

水源涵养和生态保育清洁小流域河流沉积物 重金属的特征及潜在风险

——以董铺—大房郢水库为例

王清泉, 何要来, 汪新亮, 王宁, 张学胜, 李玉成, 程桦

(安徽大学 资源与环境工程学院, 合肥 230601)

摘要: [目的] 为了解安徽省合肥市饮用水源地水源涵养和生态保育清洁小流域(董铺水库和大房郢水库)汇水河流表层沉积物中重金属对下游水库的影响。[方法] 在该区域 3 条主要汇水河流采集了 23 个沉积物样品, 分别测定了沉积物中 7 种重金属(Zn, Cu, Cr, As, Cd, Pb 和 Hg)的含量, 并采用潜在生态风险指数法(I_R)和地累积指数法(I_{geo})评估其潜在生态风险, 主成分分析法解析其可能来源。[结果] 研究区域重金属分布存在差异, As 和 Cd 在泗水河上的 C_1 和 C_2 两点含量超过了维护人体健康的土壤环境质量二级标准限值, 且 Cd 在此两点的易利用态占比为 34.97% 和 37.67%, 具有较强的生物有效性; Cd 生态风险指数普遍偏高, 达强度等级, 其中泗水河上的 C_1 和 C_2 两点达极强等级; 同时 S_0 点 Hg 生态风险达到强度等级, 其余 6 种重金属生态风险水平较低。该区域重金属主要来自于人与自然混合源和人为源, 贡献率分别为 51.11% 和 27.70%。[结论] 在泗水河下游流域 Cd 污染较为突出, 为减小其对下游水库的影响, 应加强 Cd 的污染治理。

关键词: 董铺水库和大房郢水库; 水源地; 沉积物; 重金属; 风险评价; 源分析

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)01-0098-06

中图分类号: X522, X826

文献参数: 王清泉, 何要来, 汪新亮, 等. 水源涵养和生态保育清洁小流域河流沉积物重金属的特征及潜在风险[J]. 水土保持通报, 2019, 39(1):98-103. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2019.01.016; Wang Qingquan, He Yaolai, Wang Xinliang, et al. Characteristics and potential risks of heavy metal in sediments in water conservation and ecological clean watershed[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(1):98-103.

Characteristics and Potential Risks of Heavy Metal in Sediments in Water Conservation and Ecological Clean Watershed — A Case Study at Dongpu-Dafangying Reservoir

Wang Qingquan, He Yaolai, Wang Xinliang, Wang Ning,
Zhang Xuesheng, Li Yucheng, Cheng Hua

(School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei, Anhui 230601, China)

Abstract: [Objective] We aim to investigate the effects of heavy metals in surface sediments of catchment rivers in drinking water source areas (Dongpu reservoir and Dafangying reservoir) in Hefei City of Anhui Province on downstream reservoirs. [Methods] Twenty-three sediment samples were collected from three major river catchment to determine the concentrations of Zn, Cu, Cr, As, Cd, Pb and Hg. The potential ecological risk was assessed by the potential ecological risk index (I_R) and cumulative index method (I_{geo}). The principal component analysis was used to assess the possible sources of the heavy metals. [Results] The distribution of heavy metal in the study area was different. The contents of As and Cd in sampling locations of C_1 and C_2 on the Surabaya river exceeded the secondary standard limit of soil environmental quality for maintaining human health, and the available Cd in these two sites accounted for 34.97% and 37.67% of total Cd concentration, showing a strong biological availability. Cd ecological risk index was generally high, reaching the intensity level, among which C_1 and C_2 on the Surabaya river reached the extremely strong level. In addition, the

收稿日期: 2018-08-26

修回日期: 2018-09-05

资助项目: 国家科技重大专项课题项目“水源涵养和生态保育清洁小流域技术综合集成应用推广”(2017ZX07603-002); 安大博士启动基金(12333190121)

第一作者: 王清泉(1992—), 男(汉族), 安徽省宿州市人, 硕士研究生, 研究方向为水源地污染调查与评价。E-mail: 18709841300@163.com。

通讯作者: 王宁(1971—), 男(汉族), 安徽省安庆市人, 博士, 副教授, 主要从事水污染控制及源解析研究。E-mail: ningwang0001@163.com。

ecological risk of Hg for location S_8 reached the intensity level, and the ecological risk level of the remaining 6 heavy metals was relatively low. The heavy metals in this region mainly came from human-natural mixed sources and human-made sources, with contribution rates of 51.11% and 27.70%, respectively. [Conclusion] Cd pollution is more serious in the lower reaches of the Sishui River. In order to reduce its impact on the downstream reservoir, Cd pollution control should be strengthened.

Keywords: Dongpu reservoir and Dafangying reservoir; water source; sediment; heavy metal; risk assessment; source analysis

沉积物是污染物的重要“源”和“汇”^[1],人类活动产生的有害金属元素和有机污染物经大气沉降及地表径流等途径进入河流,通过物理、化学和生物作用转移到沉积物中^[2-3]。其中的有害金属元素会在 pH 值、温度和生物扰动等条件改变的情况下,被释放进入上覆水中,并通过生物富集和食物链放大作用,对整个生态系统构成威胁^[4-5]。土壤和沉积物的重金属污染已成为生态和环境领域研究的重要方向,目前对沉积物中重金属污染的评价方法有多重,其中地累积指数法、潜在生态风险指数法和沉积物质量基准法,由于简单易行,已成为评价沉积物中重金属的生态环境风险最常用的方法^[6-7]。

董铺一大房郢水库汇水河流位于巢湖支流—南淝河上游(安徽省合肥市西北角),其中董铺水库和大房郢水库是合肥市饮用水源地^[8]。汇水河流流域面积为 140 km²,过去此区域主要以传统农业为主,近些年随着水源地保护政策的出台,区域内人口减少,土地退耕还林,划立禁养区,建设水源涵养和生态保育清洁小流域。一些等学者认为化肥农药的使用会造成一定的重金属污染^[6,9-10]。Tang^[11]和王为东^[7]等研究表明,同为巢湖农业区河流的兆河、柘皋河、杭埠河和白石天河出现了不同程度的 Cd, Pb, Zn 和 Cu 污染。目前,鲜有该流域重金属污染状况的研究。本文拟对该汇水区域内表层沉积物中 Zn, Cu, Cr, As, Pb, Cd 和 Hg 等 7 种重金属的含量进行测定,结合地累积系数法和潜在生态风险指数法进行生态风险评估,以期较好地反映该区域的污染状况,并通过多元统计分析,对沉积物中重金属的可能来源进行解析,为该区域重金属污染的防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集及处理

2017 年 10 月,根据董铺一大房郢水库汇水河流周边土地利用状况及河流特点,在河流汇水口、出水口和主要湖库处共设置 23 个采样断面,分别为南淝河源头流域 8 个(N_1 — N_8),泗水河流域 7 个(C_1 — C_7)和四里河源头流域 8 个(S_1 — S_8)。现场采用彼得森采泥器在每个断面的水域中心采集表层(0—10 cm)混

合沉积物,聚乙烯袋封装,−20 ℃ 冷冻保存。冷冻干燥机(FD 5-2.5, SIM, USA)冷冻干燥,玛瑙钵研磨后过 100 目尼龙筛,置聚乙烯袋,干燥器保存备用。

1.2 重金属总量分析

准确称取 0.1 g 样品, DMA-80 全自动测汞仪检测 Hg;准确称取 0.2 g 样品,经 HCl-HNO₃ 微波消解仪(MARSXpress, CEM, USA)消解^[12], AFS-9 700 原子荧光光度计测定 As;准确称取 0.2 g 样品,经过用 HCl-HNO₃-HF-HClO₄ 法消解后, ICP-MS(Agilent 7 700 x, USA)测定其余金属。Cd 形态采用 Tessier 法^[13]。

1.3 生态风险评估方法

1.3.1 潜在生态风险指数法 潜在生态风险指数(I_R)是一种对沉积物中重金属生态风险进行综合评价的方法,由瑞典学者 Hakanson 于 20 世纪 80 年代提出^[14],是国内外学者使用最多的评价沉积物中重金属潜在生态风险的方法之一^[15],计算方法如下:

$$E_r^i = T_r^i \cdot (C_s^i / C_n^i) \quad (1)$$

$$I_R = \sum E_r^i \quad (2)$$

式中: T_r^i ——某一相应重金属的毒性系数(Hg; Cd; Cr; Cu; Zn; Pb 和 As 对应的毒性系数分别为 40, 30, 2, 5, 1, 5, 10^[14]); C_s^i ——沉积物中重金属实测含量(mg/kg); C_n^i ——重金属 i 的参照值,即背景值,本文背景值选用安徽省地质调查院 2012 年公布的安徽省江淮流域土壤背景值^[16]; E_r^i ——某单个重金属的潜在生态危害系数; I_R ——沉积物不同重金属潜在生态风险指数。不同 E_r^i 值对应的风险等级划分: $E_r^i < 40$, 低风险; $40 \leq E_r^i < 80$, 中等风险; $80 \leq E_r^i < 160$, 强风险; $160 \leq E_r^i < 320$, 较强风险; $320 \leq E_r^i$, 极强风险。不同 I_R 值对应的风险等级划分: $I_R < 150$, 低风险; $150 \leq I_R < 300$, 中等风险; $300 \leq I_R < 600$, 强风险; $600 \leq I_R$, 极强风险^[14]。

1.3.2 地累积污染指数法 地累积污染指数法是德国科学家 Müller 于 1969 年提出的利用某一金属元素与其背景值的关系来定量确定其污染程度的评价模型^[17],计算方法如下:

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_s^i}{k \cdot C_n^i} \right) \quad (3)$$

式中: C_s^i ——重金属元素的 i 的含量; C_n^i ——元素 i 的背景值; k ——系数,考虑各地区岩石的差异而引

入的系数,取 1.5。不同 I_{geo} 值对应的风险等级划分: $I_{geo} \leq 0$,无风险; $0 < I_{geo} \leq 1$,轻度风险; $1 < I_{geo} \leq 2$,偏中风险; $2 < I_{geo} \leq 3$,中度风险; $3 < I_{geo} \leq 4$,偏重风险; $4 < I_{geo} \leq 5$,重度风险; $5 < I_{geo}$,严重风险^[18]。

1.4 质量控制和数据处理

为保证数据准确性,所有样品分析均做 3 次平行,结果取平均值(3 次分析结果的误差在 5%以内)。采用水系沉积物标准物质 GBW07305a(GSD-05a)做同步分析,7 种重金属的回收率(见表 1)在 87.55%~114.13%,符合美国 EPA 要求的 80%~120%的范围标准。

试验数据采用采用 Origin 8.5, Excel 2013 和 SPSS 24 等软件进行分析和绘图。

表 1 研究区沉积物标准品(GSD-5 a)回收率试验结果

元素	实测值/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	误差 范围/%	参考值/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	回收率/ %
Zn	284.50	3.87	263±5	108.17
Cu	119.53	2.14	118±4	101.30
Cr	64.43	1.25	68±2	94.74
As	64.79	2.36	74±4	87.55
Pb	96.40	3.43	102±4	94.50
Cd	1.37	0.67	1.37±0.1	100.51
Hg	0.33	4.12	0.29±0.03	114.13

表 2 研究区沉积物中部分金属含量和参考值

项目	各元素的含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)						
	Zn	Cu	Cr	As	Cd*	Pb	Hg*
最大值	156.10	42.05	85.80	46.91	2567.14	36.57	85.79
最小值	47.90	19.83	36.24	12.18	102.61	19.06	20.20
平均值	87.49	29.28	61.99	19.56	414.12	26.98	33.68
变异系数 ^[19] C_v /%	26.27	19.64	19.03	41.89	146.60	28.27	28.27
土壤环境质量二级标准限值 ^[18]	250	100	300	25	600	300	500
背景值 ^[16]	53.20	24.90	69.40	12.04	104.00	25.90	41.00

注: * 表示单位为 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

由于 Cd 的含量普遍偏高,重金属的形态直接影响了它的活性和对生物的有效性,而重金属的生物有效性可以通过可交换态和碳酸盐结合态之和所占重金属总量的比例来进行确定^[21]。故选取含量最高的 C_1 和 C_2 点及其他 3 个点,进行形态分析(表 3),从而

2 结果与分析

2.1 沉积物中重金属分布特征

表 2 为沉积物中部分重金属的含量和部分参考值,在 23 个水系沉积物采样点中 Hg, Cr, Zn, Cu 和 Pb 的含量分别在 20.20~85.79 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 36.24~85.80 mg/kg , 47.90~156.10 mg/kg , 19.83~42.05 mg/kg , 19.06~36.57 mg/kg 之间,平均含量分别为 33.68 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 61.99 mg/kg , 87.49 mg/kg , 29.28 mg/kg , 26.98 mg/kg , 这 5 种金属含量均低于保证农业生产和维护人体健康的土壤环境质量二级标准^[18]限值;As 的含量在 12.18~46.91 mg/kg 之间,平均含量为 19.56 mg/kg ,其中 34.78%的采样点含量高于土壤环境质量二级标准限值;Cd 的含量在 102.61~2567.14 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 之间,平均含量为 414.12 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 21.74%的采样点含量高于土壤环境质量二级标准限值,其中含量最高的两点(C_1 和 C_2)超出了土壤环境质量二级标准上限值 2.1 和 2.6 倍。说明该流域农业生产及其他人类活动的影响背景下 Cd 和 As 聚集趋势较为明显。根据 Wilding 对变异系数的分类^[19],该流域沉积物中 7 种重金属均属于中等及以上变异,其中 Cd 和 As 属于高度变异,说明 Cd 和 As 离散性较大,存在高值区域,受人为影响较大^[20]。

进一步了解其生物有效性状况。从表 3 可看出,金属可交换态和碳酸盐结合态含量之和所占金属总量的比例在 28.16%~52.53%之间, Cd 以易于释放的活化形态(可交换态和碳酸盐结合态)存在^[22],具有较高的释放风险。

表 3 研究区不同形态 Cd 的含量及其所占的比例

采样点	Cd 含量/ $(\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$				
	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5
C_1	317.43±8.35(14.88)	428.61±2.98(20.09)	1210.35±12.99(56.72)	108.43±1.87(5.08)	68.98±2.03(3.23)
C_2	620.16±1.87(24.21)	344.82±4.55(13.46)	1440.44±17.76(56.23)	109.02±0.68(4.26)	47.17±2.04(1.84)
C_6	65.12±0.72(31.99)	41.82±1.44(20.54)	10.03±0.33(4.92)	7.96±0.27(3.91)	78.66±2.11(38.64)
N_1	26.83±1.47(12.05)	45.68±2.39(20.52)	67.47±2.04(30.30)	7.35±0.30(3.30)	75.31±0.99(33.83)
S_5	16.95±0.34(8.23)	41.29±1.83(20.04)	53.29±2.79(25.86)	9.03±0.37(4.37)	85.51±1.11(41.50)

注: F_1 为金属可交换态; F_2 为碳酸盐结合态; F_3 为铁(锰)氧化物结合态; F_4 为有机质结合态; F_5 为残渣晶格结合态。括号外数字为不同形态 Cd 的含量,括号内的数字为占总量的比例(%)。

2.2 沉积物中重金属风险评价

2.2.1 潜在生态风险评价 董铺一大房郢水库汇水河流沉积物中重金属的潜在生态风险评价结果见表 4 和图 1, 整个研究区域 Zn, Cu, Cr, Pb 和 As 都处于低生态风险水平, Hg 在四里河流域的 S₇ 和 S₈ 点处于中等和强生态风险水平。Cd 在 3 个流域内的生态风险水平普遍高于其他 6 种, 只有 N₅ 和 N₇ 点生态风险处于低水平, 在泗水河流域污染最为严重, 生态风险处于中等及以上水平, 特别是 C₁ 和 C₂ 点 E_r 分别为 617.65, 740.52, 超出极强风险等级阈值(320)。

根据前期调查, 整个流域以传统农业为主和养殖业为主, 化肥农药大量使用, 畜禽粪便腐熟后直接进

入农田, 这一系列农业活动导致了整个区域 Cd 和 As 污染较为严重。近年来当地政府在泗水河流域引进汽车零部件加工企业, 工业生产也会导致 Cd 的污染。

表 4 研究区单项潜在生态风险指数及风险分级

元素	最大值	最小值	平均值	风险分级范围
Zn	2.93	0.90	1.64	低
Cu	10.45	3.98	5.97	低
Cr	2.47	0.62	1.74	低
As	38.96	10.12	16.25	低
Cd	740.50	29.60	119.60	低—极强
Pb	7.06	2.91	5.18	低
Hg	83.70	10.48	30.78	低—强

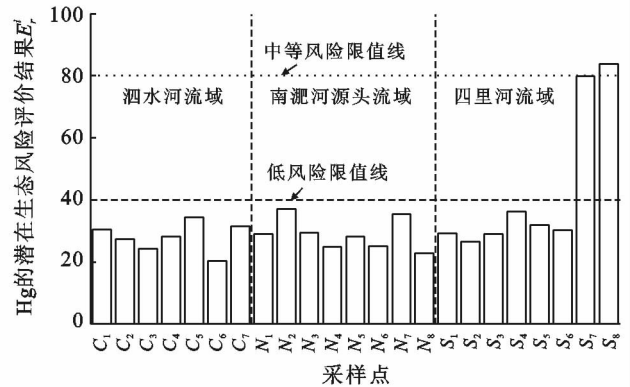
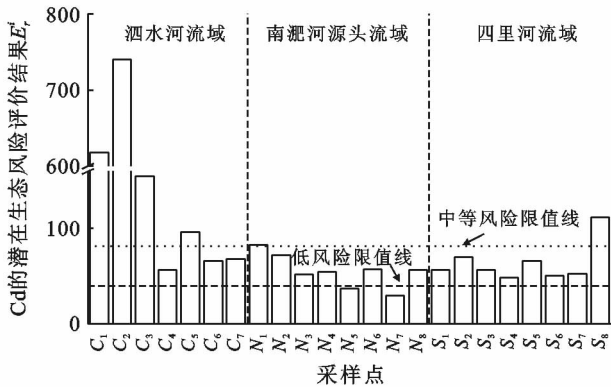


图 1 研究区沉积物中 Cd 和 Hg 的潜在生态风险评估结果

重金属综合潜在生态风险等级(图 2)显示, 南淝河源头流域和四里河源头流域综合潜在生态风险总体较低, 只有 N₂, S₇ 和 S₈ 点位置达到中等生态风险水平, 其主要贡献因子是 Cd 和 Hg。泗水河流域综合潜在生态风险较高, C₁ 和 C₂ 点达到了极强水平, C₃—C₇ 点在中等到强风险水平不等, 整个泗水河流域生态风险的主要贡献因子是 As, Hg 和 Cd。

属受到不同层次的污染。Zn, Cu, Hg, Cr 和 Pb 的地累积指数都小于 1, 处于轻度及以下污染; As 的 I_{geo} 指数范围在 -0.57~1.38 之间, 有 8 个采样点处于轻度污染水平, 其中 C₁ 和 C₂ 采样点位处于偏中污染水平。Cd 的地累积指数范围在 -0.60~4.87 之间, 只有 N₅ 和 N₇ 处于无污染水平, C₃, C₅ 和 S₈ 点处于偏中污染水平, I_{geo} 的最大值出现在 C₁ 和 C₂ 两点, 处于重度污染水平, 其他点位的 Cd 都处于轻度污染水平。该评价结果与该流域重金属的空间分布特征一致, Cd 污染较为严重。

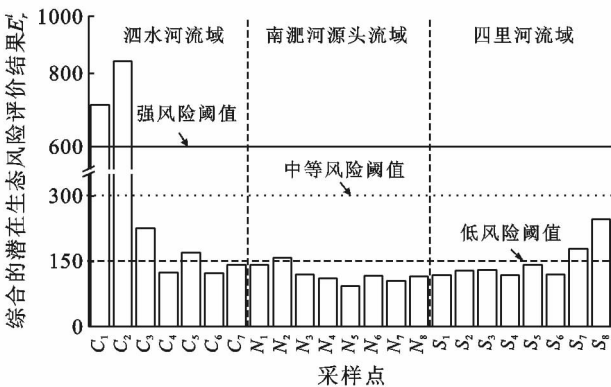


图 2 研究区沉积物中重金属的综合潜在生态风险评估结果

2.2.2 地累积指数法评价 南淝河上游流域水系沉积物中重金属的地累积指数范围在 -2.52~4.87 之间(如图 3), Cd, As, Zn, Cu, Hg, Cr 和 Pb 等 7 种重金

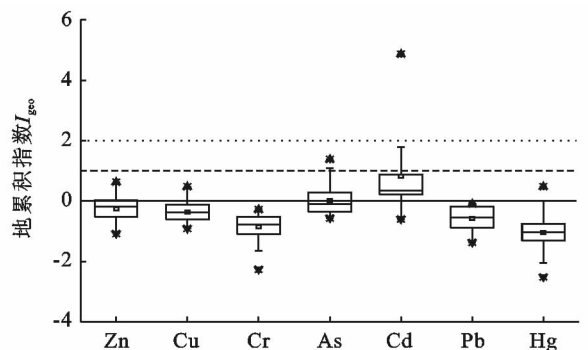


图 3 研究区地累积指数评价结果

通过潜在生态风险指数法和地累积指数法对董铺一大房郢水库汇水河流沉积物中重金属风险评价之后,发现两种评价方法得出的结论有所差异,这主要是因为潜在生态风险指数法是结合了重金属的毒性做出的评价,更有实际指导意义。但两种方法的共同结论就是整个流域 Cd 污染较为严重,尤其是泗水河子流域。

2.3 沉积物中重金属同源性分析

该区域表层沉积物中 Zn, Cu, Cr, As, Cd, Pb 和 Hg 等元素间的 Pearson 相关性分析结果见表 5。Zn 与 Cu, Zn 与 Cr, Zn 与 Pb 和 Zn 与 Hg 之间呈现显著

($p < 0.01$) 正相关, Cu, Pb 和 Cr 之间呈现显著 ($p < 0.01$) 正相关, 说明 Zn, Cu, Cr, Pb 和 Hg 之间具有同源性特征。Cd 与 As 之间呈现显著 ($p < 0.01$) 正相关关系, 且与其他 5 种重金属之间无相关性。说明这两种重金属具有同源性特征。

为进一步分析该区域沉积物中 Zn, Cu, Cr, As, Cd, Pb 和 Hg 这 7 种重金属的来源, 采用主成分分析法进行因子分析, 经方差最大正交旋转(见表 6)以及聚类分析(见图 4)后提取出前 2 个主成分 PC₁ 和 PC₂, 累计方差为 78.85%, 表明这 2 个主成分(特征值之和为 5.52)可以代表 7 种金属元素的大部分信息。

表 5 研究区沉积物中重金属质量分数相关性

元素	Zn	Cu	Cr	Pb	Hg	As	Cd
Zn	1						
Cu	0.864**	1					
Cr	0.658**	0.719**	1				
Pb	0.653**	0.730**	0.685**	1			
Hg	0.540**	0.502*	0.368	0.657**	1		
As	0.005	-0.050	0.153	-0.038	0.092	1	
Cd	0.056	-0.020	0.134	-0.123	0.071	0.906**	1

注: ** 表示在 $p < 0.01$ 级别(双尾)相关性显著。* 表示在 $p < 0.05$ 级别(双尾)相关性显著。

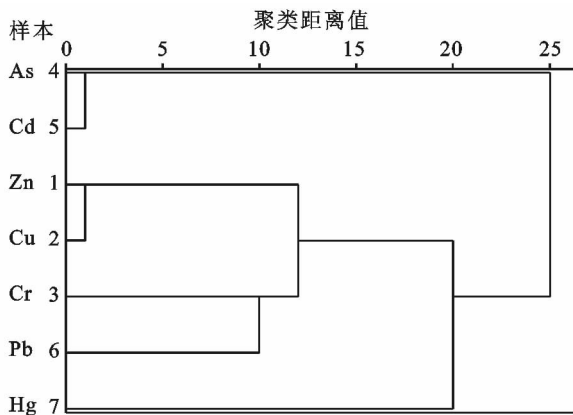


图 4 研究区沉积物金属元素同源性聚类分析

PC₁ 的贡献率在 51.11%, 表现为因子变量在 Zn, Cu, Cr, Pb 和 Hg 含量上有较高载荷, 在本研究中, 该流域沉积物中该 5 种重金属含量总体不高, 风险水平较低。Zn 只在 N₂, S₅ 和 S₈ 点有轻微蓄积现象, Cu 和 Hg 也有类似的空间分布趋势, 这是由于 N₂ 和 S₈ 所在区域靠近城镇, 车流量大, 民用煤燃烧较为普遍, 汽车尾气与煤炭燃烧产生的颗粒物会携带 Zn, Cu 和 Hg 等重金属元素^[23-24], 然后通过沉降进入河流, Cr, Pb 和其他点的 Zn, Cu, Pb 都处于无污染水平, 含量接近背景值, 该主成分受人为与自然混合污染源控制。PC₂ 的贡献率在 27.70%, Cd 和 As 在该

成分上具有较高载荷, 分别为 0.98, 0.98。该区域土地利用以农业为主, 化肥和农药的不合理使用会造成 Cd 的面源污染^[6,9,25], 在泗水河流域存在汽车零部件加工企业, 在金属加工中会产生 Cd 污染^[26], 在玻璃生产过程中会出现 As 污染^[27], 该主成分受人为污染源控制。

表 6 研究区沉积物中重金属主成分分析结果

项目	PC ₁	PC ₂
Cu	0.91	-0.10
Zn	0.89	-0.03
Pb	0.88	-0.15
Cr	0.82	0.11
Hg	0.71	0.04
Cd	0.06	0.98
As	0.06	0.98
特征值	3.58	1.94
贡献率/%	51.11	27.74
累计贡献率/%	51.11	78.85

3 结论

(1) 董铺一大房郢水库汇水河流沉积物中, Hg, Cr, Zn, Cu 和 Pb 的总体含量不高, 均低于保证农业生产和维护人体健康的土壤环境二级标准限值; As 和 Cd 平均含量分别为 19.56, 0.41 mg/kg, 这两种金属

在在泗水河下游的 C_1 和 C_2 点含量均高于土壤环境二级标准限值,在泗水河下游 As 和 Cd 污染较为严重。

(2) 通过生态风险评估一致表明,在整个研究区域 Zn, Cu, Pb 和 Cr 都处于低生态风险水平; Cd 生态风险水平较高, 91% 的取样点处于中等及以上风险水平, 尤其是 C_1 和 C_2 点达到极强水平; Hg 和 As 分别有两个点位处于中等风险和偏中风险水平。因此该区域 Cd, Hg 和 As 污染应着重关注。

(3) 多元统计分析结果表明, 该区域重金属主要分为两个来源, 其中 Zn, Cu, Cr, Pb 和 Hg 等重金属可能来源于岩石风化、煤炭燃烧和汽车尾气, 是自然源与人为源的共同影响。Cd 和 As 可能来源于农业活动和工业制造, 即人为源。

(4) 结合生态风险评估结果, 初步判断泗水河流域 Cd 和 As 污染较为严重, 且 Cd 还具有较高的生物有效性, 对下游水库存在安全风险, 有关部门应加强该区域重金属污染的治理, 同时也可类似流域重金属防治提供依据。

[参 考 文 献]

[1] Zhang Yuan, Guo Fen, Meng Wei, et al. Water quality assessment and source identification of Daliao river basin using multivariate statistical methods[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2009, 152(1/4): 105-121.

[2] 汤洁, 韩维峥, 李娜, 等. 哈尔滨市城区大气重金属沉降特征和来源研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(11): 3087-3091.

[3] Birch G F, Apostolatos C. Use of sedimentary metals to predict metal concentrations in black mussel (*Mytilus galloprovincialis*) tissue and risk to human health (Sydney estuary, Australia) [J]. Environmental Science & Pollution Research International, 2013, 20 (8): 5481-5491.

[4] Ali Z, Malik R N, Qadir A. Heavy metals distribution and risk assessment in soils affected by tannery effluents [J]. Chemistry & Ecology, 2013, 29(8): 676-692.

[5] Cooke J A, Andrews S M, Johnson M S Lead, zinc, cadmium and fluoride in small mammals from contaminated grassland established on fluorspar tailings[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1990, 51(1/2): 43-54.

[6] Zhang Hong, Shan Baoqing. Historical records of heavy metal accumulation in sediments and the relationship with agricultural intensification in the Yangtze-Huaihe region, China [J]. Science of the Total Environment, 2008, 399(1): 113-120.

[7] 吴迪, 唐晓先, 王为东, 等. 巢湖柘皋河沉积物重金属分布特征与风险评价[J]. 安徽农业大学学报, 2017, 44(3):

448-457.

- [8] 杨隆丽, 马利民, 邓燕婷. 董铺水库及其流出河流丰水期的污染源解析[J]. 广东化工, 2017, 44(2): 4-5, 3.
- [9] Chen Haiyang, Chen Ruihui, Teng Yanguo, et al. Contamination characteristics, ecological risk and source identification of trace metals in sediments of the Le'an River (China) [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2016, 125: 85-92.
- [10] Nobumitsu S, Zohour A, Nguyen T T, et al. Source profiling of arsenic and heavy metals in the Selangor River basin and their maternal and cord blood levels in Selangor State, Malaysia [J]. Chemosphere, 2017, 184: 857-865.
- [11] Tang Wenzhong, Shan Baoqing, Zhang Hong, et al. Heavy metal sources and associated risk in response to agricultural intensification in the estuarine sediments of Chaohu Lake Valley, East China [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 176(1/2/3): 945-951.
- [12] 中国环境保护部. 土壤和沉积物汞、砷、硒、铋、锑的测定微波消解/原子荧光法 HJ 680-2013 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013.
- [13] 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.
- [14] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [15] 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.
- [16] 陈兴仁, 陈富荣, 贾十军, 等. 安徽省江淮流域土壤地球化学基准值与背景值研究 [J]. 中国地质, 2012, 39(2): 302-310.
- [17] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. Geojournal, 1969, 2(3): 108-118.
- [18] 中国环境保护部, 土壤环境质量标准 GB 15618-1995 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1995.
- [19] Wilding L P. Spatial variability: Its documentation, accommodation and implication to soil surveys [M] // Nielson D R, Bouma J. Spatial Variations, Wageningen; Purdoc, 1985.
- [20] Mamat Z, Yimit H, Aji R Z, et al. Source identification and hazardous risk delineation of heavy metal contamination in Yanqi basin, northwest China [J]. Science of the Total Environment, 2014, 493(3): 1098-1111.
- [21] 崔邢涛, 王学求, 栾文楼. 河北中南部平原土壤重金属元素存在形态及生物有效性分析 [J]. 中国地质, 2015, 42(2): 655-663.

- [16] 薛天翼,白建军. 基于 TVDI 和气象数据的陕西省春季旱情时空分析[J]. 水土保持研究, 2017, 24(4): 240-246.
- [17] 刘立文,张吴平,段永红,等. TVDI 模型的农业旱情时空变化遥感应用[J]. 生态学报, 2014, 34(13): 3704-3711.
- [18] 闫娜,李登科,杜继稳,等. 基于 MODIS 产品 LST/NDVI/EVI 的陕西旱情监测[J]. 自然灾害学报, 2010, 19(4): 178-182.
- [19] 伍漫春,丁建丽,王高峰. 基于地表温度—植被指数特征空间的区域土壤水分反演[J]. 中国沙漠, 2012, 32(1): 148-154.
- [20] 季国华,胡德勇,王兴玲,等. 基于 Landsat 8 数据和温度—植被指数的干旱监测[J]. 自然灾害学报, 2016, 25(2): 43-52.
- [21] 张雅梅,熊康宁,安裕伦,等. 花江喀斯特峡谷示范区土壤侵蚀调查[J]. 水土保持通报, 2003, 23(2): 19-22.
- [22] 喻阳华,秦仕忆,钟欣平. 喀斯特干热河谷花椒林母岩化学组成与元素含量随海拔的分异[J]. 贵州师范大学学报:自然科学版, 2018, 36(2): 9-14.
- [23] 徐涵秋. Landsat 8 热红外数据定标参数的变化及其对地表温度反演的影响[J]. 遥感学报, 2016, 20(2): 229-235.
- [24] 田涟祎,周忠发,闫利会. 人为干预下喀斯特峡谷区不同土地利用类型对土壤理化性质的影响[J]. 水土保持通报, 2015, 35(6): 92-96.
- [25] 田涟祎. 石漠化地区土壤性质对不同土地利用方式的响应研究[D]. 贵阳:贵州师范大学, 2016.
- [26] Carlson T, Gillies R, Perry E. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover[J]. Remote Sensing Reviews, 1994, 9(1): 161-173.
- [27] 范辽生,姜纪红,盛晖,等. 利用温度植被干旱指数(TVDI)方法反演杭州伏旱期土壤水分[J]. 中国农业气象, 2009, 30(2): 230-234.
- [28] 覃志豪,李文娟,徐斌,等. 陆地卫星 TM6 波段范围内地表比辐射率的估计[J]. 国土资源遥感, 2004, 16(3): 28-32.
- [29] Sobrino J A, Jiménez-Muñoz J C, Paolini L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 90(4): 434-440.
- [30] 李小文. 遥感原理及其应用[M]. 北京:科学出版社, 2008: 109-115.
- [31] 丁凤,徐涵秋. TM 热波段图像的地表温度反演算法与实验分析[J]. 地球信息科学学报, 2006, 8(3): 125-130.
- [32] 齐述华,王长耀,牛铮. 利用温度植被旱情指数(TVDI)进行全国旱情监测研究[J]. 遥感学报, 2003, 7(5): 420-427.
- [33] 李丹,刘丹丹,赵金祥. 基于 DEM 的山区土地利用变化分析[J]. 水土保持研究, 2014, 21(1): 66-70.
- [34] 黎景良,后斌,危双峰,等. 基于 DEM 的广东省山区土地利用变化分析[J]. 测绘通报, 2007(6): 53-57.
- [35] 熊康宁,黎平,周忠发. 喀斯特石漠化的遥感: GIS 典型研究[M]. 北京:地质出版社, 2002.
- [36] 国家质量监督检验检疫总局,国家标准化管理委员会. 土地利用现状分类,中华人民共和国国家标准 GB/T 21010—2017[S]. 北京:中国标准出版社, 2017.
- [37] 盈斌. 岩溶地区土地利用、石漠化与治理工程设计[D]. 贵阳:贵州师范大学, 2009.

(上接第 103 页)

- [22] 李佳璐,姜霞,王书航,等. 丹江口水库沉积物重金属形态分布特征及其迁移能力[J]. 中国环境科学, 2016, 36(4): 1207-1217.
- [23] Wang Yangqian, Yang Liyuan, Kong Linghao, et al. Spatial distribution, ecological risk assessment and source identification for heavy metals in surface sediments from Dongping Lake, Shandong, East China [J]. Catena, 2015, 125: 200-205.
- [24] 刘海彪,孔少飞,王伟,等. 中国民用煤燃烧排放细颗粒物中重金属的清单[J]. 环境科学, 2016, 37(8): 2823-2835.
- [25] Liang Xianmeng, Song Jinming, Duan Liqin, et al. Source identification and risk assessment based on fractionation of heavy metals in surface sediments of Jiaozhou Bay, China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2018, 128(2): 548-556.
- [26] Tian H Z, Zhu C Y, Gao J J, et al. Quantitative assessment of atmospheric emissions of toxic heavy metals from anthropogenic sources in China: Historical trend, spatial distribution, uncertainties, and control policies [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, 15(17): 10127-10147.
- [27] Luo Wei, Lu Yonglong, Zhang Yan, et al. Watershed-scale assessment of arsenic and metal contamination in the surface soils surrounding Miyun Reservoir, Beijing, China [J]. Journal of Environmental Management, 2010, 91(12): 2599-2607.