

徐梦, 刘鸿雁, 罗凯, 等. 夜郎湖表层沉积物重金属分布特征及生态风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(6): 1202-1209.

XU Meng, LIU Hong-yan, LUO Kai, et al. Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Yelang Lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(6): 1202-1209.

夜郎湖表层沉积物重金属分布特征及生态风险评估

徐梦¹, 刘鸿雁^{1,2*}, 罗凯¹, 崔俊丽¹, 刘艳萍¹, 李家飞¹

(1. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025; 2. 贵州大学农学院, 贵阳 550025)

摘要:为研究喀斯特地质背景下重金属在河流沉积物中积累和释放过程以及重金属污染的环境生态风险,以贵州省普定县夜郎湖表层沉积物为研究对象,分析其中 Zn、As、Cd、Cr、Ni、Cu 和 Pb 的含量及形态分布特征,采用地累积指数法和潜在生态危害指数法对各重金属的污染水平及潜在生态风险进行评价。结果表明:夜郎湖表层沉积物中 Zn、Pb、Cr、Ni、Cu、As 和 Cd 的平均含量分别为 141.75、83.76、54.97、38.60、36.61、9.47、1.50 mg·kg⁻¹,除 As 和 Cr 外,其他重金属含量明显高于贵州省沉积物地球化学背景值;Cr、Ni、Cu 和 As 以残渣态为主,所占比例分别为 52.56%~80.21%、30.09%~70.43%、38.05%~80.77%和 70.04%~94.89%,Pb、Zn 易还原态比例相对较高,Cd 的酸可交换态占 10.93%~49.15%,易还原态占 25.58%~62.49%,表现出很强的生物活性。从沉积物的空间分布来看,重金属活性高的地方绝对含量也高,且 Cu 与其他重金属含量均呈极显著相关关系,说明沉积物中重金属来源与网箱养鱼有很大关系。地累积指数法结果表明,该区域受 Pb 和 Cd 污染较为严重,部分可达到中度污染水平;潜在生态风险评估结果表明,Cd 是最主要的生态风险因子,沉积物中 Cd 在地球化学高背景下,可能受到网箱养鱼废弃物沉积的影响。研究区基本处于轻度到中度潜在生态危害水平,喀斯特地区重金属 Cd 的地球化学高背景与污染叠加对水生生态系统具有潜在环境风险。

关键词:沉积物;重金属;分布;形态;风险评价;夜郎湖

中图分类号:X820.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2017)06-1202-08 **doi:**10.11654/jaes.2016-1179

Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Yelang Lake

XU Meng¹, LIU Hong-yan^{1,2*}, LUO Kai¹, CUI Jun-li¹, LIU Yan-ping¹, LI Jia-fei¹

(1. College of Resource and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: Carbonate rock, which is typical heavy metals geochemical anomaly karst terrain, accounts for 73% of the land area in Guizhou Province. The geochemical background value of Cd is 0.31×10^{-6} , which is 2.5~3.5 times higher than the abundance value. Therefore, the accumulation, release, and environmental risks of heavy metals should be studied in this region. To evaluate pollution levels comprehensively, the concentration and speciation distributions of seven heavy metals (Zn, As, Cd, Cr, Ni, Cu, and Pb) were analyzed in surface sediments from Yelang Lake. The geoaccumulation index (I_{geo}) and the potential ecological risk index (RI) were used to assess the potential con-

收稿日期: 2016-09-12

作者简介: 徐梦(1991—),女,硕士研究生,主要研究方向为污染控制工程。E-mail: xmeng2006@163.com

* 通信作者: 刘鸿雁 E-mail: hongyan.l@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(41461097); 国家自然科学基金委员会-贵州省人民政府喀斯特科学研究中心项目(U1612442); 贵州省科技计划项目(黔科合 J 重大字[2015]2001); 贵州省教育厅重点实验室项目(黔教合 KY 字[2016]001); 研究生创新实践基地建设项目(贵大研 SJJJ[2015]004)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41461097); The Joint Projects of the National Natural Science Foundation of China and Karst Research Centre for Science in Guizhou Province, China (U1612442); The Key Program of Science and Technology of Guizhou Province, China (QianKeHe[2015]2001); The Key Laboratory of Education Department of Guizhou Province, China (QianJiaoHe[2016]001); The Construction of Innovation Practice Base of Postgraduates (Guizhou University SJJJ[2015]004)

tamination and the environmental risks associated with heavy metals. The results showed that the mean contents of Zn, Pb, Cr, Ni, Cu, As, and Cd in the surface sediments were 141.75, 83.76, 54.97, 38.60, 36.61, 9.47, and 1.50 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. These contents, excluding As and Cr, were higher than the geochemical background values of supergene sediments in Guizhou Province. Cr, Ni, Cu, and As in the sediments were dominated mainly by the residual fraction, which accounted for 52.56%~80.21%, 30.09%~70.43%, 38.05%~80.77%, and 70.04%~94.89%, respectively. The reducible fractions of Pb and Zn were higher than they were for the other metals, and the percentages of the exchangeable and reducible fractions of Cd were 10.93%~49.15% and 25.58%~62.49%, respectively. The I_{geo} showed that there were more serious degrees of Pb and Cd contamination in Yelang Lake. The RI showed that Cd is the main ecological risk factor, which was affected by sediment from the fish culture in net pen, and the pollution degree of heavy metals in the surface sediments from Yelang Lake represented light to moderate ecological harm. Therefore, Cd geochemical background levels in karst areas are a high potential environmental risk for aquatic areas.

Keywords: sediment; heavy metals; distribution; speciation; risk assessment; Yelang Lake

重金属是最严重的环境污染物之一,具有隐蔽性、长期性、不可逆转性等特点^[1],会通过生物富集和放大作用对水生生态系统及人类健康构成威胁^[2]。重金属进入水体后,可通过一系列物理化学方式沉淀于沉积物中^[3],当外界条件改变时,沉积物可将重金属重新释放到水体中,造成水体的二次污染。沉积物重金属风险主要用富集因子法、污染指数法、次生相富集系数法、地累积指数法和潜在生态危害指数法来评价。目前,长江流域的大多数湖泊已出现了不同程度重金属污染现象^[4-6],沉积物重金属污染已引起广泛关注。有研究表明百花湖水体受到重金属的严重污染,处于中等-很强水平的生态危害程度^[7],红枫湖沉积物重金属含量分布具有一定的区域特征,北湖湖区重金属高于南湖,Cd 是污染最为严重的重金属^[8]。

贵州省是典型的碳酸盐岩分布区域,碳酸盐岩出露面积约占全省面积的 73%,具有典型的重金属地球化学高背景特征:表生沉积物中的亲铜(硫)性成矿元素(Hg、Cd、Sb、As、Mo 为主,包括 Cu、Zn、Bi、Pb)呈强聚集的地球化学高背景;以 Mn、Co、Ni、Cr、V、Ti 为主的亲基性、相容元素呈次强聚集的地球化学较高背景^[9]。夜郎湖水库位于安顺市普定县境内(26°23'N, 105°48'E),是 1994 年蓄水的人工湖库,运行以来主要用以发电、防洪、旅游和供水,位于乌江流域的上游区域,主要的陆生地貌为农业用地,主要污染源为流域内的农业面源污染^[7]。由于该区域陡坡开荒面积大,耕作方式粗放,加上典型的石漠化问题,导致土壤贫瘠。目前,有研究表明夜郎湖不同形态 Hg 的分布特征是总汞、溶解态汞、颗粒态汞在夏季含量明显高于冬季和春季,而冬季和春季无明显差异,悬浮颗粒物(SPM)和硝酸盐(NO_3^-)对于不同形态 Hg 的季节分布起着重要作用^[10-11]。重金属作为非生物降解性污染物,对水生态环境及人体

健康都会构成威胁。夜郎湖是黔中安顺市主要饮用水源地,在部分河段进行网箱养鱼,有研究表明,网箱养鱼河段水中的 Cu 含量显著高于其他河段,渔业水与底泥中金属含量呈正相关^[12]。因此,本项目结合表层沉积物重金属含量分布特征,研究重金属的污染状态,探讨喀斯特地区重金属地球化学高背景下水生态系统的环境生态风险,对确保水质安全具有重要意义。

1 材料和方法

1.1 样品采集

2015 年 11 月于普定县夜郎湖,用沉积物采样器共采集 15 个表层沉积物样品,其中三岔河区域为夜郎湖的上游,大船边和沙冲区域为夜郎湖的中游,田坟、沙湾区域为夜郎湖的下游,均用 GPS 进行定位,采集地点见图 1。采集的样品用自封袋封装,放置于 4℃ 冰箱保存。采集沉积物前先采集该点的表层湖水,用便携式多参数水质分析仪(雷磁 DZB-718)现场测量上覆水的溶解氧(DO)、pH、氧化还原电位(Eh),结果见表 1。

1.2 分析测定方法

将采集的沉积物样品自然风干,充分混匀后用四分法取土,研钵磨细后过 100 目筛。重金属总量采用 HNO_3 -HF- HClO_4 三酸消解法^[13];形态分析采用 BCR 连续提取法^[14],用 ICP-MS(Thermo Fisher Scientific X2)测定重金属 Cu、Zn、Cd、Pb、Ni、Cr 和 As 的含量。

1.3 地累积指数法

地累积指数(Index of geoaccumulation, I_{geo})法是一种广泛应用于土壤和沉积物重金属污染程度的定量评价指标,该方法除考虑人为污染因素、地球化学背景值外,还考虑了自然成岩作用可能引起的背景值变动^[15],分级标准^[16]见表 2。评价公式为:

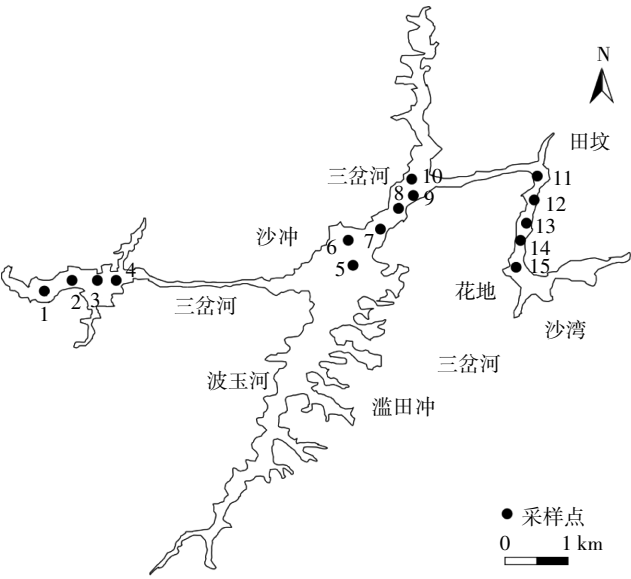


图 1 采样点分布图

Figure 1 Distribution of sediments sampling sites

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_i}{k \cdot B_i}$$

式中： C_i 为样品中元素 i 的实测浓度； k 为自然成岩作用可能引起的背景值变动（一般取值为 1.5）； B_i 为土壤中元素 i 的地球化学背景值。

1.4 潜在生态危害指数法

潜在生态危害指数法考虑了沉积物中重金属含量、生态效应、环境效应与毒性水平等因素^[17]，被国内外学者广泛应用于评价沉积物中的潜在生态风险，分级标准见表 3。根据该方法，第 i 种重金属的潜在生态风险系数 (E_i^p) 及多种重金属的潜在生态风险指数 (RI) 可分别表示为：

$$E_i^p = T_i^p \times C_i^p; RI = \sum E_i^p$$

式中： T_i^p 为重金属 i 的毒性响应系数（表 4）； C_i^p 为污染系数 ($C_i^p = \frac{C_i}{C_n}$ ，其中 C_i 为重金属 i 的实测值， C_n 为重金属 i 的背景值)。

2 结果与讨论

2.1 沉积物重金属总量分布特征及相关性分析

重金属含量分布特征如表 5 所示。重金属含量基

表 2 地累积指数分级标准

Table 2 Index of geoaccumulation and classification of pollution degree

等级	0	1	2	3	4	5	6
I_{geo} 值	≤ 0	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	>5
污染程度	无污染	轻度	偏中度	中度	偏重度	严重	极重

表 3 单一重金属潜在生态风险系数 (E_i^p) 和多种重金属潜在生态风险指数 (RI) 分级标准

Table 3 Criteria for potential ecological risk coefficients and potential ecological indices

污染程度	轻度	中等	强度	很强	极强
单一重金属潜在生态风险系数 (E_i^p)	<40	40~80	80~160	160~320	≥ 320
多种重金属潜在生态风险指数 (RI)	<150	150~300	300~600	≥ 600	—

表 4 重金属的毒性系数^[18]

Table 4 Toxicity coefficients of different heavy metals

项目	As	Zn	Cu	Cd	Cr	Pb	Ni
毒性系数	10	1	5	30	2	5	5

本呈现 $Zn>Pb>Cr>Ni>Cu>As>Cd$ 的趋势，除 As 和 Cr 外，沉积物重金属含量明显高于贵州省沉积物地球化学背景值。Zn 的均值可达 $141.75\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，是背景值的 1.58 倍；Pb、Cu、Ni 污染也很严重，均值分别为 83.77 、 36.61 、 $38.60\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，分别是背景值的 2.85、1.24、1.18 倍；Cd 污染最为严重，是背景值的 4.65 倍，与贵州省 Cd 的高地球化学背景值有关。何绍麟等^[19]通过对 46 965 件土壤和水系沉积物组合样进行统计分析，得到贵州省地表土壤和沉积物中 Cd 的地球化学背景值为 $0.31\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，是中国水系沉积物和土壤地球化学丰度值的 2.5~3.5 倍，表现出贵州地表介质中 Cd 的高背景含量分布特征。贵州省土壤 Cd 背景值为 $0.659\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，其中石灰（岩）土背景值高达 $1.115\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。同时大量研究表明贵州省水城县大湾镇是典型的煤矿区和铅锌矿区，Cd 具有高背景和高污染^[20-21]，众多学者对贵州省万山、丹寨等汞矿区的研究显示，在汞矿区重金属 Cd 含量高，迁移性强，土壤

表 1 夜郎湖上覆水基本理化性质

Table 1 Physical-chemical properties of overlying water

采样点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
DO/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	8.62	8.56	8.52	8.48	8.91	8.40	8.74	8.83	8.60	8.58	8.82	8.77	8.54	8.60	8.58
pH	8.11	8.42	8.18	8.12	8.41	8.12	8.13	8.19	8.32	8.21	8.36	8.43	8.28	8.38	8.35
Eh/mV	215	203	213	219	212	216	211	214	214	209	213	215	244	234	253

表 5 夜郎湖表层沉积物重金属含量分布特征

Table 5 Heavy metal contents of surface sediments in Yelang Lake

采样点	重金属含量/mg·kg ⁻¹						
	Zn	As	Cd	Cr	Ni	Cu	Pb
1	165.34	15.74	1.38	68.03	68.40	52.65	79.83
2	198.66	10.69	2.08	50.04	47.89	43.78	146.83
3	191.54	13.53	1.65	78.28	50.75	50.91	95.25
4	118.20	8.93	0.51	55.78	40.65	38.75	26.67
5	32.29	3.56	0.27	26.37	24.38	9.52	8.86
6	188.04	10.23	2.64	59.59	41.20	55.17	125.32
7	203.03	17.06	2.46	85.86	43.18	56.65	120.62
8	174.44	8.69	2.64	59.03	41.13	39.78	122.91
9	64.65	7.17	0.31	53.54	31.12	17.57	20.46
10	113.47	9.43	0.42	53.66	33.90	20.44	31.16
11	153.96	4.36	1.64	38.96	26.74	33.41	96.56
12	265.62	11.10	4.01	62.19	38.39	50.58	239.68
13	112.31	6.92	1.41	48.35	32.35	32.69	62.18
14	51.25	5.81	0.30	33.27	27.80	16.77	28.91
15	93.42	8.75	0.79	51.82	31.08	30.45	51.28
M±SD	141.75 ±65.14	9.47± 3.83	1.50± 1.11	54.97± 15.55	38.60± 11.32	36.61± 15.31	83.76± 61.75
变异系数	0.46	0.41	0.74	0.28	0.29	0.41	0.74
背景值 ^[9]	89.94	14.89	0.31	79.42	32.84	29.43	29.39
M/背景值	1.58	0.64	4.84	0.69	1.18	1.24	2.85

注:M 为平均值,SD 为标准偏差;背景值为贵州省沉积物地球化学背景值。

Note: M means mean value; SD means standard deviation; background values mean geochemical background values of supergene sediments in Guizhou Province.

存在严重的 Cd 复合污染^[22-23]。这还可能受农药、化肥使用的影响,化肥的生产从原料开采到加工,会带入重金属,尤其是磷肥中 Cd 含量较高^[24]。从空间分布看,重金属的变异系数达 28%~74%,这种空间分布的差异性极有可能与湖区的网箱养鱼有关,湖滨区一直存在网箱养鱼情况,一般每个网箱中都会加挂 CuSO₄ 晶体,靠 Cu²⁺来达到杀菌的目的,相关性分析数据表明 Cu 与其他重金属均呈极显著正相关关系,仅与 Zn 呈显著正相关关系;重金属空间分布差异也可能与湖区的人工利用方式及周边土地利用类型存在一定关系^[25],有研究表明不同土地利用类型土壤的重金属含量差异较大,设施菜地>露天菜地>大田>林地^[26]。Cd、Cr、Cu、Ni 在旱田中含量较高,其次是草地和水田^[27],人类活动会造成湖泊不同区域元素含量的差异性^[25]。同时重金属空间分布差异也可能受湖泊的水动力条件、迁移转化^[28]和降雨径流的影响,降雨径流本身就有非点源污染的某些属性和特征,而且受区域污染源、土壤

重金属含量分布不平衡的影响。Cd 和 Pb 的变异系数最大,均为 74%,属于高度变异,表明 Cd 和 Pb 的空间分布极不均匀。有研究表明 Pb 含量的分布差异性与大气沉降和流域侵蚀有关^[9],而本研究结果可能与当地村民使用含 Pb 汽油的机动船舶在湖泊上作业有关。其他 5 种重金属(Zn、As、Cu、Ni 和 Cr)的波动程度相对较小。重金属含量基本呈现出夜郎湖上游三岔河区域>大船边和沙冲区域>田坎和沙湾区域,表现出从上游到下游重金属含量减小的趋势。

为进一步分析夜郎湖沉积物中 7 种重金属的空间相关性,采用 SPSS 18.0 软件对其总量进行 Pearson 相关性分析,结果显示 As、Cr、Ni、Cu、Zn 之间具有极显著的相关关系(表 6),Cd 和 Pb 的相关性系数可达 0.970($P<0.01$),说明它们同源的可能性很大^[29]。

表 6 表层沉积物重金属含量相关性分析

Table 6 Pearson correlation coefficients of heavy metals in surface sediments

	R	Zn	As	Cd	Cr	Ni	Cu	Pb
Zn	1							
As		0.662**						
Cd		0.914**	0.452					
Cr		0.684**	0.922**	0.501				
Ni		0.571*	0.829**	0.341	1			
Cu		0.890*	0.804**	0.769**	0.691**	1		
Pb		0.925**	0.443	0.970**	0.447	0.739**	0.730**	1

注:** $P<0.01$; * $P<0.05$ 。

Note: **indicates $P<0.01$; * indicates $P<0.05$.

2.2 沉积物重金属形态分布特征

由图 2 可知,夜郎湖表层沉积物中 Cr、Ni、Cu、As 以残渣态为主,所占比例分别为 52.56%~80.21%、30.09%~70.43%、38.05%~80.77%、70.04%~94.89%,残渣态基本不为生物所利用,对沉积物中重金属的迁移和可利用性影响不大,一般认为对环境是安全的^[30]。因此,研究区受 Cr、Ni、Cu、As 污染较小。Zn 以易还原态和残渣态为主,所占比例分别为 21.89%~49.09%和 19.98%~69.92%,其中易还原态易受 pH 值、氧化还原条件的影响,可间接被生物利用,有较强的潜在可迁移性^[31]。Pb 以易还原态为主,所占比例为 46.37%~77.07%,Pb 易与铁锰氧化物结合形成稳定络合物,在氧化条件下不易释放,故 Pb 的易还原态所占比例最大可能与沉积物含氧条件较好有关^[32]。Cd 以酸可交换态和易还原态为主,所占比例分别为 10.93%~49.15%,25.58%~62.49%,在 7 种重金属中 Cd 的酸可交换态

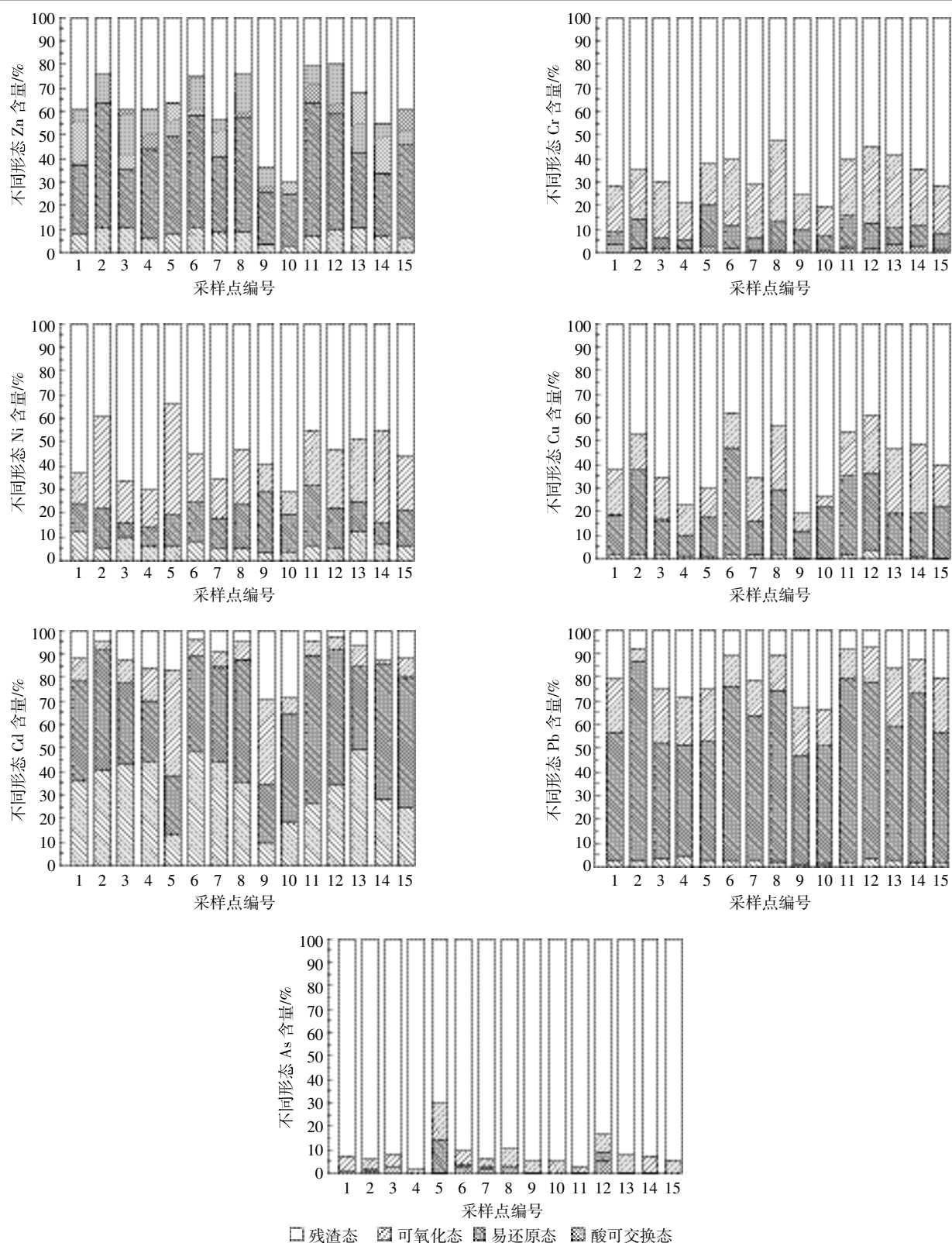


图2 不同形态重金属含量分布图

Figure 2 Fraction distribution of heavy metals in sediments

所占比列最高,与臧飞等^[32]研究结果一致,说明 Cd 相对于其他元素更易迁移转化,同时具有较高的生物有

效性^[33]。研究区内 Pb 和 Cd 污染较为严重,有研究表明在受污染的区域残渣态重金属含量较低,主要是由

于外源重金属易于转化为具有活性的形态^[34]。

可氧化态在 7 种元素中含量也相对较高,在 Zn、Cr、Ni、Cu、Cd、Pb 和 As 所占比例(平均值)分别为 17.23%、22.74%、23.27%、17.83%、11.75%、17.73% 和 6.01%,沉积物中有机质含量普遍较高,有机物在微生物的作用下会发生矿化分解,使部分可氧化态重金属释放进入上覆水或者被水生生物吸收,同时也会使水-沉积物界面的氧化还原条件及酸碱度发生变化,进而使可氧化态重金属迁移转化为生物利用潜力较大的酸可交换态和易还原态^[29]。

从重金属空间分布来看,一般重金属含量高的地方其活性较高的酸可交换态、易还原态及可氧化态都相对较高,如第 2、7、8、12 采样点,这极有可能与网箱

养鱼的湖底养殖废弃物沉积有关。而重金属含量低的地方酸可交换态、易还原态及可氧化态相对较低,残渣态较高,说明其受水库建设蓄水前土地利用方式的影响相对较大。

2.3 沉积物重金属生态风险评估

2.3.1 沉积物重金属的地累积指数评价

以贵州省沉积物地球化学背景值为参考,夜郎湖表层沉积物各重金属的 I_{geo} 范围(平均值)分别为 Zn: $-2.06\sim 0.98(-0.11)$;As: $-2.65\sim -0.39(-1.36)$;Cd: $-0.63\sim 2.50(1.22)$;Cr: $-1.84\sim -0.47(-1.17)$;Ni: $-0.89\sim 0.47(-0.40)$;Cu: $-0.20\sim 0.36(-0.43)$;Pb: $-2.31\sim 2.44(0.48)$ 。As 和 Cr 处于无污染水平,Zn、Ni、Cu 处于无污染到轻度污染水平,Pb 和 Cd 污染较严重,且跨度较大,部分可达到中等污染。如图 3 所示,污染程度排序为 $Cd>Pb>Zn>Cu>Ni>Cr>As$,与沉积物中重金属形态分布有关。

2.3.2 沉积物重金属的潜在生态危害指数评价

如表 7 所示,重金属潜在生态风险系数(E_i^r)平均值排序为 $Cd>Pb>As>Cu>Ni>Zn>Cr$,其中 Cd 的潜在生态风险系数均值分别是 Pb、As、Cu、Ni、Zn 和 Cr 的 10、22、23、24、91、105 倍,表明 Cd 对潜在生态风险指数的影响程度远高于其他重金属。Zn、As、Cr、Ni、Cu 的潜在生态风险系数均小于 40,为轻度污染;Pb 除采样点 12 处于中等污染水平外,其他采样点均为轻度污染;Cd 大部分为重度到很强污染,

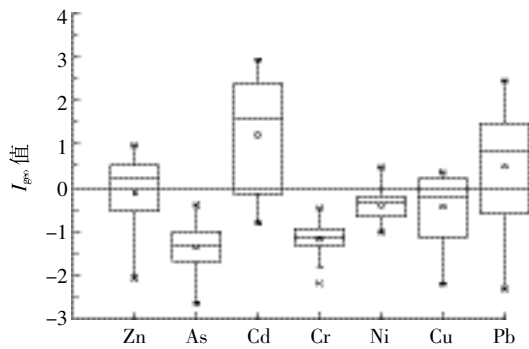


图 3 表层沉积物地累积指数箱线分布图

Figure 3 Box-and-whisker plots for geo-accumulation index(I_{geo}) of heavy metals in surface sediments

表 7 沉积物重金属潜在生态风险评价

Table 7 The potential ecological risk of heavy metals in surface sediments

采样点	潜在生态风险系数(E_i^r)							潜在生态风险指数(RI)	污染等级
	Zn	As	Cd	Cr	Ni	Cu	Pb		
1	1.84	10.57	133.58	1.71	10.41	8.94	13.58	180.63	中等
2	2.21	7.18	200.89	1.26	7.29	7.44	24.98	251.25	中等
3	2.13	9.09	159.41	1.97	7.73	8.65	16.20	205.18	中等
4	1.31	6.00	49.66	1.40	6.19	6.58	4.54	75.68	轻度
5	0.36	2.39	25.81	0.66	3.71	1.62	1.51	36.06	轻度
6	2.09	6.87	255.39	1.50	6.27	9.37	21.32	302.81	强度
7	2.26	11.46	238.16	2.16	6.57	9.62	20.52	290.75	中等
8	1.94	5.83	255.78	1.49	6.26	6.76	20.91	298.97	中等
9	0.72	4.81	29.53	1.35	4.74	2.98	3.48	47.61	轻度
10	1.26	6.33	40.95	1.35	5.16	3.47	5.30	63.82	轻度
11	1.71	2.93	158.43	0.98	4.07	5.68	16.43	190.23	中等
12	2.95	7.46	388.45	1.57	5.85	8.59	40.78	455.65	强度
13	1.25	4.65	136.06	1.22	4.93	5.55	10.58	164.24	中等
14	0.57	3.90	29.18	0.84	4.23	2.85	4.92	46.49	轻度
15	1.04	5.88	76.81	1.30	4.73	5.17	8.72	103.65	轻度
平均值	1.58	6.36	145.21	1.38	5.88	6.22	14.25	180.87	中等

平均值处于强度污染等级。可见,夜郎湖沉积物中Cd是最主要的潜在生态危害因子,表层沉积物中Cd含量远高于地球化学背景值,且毒性系数较高。潜在生态风险指数(RI)表明,研究区基本处于轻度到中等潜在生态危害水平。

3 结论

(1)夜郎湖表层沉积物重金属含量基本呈现 $Zn > Pb > Cr > Ni > Cu > As > Cd$ 的趋势,Cd和Pb的空间分布极不均匀,Zn、As、Cu、Ni和Cr的波动程度相对较小。除As和Cr外,研究区沉积物重金属含量明显高于贵州省沉积物地球化学背景值,Pb和Cd含量分别是背景值的2.85倍和4.84倍,污染较为严重。

(2)Cr、Ni、Cu、As以残渣态为主,Pb以易还原态为主,Zn以易还原态和残渣态为主,Cd以酸可交换态和易还原态为主。研究区内Cd和Pb具有较高的潜在生态风险。

(3)空间上,重金属活性高的地方其绝对含量也高,且Cu与其他重金属(除Zn外)均呈极显著相关关系,说明沉积物中重金属来源与网箱养鱼有很大关系。

(4)地累积指数法表明,该区As和Cr处于无污染水平,Zn、Ni、Cu为无污染到轻度污染,Pb和Cd污染较为严重,部分达到中等污染水平。潜在生态危害指数评价结果表明,上游区域呈现中等污染水平,中下游污染较为严重,为轻度到强度污染,Cd是最主要的潜在生态危害因子,沉积物中Cd在地球化学高背景下,可能受到网箱养鱼废弃物沉积的影响,夜郎湖基本处于轻度到中等潜在生态危害水平。

参考文献:

- [1] Owen R B, Sandhu N. Heavy metal accumulation and anthropogenic impact on Tolo Harbour, Hongkong[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2000, 40(2): 174-180.
- [2] Varol M, Şen B. Assessment of nutrient and heavy metal contamination in surface water and sediments of the upper Tigris River, Turkey[J]. *Catena*, 2012, 92(1): 1-10.
- [3] 张伯镇, 雷 沛, 潘延安, 等. 重庆主城区次级河流表层沉积物重金属污染特征及风险评价[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(7): 2185-2192.
- [4] ZHANG Bo-zhen, LEI Pei, Pan Yan-an, et al. Pollution and ecological risk assessment of heavy metals in the surface sediments from the tributaries in the main urban districts, Chongqing City[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(7): 2185-2192.
- [5] 王 丹, 孟 鑫, 张 洪, 等. 梁子湖沉积物重金属污染现状分析及风险评价[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(6): 1901-1909.
- [6] WANG Dan, MENG Xin, ZHANG Hong, et al. Pollution analysis and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Liangzi Lake[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(6): 1901-1909.
- [7] 李玉斌, 冯 流, 刘征涛, 等. 中国主要淡水湖泊沉积物中重金属生态风险研究[J]. *环境科学与技术*, 2012, 35(2): 200-205.
- [8] LI Yu-bin, FENG Liu, LIU Zheng-tao, et al. Ecological risk assessment of sediment heavy metals in main lakes of China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 35(2): 200-205.
- [9] 刘 成, 邵世光, 范成新, 等. 巢湖重污染汇流湾区沉积物重金属污染特征及风险评价[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(4): 1031-1037.
- [10] LIU Cheng, SHAO Shi-guang, FAN Cheng-xin, et al. Pollution status and risk assessment of heavy metal in the sediment of the severe polluted confluence area of Lake Chaohu[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(4): 1031-1037.
- [11] 田林锋, 胡继伟, 罗桂林, 等. 贵州百花湖沉积物重金属稳定性及潜在生态风险性研究[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(4): 885-894.
- [12] TIAN Lin-feng, HU Ji-wei, LUO Gui-lin, et al. Ecological risk and stability of heavy metals in sediments from Lake Baihua in Guizhou Province[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(4): 885-894.
- [13] 黄先飞, 秦樊欣, 胡继伟, 等. 红枫湖沉积物中重金属污染特征与生态危害风险评价[J]. *环境科学研究*, 2008, 21(2): 18-23.
- [14] HUANG Xian-fei, QIN Fan-xin, HU Ji-wei, et al. Pollution characteristic and ecological risk assessment of heavy metals in superficial sediments of Hongfeng Lake[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(2): 18-23.
- [15] 何绍麟. 贵州表生沉积物地球化学背景特征[J]. *贵州地质*, 1998, 15(2): 149-156.
- [16] HE Shao-lin. Geochemical background of supergene sediments in Guizhou[J]. *Guizhou Geology*, 1998, 15(2): 149-156.
- [17] 张军方, 冯新斌, 闫海鱼, 等. 夜郎湖水体不同形态汞的时空分布[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(5): 969-975.
- [18] ZHANG Jun-fang, FENG Xin-bin, YAN Hai-yu, et al. Spatial and temporal distribution of mercury species in water in Yelanghu Reservoir[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(5): 969-975.
- [19] 张军方, 冯新斌, 闫海鱼, 等. 夜郎湖水体甲基汞的分布模式初步研究[J]. *地球与环境*, 2009, 37(3): 293-298.
- [20] ZHANG Jun-fang, FENG Xin-bin, YAN Hai-yu, et al. Preliminary study on methyl mercury distribution in Yelanghu Reservoir[J]. *Earth and Environment*, 2009, 37(3): 293-298.
- [21] 赵中金, 黄 昀, 李其林, 等. 重庆市渔业环境质量现状及污染特征探析[J]. *中国生态农业学报*, 2006, 14(1): 176-180.
- [22] ZHAO Zhong-jin, HUANG Yun, LI Qi-lin, et al. Quality situation and pollution characteristics of fishery environment in Chongqing[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, 14(1): 176-180.
- [23] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. *Analytical Chemistry*, 1979, 51(7): 844-851.
- [24] Davidson C M, Duncan A L, Littlejohn D, et al. A critical evaluation of the three-stage BCR sequential extraction procedure to assess the potential mobility and toxicity of heavy metals in industrially-contaminated land[J]. *Analytica Chimica Acta*, 1998, 363(1): 45-55.

- [15] 韩平, 王纪华, 冯晓元, 等. 北京顺义区土壤重金属污染生态风险评估研究[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(1): 103–109.
HAN Ping, WANG Ji-hua, FENG Xiao-yuan, et al. Ecological risk assessment of heavy metals in soils in Shunyi, Beijing[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(1): 103–109.
- [16] 张兆永, 吉力力·阿不都外力, 姜逢清. 艾比湖表层沉积物重金属的来源、污染和潜在生态风险研究[J]. 环境科学, 2015, 36(2): 490–496.
ZHANG Zhao-yong, JILILI Abuduwalili, JIANG Feng-qing. Sources, pollution statue and potential ecological risk of heavy metals in surface sediments of Aibi Lake, northwest China[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(2): 490–496.
- [17] Hakanson L. An ecology risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975–1001.
- [18] Forstner U. Lecture notes in earth sciences(contaminated sediments) [M]. Berlin: Springer Verlag, 1989: 107–109.
- [19] 何绍麟, 龙超林, 刘应忠, 等. 贵州地表土壤及沉积物中镉的地球化学与环境问题[J]. 贵州地质, 2004, 21(4): 245–250.
HE Shao-lin, LONG Chao-lin, LIU Ying-zhong, et al. Geochemistry and environment of the cadmium in the soil and sediments at the surface of Guizhou Province[J]. *Guizhou geology*, 2004, 21(4): 245–250.
- [20] 龙家襄, 刘鸿雁, 刘方, 等. 贵州省典型污染区土壤中镉的空间分布及影响机制[J]. 土壤通报, 2014, 45(5): 1252–1259.
LONG Jia-huan, LIU Hong-yan, LIU Fang, et al. Spatial distribution and effect mechanisms of cadmium in soils in typical contaminated areas, Guizhou Province[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(5): 1252–1259.
- [21] 刘鸿雁, 邢丹, 肖玖军, 等. 铅锌矿渣场植被自然演替与基质的交互效应[J]. 应用生态学报, 2010, 21(12): 3217–3224.
LIU Hong-yan, XING Dan, XIAO Jiu-jun, et al. Interactions between natural vegetation succession and waste residue in lead-zinc tailings deposited sites[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(12): 3217–3224.
- [22] 仇广乐, 冯新斌, 王少锋, 等. 贵州汞矿矿区不同位置土壤中总汞和甲基汞污染特征的研究[J]. 环境科学, 2006, 27(3): 551–555.
QIU Guang-le, FENG Xin-bin, WANG Shao-feng, et al. Total mercury and methyl mercury in soils collected from Guizhou Hg-mined areas[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(3): 551–555.
- [23] 于萍萍, 刘鸿雁, 郭丹丹, 等. 贵州典型汞矿区作物对汞的积累特征及品质差异[J]. 贵州农业科学, 2012, 40(3): 194–198.
YU Ping-ping, LIU Hong-yan, GUO Dan-dan, et al. Hg accumulation characteristics and quality differences of crops in typical Hg mining areas in Guizhou[J]. *Guizhou Agricultural Science*, 2012, 40(3): 194–198.
- [24] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008–1010.
- [25] Olías M, Ceron J C, Moral F, et al. Water quality of the Guadamar River after the Aznalcollar spill (SW Spain)[J]. *Chemosphere*, 2006, 62(2): 213–225.
- [26] 白玲玉, 曾希柏, 李莲芳, 等. 不同农业利用方式对土壤重金属累积的影响及原因分析[J]. 中国农业科学, 2010, 43(1): 96–104.
BAI Ling-yu, ZENG Xi-bai, LI Lian-fang, et al. Effects of land use on heavy metal accumulation in soils and source analysis[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(1): 96–104.
- [27] 赵淑苹, 陈立新. 大庆地区不同土地利用类型土壤重金属分析及生态危害评价[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 195–199.
ZHAO Shu-ping, CHEN Li-xin. Soil heavy content analysis and ecological risk assessment of different landuse types in Daqing region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(5): 195–199.
- [28] 董金秀, 乔胜英, 谢淑云. 梁子湖表层沉积物元素分布模式及地球化学意义[J]. 地质科技情报, 2010, 29(3): 91–96.
DONG Jin-xiu, QIAO Sheng-ying, XIE Shu-yun. Distribution model and geochemical characteristics of the elements in the surface sediments of Liangzi Lake[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2010, 29(3): 91–96.
- [29] 杨陈, 王沛芳, 刘佳佳, 等. 太湖沉积物中重金属的垂向分布特征及迁移转化[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(3): 548–557.
YANG Chen, WANG Pei-fang, LIU Jia-jia, et al. Vertical distribution and migration of heavy metals in sediment cores of Taihu Lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(3): 548–557.
- [30] Teasdale P R, Apte S C, Ford P W, et al. Geochemical cycling and speciation of copper in waters and sediments of Macquarie Harbour, Western Tasmania[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2003, 57(3): 475–487.
- [31] 王沛芳, 邹丽敏, 王超, 等. 玄武湖沉积物中重金属的垂直分布[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(5): 547–553.
WANG Pei-fang, ZOU Li-Min, WANG Chao, et al. Vertical distribution of fractions of Pb, Cd, Ni, Zn, Cr and Mo in sediments of an urban lake[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, 19(5): 547–553.
- [32] 臧飞, 王胜利, 南忠仁, 等. 工矿型绿洲城郊排污渠沉积物重金属的形态分布规律及风险评价[J]. 环境科学, 2015, 26(2): 497–505.
ZANG Fei, WANG Sheng-li, NAN Zhong-ren, et al. Speciation distribution and risk assessment of heavy metals in sediments in suburban outfall of industrial oasis region[J]. *Environmental Science*, 2015, 26(2): 497–505.
- [33] 黄兴星, 朱先芳, 唐磊, 等. 密云水库上游某铁矿区土壤重金属含量及形态研究[J]. 中国环境科学, 2012, 32(9): 1632–1639.
HUANG Xing-xing, ZHU Xian-fang, TANG Lei, et al. Studies on the distribution and chemical speciation of heavy metals in a iron mine soil of the upstream area of Miyun Reservoir, Beijing[J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(9): 1632–1639.
- [34] Nyamangara J. Use of sequential extraction to evaluate zinc and copper in a soil amended with sewage sludge and inorganic metal salts[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1998, 69(2): 135–141.