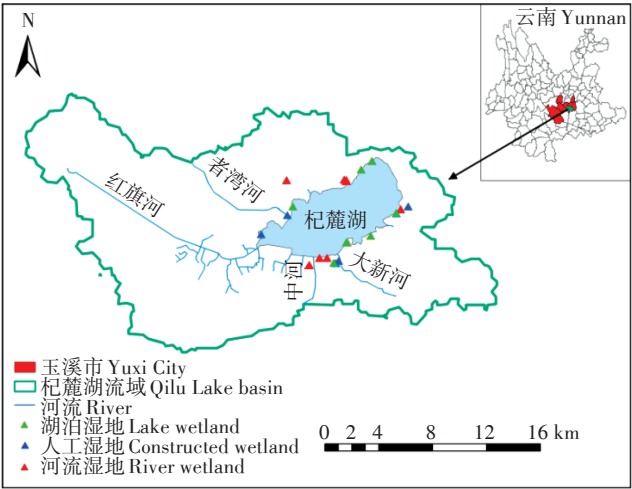


图1 研究区位置及采样点分布

Figure 1 Location of the study area and the sampling point distribution

1.3.2 潜在生态风险评价

采用 Hakanson 潜在生态风险指数法^[18]评价杞麓湖农业径流区湿地重金属污染,重金属毒性响应系数(T_r^i)见表1, T_r^i 表示重金属毒性水平和生物对重金属污染的敏感程度,潜在生态风险指数(I_R)算式如下:

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i \tag{1}$$

$$C_f^i = \frac{C_s^i}{C_n^i} \tag{2}$$

$$I_R = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times C_f^i \tag{3}$$

式中: C_f^i 为重金属*i*相对于背景值的污染指数; C_s^i 为重金属*i*的实测值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; C_n^i 为重金属*i*的背景参考值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; E_r^i 为重金属元素*i*的单因子潜在生态风险指数, E_r^i 和 I_R 值越大,生态危害程度越大,其分类等级见表2。样点污染程度比例=重金属元素不同污染等级样品数/样品总数 $\times 100\%$,样点潜在生态风险比例=潜在生态风险评价等级样品数/样品总数 $\times 100\%$ 。

1.4 数据统计分析

用 Excel 2013 进行数据统计,用 SPSS 20.0 软件进行 Pearson 相关性分析和主成分分析,不同处理结果用平均值 $\pm$ 标准差(Mean $\pm$ SD)表示,用 Origin 8.0 软件作图。用 ArcGIS 15.0 软件绘制采样点分布图,用 ArcGIS 反距离权重插值法(IDW)分析研究区数据,并绘制重金属空间分布图及潜在生态风险分布图。

2 结果与分析

2.1 农业径流区湿地重金属的污染特征

由表3可知,杞麓湖农业径流区不同类型湿地沉积物重金属平均含量总体表现为河流湿地>人工湿

表2 污染程度和潜在生态风险程度分类等级

Table 2 Degree of pollution and potential ecological risk

单因子污染指数 Single factor pollution index(C_f^i)	污染程度 Pollution degree	潜在生态风险指数 Potential ecological risk index(I_R)	潜在生态风险等级 Level of potential ecological risk
$C_f^i \leq 1$	清洁	$I_R < 150$	轻微
$1 < C_f^i \leq 2$	轻度	$150 \leq I_R < 300$	中度
$2 < C_f^i \leq 3$	中度	$300 \leq I_R < 600$	强
$C_f^i > 3$	重度	$I_R \geq 600$	极强

表1 云南省各重金属土壤背景值和毒性响应系数

Table 1 Soil background values and toxicity response coefficients of heavy metals in Yunnan Province

项目 Item	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Ni	Hg
土壤背景值 Soil background value/ $(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	46.30	89.70	40.60	0.218	65.2	42.5	0.058
毒性响应系数 Toxicity response coefficient(T_r^i)	5	1	5	30	2	5	40

地>湖泊湿地;同类湿地重金属平均含量排序为Zn>Cr>Cu>Ni>Pb>Cd>Hg;河流湿地沉积物Zn和Ni标准差较大,表明采样点变异较大,主要是由于湖泊西北部纳家营轧钢厂附近采样点数值偏高。除Pb外,河流湿地其余6种重金属平均含量均超过云南省土壤背景值,Cu、Zn、Cd、Cr、Ni、Hg分别为土壤背景值的1.84、2.10、4.49、1.51、2.23、5.17倍,人工湿地和湖泊湿地Zn、Cd、Cr和Hg含量均超过背景值,表明杞麓湖农业径流区低污染水中存在不同程度重金属污染,重金属Cd污染严重,在河流湿地和人工湿地超背景值的样点比例高达100%。不同类型湿地的变异系数差异明显,河流湿地Ni和Hg、湖泊湿地Pb的标准差高于平均值,变异系数较大,表明3种元素含量空间分布不均匀,离散性相对较大。

2.2 农业径流区湿地重金属的空间分布特征

杞麓湖农业径流区湿地7种重金属空间分异特征明显,总体呈西北部高于东南部,自北向南、自西向东递减趋势(图2)。其中,Cu、Zn、Cr和Cd空间含量变化大体一致,具有一定相似性,空间分异较大。Cd存在多个点源,高值区较多;Ni和Hg除高值区外整体

分布均匀,无明显空间分异,Hg高值区出现在西南部杞麓湖国家湿地公园,Ni空间分布最均匀,且平均含量略高于云南省土壤背景值;Pb部分区域存在一定空间分异,除部分区域含量偏高外,整体分布均匀,西部和东部部分样点含量稍高。重金属污染高值主要在湖泊西北部纳家营轧钢厂附近及西南部杞麓湖国家湿地公园。

2.3 农业径流区湿地重金属污染评价

2.3.1 单因子污染指数法

以云南省土壤背景值为参比值,杞麓湖农业径流区湿地沉积物均受到不同程度的重金属污染。除Pb和Ni外,三种不同类型湿地沉积物重金属Cu、Zn、Cd、Cr和Hg的单因子污染指数均大于1,呈现不同程度的富集。其中,河流湿地Cd和Hg的污染指数高达8.39和24.02,重度污染占比76.93%和38.46%(图3)。说明Cd和Hg富集程度高,呈重度污染,存在较高生态风险。

2.3.2 潜在生态风险指数法

通过反距离权重插值法结合潜在生态风险指数对各风险等级占比进行统计,结果如图4a所示,农业

表3 研究区域土壤重金属污染特征分析

Table 3 Descriptive statistics of heavy metals in soils of the study area

湿地类型 Wetland type	重金属 Heavy metal	范围 Range/ (mg·kg ⁻¹)	平均值 Average/ (mg·kg ⁻¹)	标准差 Standard deviation/ (mg·kg ⁻¹)	变异系数 Coefficient of variable/%	超背景值样点比例 Proportion of samples exceeding background values/%
河流湿地 River wetland	Cu	30.50~227.00	85.20	64.62	75.85	69.23
	Zn	83.90~472.00	188.67	123.25	65.33	76.92
	Pb	0.20~88.10	34.61	26.55	76.72	22.08
	Cd	0.24~3.22	0.98	0.49	50.79	100
	Cr	38.00~359.10	98.26	84.53	86.03	61.54
	Ni	5.10~901.00	94.77	242.84	256.24	30.77
	Hg	0.06~1.39	0.30	0.39	130.26	100
人工湿地 Constructed wetland	Cu	20.90~47.50	35.16	8.38	23.83	10.00
	Zn	60.20~172.10	115.86	32.42	27.98	62.00
	Pb	0.20~41.40	17.76	13.96	74.63	10.00
	Cd	0.26~1.46	0.72	0.35	49.09	100
	Cr	27.90~202.10	85.30	61.15	71.69	38.00
	Ni	5.00~46.00	24.97	13.95	55.85	20.00
	Hg	0.02~0.22	0.09	0.05	56.72	80.00
湖泊湿地 Lake wetland	Cu	27.10~83.00	35.52	16.93	47.65	11.13
	Zn	70.80~318.00	116.31	72.87	62.66	56.56
	Pb	0.20~173.10	33.96	50.08	147.47	11.11
	Cd	0.11~2.14	0.88	0.65	73.52	88.89
	Cr	33.00~143.00	92.24	38.07	41.27	77.78
	Ni	5.00~42.70	26.34	14.26	52.87	11.11
	Hg	0.03~0.15	0.09	0.04	47.44	77.78

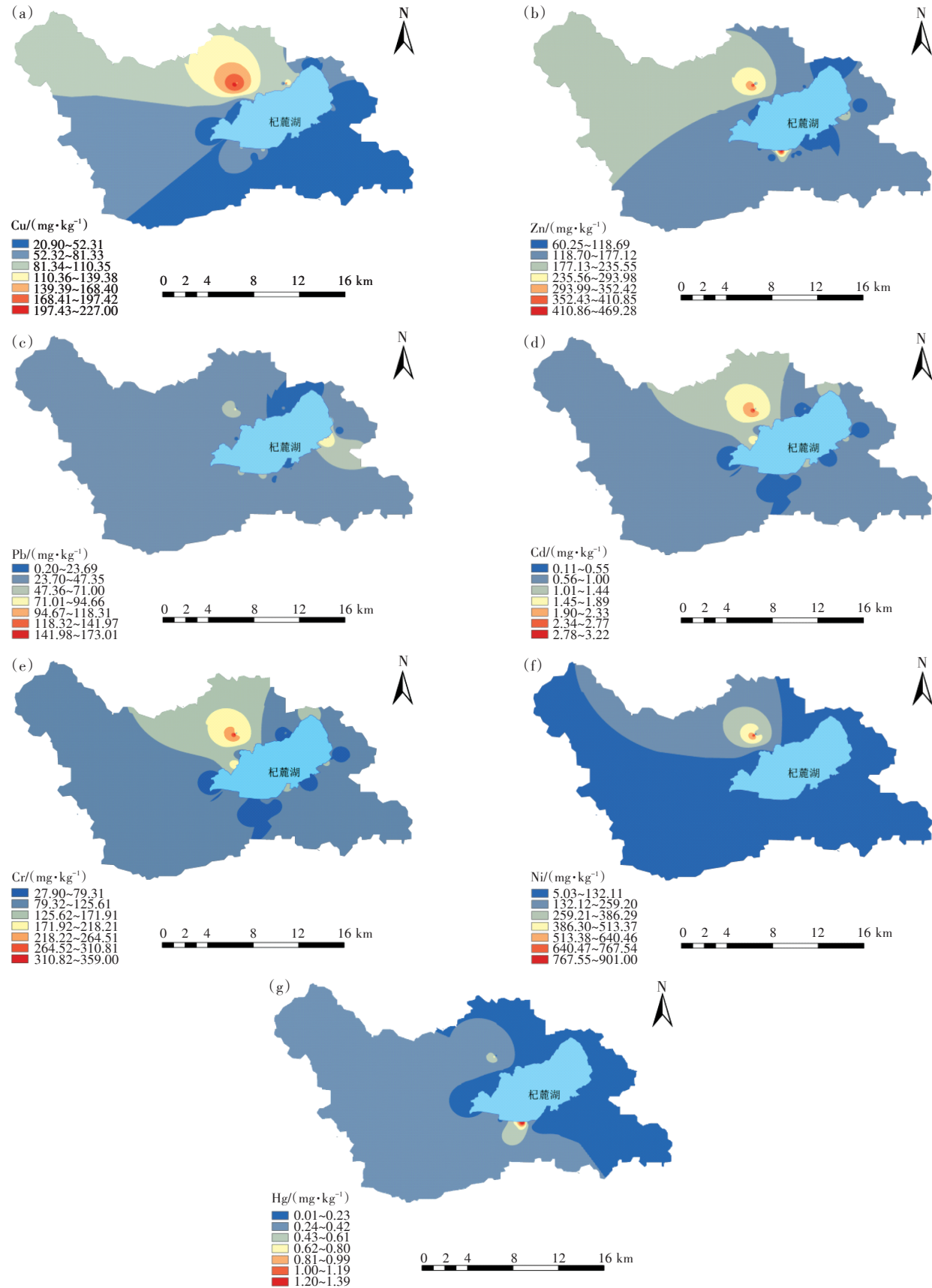


图2 杞麓湖湿地沉积物重金属的空间分布

Figure 2 Spatial distribution of heavy metals in sediment of Qilu Lake wetlands

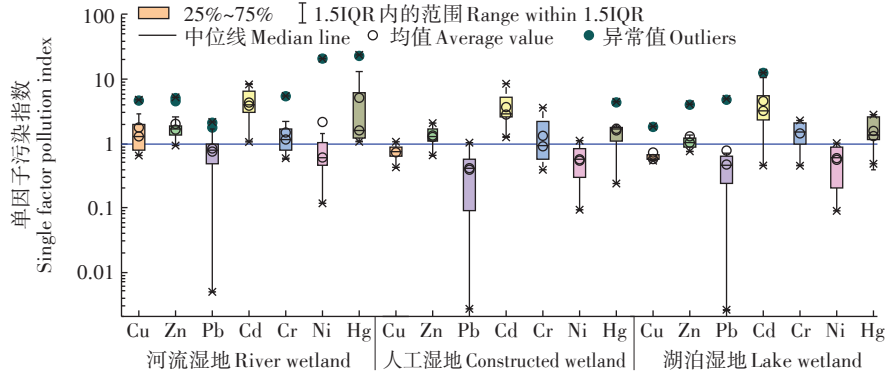


图3 基于云南省土壤背景值的单因子污染指数

Figure 3 Single factor pollution index based on soil background value in Yunnan Province

径流区各采样点潜在生态风险指数平均值为264,属中度生态风险水平。人工湿地和湖泊湿地强生态风险样点约占11%,大部分样点处于轻微和中度生态风险水平,河流湿地强生态风险样点占比高达30.7%,局部出现生态风险高值区,极强生态风险样点占15.39%,潜在生态风险指数最大值达1241。潜在生态风险空间分布呈西高东低的趋势(图4b),西部地区处于强生态风险水平,东部地区处于中度风险水平,少数采样点周围处于轻微风险水平。其中,极强潜在生态风险区主要分布在西北部杞麓湖纳家营轧钢厂附近及西南部的杞麓湖国家湿地公园。

2.4 农业径流区湿地沉积物重金属空间分异特征及污染源分析

杞麓湖农业径流区湿地表层沉积物各重金属与土壤理化因子相关性分析见表4,结果表明:Cu与Zn、Cr、Ni、Zn与Pb、Ni、Hg、Ni与Cr之间呈极显著相关($P<0.01$),推测Cu、Zn、Cr、Ni、Hg 5种重金属污染具有同源性,7种重金属元素与土壤pH、OM、TN、TP间存在一定相关性,其中TN与Cd极显著正相关($P<0.01$),TP与Pb、Cr显著负相关($P<0.05$),Zn、Pb、Cr、Ni、Hg与OM呈极显著正相关($P<0.01$)。

运用SPSS软件主要提取到PC1和PC2两个主成分(表5),累计方差贡献分别为50.77%和68.99%,能较好解析污染源信息。第一主成分(PC1)中Zn、Cr、Ni载荷较高,分别为0.913、0.727和0.834,由相关性分析结果可知,这3种元素具有较好相关性且空间分布特征相似,说明来源可能一致。

第二主成分(PC2)中Cd和Pb载荷值分别为0.623和0.390,其中,Cd与其他重金属相关性不显著,说明Cd具有单独来源,且与TN呈极显著正相关。

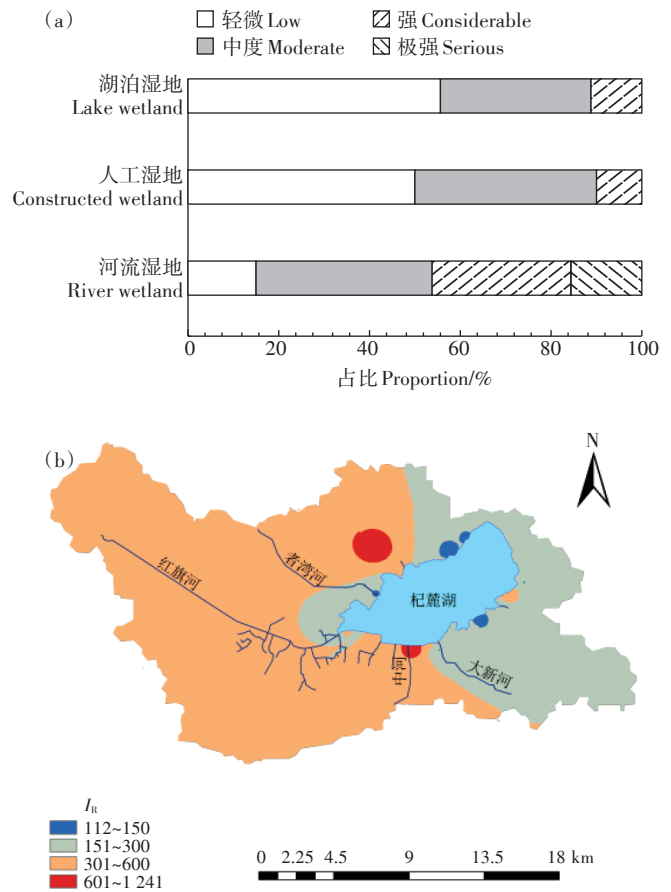


图4 研究区潜在生态风险指数(I_R)等级占比(a)和空间分布图(b)

Figure 4 The map of risk level proportion(a) and spatial distribution(b) of potential ecological risk index(I_R) in the study area

3 讨论

3.1 杞麓湖径流区不同湿地沉积物重金属分布特征

杞麓湖农业径流区不同类型湿地沉积物重金属平均含量表现为河流湿地>人工湿地>湖泊湿地,原

表4 土壤理化因子与重金属含量的相关性

Table 4 Pearson correlation of soil physical and chemical factors and heavy metal concentrations

指标Indicator	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Ni	Hg	pH	OM	TN	TP
Cu	1										
Zn	0.499**	1									
Pb	0.159	0.703**	1								
Cd	0.181	0.363*	0.346*	1							
Cr	0.499**	0.485**	0.407*	0.02	1						
Ni	0.629**	0.643**	0.343	0.151	0.784**	1					
Hg	0.305	0.741**	0.358*	0.252	0.216	0.391*	1				
pH	-0.418*	-0.304	-0.053	-0.560**	-0.145	-0.396*	-0.420*	1			
OM	0.227	0.793**	0.590**	0.156	0.452**	0.477**	0.717**	-0.105	1		
TN	0.15	-0.219	-0.287	0.527**	-0.261	-0.091	-0.046	-0.606**	-0.474**	1	
TP	-0.127	-0.334	-0.409*	0.186	-0.395*	-0.156	-0.112	-0.422*	-0.526**	0.519**	1

注:*表示在 $P<0.05$ 水平显著相关;**表示在 $P<0.01$ 水平极显著相关; $n=32$ 。
Notes:* indicates a significant correlation at $P<0.05$ level;** indicates a significant correlation at $P<0.01$ level; $n=32$.

表5 土壤重金属元素因子载荷

Table 5 Factor matrix of heavy metal elements of soil

主成分 Principal components	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Ni	Hg	特征值 Eigen value	方差贡献率 Variance contribution rate/%	累计方差贡献率 Cumulative variance contribution/%
PC1	0.675	0.913	0.668	0.389	0.727	0.834	0.666	3.554	50.77	50.77
PC2	-0.374	0.242	0.390	0.623	-0.504	-0.403	0.347	1.275	18.22	68.99

因是湿地对重金属具有削减作用,由农业径流区上段城镇生活低污染水、交通运输以及农业生产中化肥农药施用等产生的重金属经地表径流或大气沉降进入河流湿地,一部分重金属在河流湿地沉积物中积累,另一部分重金属先进入人工湿地,经湿地削减后进入湖泊湿地,最后进入湖泊水体。除Pb外,河流湿地其余6种重金属平均含量均超过云南省土壤背景值,河流湿地和人工湿地Cd超标严重,超标率达100%。变异系数可以反映各样本数据变量空间上的离散程度,有研究表明,变异系数较小的元素自然来源占主导地位,而变异系数较大的元素则受人为影响较大^[20]。Ni、Hg和Pb这3种重金属呈强变异,表明河流湿地Ni和Hg、湖泊湿地Pb受人为活动干扰严重,主要受径流区农业活动影响,还与流域内钢铁产业及其加工制造业等有关。

杞麓湖农业径流区湿地沉积物Cu、Zn、Cr和Cd具有相似的空间分布特征,整体呈西北高东南低,自北向南、自西向东递减的趋势。Cd空间分异较大,存在多个点源,整体为高值分布,Hg高值区出现在西南部杞麓湖国家湿地公园,该区域人类活动密集,环湖公路车辆较多,其产生的尾气中重金属Hg经大气沉

降随雨水进入湿地,导致该区Hg浓度偏高,这主要与通海县坝区密集人类活动和交通运输有关。Ni空间分布最均匀,且平均含量略高于云南省土壤背景值,其高值贡献区主要来自湖泊西北部纳家营轧钢工业,说明Ni元素主要受成土母质和点源影响。Pb存在一定空间分异,除部分区域含量偏高外,整体分布均匀,西部和东部局部地区含量稍高。

3.2 农业径流区沉积物重金属潜在生态危害解析

湿地沉积物重金属的风险评价一直是湿地生态环境评价的核心方法^[21],基于云南省土壤背景值进行评价,从单因子污染指数看,三种类型湿地Cd和Hg呈重度污染,富集严重,存在较大生态安全隐患,应优先控制。由于湿地沉积物对Cd和Hg具有较强的吸附作用^[22]。强潜在生态风险主要贡献区是西北部杞麓湖纳家营轧钢厂及西南部的杞麓湖国家湿地公园,高值区内有红旗河、者湾河、中河和大新河4条主要入湖河流(图1),土地利用类型主要以农业用地为主,人类活动频繁,地表植被覆盖率低,以农作物为主,因此整个西北部地区潜在生态风险偏高。其中,杞麓湖西南部和西北部坡面是流域内重要水源涵养区,也是生态敏感性和土壤可蚀性较高地区^[23],应得

到管理部门重视。

3.3 农业径流区沉积物营养盐与重金属的相关性

依据重金属相关性可间接推测沉积物重金属污染来源和途径,若各元素间相关性显著或极显著,表明在该地区重金属元素具有同源性或呈复合污染^[24]。其次,湿地沉积物理化性质也直接影响重金属随低污染水进入湿地的环境行为^[25]。本研究中,TN与Cd呈极显著正相关($P<0.01$),TP与Pb、Cr显著负相关($P<0.05$),Zn、Pb、Cr、Ni、Hg与OM呈极显著正相关($P<0.01$),农业径流区低污染水OM含量丰富,对重金属络合能力强,这可能是造成该径流区表层沉积物中Zn、Pb、Cr、Ni、Hg含量较高的主要原因。农业径流区湿地沉积物pH平均值为7.73,呈弱碱性,7种重金属均与pH呈负相关,其中Cd与pH呈极显著负相关($P<0.01$),这是因为pH越高,土壤表面的负电荷数量越多,与有机酸形成配合物的机率也越大,导致重金属吸附能力减弱,重金属在土壤中的移动性增强^[26]。

主成分分析法(PCA)是研究多个变量相关性的多元统计方法,能较好地根据相关性密切程度进行元素分类,通过各因子中的特征元素判断元素来源^[27-28]。本研究第一主成分为混合来源,主要与人类生活和农业生产有关。第二主成分为Cd和Pb,载荷值分别为0.623和0.390,其中,Cd与其他重金属的相关性不显著,说明Cd具有单独来源,且与TN呈极显著正相关,表明Cd与农业活动和农药、化肥施用等有关^[29],此外,Cd污染与工业生产有关,可解释杞麓湖西北部纳家营钢铁产业样点Cd污染严重。结合风险评价和空间分布结果,Cd应作为该区域污染防控与生态修复重点。Pb主要在车辆的燃料燃烧和催化剂、铅蓄电池的使用中大量产生^[30],Pb的高值区主要在杞麓湖国家湿地公园环湖公路附近,说明其主要来自人类活动与交通运输。

4 结论

(1)杞麓湖农业径流区不同湿地类型的重金属含量存在一定差异,表现为河流湿地>人工湿地>湖泊湿地,同类湿地中重金属平均含量大小为Zn>Cr>Cu>Ni>Pb>Cd>Hg,Pb、Ni和Hg呈强变异性,其中Cd和Hg超背景值样点比例较高,应重点防控。

(2)ArcGIS反距离权重插值法分析结果表明,Cd、Cu、Cr、Zn含量具有相似空间分异特征,呈自北向南、自西向东递减趋势,两个含量高值区分别是西北部的纳家营钢铁厂附近湿地和西南部的杞麓湖国家

湿地公园,应予优先关注和重点管控。

(3)单因子污染指数结果表明Cd和Hg呈重度污染,存在危害风险,其余5种重金属污染程度较轻。农业径流区潜在生态风险指数介于112~1 241,平均264,属中度风险水平,且生态风险空间分布呈西高东低趋势,与含量空间分布特征一致。

(4)相关性分析和主成分解析结果表明,径流区湿地沉积物各重金属主要受人类农业活动干扰。Cu、Ni、Cr和Zn的污染源主要是农业生产活动;Pb来源主要与道路交通有关,还受工业活动影响;Cd主要受农业活动和工业活动影响。

研究区采样点的位置和数量对分析结果具有一定程度的影响,本研究缺乏沉积物分层采样和重金属形态分析,还需在后续研究中提高采样密度并进行重金属形态的深入研究。

参考文献:

- [1] KUMAR V, SHARMA A, PANDITA S, et al. A review of ecological risk assessment and associated health risks with heavy metals in sediment from India[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2020, 35(5): 516-526.
- [2] ZHU J, ZHANG T, ZHU N, et al. Bioelectricity generation by wetland plant-sediment microbial fuel cells(P-SMFC) and effects on the transformation and mobility of arsenic and heavy metals in sediment[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2019, 41(5): 2157-2168.
- [3] FENG J, ZHU X, WU H, et al. Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of a typical restored mangrove-aquaculture wetland in Shenzhen, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 124(2): 1033-1039.
- [4] SUN R, YANG J, XIA P, et al. Contamination features and ecological risks of heavy metals in the farmland along shoreline of Caohai plateau wetland, China[J]. *Chemosphere*, 2020, 254: 126828.
- [5] PIERRE-JEAN S, EMILIE P, AURÉLIE M, et al. Daily variations of Zn and Pb concentrations in the Deule River in relation to the resuspension of heavily polluted sediments[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 470/471: 600-607.
- [6] GOPALAKRISHNAN G, WANG S, MO L, et al. Distribution determination, risk assessment, and source identification of heavy metals in mangrove wetland sediments from Qi'ao Island, south China[J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2020, 33: 100961.
- [7] XIAO H, SHAHAB A, LI J, et al. Distribution, ecological risk assessment and source identification of heavy metals in surface sediments of Huixian karst wetland, China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 185: 109700.
- [8] XIA P, MA L, SUN R, et al. Evaluation of potential ecological risk, possible sources and controlling factors of heavy metals in surface sediment of Caohai wetland, China[J]. *Science of the Total Environment*,

- 2020, 740:140231.
- [9] YONG N, XIA J, KUN W, et al. Meta analysis of heavy metal pollution and sources in surface sediments of Lake Taihu, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 700:134509.
- [10] 肖雨涵, 庞燕, 项颂, 等. 多级生态库塘对低污染水体的净化[J]. 环境工程学报, 2018, 12(10):2998-3004. XIAO Y H, PANG Y, XIANG S, et al. Purification of multi-stage pond on low-polluted water[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2018, 12(10):2998-3004.
- [11] 张俊朋, 陆轶峰, 国晓春, 等. 表面流湿地去除洱海缓冲带低污染水氮模拟研究[J]. 环境工程技术学报, 2018, 8(5):488-494. ZHANG J P, LU Y F, GUO X C, et al. Nitrogen removal of simulated low-polluted water of Lake Erhai buffer zone by surface-flow wetland[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2018, 8(5):488-494.
- [12] JIANG H, CAI L, WEN H, et al. An integrated approach to quantifying ecological and human health risks from different sources of soil heavy metals[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 701:134-143.
- [13] YANG Q, LI Z, LU X, et al. A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: Pollution and risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 642:690-700.
- [14] 赵筱青, 谭琨, 易琦, 等. 典型高原湖泊流域生态安全格局构建——以杞麓湖流域为例[J]. 中国环境科学, 2019, 39(2):768-777. ZHAO X Q, TAN K, YI Q, et al. Construction of ecological security pattern in typical plateau lake basin: A case of the Qilu Lake basin[J]. *China Environment Science*, 2019, 39(2):768-777.
- [15] 王涛, 肖彩霞, 刘娇, 等. 杞麓湖流域景观时空格局演变及其对景观生态风险的影响[J]. 水土保持研究, 2019, 26(6):219-225. WANG T, XIAO C X, LIU J, et al. Evolution of spatial and temporal patterns of landscape and its impact on landscape ecological risk in Qilu Lake basin[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(6):219-225.
- [16] HILLMAN A L, QUINN R F O, ABBOTT M B, et al. A Holocene history of the Indian monsoon from Qilu Lake, southwestern China[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 227:12-19.
- [17] 白少云, 刘斌, 余珮珩, 等. 融合多尺度影像数据的杞麓湖流域景观格局分析[J]. 测绘通报, 2020(2):90-95. BAI S Y, LIU B, YU P H, et al. Analysis of the Qilu Lake watershed landscape pattern based on multi-scale image data[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2020(2):90-95.
- [18] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1990. China National Environmental Monitoring Centre. Background values of soil elements in China[M]. Beijing:China Environmental Press, 1990.
- [19] LARS H. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. *Hakanson Lars*, 1980, 14(8):975-1001.
- [20] SALVAGIO M D, MASSIMO A, ADRIANA B, et al. Heavy metals in urban soils: A case study from the city of Palermo (Sicily), Italy[J]. *Science of the Total Environment*, 2002, 300:249-243.
- [21] HOU Q, YANG Z, JI J, et al. Annual net input fluxes of heavy metals of the agro-ecosystem in the Yangtze River Delta, China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, 139:68-84.
- [22] ZHANG K, XIAO R, GAO H, et al. Arsenic, heavy metal pollution in wetland soils from tidal freshwater, salt marshes before, after the flow-sediment regulation regime in the Yellow River Delta, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 450/451:244-253.
- [23] 余珮珩, 冯明雪, 刘斌, 等. 顾及生态安全格局的流域生态保护红线划定及管控研究——以云南杞麓湖流域为例[J]. 湖泊科学, 2020, 32(1):89-99. YU P H, FENG M Y, LIU B, et al. Demarcation and administration of watershed ecological protection red line considering the ecological security pattern: A case of the Qilu Lake watershed, Yunnan Province[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(1):89-99.
- [24] XIE F, ZHANG R, GUO G, et al. Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in urban soils from southwest China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, 24(3):410-418.
- [25] 李俊莉, 宋华明. 土壤理化性质对重金属行为的影响分析[J]. 环境与可持续发展, 2003(1):24-26. LI J L, SONG M H. Effects of soil physical and chemical properties on heavy metal behavior[J]. *Environment and Sustainable Development*, 2003(1):24-26.
- [26] 窦韦强, 安毅, 秦莉, 等. 农田土壤重金属垂直分布迁移特征及生态风险评价[J]. 环境工程, 2021, 39(2):166-172. DOU W Q, AN Y, QIN L, et al. Characteristics of vertical distribution and migration of heavy metals in farmland soils and ecological risk assessment[J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(2):166-172.
- [27] KUKUCKA P, AUDY O, KOHOUTEK J, et al. Source identification, spatio-temporal distribution and ecological risk of persistent organic pollutants in sediments from the upper Danube catchment[J]. *Chemosphere*, 2015, 138:777-783.
- [28] WANG J, SU J, LI Z, et al. Source apportionment of heavy metal and their health risks in soil-dustfall-plant system nearby a typical non-ferrous metal mining area of Tongling, eastern China[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 254:1-10.
- [29] GRAY C W, MCLAREN R G, ROBERTS A H C, et al. The effect of long-term phosphatic fertiliser applications on the amounts and forms of cadmium in soils under pasture in New Zealand[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1999, 54(3):267-277.
- [30] HUANG J, GUO S, ZENG G, et al. A new exploration of health risk assessment quantification from sources of soil heavy metals under different land use[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 243:49-58.