

典型塘库湿地底泥重金属污染环境风险评价

高婷¹, 刘慧², 吴优², 张富豪², 赵斌^{2*}

¹云南新时代环保工程有限公司, 云南 玉溪

²玉溪师范学院化学生物与环境学院, 云南 玉溪

收稿日期: 2024年12月25日; 录用日期: 2025年2月10日; 发布日期: 2025年2月26日

摘要

本文对云南省大理市某库塘湿地进出口位置、重点区域等11个采样点采集并测定底泥中11项指标(有机质、全氮、全磷、Cu、Zn、Ni、Pb、Cd、Cr、As和Hg)含量, 进行底泥重金属污染环境风险评价。把库塘湿地分为不同典型区域, 采用主成分分析、地累积指数法、潜在生态风险指数法等方法分析库塘湿地底泥重金属, 结果显示库塘湿地西部底泥重金属的平均含量、主成分分析、地累积指数、潜在生态风险指数均大于中部湿地和东部湿地, 湿地生态修复时, 应重点治理西部湿地。

关键词

底泥, 重金属污染, 环境风险评价

Environmental Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Typical Pond and Reservoir Wetland Sediments

Ting Gao¹, Hui Liu², You Wu², Fuhao Zhang², Bin Zhao^{2*}

¹Yunnan New Era Environmental Protection Engineering Co. Ltd., Yuxi Yunnan

²College of Chemistry, Biology and Environment, Yuxi Normal University, Yuxi Yunnan

Received: Dec. 25th, 2024; accepted: Feb. 10th, 2025; published: Feb. 26th, 2025

Abstract

This article collected and measured the content of 11 indicators (Organic Matter, Total Nitrogen,

*通讯作者。

文章引用: 高婷, 刘慧, 吴优, 张富豪, 赵斌. 典型塘库湿地底泥重金属污染环境风险评价[J]. 世界生态学, 2025, 14(1): 75-82. DOI: 10.12677/ije.2025.141010

Total Phosphorus, Cu, Zn, Ni, Pb, Cd, Cr, As, and Hg) in the sediment of 11 sampling points, including the import and export locations and key areas of a reservoir wetland in Dali City, Yunnan Province, for environmental risk assessment of heavy metal pollution in sediment. The pond and reservoir wetland were divided into different typical areas, and methods such as principal component analysis, land accumulation index, and potential ecological risk index were used to analyze the heavy metals in the sediment of the pond and reservoir wetland. The results showed that the average content of heavy metals, principal component analysis, land accumulation index, and potential ecological risk index in the sediment of the western part of the pond and reservoir wetland were higher than those in the central and eastern wetlands. When restoring wetland ecology, the western wetland should be given priority for management.

Keywords

Sediments, Heavy Metal Pollution, Environmental Risk Assessment

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

重金属是具有生物毒性强、易累积、难降解特性的持久性污染物[1]。重金属可通过地表径流迁移、沉降,逐步转移至湖泊底泥中,并可能在一定的环境条件下重新释放到上覆水体中,直接或间接地对水生生物产生致害作用,并通过生物富集、食物链放大等一系列过程进一步对人类健康产生不利影响[2][3]。底泥中污染物的释放是城市湖泊水质恶化的根本原因,因此,底泥重金属是湖库水环境的重要“指示剂”,能够客观反映湖泊的污染状况和生态风险,目前绝大多数国家环保部门已将 Cu、Pb、Zn、As、Cd 等重金属列为优先控制污染物[4]-[6]。因此,对库塘湿地的底泥重金属进行监测,可以直观表现出湖泊湿地的污染情况以及潜在风险,对政府部门采取风险管控或生态环境修复具有重要支撑作用。

大理洱海省级重要湿地位于大理州大理市,地处云南苍山洱海国家级自然保护区范围内,以云南高原湖泊湿地生态系统为主要保护对象[7]。大理喜洲某库塘湿地曾是洱海湿地的一部分,现作为生态湿地公园,占地总面积 672.2 亩,通过库塘湿地对低污染水进行深度处理,对污水处理厂污水、生活污水、农田污水、初期雨水径流中的污染物等进行有效处理,以降低其对洱海的污染风险。但作为城镇周边库塘湿地,仍然有机动车排放的尾气、游客废弃物、农药使用等造成重金属污染,因此需要对库塘湿地的重金属污染风险进行评价。本文检测了库塘湿地中 11 个点位重金属的含量以及有机质、总氮和总磷,且分别采用地累积指数法、潜在风险指数法以及主成分分析对库塘湿地的重金属污染进行分析与评价,为库塘湿地是否需要风险管控和环境保护提供重要依据。

2. 材料和方法

2.1. 样品采集与处理

经现场调查,在库塘湿地选取 11 个具有代表性的湿地进出口位置、重点湖湾区域作为采样地点,点位从西到东可分为西部湿地(S1、S2、S3)、中部湿地(S4、S5、S6、S7)、东部湿地(S8、S9、S10、S11)如图 1。

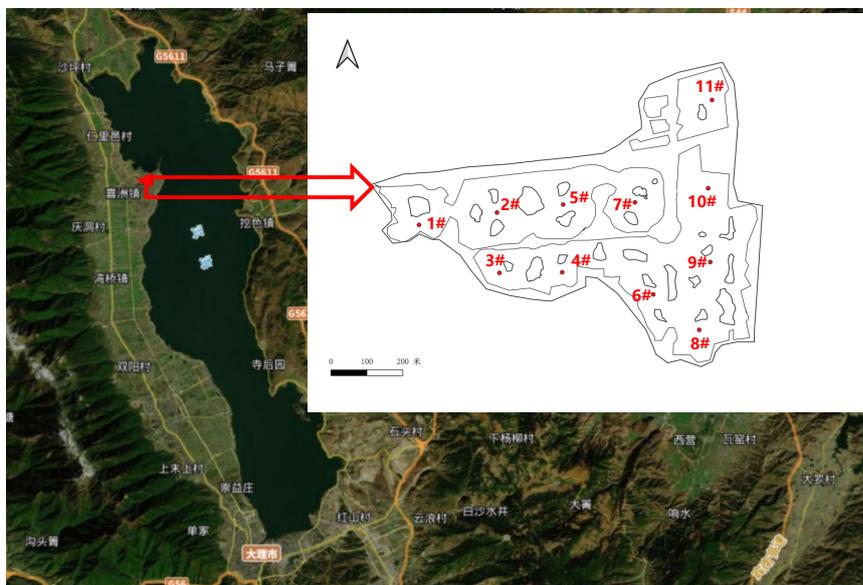


Figure 1. Schematic diagram of sampling points of reservoir wetland sediment
图 1. 库塘湿地底泥采样点位示意图

2.2. 分析方法

本研究沉积物分析指标包括：有机质、全氮、全磷、镉、铜、铬、砷、汞、镍、锌和铅。其中：8种重金属参考国家标准检测方法。pH测定使用pH计参考电位法；土壤有机质、总磷使用分光光度计，总氮使用半微量开氏法。为保证样品测定结果的准确性，所有样品都增加空白样品和平行样品测定。

2.3. 评价方法

2.3.1. 土壤初步风险评价方法

参考 GB15618-2018，对库塘湿地土壤进行初步风险评价。按照测得的重金属含量的 pH 和土壤类型选定所要对比的风险筛选值和风险管制值标准，若实测重金属含量同时低于风险筛选值和风险管制值的标准，则污染风险较低，反之则存在污染风险。若高于风险筛选值标准却低于风险管制值标准则可能存在污染风险，但未达到风险管制值标准，则存在污染风险且难以降低。

2.3.2. 地累积指数法

地累积指数法是德国学者 Muller 提出的对沉积物重金属累积程度的评价方法。地累积指数法考虑了自然地质过程和人为活动对沉积物的影响，可以直观反映出沉积物中重金属的累积程度[8]，计算公式如下：

$$I_{geo} = \log_2 \left[\frac{C_n}{(k \times B_n)} \right]$$

式中： I_{geo} 符号表达见表 1；重金属 n 的实测值符号表达为 C_n ，单位是 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ； n 的土壤背景值用符号表达是 B_n ，本文采用云南省土壤背景值[9] (Cd、Cu、Cr、As、Hg、Ni、Pb 和 Zn 土壤背景值含量分别为 0.218、46.3、65.2、18.4、0.058、42.5、40.6 和 $89.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 作为基准，有固定数值，单位是 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ； k 是可能引起背景值波动而引入的常数，为固定值，通常 $k = 1.5$ 。一般在研究中采用德国学者 Muller 的分级标准[8]，分为 7 个污染等级，重金属地累积指数分级标准见表 1。

Table 1. Pollution classification of geoaccumulation index I_{geo} **表 1.** 地累积指数 I_{geo} 的污染分级

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

2.3.3. 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法可反映特定环境中单一重金属污染物的影响和多种重金属污染物的生态危害状况, 并从重金属的生物毒性角度出发, 划分出潜在生态危害等级, 该方法由瑞典学者 Hakanson 提出[10], 计算公式如下:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_{i,r} = \sum_{i=1}^n T_{i,r} \times \frac{C_{i,f}}{C_{i,n}}$$

式中: RI 和 $E_{i,r}$ 的标准见表 2, i 为某重金属元素; 毒性系数用符号表达是 $T_{i,r}$ 且是常数(Cd 的毒性系数是 30、Cu 是 5、Cr 是 2、As 是 10、Hg 是 40、Ni 是 5、Pb 是 5、Zn 是 1), 无量纲; 实测值用符号表达是 $C_{i,f}$, 单位是 $mg \cdot kg^{-1}$; 土壤背景值用符号表达是 $C_{i,n}$, 本文选取云南省土壤背景值[9]作为基准, 云南省土壤背景值是固定数值, 单位是 $mg \cdot kg^{-1}$ 。根据 RI 和 $E_{i,r}$ 值划分的不同标准与测量值对比进行分级, 潜在生态风险指数划分标准见表 2。

Table 2. Potential ecological risk classification standards**表 2.** 潜在生态风险划分标准

单金属潜在生态危害指数($E_{i,r}$)	综合金属生态风险指数(RI)	潜在生态风险等级
<40	<150	低
$40 \leq E_{i,r} < 80$	$150 \leq RI < 300$	中
$80 \leq E_{i,r} < 160$	$300 \leq RI < 600$	重
$160 \leq E_{i,r} < 320$	$600 \leq RI < 1200$	严重
≥ 320	≥ 1200	极严重

3. 结果与讨论

3.1. 库塘湿地底泥重金属分布特征

库塘湿地底泥中 8 种重金属元素含量的平均值, 最大、最小值, 土壤背景值, 超标点位比例, 变异系数以及中国湖泊沉积物平均值见表 3。所有检测点位底泥重金属含量如下: Cu 的平均含量是 $29.5744 mg \cdot kg^{-1}$, Zn 是 $74.0082 mg \cdot kg^{-1}$, Ni 是 $35.0017 mg \cdot kg^{-1}$, Pb 是 $27.5293 mg \cdot kg^{-1}$, Cd 是 $0.1407 mg \cdot kg^{-1}$, Cr 是 $84.4321 mg \cdot kg^{-1}$, As 是 $0.9745 mg \cdot kg^{-1}$, Hg 是 $0.0604 mg \cdot kg^{-1}$, 而高于云南省土壤背景值的采集点位比例, Cu 占 9.09%, Zn 占 18.18%, Ni 占 27.27%, Pb 占 9.09%, Cd 占 36.36%, Cr 占 81.81%, As 占 0%, Hg 占 63.64%, 整体污染水平较低。表现出西部湿地、东部湿地的底泥重金属含量具有差异性, 8 种重金属 Cu、Zn、Ni、Pb、Cd、Cr、As 和 Hg 的含量若按照分类的不同区域湿地, 其浓度含量大小依次为: 西部湿地 $>$ 中部湿地 $>$ 东部湿地。西部湿地位于人类活动较密集区, 可能受到污水或废水污染导致西部湿地重金属含量普遍偏高, S1 点位重金属含量最高, 而中部湿地中 S4、S5 点位与西部湿地相连, 比 S6、S7 点位重金属含量略高, 而东部湿地重金属含量较低。

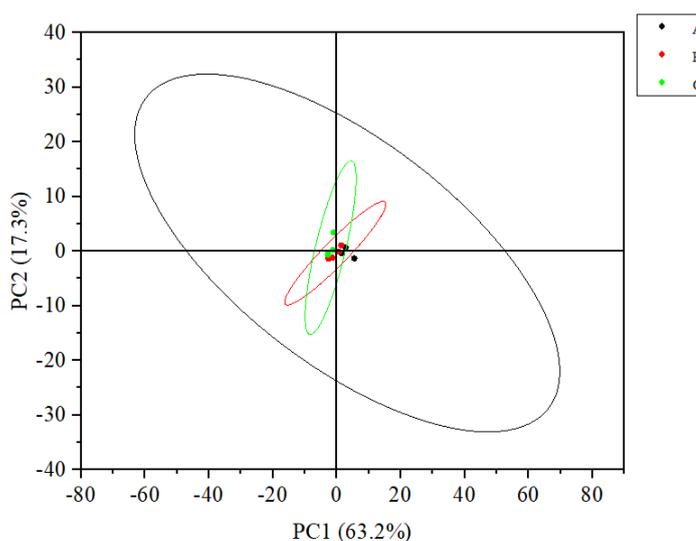
Table 3. Descriptive statistics of heavy metal contents in reservoir wetland sediments**表 3.** 库塘湿地底泥重金属含量描述性统计结果

元素	平均值 /mg·kg ⁻¹	最大值 /mg·kg ⁻¹	最小值 /mg·kg ⁻¹	标准偏差 /mg·kg ⁻¹	变异 系数/%	云南省土壤 背景值/mg·kg ⁻¹	超标点位 比例/%	中国湖泊沉积物 平均值[17]/mg·kg ⁻¹
Cu	29.5744	65.6314	13.7349	14.5439	49.18	46.3	9.09	31.7
Zn	74.0082	128.3455	47.8549	22.8278	30.84	89.7	18.18	88
Ni	35.0017	57.7496	20.2402	11.0045	31.44	42.5	27.27	36.8
Pb	27.5293	94.0717	13.3513	21.9125	79.6	40.6	9.09	31
Cd	0.3869	0.5962	0	0.2013	52.03	0.218	36.36	0.194
Cr	84.4321	118.3865	54.068	20.9194	24.78	65.2	81.81	85
As	0.9745	1.5904	0.5521	0.3685	37.81	18.4	0	12.1
Hg	0.0604	0.1023	0.0394	0.02205	36.51	0.058	63.64	0.053

有研究表明,当变异系数超过 20%时,人类活动密集是导致重金属空间差异的主要驱动因子[11]-[14],库塘湿地中 Zn、Ni、Cr、As 和 Hg 的变异系数在 20%~40%之间,变异系数超过 40%的有 Cu、Pb 和 Cd。由于库塘湿地周围存在住宅区、工厂和公路,交通发达,且库塘湿地内部是湿地公园供人游览,人类的大量活动、住宅区的生活废水和垃圾、车辆行驶在公路上产生的尾气都会导致库塘湿地底泥重金属具有差异性。因此,人类活动密集和经济活动是河道底泥重金属产生含量差异的主要驱动力[11][15][16]。

3.2. 库塘湿地重金属污染主成分分析

主成分分析结果显示,11种指标共分为2类,前两个主成分(PC1和PC2)累积方差贡献率超过了80%,表明PC1和PC2两个主成分较好地代表了原始数据的大部分信息;其中,PC1方差贡献率为63.2%,PC2方差贡献率为17.3%。PC2载荷较高的指标为有机质和全氮,PC1载荷较高的指标为8种重金属和全磷。图2表明各个样本的点聚集在一起,表明这些样本的相似性较高。

**Figure 2.** Principal component analysis of heavy metals and related indicators**图 2.** 重金属和相关指标的主成分分析图

3.3. 库塘湿地重金属污染程度评价

地累积指数分析结果显示, Cu、Zn、Ni、As 通过与 I_{geo} 的分级标准进行对比, 可知这四种重金属符合清洁这一分级标准。对比 Cd、Cr、Hg 和 Pb 的 I_{geo} 指数, 得知其符合轻度污染的分级。所分析的 8 种底泥重金属的分级数为 1 或 0, 整理数据后可将库塘湿地的底泥重金属污染程度综合评价为轻度污染。

按不同区域的湿地的 I_{geo} 指数排序, 西部湿地 > 中部湿地 > 东部湿地。主要原因一方面可能是, 西部湿地位于人类活动密集区, 可能受到污水或废水污染导致西部湿地重金属含量要高于中部湿地和东部湿地。另一方面, 随着社会的发展, 交通和各类产业也在不断完善和发展, 对汽油及工业原料的需求增多, 且库塘湿地周围是住宅区及公路, 产生的大量废气和生活废水可能导致特定的重金属污染, 比如汽车尾气含有的 Pb。而库塘湿地作为湿地公园供人游览, 人类活动密集会导致重金属分布及含量都具有差异。

3.4. 库塘湿地底泥重金属生态风险评价

表 4 的结果显示, S1 点位中部分重金属的 $E_{i,r}$ 符合高风险和中风险的分级标准, RI 符合中风险的标准, S1 点位的生态风险偏高主要原因可能是人类的大量活动、住宅区的生活废水和垃圾、工厂产生的废水和废气、车辆行驶在公路上产生的尾气导致的严重污染。S2、S3、S4、S5、S8、S10 部分重金属符合中风险的标准, 大部分重金属的 $E_{i,r}$ 和 RI 都符合低风险的标准。大部分点位的重金属处于低风险, 且污染集中, 综合评价为生态风险较低。

按被分为不同区域的湿地的综合潜在生态风险指数 RI 排列, 西部湿地 > 中部湿地 > 东部湿地, 西部湿地明显更高, 原因可能是西部湿地的有机质、全氮、全磷含量最高, 拥有适合微生物及藻类的生长环境。综合评价表明西部湿地污染风险更高, 需要重点处理。

Table 4. Potential ecological risk index $E_{i,r}$ and comprehensive potential ecological risk index RI of heavy metals in reservoir wetland sediment

表 4. 库塘湿地底泥各重金属潜在生态风险指数 $E_{i,r}$ 与综合潜在生态风险指数 RI

采样点	$E_{i,r}$								RI
	Cu	Zn	Ni	Pb	Cd	Cr	As	Hg	
S1	7.0842	1.427	6.7882	11.5887	82.018	3.6196	0.5016	67.1724	180.1997
S2	4.3737	0.9164	5.2941	3.9286	0	3.3129	0.4772	68.2759	86.5788
S3	4.0173	1.0446	5.2	3.8177	44.5872	3.2822	0.6576	70.3448	132.9514
S4	3.4989	0.903	4.4353	3.1158	50.9174	3.0982	0.8478	46.8276	113.644
S5	4.0173	0.9153	4.9529	2.8941	35.367	2.7178	0.7283	41.5862	93.1789
S6	2.3758	0.8796	4	2.1921	0	2.6871	0.3663	32.1379	44.6388
S7	2.1814	0.6366	3.4235	1.9458	0	2.0521	0.3	28.2069	38.7463
S8	1.5334	0.534	2.3765	1.6502	0	1.6595	0.3717	44.4828	52.6081
S9	1.4794	0.5452	2.5294	1.6749	0	2.0061	0.3804	27.1724	35.7878
S10	2.4622	0.6499	3.1529	2.2167	0	1.9693	0.8641	43.4483	54.7634
S11	2.1058	0.6198	3.1412	2.2660	0	2.0706	0.3277	35.6552	46.1863

3.5. 重金属差异性分析

把库塘湿地底泥重金属与云南省土壤背景值[9]进行比较, 库塘湿地中除 As 低于土壤背景值外, 其

他元素的含量均含有超过土壤背景值的点位, Cr 超标情况最严重; 与中国湖泊沉积物[17]平均值对比分析, 可以得知 Cd、Hg 的含量, 以及 Ni 和 Cr 含量相近, Cu、Zn、Pb 和 As 含量偏低。

与国内其他湖泊进行比较可以得知, 库塘湿地的 As、Zn 和 Hg 的平均含量比其他湖泊最低的平均含量更低; Cu 和 Pb 与其他湖泊的最低平均含量接近; Ni 和 Cr 与其他城市湖泊的平均含量相近(除去阳澄湖的 Cr), Cd 与其他湖泊的最低平均含量相比偏高。综合分析, 本文关注的库塘湿地污染程度分类为轻度污染, 且集中于西部湿地, 治理时应重点关注。

4. 结论

(1) 库塘湿地 11 个监测点位的底泥重金属 Cr 超标情况最为严重, 综合评价为整体污染水平低。

(2) 主成分分析表明, PC1 和 PC2 累积方差贡献率超过了 80%, 表明 PC1 和 PC2 两个主成分较好地代表了原始数据的大部分信息。其中, PC1 方差贡献率为 63.2%, PC2 方差贡献率为 17.3%。

(3) Cu、Zn、Ni、As 通过与 I_{geo} 的分级标准进行对比, 这四种金属符合清洁的分级标准; 对比其余四种重金属的 I_{geo} , 属轻度污染。按分类为不同区域湿地的 I_{geo} 排序为: 西部湿地 > 中部湿地 > 东部湿地, 需要重点关注西部湿地。

(4) 本研究中多数点位重金属的 $E_{i,r}$ 和 RI 依据分级标准归于低风险, 生态风险综合评价为低风险。按被分为不同区域湿地的 RI 排列如下: 西部湿地 > 中部湿地 > 东部湿地。综合评价为库塘湿地潜在生态风险较低, 但西部湿地生态风险较高, 需重点关注。

基金项目

大学生创新创业训练计划项目(2023A023, 2024A019)。

参考文献

- [1] Chen, H., Teng, Y., Lu, S., Wang, Y. and Wang, J. (2015) Contamination Features and Health Risk of Soil Heavy Metals in China. *Science of The Total Environment*, **512**, 143-153. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.025>
- [2] Zhu, H., Yuan, X., Zeng, G., Jiang, M., Liang, J., Zhang, C., et al. (2012) Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Xiawan Port Based on Modified Potential Ecological Risk Index. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **22**, 1470-1477. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(11\)61343-5](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(11)61343-5)
- [3] Yu, R., Yuan, X., Zhao, Y., Hu, G. and Tu, X. (2008) Heavy Metal Pollution in Intertidal Sediments from Quanzhou Bay, China. *Journal of Environmental Sciences*, **20**, 664-669. [https://doi.org/10.1016/s1001-0742\(08\)62110-5](https://doi.org/10.1016/s1001-0742(08)62110-5)
- [4] 赵振华. 美国水中 129 种“优先污染物”简介[J]. 环境与可持续发展, 1981(8): 7-9.
- [5] 王一喆, 张亚辉, 赵莹, 等. 国内外环境优先污染物筛选排序方法比较[J]. 环境工程技术学报, 2018, 8(4): 456-464.
- [6] 陶艳茹, 苏海磊, 李会仙, 等. 《欧盟水框架指令》下的地表水环境管理体系及其对我国的启示[J]. 环境科学研究, 2021, 34(5): 1267-1276.
- [7] 云南省林业和草原局. 云南省 16 处湿地列为第三批省级重要湿地[R/OL]. 2018-07-18. https://lcy.yn.gov.cn/html/2018/zuixindongtai_0713/51555.html, 2024-03-07.
- [8] Muller, G. (1969) Index of Geoaccumulation in Sediments of the Rhine River. *GeoJournal*, **2**, 108-118.
- [9] 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.
- [10] Hakanson, L. (1980) An Ecological Risk Index for Aquatic Pollution Control: A Sedimentological Approach. *Water Research*, **14**, 975-1001. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8)
- [11] 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.
- [12] Wang, L., Yang, L., Kong, L., Li, S., Zhu, J. and Wang, Y. (2014) Spatial Distribution, Source Identification and Pollution Assessment of Metal Content in the Surface Sediments of Nansi Lake, China. *Journal of Geochemical Exploration*, **140**, 87-95. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.02.008>

- [13] Yongming, H., Peixuan, D., Junji, C. and Posmentier, E. (2006) Multivariate Analysis of Heavy Metal Contamination in Urban Dusts of Xi'an, Central China. *Science of the Total Environment*, **355**, 176-186.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.02.026>
- [14] Yang, Z., Lu, W., Long, Y., Bao, X. and Yang, Q. (2011) Assessment of Heavy Metals Contamination in Urban Topsoil from Changchun City, China. *Journal of Geochemical Exploration*, **108**, 27-38.
<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2010.09.006>
- [15] Liu, Y., Engel, B.A., Collingsworth, P.D. and Pijanowski, B.C. (2017) Optimal Implementation of Green Infrastructure Practices to Minimize Influences of Land Use Change and Climate Change on Hydrology and Water Quality: Case Study in Spy Run Creek Watershed, Indiana. *Science of The Total Environment*, **601**, 1400-1411.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.015>
- [16] Putro, B., Kjeldsen, T.R., Hutchins, M.G. and Miller, J. (2016) An Empirical Investigation of Climate and Land-Use Effects on Water Quantity and Quality in Two Urbanising Catchments in the Southern United Kingdom. *Science of the Total Environment*, **548**, 164-172. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.132>
- [17] Cheng, H., Li, M., Zhao, C., Yang, K., Li, K., Peng, M., *et al.* (2015) Concentrations of Toxic Metals and Ecological Risk Assessment for Sediments of Major Freshwater Lakes in China. *Journal of Geochemical Exploration*, **157**, 15-26.
<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.05.010>