浙 江 农 林 大 学 学 报，2021，**38**(4)：746–755
Journal of Zhejiang A&F University
doi: 10.11833/j.issn.2095-0756.20200547

普者黑流域表层水和沉积物中重金属污染特征及风险评价

彭　博[1]，刘　鹏[1]，王　妍[1]，张叶飞[2]，杨　波[2]

（1. 西南林业大学 生态与环境学院，云南 昆明 650224；2. 西南林业大学 石漠化研究院，云南 昆明 650224）

摘要：【目的】普者黑流域拥有独特的自然景观和特殊的岩溶湖泊生态系统，研究其湖泊沉积物中重金属分布特征及生态风险评价对该区域湖泊水环境保护及污染防治具有重要意义。**【方法】**采用地累积指数和潜在生态风险指数分析了流域内表层水及沉积物中 6 类重金属：砷 (As)、铬 (Cr)、铜 (Cu)、锌 (Zn)、锰 (Mn) 和镍 (Ni) 水平，并对重金属生态风险进行评价及源头追溯。**【结果】**①普者黑流域表层水中重金属质量浓度远低于《地表水环境质量标准》Ⅰ类标准限值。②沉积物中重金属的平均质量分数均高于其对应的背景值 (Cr 除外)。③沉淀物重金属质量分数平均值从大到小依次为 Mn、Zn、Cu、Cr、Ni、As，分别是各自背景值的 1.68、1.33、3.33、0.96、1.01 和 1.59 倍。其中 Cr 污染程度最低，有 96.6% 的采样点为清洁水平；As 偏中度污染，是 Mn 的 1.8 倍；Mn 的清洁水平和轻度污染相当。④单项重金属生态风险指数从大到小依次为 As、Cu、Ni、Cr、Mn、Zn，潜在生态风险指数值均小于 40，风险较低。**【结论】**As 和 Cu 是普者黑流域污染范围最大、程度最高的 2 类重金属，Cr、Ni 和 Zn 大多为无污染；潜在生态风险评价发现：平均生态风险指数为 31.7，As 和 Cu 贡献率最大，所有重金属均处于低生态风险；从空间分布来看，流域下段国家湿地公园及 3 条入湖河流是各类重金属主要汇集区域。图 6 表 7 参 40

关键词：普者黑；沉积物；重金属；地累积指数；潜在生态风险

中图分类号：X522　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**2095-0756(2021)04-0746-10

Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in surface water and sediments of Puzhehei watershed

PENG Bo[1]，LIU Peng[1]，WANG Yan[1]，ZHANG Yefei[2]，YANG Bo[2]

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

Abstract: [**Objective**] Puzhehei watershed has a unique natural landscape and a special karst lake ecosystem. This study aims to investigate the distribution characteristics of heavy metals in lake sediments and make ecological risk assessment, which is of great significance to the protection and pollution control of lake water environment in the region. [**Method**] The levels of six types of heavy metals (As, Cr, Cu, Zn, Mn, and Ni) in surface water and sediments in the basin were analyzed by geo-accumulation index evaluation and potential ecological risk index, and ecological risks of heavy metals were evaluated and the source was traced back. [**Result**] (1) The mass concentration of heavy metals in the surface water of Puzhehei Basin was far below the Class Ⅰ standard limit of “Surface Water Environmental Quality”. (2)The average mass fraction of heavy metal in the sediments was higher than their corresponding background values (except Cr). (3)The average value of heavy metals in the sediments detected was Mn, Zn, Cu, Cr, Ni and As in descending order, which were 1.68, 1.33, 3.33, 0.96, 1.01 and 1.59 times of their background values, respectively. The pollution degree of Ni was

收稿日期：2020-08-25；修回日期：2021-04-01

基金项目：国家自然科学基金资助项目 (31660139，31760245)

作者简介：彭博 (ORCID: 0000-0002-4843-4647)，从事脆弱生态系统恢复研究。E-mail: penpoer@163.com。通信作者：王妍 (ORCID: 0000-0002-7835-9246)，副教授，博士，从事脆弱生态系统修复研究。E-mail: wycaf@126.com

the lowest, with 96.6% of the sampling points being clean. As was moderately polluted, which was 1.8 times of Mn, and the clean level of Mn was similar to that of light pollution. (4)The ecological risk index of individual heavy metal in descending order was As, Cu, Ni, Cr, Mn and Zn, and the potential ecological risk index values were all less than 40, indicating low risk. [**Conclusion**] As and Cu are the two heavy metals with the largest pollution range and the highest degree in Puzhehei watershed, while Cr, Ni and Zn are mostly pollution-free. In the potential ecological risk evaluation, the average ecological risk index is 31.7. As and Cu contribute most to this risk, and all heavy metals are at low ecological risk. From the perspective of spatial distribution, the National Wetland Park in the lower reaches of the river basin and the estuaries of the three rivers are the main gathering areas of heavy metals. [Ch, 6 fig. 7 tab. 40 ref.]

Key words: Puzhehei; sediments; heavy metal; geo-accumulation index; potential ecological risk

沉积物是水环境的重要组成部分，既是水体污染的“源”，也是污染物的“汇”[1]，沉积物满足一定条件和经过一系列反应后，会吸附污染物并转移至悬浮颗粒及周围水体中造成污染[2−3]。重金属作为重要的环境污染物，在受污染水环境中分布相对稳定，具有较强且持久的生物毒性及食物链富集放大效应等特征[4]。近年来研究热点多侧重于水污染评价、沉积物重金属污染等方面[5−8]，而沉积物是水环境中重金属污染程度的“指示剂”[9]，从侧面反映水体重金属污染程度，因此探析水和沉积物整体的污染特征，对揭示流域重金属污染及风险评价具有重要意义。普者黑流域地处珠江源头和长江、红河上游，流域内分布有 54 个湖泊，312 座孤峰，83 个溶洞，15 条河流和 120 km 的地下暗河，是云南峰丛洼地分布最为集中的区域，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，在西南部滇黔桂喀斯特地貌中极具代表性，形成了独特的自然景观和特殊的岩溶湖泊生态系统，具有较高的研究及保护价值。近年来该区域的研究主要集中在景观格局演变[10−11]、沉积物磷赋存形态[12]、水环境质量评价方面[13−14]。本研究利用地累积指数和潜在生态风险指数等方法，对该流域表层水和沉积物的重金属污染水平及生态风险进行评价和源头追溯，以期为普者黑流域重金属污染控制、生态修复等提供理论依据。

1　研究地区与研究方法

1.1　研究区概况

普者黑流域位于滇东南丘北县境内 (24°05′~24°12′N，103°55′~104°13′E)，流域面积 388 km^2，海拔 1 446~1 462 m，是典型的湖泊、孤峰、峰林复合生态系统。湖区容水总量约 7 000 万m^3，水深 3~8 m，为南盘江上游，属于珠江水系。该区属亚热带季风气候，降水多在 5−10 月，年平均气温为 16.4 ℃，年平均降水量为 1 206.8 mm。流域内有板桥河 (BQ)、增产水库 (ZC) 和响水河 (XS)3 条主要入湖河流。

1.2　样品采集与处理

样品采集于 2018 年 4 月。利用 1∶50 000 数字高程模型 (DEM) 数据，在 ArcGIS 10.2 水文分析模块支持下，将整个流域划分成 26 个子流域，根据每个子流域的出水口和入水口情况，设置 30 个取样点。其中，湖泊北部 (1~6)、中部 (7~12) 和南部 (13~18) 各 6 个，共计 18 个样点；响水河 (XS-1、XS-2、XS-3、XS-4、XS-5)5 个；增产水库 (ZC-1、ZC-2、ZC-3、ZC-4)4 个；板桥河 (BQ-1、BQ-2、BQ-3)3 个 (图 1)。

取样前，预先用王水 [V(盐酸)∶V(硝酸)=3∶1] 浸泡过的洁净采样瓶，用表层水 (水下约 50 cm) 润洗 3~4 次；表层水使用 450 mL 塑料瓶采集。使用活塞式柱状底泥采样器，取原状土柱后，收集 0~15 cm 表层沉积物土样，将混合后样品放入自封袋中冷冻保存。室温风干后用玛瑙研钵研磨至粉状，经 100 目尼龙筛网筛分。

采用离子体光谱仪 (美国安捷伦 ICP-OES700) 进行重金属元素：砷 (As)、铬 (Cr)、铜 (Cu)、锌 (Zn)、锰 (Mn) 和镍 (Ni) 的总量测定；总磷 (TP) 采用酸熔-钼锑抗比色法测定；总氮 (TN) 采用半微量凯式法测定；有机质 (OM) 采用重铬酸钾容量法[14−15] 测定。

1.3　评价方法

1.3.1　*地累积指数法*　地累积指数法[16] 考虑了人为活动、环境地球化学背景值以及自然地质过程引起的

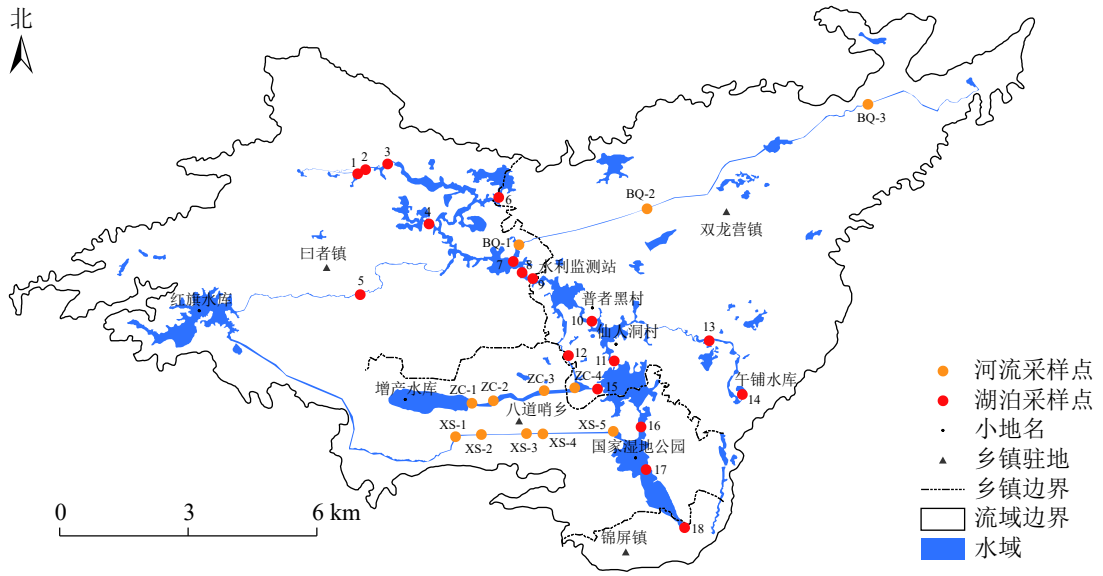

图 1 普者黑流域采样点分布示意图

Figure 1 Schematic diagram of the distribution of sampling points in the Puzhehei watershed

背景值变动，直观得出重金属污染级别。计算公式为：

$$I_{geo}=\log_2(w_i/kB_i)。\quad (1)$$

式 (1) 中：I_{geo} 为地累积指数；w_i 为沉积物中重金属 i 的质量分数 (mg·kg^{-1})；B_i为沉积物中重金属 i 的地球化学背景值 (mg·kg^{-1})，本研究采用全国土壤重金属环境背景值[17]，As、Cr、Cu、Zn、Mn、Ni 的背景值分别为 18.4、65.2、46.3、89.7、626、51 mg·kg^{-1}；k 是由于成岩作用可能会引起背景值的变动而设定的常数，一般取 1.5。根据 I_{geo} 将沉积物中重金属的污染程度分为 7 个等级[18](表 1)。

表 1 重金属污染程度与地累积指数 (I_{geo}) 的等级划分

Table 1 Degree of heavy metal pollution and the classification of geoaccumulation index (I_{geo})

地累积指数(I_{geo})	级别	污染程度
$I_{geo}\leqslant 0$	0	清洁水平
$0<I_{geo}\leqslant 1$	1	轻度污染
$1<I_{geo}\leqslant 2$	2	偏中度污染
$2<I_{geo}\leqslant 3$	3	中度污染
$3<I_{geo}\leqslant 4$	4	偏重度污染
$4<I_{geo}\leqslant 5$	5	重度污染
$I_{geo}>5$	6	严重污染

1.3.2 潜在生态风险指数法 使用 HAKANSON[19] 的方法对表层沉积物重金属进行潜在生态风险评价，该方法考虑了重金属含量、污染物种类、毒性水平和水体对金属污染的敏感性等 4 个影响因素[20]；潜在生态风险指数 (I_R) 计算方法如下：

$$I_R=\sum_{i=1}^{n}E_r^i=\sum_{i=1}^{n}T_r^i\times C_f^i=\sum_{i=1}^{n}T_r^i\times\frac{C_i}{C_n^i}。\quad (2)$$

式 (2) 中：E_r^i为重金属 i 的潜在生态风险指数；T_r^i为重金属 i 的毒性系数；C_f^i为重金属 i 相对参比值的污染指数；C_i 为重金属 i 的实测浓度；C_n^i为重金属 i 的评价参比值。其中，As、Cr、Cu、Zn、Mn、Ni 的毒性系数分别为 10、2、5、1、1、5[21]；根据 I_R 的大小，将重金属综合潜在风险分为 5 个等级 (表 2)。

表 2 潜在生态风险评价指数与分级标准

Table 2 Potential ecological risk assessment index and classification criteria

单项潜在生态风险指数(E_r^i)	单项潜在生态风险等级	潜在生态风险指数(I_R)	综合潜在生态风险等级
$E_r^i<40$	低(Ⅰ)	$I_R<150$	低(Ⅰ)
$40\leqslant E_r^i<80$	中等(Ⅱ)	$150\leqslant I_R<300$	中等(Ⅱ)
$80\leqslant E_r^i<160$	较重(Ⅲ)	$300\leqslant I_R<600$	较重(Ⅲ)
$160\leqslant E_r^i<320$	重(Ⅳ)	$600\leqslant I_R<1\,200$	重(Ⅳ)
$E_r^i\geqslant 320$	严重(Ⅴ)	$I_R\geqslant 1\,200$	严重(Ⅴ)

1.4 数据处理

通过 Excel 预处理数据；使用 SPSS 19.0 进行主成分分析和聚类分析；利用 ArcGIS 10.2 绘制重金属元素空间分布图；通过 Pearson 相关系数分析各元素之间的相关性。

2　结果与分析

2.1　表层水和沉积物的重金属特征

由表 3 可知：表层水的重金属质量浓度平均值低于 GB 3838−2002《地表水环境质量标准》的 I 类标准限值，从大到小依次为 As、Mn、Ni、Cu，Cr 和 Zn 未检出。可见，该流域表层水的重金属占水质成分较低，重金属在该流域表层水内不是主要污染因子。

表 3　表层水的重金属特征

Table 3　Descriptive statistics of heavy metal content in surface water

元素	最小值/(μg·L^{-1})	最大值/(μg·L^{-1})	平均值/(μg·L^{-1})	标准差/(μg·L^{-1})	变异系数/%	地表水 I 类标准/(μg·L^{-1})	超标率/%
As	3.38	41.89	17.64	10.49	0.59	50	0
Cr	–	–	–	–	–	10	0
Cu	0.02	10.66	2.39	2.84	1.19	10	6.67
Zn	–	–	–	–	–	50	0
Mn	0.16	59.11	9.78	14.56	1.49	100	3.33
Ni	2.39	18.96	6.71	4.95	0.73	20	0

说明：–表示未检出。Cr、Zn检出限分别为4和10 μg·L^{-1}

由表 4 可知：表层沉积物的重金属质量分数从大到小依次为 Mn、Zn、Cu、Cr、Ni、As，分别是各自背景值的 1.68、1.33、3.33、0.96、1.01 和 1.59 倍，除 Cr 外，均高于全国土壤重金属背景值，且 As、Cu、Mn 和 Zn 有超过 50% 的样点高于相应背景值，Cu 有 90% 的样点超过背景值，Cr、Ni 分别有 36.7% 和 46.7% 的样点超过背景值。与国内其他湖泊相比，研究区 Cr、Ni、Zn 都处于较低水平，As 和 Cu 处于较高水平；其中，As 质量分数是太湖的 2.3 倍，Cu 质量分数是阳澄湖和洞庭湖的 1.9 倍。Mn 质量分数仍处于较高水平，其平均值为全国土壤背景值的 1.8 倍，为阳宗海的 1.5 倍。除 As 和 Cu 外，流域其余 4 类重金属虽然受不同程度人为活动的影响，但重金属质量分数较低，污染贡献率小。

表 4　不同湖泊表层沉积物的重金属对比

Table 4　Comparison of heavy metal contents in surface sediments of different lakes

研究区	重金属质量分数/(mg·kg^{-1})					
	As	Cr	Cu	Ni	Zn	Mn
滇池[22]	29.3	129.2	100.2		176.3	
阳宗海[23]	31.4	97.6	145.8	55.1	149.2	617.9
阳澄湖[24]	27.5	62.6	35.0	47.6	141.0	
洞庭湖[25]	21.4	50.8	37.0		142.3	
太湖[26]	13.0	97.0	53.0	48.0	192.0	
普者黑(本研究)	29.4	55.2	68.9	40.5	107.3	907.2
全国土壤背景值	18.4	57.3	20.7		80.7	540.0
土壤环境质量 I 类标准	15.0	90.0	35.0	40.0	100.0	

由图 2 可知：表层沉积物中 Cr、Ni 和 Zn 的空间分布具有一致性，在湖泊不同断面上由北向南呈逐渐增加的趋势，高值均出现在增产水库、响水河和湖泊下段国家湿地公园区域。流域北部的板桥河中 As 和 Mn 也较高，Cu 空间分布则不同，除 5、12 和 14 号采样点外，所有采样点 Cu 均高于土壤背景值。As 平均质量分数在空间上从大到小依次为北部、南部、中部，在 3 条入湖河流中从大到小依次为 XS、ZC、BQ；Cu 平均质量分数在空间上从大到小依次为中部、南部、北部，在 3 条入湖河流中从大到小依次为 XS、ZC、BQ；由此可见，入湖河流重金属质量分数显著高于湖泊主体，是污染物传输的重要通道。Mn 和 Ni 的变异系数分别为 47.3% 和 53.8%，As、Cr、Cu 和 Zn 的变异系数超过了 60%，分别为 64.4%、65.1%、61.9% 和 62.3%，表明重金属质量分数存在空间差异性。当变异系数超过 20% 时，人类活动是导致重金属空间分布存在差异的主要驱动因子[27]。

2.2　沉积物重金属的污染现状评价

2.2.1　地累积指数 (I_{geo}) 法评价结果　地累积指数评价表明：Cr、Ni 和 Zn 的 I_{geo} 均小于 1，处于低污染水平 (表 5)。通过各采样点污染程度分析，污染程度由高到低依次为 As、Cu、Mn、Zn、Cr、Ni。其中，Ni 污染程度最低，有 96.6% 采样点为清洁水平；Zn 则有 3.3% 的采样点为偏中度污染；As 和 Cu 均有 56.7% 的采样点处于清洁水平，轻度污染所占比例分别为 26.6% 和 40.0%，As 偏中度污染程度是 Mn 的 1.8 倍；Mn 的清洁水平和轻度污染相当。仅 As 有 16.7% 的样点 I_{geo} 大于 1，其余元素均小于 1。

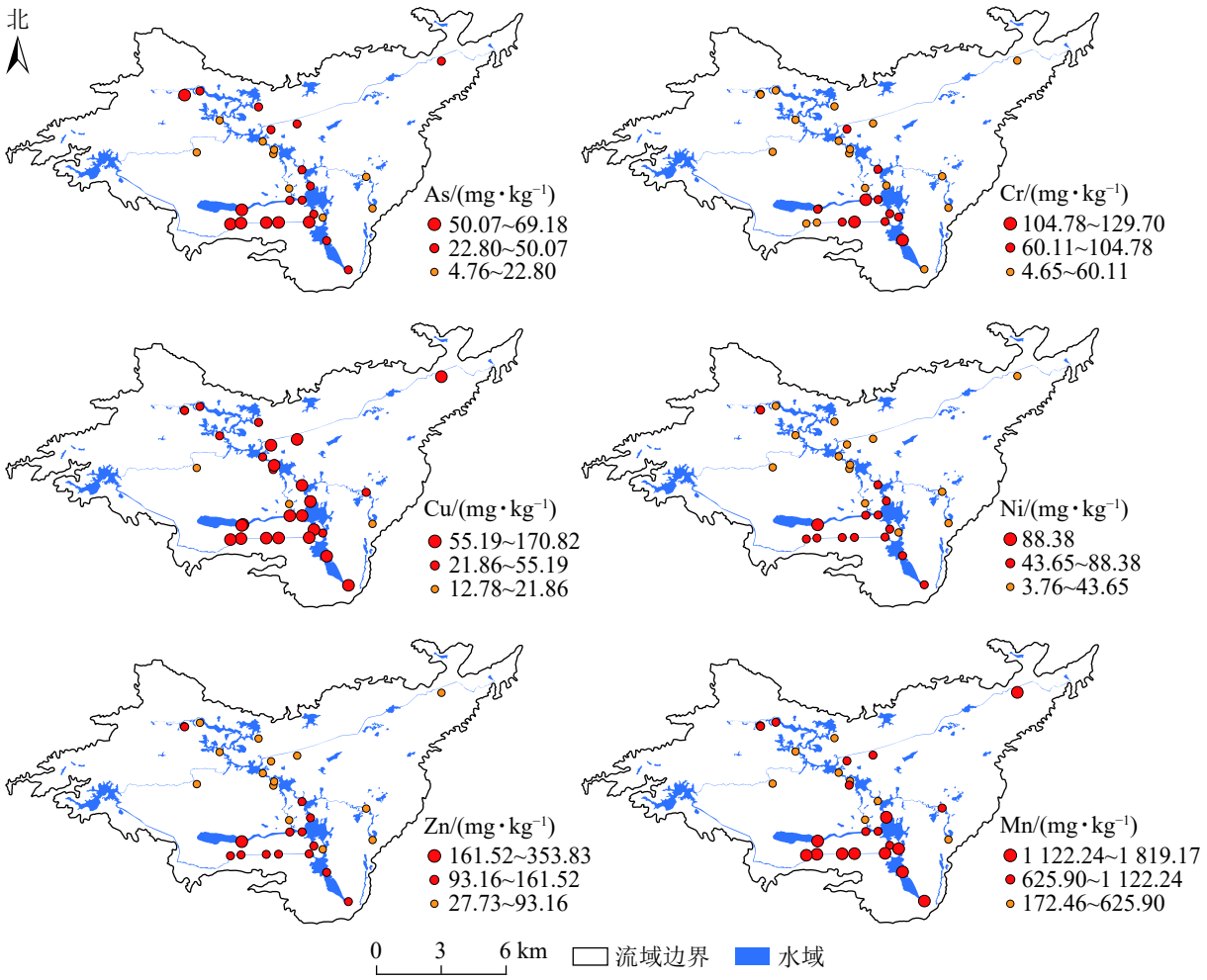

图 2 普者黑流域表层沉积物重金属空间分布示意图

Figure 2 Schematic diagram of spatial distribution of heavy metals in surface sediments of Puzhehei Watershed

表 5 表层沉积物重金属地累积指数污染评价结果

Table 5 Pollution assement of heavy metals in surface sediment

I_{geo}	级别	污染程度	各采样点重金属污染程度所占比例/%					
			As	Cr	Cu	Ni	Zn	Mn
$I_{geo}\leqslant 0$	0	清洁水平	56.7	90.0	56.7	96.6	80.0	50.0
$0<I_{geo}\leqslant 1$	1	轻度污染	26.6	10.0	40.0	3.4	16.7	50.0
$1<I_{geo}\leqslant 2$	2	偏中度污染	16.7		3.3		3.3	
$2<I_{geo}\leqslant 3$	3	中度污染						

可见，普者黑流域沉积物中重金属污染较少，保留了原有沉积物特征，但 As 污染是目前最大的潜在风险。

于霞等[28] 研究发现：赤水河流域沉积物重金属的 I_{geo} 从大到小依次为 Cd、Mn、Ni、As、Cu、Zn、Hg，其中 Cd 的平均 I_{geo} 为 1.40，其他元素均小于 0；但滇池外海[22] 沉积物重金属的 I_{geo} 从大到小依次为 Cd、Pb、Cu、Hg、As、Cr、Zn，其他重金属 (除 As、Cu 和 Cr 外) 均大于 1，高于普者黑流域，处于偏中度污染及以上水平。As、Mn、Cu 的污染程度均较高，而 Cr、Zn 的 I_{geo} 均处于轻度污染或清洁水平之上。可见，普者黑流域、赤水河流域及滇池外海的主要污染并不是 Cr 和 Zn 积累所导致的。

2.2.2 *潜在生态风险指数法评价结果* 由图 3 可知：单项重金属潜在生态风险指数从大到小依次为 As、Cu、Ni、Cr、Mn、Zn，潜在生态风险指数均小于 40，风险较低，与地累积指数评价结果一致。图 4 表明：普者黑流域表层沉积物中重金属的潜在生态风险主要由 As、Cu 和 Ni 引起，3 种重金属的生态风险指数对总的潜在风险指数贡献率较高，其他 3 种重金属的贡献率仅为 13.95%。As 和 Cu 是该流域表层

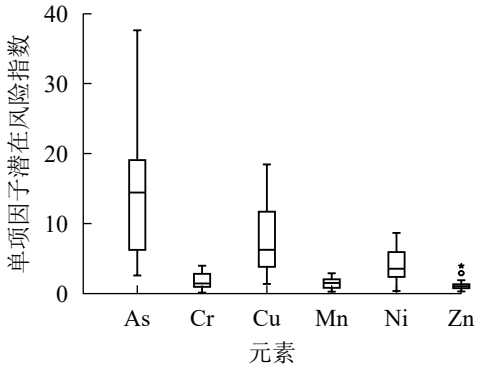

图 3　单项重金属潜在生态风险指数

Figure 3　Single factor potential ecological risk coefficient

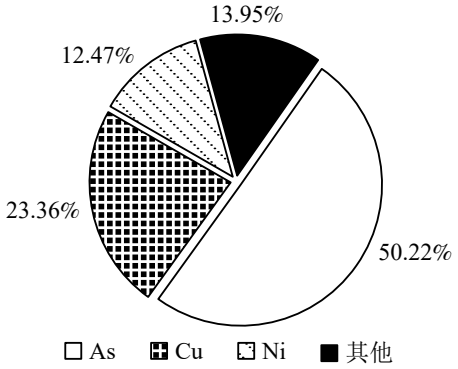

图 4　重金属对潜在生态风险指数的贡献

Figure 4　Contribution of heavy metals to the potential ecological risk index

沉积物中重金属主要潜在生态风险因素，而各重金属中生态风险指数最小的为 Mn 和 Zn。张玉玺等[23]研究认为：阳宗海沉积物中潜在生态风险贡献最大的是 As 和 Cu，最小的是 Ti 和 Mn，这与本研究结果相似。

重金属在普者黑流域表层沉积物各采样点平均生态风险指数 (I_R) 为 31.7，小于其限值 (150)。从重金属潜在生态风险指数空间分布 (图 5) 来看：湖泊下段风险高于中段和上段，入湖河流中响水河风险最高，其次是增产水库，板桥河相对较低。且生态风险变异指数为 56.0%，说明潜在生态风险指数受空间差异的影响。

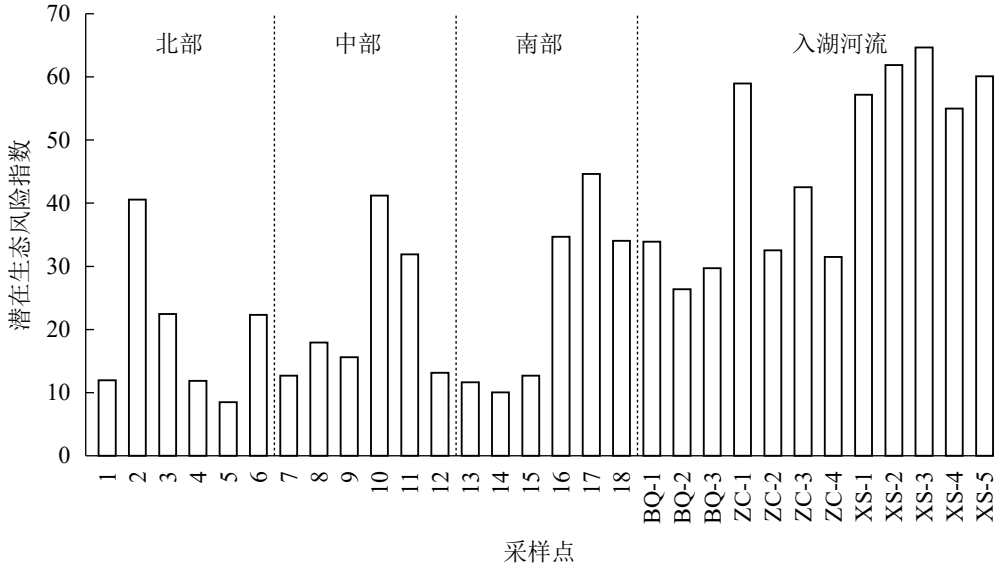

图 5　表层沉积物中重金属的潜在生态风险指数

Figure 5　Potential ecological risk index of heavy metals in surface sediments

2.3　沉积物中重金属溯源分析

2.3.1　*沉积物重金属分布与土壤化学特征的相关性*　沉积物中重金属相关性越大，来源越相似[29]。相关分析 (表 6) 表明：As、Cr、Cu、Mn、Ni、Zn 和 TP 两两之间呈显著正相关 ($P<0.05$)，Cu、Ni 与 OM 之间呈显著 ($P<0.05$) 或者极显著 ($P<0.01$) 正相关；Cu 与 TN 之间呈显著正相关 ($P<0.05$)，表明研究区重金属大部分具有相似来源，且可能产生复合性污染。

2.3.2　*沉积物重金属聚类特征*　通过主成分分析对重金属质量分数初始数据进行检验，结果均符合检验要求。前 2 个主成分的方差累积贡献率达 77.82%，矩阵旋转之后提取的 2 个主成分特征值均大于 1，方差累积贡献率也为 77.82%。可见，旋转后的方差累积贡献率无明显变化，满足主成分分析原则。第 1 主成分中 Cu、Ni、TP、As 和 Zn 具有较高的载荷，Cr 和 Mn 低于组内其他组分的荷载；OM 和 TN 在第 2 主成分中具有较高的载荷 (表 7)。

表 6 沉积物中重金属与土壤化学特征的相关性

Table 6 Correlation between heavy metals in sediments and soil chemical characteristics

元素	TP	OM	TN	As	Cr	Cu	Mn	Ni	Zn
TP	1								
OM	0.59**	1							
TN	0.53**	0.93**	1						
As	0.61**	0.19	0.12	1					
Cr	0.51**	0.29	0.15	0.52**	1				
Cu	0.85**	0.51**	0.40*	0.70**	0.72**	1			
Mn	0.41*	0.23	0.14	0.71**	0.43*	0.54**	1		
Ni	0.61**	0.38*	0.29	0.83**	0.71**	0.76**	0.74**	1	
Zn	0.65**	0.36	0.31	0.69**	0.36*	0.78**	0.58**	0.68**	1

说明：*$P<0.05$；**$P<0.01$

聚类分析 (图 6) 表明：9 种组分大致可分为 3 类：第 1 类为 As、Ni 和 Mn；第 2 类为 Cu、TP、Zn 和 Cr；第 3 类为 OM 和 TN。

相关重金属元素溯源研究显示：市郊农田土壤中 As 严重超标，说明其主要来自农药和化肥的使用，进入水体后被水中阳离子吸附形成难溶化合物[30]，Cr 主要来自于化工等企业污染排放[31]；Cu、Zn 和 Cr，Cu 与 TP、TN 和 OM 之间存在较强的相关性，所以 Cu 在以农作物种植为主的板桥河水系和湖泊上段存在中度污染，可能是由于规模较小的造纸和纺织企业集中导致其含量较高[32]。Zn 是除 Pb 外的机动车污染源标识元素[33]，流域内小型机器耕地，农产品交通运输过程中尾气排放和车轮磨损可能会导致 Zn 的排放[34]，胡国成等[35] 和罗燕等[36] 认为：Zn 排放与库区船舶及水利工程防腐设施也有较大联系，降雨后因冲刷作用使路面街尘的 Zn 污染物侵染水体。

普者黑流域内工业污染源相对较少，仅有少量砖厂、酿酒厂、有机肥厂等小规模产业，城镇生活废物的排放及农业生产中化肥、农药和饲料的使用，排出大量重金属化合物及其羟基络合物。由上述可知，重金属在流域中段和下段蓄积严重，3 条入湖河流均承载着上游集镇的生产、生活污水和周围农业面源污染输入，中段湖泊周边为人类活动聚集地，输出的重金属量大，由于常规的二级污水处理工艺对重金属的去除率低[37]，土壤表层重金属通过地表径流随颗粒物进入水体并在沉积物中累积[38]，在水动力影响下重金属迁移至流域下段，导致流域下段重金属含量增加。污水排放处理未达标、农业面源污染是该地区重金属污染的主要原因。本研究表明部分重金属污染主要来源于各种人类活动的影响。

表 7 沉积物中重金属质量分数旋转矩阵因子载荷

Table 7 Rotation matrix factor loading of heavy mental content in sediments

元素	原始荷载值		旋转后荷载值	
	主成分1	主成分2	主成分1	主成分2
As	0.82	−0.39	0.91	0.03
Cr	0.69	−0.20	0.71	0.15
Cu	0.93	−0.01	0.82	0.43
Mn	0.71	−0.37	0.80	0.01
Ni	0.89	−0.25	0.91	0.20
Zn	0.81	−0.11	0.77	0.28
TP	0.84	0.22	0.64	0.58
OM	0.60	0.76	0.18	0.95
TN	0.51	0.82	0.06	0.96

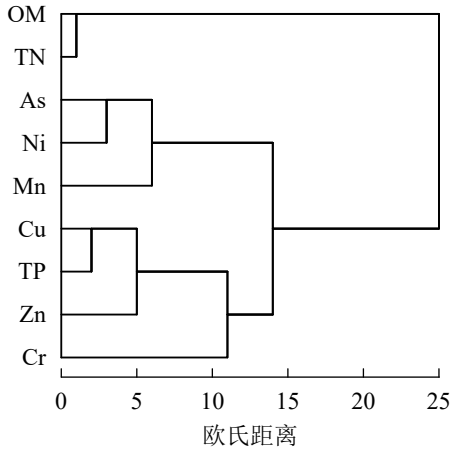

图 6 聚类分析结果树形图

Figure 6 Cluster analysis result tree diagram

Mn 和铁 (Fe) 是参与地球化学循环的主要成矿元素[39]。通过相关分析可知：Mn、Ni 与 Zn、Cu 相关性较低，推测 Mn、Ni 来源于自然风化侵蚀作用和天然地球化学过程。沉积物中 Cr 平均质量分数低于

背景值，I_{geo} 评价结果表明 Cr 和 Ni 无污染，且 Cr 和 Ni 的生物可利用性较低[40]，几乎未受到人为污染源的污染，推测其主要来源于岩石风化侵蚀产物等自然源。

3　结论

普者黑流域表层沉积物重金属质量浓度远低于《地表水环境质量标准》I 类标准限值。沉积物中除 Cr 外，重金属元素质量分数平均值基本高于全国土壤重金属背景值。As、Mn 污染水平高。地累积指数评价结果表明：As 和 Cu 是普者黑流域表层沉积物中污染范围最大、程度最高的 2 种重金属，Cr、Ni 和 Zn 大多为清洁水平或轻度污染。除 As 有 16.7% 的样点 I_{geo} 大于 1 之外，其余元素的 I_{geo} 均小于 1。通过潜在生态风险评价，As 和 Cu 的贡献率分别为 50.4% 和 23.4%。单项重金属潜在生态风险指数表明普者黑流域生态风险较低；各重金属汇集区域主要集中在湖泊下段及入湖河流。溯源分析表明：人为因素是造成污染的重要方面，但由于自然因素 (如降雨、岩石风化等) 的影响，重金属转移也会造成相关流域的侵染。

4　参考文献

[1] 齐鹏, 余树全, 张超, 等. 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, 2015, **36**(12): 4486 − 4493.
QI Peng, YU Shuquan, ZHANG Chao, *et al*. Pollution characteristics and potential ecological risk of heavy metals in urban surface water sediments from Yongkang [J]. *Environ Sci*, 2015, **36**(12): 4486 − 4493.

[2] 钱钱, 杨兴, 郭明, 等. 生物质炭对土壤吸附 Zn^{2+}-DEP 复合污染溶液中 Zn^{2+}的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2019, **36**(6): 1051 − 1061.
QIAN Qian, YANG Xing, GUO Ming, *et al*. Adsorption of Zn^{2+} from a Zn^{2+}-DEP (diethyl phthalate)composite solution using biochars in soil [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2019, **36**(6): 1051 − 1061.

[3] 熊春晖, 张瑞雷, 吴晓东, 等. 滆湖表层沉积物营养盐和重金属分布及污染评价[J]. 环境科学, 2016, **37**(3): 925 − 934.
XIONG Chunhui, ZHAGN Ruilei, WU Xiaodong, *et al*. Distribution and pollution assessment of nutrient and heavy metals in surface sediments from Lake Gehu in southern Jiangsu Province, China [J]. *Environ Sci*, 2016, **37**(3): 925 − 934.

[4] HILLER E, JURKOVI L, SUTRIEPKA M. Metals in the surface sediments of selected water reservoirs, Slovakia [J]. *Bull Environ Contam Toxicol*, 2010, **84**(5): 635 − 640.

[5] YALCIN M G, ILHAN S. Multivariate analyses to determine the origin of potentially harmful heavy metals in beach and dune sediments from Kizkalesi Coast (Mersin), Turkey [J]. *Bull Environ Contam Toxicol*, 2008, **81**(1): 57 − 68.

[6] SURESH G, SUTHARSAN P, RAMASAMY V, *et al*. Assessment of spatial distribution and potential ecological risk of the heavy metals in relation to granulometric contents of Veeranam Lake sediments, India [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2012, **84**: 117 − 124.

[7] 秦建桥, 黄晓萍, 阮文刚. 广东省西伶通道内河航道底泥重金属污染状况与生态风险评价[J]. 水土保持研究, 2019, **26**(3): 331 − 338.
QIN Jianqiao, HUANG Xiaoping, RUAN Wengang. Heavy metal pollution and ecological risk assessment in sediments of the Xiling channel of inland waterway of Guangdong Province [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2019, **26**(3): 331 − 338.

[8] 罗松英, 邢雯淋, 梁绮霞, 等. 湛江湾红树林湿地表层沉积物重金属形态特征、生态风险评价及来源分析[J]. 生态环境学报, 2019, **28**(2): 348 − 358.
LUO Songying, XING Wenlin, LIANG Qixia, *et al*. Speciation, ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in the surface sediments of Mangrove Wetland in Zhanjiang Bay [J]. *Ecol Environ Sci*, 2019, **28**(2): 348 − 358.

[9] 胡春华, 李鸣, 夏颖. 鄱阳湖表层沉积物重金属污染特征及潜在生态风险评价[J]. 江西师范大学学报 (自然科学版), 2011, **35**(4): 427 − 430.
HU Chunhua, LI Ming, XIA Ying. The pollution characteristics and potential ecological risk assessment of heavy metals in the surface sediments of Poyang Lake [J]. *J Jiangxi Norm Univ Nat Sci Ed*, 2011, **35**(4): 427 − 430.

[10] 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 Yungen, LIANG Qibin, *et al*. Variation of Puzhehei Lake area in dry season from 1977 to 2014 [J]. *Wetland Sci*, 2016, **14**(4): 471 − 476.

[11] 闻国静, 刘云根, 王妍, 等. 普者黑湖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 Guojing, LIU Yungen, WANG Yan, *et al*. Temporal and spatial evolution of landscape patterns and ecological risk in the Puzhehei Lake basin [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2017, **34**(6): 1095 − 1103.

[12] 詹乃才, 刘云根, 王妍, 等. 滇东南典型岩溶湿地沉积物不同形态磷分布特征[J]. 浙江农业学报, 2016, **28**(10): 1772 − 1780.
ZHAN Naicai, LIU Yungen, WANG Yan, *et al*. Distribution characteristic of different phosphorus speciation in sediment of typical karst wet-land located in southeast of Yunnan [J]. *Acta Agric Zhejiang*, 2016, **28**(10): 1772 − 1780.

[13] 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 Hanyi, LIU Yungen, ZHENG Han, *et al*. Characteristics of sewage pollution and environmental risk assessment of dispersion livestock intensive village in Yunnan [J]. *Environ Eng*, 2016, **34**(7): 46 − 51.

[14] 国家环境保护局, 国家技术监督局. 土壤质量铅、镉的测定 KI-MIBK 萃取火焰原子吸收分光光度法: GB/T 17140−1997[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.

[15] 欧维新, 杨桂山, 高建华. 盐城潮滩湿地对 N、P 营养物质的截留效应研究[J]. 湿地科学, 2006, **4**(3): 179 − 186.
OU Weixin, YANG Guishan, GAO Jianhua. Retention effect of wetland for nitrogen and phosphorus nutrients in the coastal zone of the Yancheng [J]. *Wetland Sci*, 2006, **4**(3): 179 − 186.

[16] MULLER G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. *Geol J*, 1969, **2**(3): 108 − 118.

[17] 国家环境保护局. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.

[18] 张伟, 陈蜀蓉, 侯平. 浦阳江流域疏浚前后底泥重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. 浙江农林大学学报, 2016, **33**(1): 33 − 41.
ZHANG Wei, CHEN Shurong, HOU Ping. Heavy metal contamination and potential ecological risk for sediments in the Puyang River Basin prior to and post dredging [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2016, **33**(1): 33 − 41.

[19] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach [J]. *Water Res*, 1980, **14**(8): 975 − 1001.

[20] NEMR A E, EL-SAID G F, KHALED A, *et al*. Distribution and ecological risk assessment of some heavy metals in coastal surface sediments along the Red Sea, Egypt [J]. *Int J Sediment Res*, 2016, **31**(2): 164 − 172.

[21] 徐争启, 倪师军, 庹先国, 等. 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, 2008, **31**(2): 112 − 115.
XU Zhengqi, NI Shijun, TUO Xianguo, *et al*. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index [J]. *Environ Sci Technol*, 2008, **31**(2): 112 − 115.

[22] 李晓铭, 赵世民, 王道玮, 等. 滇池表层沉积物中重金属污染特征及评价[J]. 地球与环境, 2013, **41**(6): 647 − 655.
LI Xiaoming, ZHAO Shimin, WANG Daowei, *et al*. Study on the pollution characteristics of heavy metals in surface sediments of Dianchi Lake [J]. *Earth Environ*, 2013, **41**(6): 647 − 655.

[23] 张玉玺, 孙继朝, 向小平, 等. 阳宗海表层沉积物中的重金属生态风险评估[J]. 水资源保护, 2012, **28**(5): 19 − 24.
ZHANG Yuxi, SUN Jichao, XIANG Xiaoping, *et al*. Evaluation of ecological risk of heavy metals in surface sediments from Yangzonghai Lake [J]. *Water Resour Prot*, 2012, **28**(5): 19 − 24.

[24] 蒋豫, 吴召仕, 赵中华, 等. 阳澄湖表层沉积物中氮磷及重金属的空间分布特征及污染评价[J]. 环境科学研究, 2016, **29**(11): 1590 − 1599.
JIANG Yu, WU Zhaoshi, ZHAO Zhonghua, *et al*. Spatial distribution and pollution assessment of nitrogen, phosphorus and heavy metals in surface sediments of Lake Yangcheng, Jiangsu Province, China [J]. *Res Environ Sci*, 2016, **29**(11): 1590 − 1599.

[25] 石雪芳, 张海涛, 张宇, 等. 洞庭湖表层沉积物中重金属污染评价与分析[J]. 环境科学与技术, 2017, **40**(12): 267 − 277.
SHI Xuefang, ZHANG Haitao, ZHANG Yu, *et al*. Analysis and pollution assessment of heavy metals in surface sediments of Dongting Lake [J]. *Environ Sci Technol*, 2017, **40**(12): 267 − 277.

[26] 于佳佳, 尹洪斌, 高永年, 等. 太湖流域沉积物营养盐和重金属污染特征研究[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(6): 289 − 296.

YU Jiajia, YIN Hongbin, GAO Yongnian, *et al*. Characteristics of nutrient and heavy metals pollution in sediments of Taihu watershed [J]. *China Environ Sci*, 2017, **37**(6): 289 − 296.

[27] 张杰, 郭西亚, 曾野, 等. 太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2202 − 2210.
ZHANG Jie, GUO Xiya, ZENG Ye, *et al*. Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in river sediments from Lake Taihu Basin [J]. *Environ Sci*, 2019, **40**(5): 2202 − 2210.

[28] 于霞, 安艳玲, 吴起鑫. 赤水河流域表层沉积物重金属的污染特征及生态风险评价[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(5): 1400 − 1407.
YU Xia, AN Yanling, WU Qixin. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in the sediments of Chishui River [J]. *Acta Sci Circumstantiae*, 2015, **35**(5): 1400 − 1407.

[29] 程芳, 程金平, 桑恒春, 等. 大金山岛土壤重金属污染评价及相关性分析[J]. 环境科学, 2013, **34**(3): 1062 − 1066.
CHENG Fang, CHENG Jinping, SANG Hengchun, *et al*. Assessment and correlation analysis of heavy metals pollution in soil of Dajinshan Island [J]. *Environ Sci*, 2013, **34**(3): 1062 − 1066.

[30] 白宁静, 陈丽, 蒋伊能, 等. 阳宗海砷污染背景下浮游植物的时空分布特征及其驱动因子解析[J]. 湖泊科学, 2019, **31**(1): 147 − 158.
BAI Ningjing, CHEN Li, JIANG Yineng, *et al*. Spatio-temporal characteristics of phytoplankton distribution and the identification of driving factors in the arsenic-contaminated Yangzong Lake [J]. *J Lake Sci*, 2019, **31**(1): 147 − 158.

[31] 马玉, 李团结, 高全洲, 等. 珠江口沉积物重金属背景值及其污染研究[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(3): 712 − 719.
MA Yu, LI Tuanjie, GAO Quanzhou, *et al*. Background values and contamination of heavy metals in sediments from the Pearl River Estuary [J]. *Acta Sci Circumstantiae*, 2014, **34**(3): 712 − 719.

[32] 陈佳, 王莉, 杨小刚, 等. 渭河陕西段水体主要污染物特征分析[J]. 内蒙古大学学报 (自然科学版), 2015, **46**(2): 211 − 218.
CHEN Jia, WANG Li, YANG Xiaogang, *et al*. Analysis of the characteristics on the water pollutants in the weihe river of Shaanxi Province [J]. *J Inn Mong Univ Nat Sci Ed*, 2015, **46**(2): 211 − 218.

[33] 李志涛, 王夏晖, 何俊, 等. 四川省江安县某硫铁矿区周边农田土壤重金属来源解析及污染评价[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(6): 1272 − 1279.
LI Zhitao, WANG Xiahui, HE Jun, *et al*. Source identification and pollution assessment of heavy metals in farmland soils around a pyrite mining area in Jiang'an County, Sichuan Province, China [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2019, **38**(6): 1272 − 1279.

[34] 钱力, 张超, 齐鹏, 等. 永康城市土壤重金属污染评价及来源分析[J]. 浙江农林大学学报, 2016, **33**(3): 427 − 433.
QIAN Li, ZHANG Chao, QI Peng, *et al*. Sourcing and evaluating heavy metal pollution in the urban topsoil of Yongkang City [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2016, **33**(3): 427 − 433.

[35] 胡国成, 许振成, 彭晓武, 等. 广东长潭水库表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评价研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(6): 1166 − 1171.
HU Guocheng, XU Zhencheng, PENG Xiaowu, *et al*. Pollution characteristics and potential ecological risk assessment of heavy metals in surface sediment from Changtan reservoir, Guangdong Province, China [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2011, **30**(6): 1166 − 1171.

[36] 罗燕, 秦延文, 张雷, 等. 大伙房水库表层沉积物重金属污染分析与评价[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(5): 987 − 995.
LUO Yan, QIN Yanwen, ZHANG Lei, *et al*. Analysis and assessment of heavy metal pollution in surface sediments of the Dahuofang reservoir [J]. *Acta Sci Circumstantiae*, 2011, **31**(5): 987 − 995.

[37] 孙祖越, 周莉. 生殖与发育毒理学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2015.

[38] REZA R, SINGH G. Heavy metal contamination and its indexing approach for river water [J]. *Int J Environ Sci Technol*, 2010, **7**(4): 785 − 792.

[39] ZHANG Yuan, SHI Taoran, ZHANG Yan, *et al*. Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in sediments from a hypertrophic plateau lake Dianchi, China [J]. *Environ Monit Assess*, 2014, **186**(2): 1219 − 1234.

[40] 李仁英, 杨浩, 陈捷, 等. 盘龙江口滇池沉积物重金属的分布及污染评价[J]. 土壤, 2006, **38**(2): 186 − 191.
LI Renying, YANG Hao, CHEN Jie, *et al*. Distribution and pollution evaluation of heavy metals in sediments of Lake Dianchi in the estuary of the Panlongjiang River [J]. *Soils*, 2006, **38**(2): 186 − 191.