

汉江中上游相邻河段沉积物重金属 污染生态危害对比研究

黄洪 马婷婷¹

(湖北文理学院资源环境与旅游学院, 湖北 襄阳 441053)

【摘要】: 为了对汉江中上游距离相近的两河段——汉中段和丹江口水库的沉积物重金属污染状况进行详细地分析对比, 采用 Honkanson 潜在生态风险指数法和层次分析法, 分析两河段的主要重金属元素 (Pb、Cu、Zn、Cd、Cr) 含量, 得出河流淤积物重金属的污染程度和环境危害, 而后据此计算出相应权重, 进行对比分析。结果表明, 丹江口水库的权重 (0.303) 远高于汉中段 (0.120), 丹江口水库的重金属污染危害远高于汉中段。

【关键词】: 沉积物 重金属 权重比较 汉中段 丹江口水库

【中图分类号】 X522 **【文献标识码】** A

近年来, 河流的重金属污染问题受到了更多的深入探讨和研究。渗入天然水体中的重金属污染物, 绝大部分最终会迅速附在水体沉积物上, 与沉积物一起沉于水体中, 从而影响水质。重金属在水体中存在时, 其含量微小且偶然性和不确定性太强, 毫无规律可言, 但在沉积物中“浓缩”后, 重金属的含量高, 规律性好, 稳定性高^[1]。因此河流内沉积物是研究河流重金属污染的优质样品。水环境安全对人类的现实意义重大, 因此水体沉积物重金属相关研究成为近期研究热点。

国内学者对我国许多重要的河流和水库都做过重金属污染相关调查和研究, 包括我国的七大水系 (珠江、长江、淮河、黄河、海河、辽河、松花江) 沉积物的典型重金属的总生态风险评估^[2]; 亦或系统地对长江的表层沉积物中的重金属污染进行调研后的生态风险评价^[3]; 甚至把长江等水系分段, 并对其重要分段进行详细研究, 如对靠近长江出海口河段内的沉积物重金属的形态及风险特征的研究^[4]; 对于长江的重要支流汉江, 也有许多学者开始研究它的重金属污染相关情况^[5,6], 但仍缺乏对汉江重要河段表层沉积物重金属方面的对比分析研究, 因而无法全面深层次地反映汉江的重金属污染及风险。

本研究使用层次分析法对汉江上游的两个相邻河段 (汉中段和丹江口水库) 的浅层沉积物重金属污染数据^[6,7]进行对比, 以 Pb、Cu、Zn、Cd、Cr 作为目标分析元素, 通过对比来分析两河段的污染差异, 解析污染原因及外部环境的影响, 为今后生态修复提供针对性的方法和建议。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

¹作者简介: 黄洪 (2000-), 女, 湖北恩施人, 本科生。

基金项目: 湖北文理学院教师科研能力培育基金自然科学基金类 (2019KYPY001&2020KYPYTD005); 国家自然科学基金项目 (42077143); 2020 年湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划项目 (T2020016)

汉江作为长江中部河段的重要支流，是中部众多地区的水源来源，且汉江上游水量充沛，汉中段是汉江的源头，也是国家南水北调中线工程重要水源涵养地；丹江口水库被评价为亚洲内部的第一大人工淡水湖，水质良好，自 2014 年起，被选作如南水北调中线工程的重要水源地。汉中段和丹江口水库两个相邻河段的水质情况直接影响工程沿线(北京、天津、河南、河北 4 个省市)20 多座大中城市的生活和生产用水，具有深远的综合效益，因此对该部分河段的重金属污染及生态风险研究势在必行。

1.2 数据来源

此次研究的汉江上游汉中段的原始数据来自宁强县烈金坝 S1、南郑县梁西渡 S2、城固县柳林镇 S3、洋县黄安镇 S4 四点^[6]，丹江口水库的数据则是汉江郧县支流 S5、汉江十堰支流 S6、神定河库湾 S7、大柏河库湾 S8、老灌河库湾 S9 五点^[7]的结果(表 1)。

表 1 不同点位的沉积物重金属含量(单位：mg/kg)

河段	样点	Pb	Cu	Zn	Cd	Cr
汉中段	S1	20.55	15.32	65.74	0.09	65.87
	S2	24.46	20.35	98.16	0.18	56.42
	S3	22.13	18.21	86.85	0.08	77.36
	S4	23.67	17.42	95.98	0.15	54.21
	平均值	22.70	17.83	86.68	0.13	63.47
丹江口	S5	15.73	33.26	122.70	0.73	100.70
	S6	15.20	22.77	99.83	0.70	71.54
	S7	18.51	33.36	257.70	0.58	163.30
	S8	7.40	136.00	813.60	3.01	414.80
	S9	15.11	66.20	160.10	0.79	138.60
	平均值	14.39	58.32	290.79	1.16	177.79

1.3 风险评估

1.3.1 方法选择

在确定层次分析法的评价指标之前，需要对重金属含量的原始数据进行处理，以加强评价指标的科学性和准确性。针对两段流域的重金属污染数据进行解析，采用瑞典科学家 Hakanson^[8]对之前重金属数据的潜在生态风险指数法简要分析。以陕西省土壤中重金属的背景值^[9]作为背景参考比值进行计算，公式如下：

$$C_i^i = C_i^i / C_n^i \quad (1)$$

$$E_i^i = T_i^i \times C_i^i \quad (2)$$

$$R_1 = \sum_{i=1}^n E_i^i \quad (3)$$

式中： C_i^i 意为第 i 种重金属元素的污染系数； C_i^i 意为表层沉积物第 i 种重金属浓度的实测值； C_n^i 意为沉积物背景参考值。 E_i^i 意为第 i 种重金属的潜在生态危害系数； T_i^i 意为重金属第 i 种元素的毒性响应系数，反映重金属元素的毒性水平及水体对重金属元素污染的敏感程度。 R_1 作为多金属潜在生态风险系数。

由表 3、表 4 可以得出和重金属污染有关的生态风险危害系数，因此可以以此为依据对五种元素进行判断，对其重要程度进行量化，提升判断量化的准确程度和专业性。

表 3 沉积物重金属单项污染系数

河段	样点	Pb	Cu	Zn	Cd	Cr
汉中段	S ₁	0.96	0.72	0.95	0.96	1.05
	S ₂	1.14	0.95	1.41	1.91	0.90
	S ₃	1.03	0.85	1.25	0.85	1.24
	S ₄	1.11	0.81	1.38	1.60	0.87
	平均值	1.06	0.83	1.24	1.33	1.02
丹江口	S ₅	0.74	1.55	1.77	7.30	1.61
	S ₆	0.71	1.06	1.44	7.00	1.14
	S ₇	0.86	1.56	3.71	5.80	2.61
	S ₈	0.35	6.36	11.72	30.10	6.64
	S ₉	0.71	3.09	2.31	7.90	2.22
	平均值	0.67	2.73	4.19	11.62	2.84

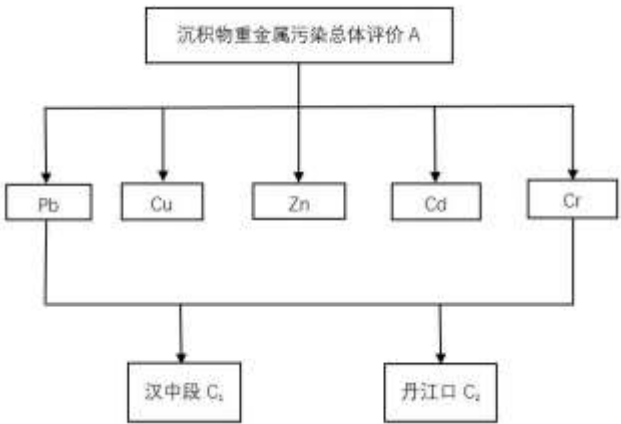
1.3.2 评价指标体系

(1) 评价指标的选择。

此次采用层次分析法确定重金属污染的相应权重，评价指标为沉积物中常见的五种重金属元素 Pb、Cu、Zn、Cd、Cr。对于评价指标的量化，则以上文计算得到的与五种目标元素的相关数据为依据。

(2) 评价指标体系的构建。

将两个河段沉积物的重金属污染综合评价作为目标层，将重金属污染物中选取的五种代表性重金属作为准则层，构成准则层比较矩阵，然后各个准则分别与两个不同河段对应，构成判断矩阵。指标体系如图 1 所示。



(3) 确定指标权重。

根据潜在风险指数法的计算结果，对指标进行量化，其中，量化值为 1 表示生态风险危害程度为同等；量化值为 3 表示危害程度为稍微；量化值为 5 表示危害程度为较强；量化值为 7 表示危害程度为强烈；量化值为 9 表示危害程度为极端；2、4、6、8 为两相邻判断的中间值。量化完成后，准则层比较矩阵和两河段相关的五个判断矩阵(图 2)。对每个单层矩阵进行特征值 $\lambda_{\max}$ 计算，然后通过运用公式(4)算出矩阵的一致性指标计算一致性比率 CR，通过比对 CR 的大小得出单层是否通过一致性检验。

计算所得的 $CR(A)=0.09<0.1$ ， $CR(Pb)=0<0.1$ ， $CR(Cu)=0<0.1$ ， $CR(Zn)=0<0.1$ ， $CR(Cd)=0<0.1$ ， $CR(Cr)=0<0.1$ ，表明所有目标污染物均通过了一致性检验。

$$CI=\frac{\lambda_{\max}-n}{n-1}$$

(4)

式中：CI 为一致性指标； $\lambda_{\max}$ 为矩阵的最大特征值；n 为采用矩阵的相应阶数。之后对每个矩阵计算权重。对五个矩阵进行特征向量的计算，得出 A 的特征向量为(0.085，0.193，0.036，0.623，0.064)^T；Pb 的特征向量为(0.75，0.25)^T；Cu 的特征向量为(0.167，0.833)^T；Zn 的特征向量为(0.2，0.8)^T；Cd 的特征向量为(0.1，0.9)^T；Cr 的特征向量为(0.2，0.8)^T。通过运算得出的权重值见表 5。

表 4 沉积物重金属元素的单项潜在生态危害系数(E_i^i)和多项潜在生态风险指数(R_1)

河段	样点						
		Pb	Cu	Zn	Cd	Cr	
汉中段	S ₁	4.80	3.60	0.95	28.80	2.10	40.25

	S ₂	5.70	4.75	1.41	57.30	1.80	70.96
	S ₃	5.15	4.25	1.25	25.50	2.48	38.63
	S ₄	5.55	4.05	1.38	48.00	1.74	60.72
	平均值	5.30	4.16	1.25	39.90	2.03	52.64
丹江口	S ₅	3.70	7.75	1.77	219.00	3.22	235.44
	S ₆	3.55	5.30	1.44	210.00	2.28	222.57
	S ₇	4.30	7.80	3.71	174.00	5.22	195.03
	S ₈	1.75	31.80	11.72	903.00	13.28	961.55
	S ₉	3.55	15.45	2.31	237.00	4.44	262.75
	平均值	3.37	13.62	4.19	348.60	5.69	375.47
总平均值		4.23	9.42	2.88	211.40	4.06	231.99

A	Pb	Cu	Zn	Cd	Cr
Pb	1	1/4	3	1/8	2
Cu	4	1	5	1/7	4
Zn	1/3	1/5	1	1/9	1/3
Cd	8	7	9	1	8
Cr	1/2	1/4	3	1/8	1

Pb	C ₁	C ₂	Cu	C ₁	C ₂	Zn	C ₁	C ₂
C ₁	1	3	C ₁	1	1/5	C ₁	1	1/4
C ₂	1/3	1	C ₂	5	1	C ₂	4	1

Cd	C ₁	C ₂	Cr	C ₁	C ₂
C ₁	1	1/9	C ₁	1	1/4
C ₂	9	1	C ₂	4	1

图 2 两河段的重金属生态危害的量化系数构造矩阵

表 5 矩阵计算后的相应指标权重 L

准则层	准则层权重	河段	权重
-----	-------	----	----

Pb	0.085	汉中段	0.120
Cu	0.193		
Zn	0.036		
Cd	0.623	丹江口	0.303
Cr	0.064		

2 结果与分析

2.1 对沉积物重金属生态危害分析结果

单纯从污染物含量数据来看，两河段的重金属污染都有所超标，无法满足国家规定的《地表水环境质量标准》^[10]的要求。其中在汉中段单项元素的潜在生态危害系数 E_i 中，污染排序为 $Cd > Pb > Cu > Cr > Zn$ ，丹江口河段的单项潜在生态危害系数 E_i 则是 $Cd > Cu > Cr > Zn > Pb$ 。在两河段中 Cd 的污染危害程度同时占据高位，剩余四个有不同的变化。两河段相比，其生态风险指数 R ，丹江口水库远超过汉中段水平。

2.2 沉积物重金属污染相应指标的权重结果

与五种元素的生态危害指标分布有异曲同工之处，五种元素单层权重中，Cd 的权重占比 (0.623) 依旧处于第一位，比其他四种元素的权重高出很多，其次分别是 Cu (0.193)、Pb (0.085)、Cr (0.064)、Zn (0.036)。而两河段的权重占比依旧是丹江口水库 (0.303) 高于汉中段 (0.12)，这说明丹江口水库的污染危害要高于汉中段，虽两者相差倍数不大，但也说明汉中段存在着一定的生态污染危害。

2.3 原因分析

从结果对比来看，丹江口河段的生态危害要远高于汉中段，其中不乏与丹江口河段的人为开发多于汉中段的原因。同为汉江的中上游河段，且两河段距离相近，但河流沉积物中重金属污染的危害却相差很多，人们对于两处的关注度和开发程度也大不相同。

丹江口水库自建成之日，就备受期待，除担负了包括发电、防洪、航运、养殖、灌溉和旅游等水库本身的基础作用外，还是国家水资源重点工程的水源地，相关地区政府对于该水源的保护极其重视，连续 25 年将其水质稳定在国家二类标准以上。南水北调工程虽然在一定程度上缓解了水源的分配不均，但浩大的人为工程依旧对原始自然环境造成了一定的影响，这种影响对丹江口水库更甚。2005 年开始的南水北调中线工程开始对水库的大坝加高，抬升了蓄水位，因此减小了丹江口水库内的流速，而后使得金属污染物的扩散与转移的速率被迫减慢^[11]，越来越多的重金属淤积在库底，变成了沉积物的一部分；部分农田被迫成为淹没区，进而成为河流的新水库底质，导致以往种植农田时积累在土壤中的某些重金属在相应的条件下释放到水体中，水库的支流会不断地接收到城镇排放的工业废水、生活污水和农业面源等，加重重金属污染^[12]，使得丹江口水库的沉积物重金属污染状况远高于汉中段。

3 结语

过于频繁的人为活动对于自然环境带来的巨大破坏性有目共睹，在这些人类行为的基础上，河流本身的自净功能也会受到

很大的影响。来自汉江上游的农田土壤重金属污染及各种采矿废水则是主要的修复对象。要保证无论调水与否都要保持一江清水，真正呵护好自己的母亲河。突出生态环境保护的重点，做好与“十四五”规划精准对接，加大水污染治理和生态修复力度。要全面开展汉江流域典型重金属元素的监测与风险评估，加强流域内各段环境的质量监测，提出及时有效的环境保护措施，提升汉江流域的生态环境保护能力，才能助力汉江流域生态经济带的可持续开发和永续利用。

参考文献:

- [1]贾振邦, 霍文毅, 赵智杰, 等. 应用次生相富集系数评价柴河沉积物重金属污染[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2000, 36(6): 808-812.
- [2]阳金希, 张彦峰, 祝凌燕. 中国七大水系沉积物中典型重金属生态风险评估[J]. 环境科学研究, 2017, 30(3): 423-432.
- [3]王岚, 王亚平, 许春雪等. 长江表层沉积物重金属污染特征及生态风险性评价[J]. 环境科学, 2012, 33(8): 2599-2606
- [4]尹肃, 冯成洪, 李扬飏, 等. 长江口沉积物重金属赋存形态及风险特征[J]. 环境科学, 2016, 37(3): 917-924.
- [5]宋凤敏, 岳晓丽, 刘智峰, 等. 汉江上游水体表层沉积物重金属污染特征评价[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(7): 1576-1584.
- [6]赵佐平. 汉江上游汉中段河流表层沉积物重金属污染风险评价[J]. 水土保持通报, 2014, 34(5): 158-161.
- [7]雷沛, 张洪, 单保庆, 等. 丹江口水库典型库湾及支流沉积物重金属污染分析及生态风险评价[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(1): 110-117.
- [8]Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [9]王利军, 卢新卫, 雷凯, 等. 渭河宝鸡段表层沉积物重金属污染研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(2): 334-340.
- [10]GB 3838-2002, 中华人民共和国地表水环境质量标准[S]. 国家环境保护总局, 2002.
- [11]刘荣霞. 南水北调中线丹江口水库调度水质影响模拟[J]. 应用基础与工程科学学报, 2011, 19(增刊): 193-200.
- [12]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.