

芦岭塌陷湖沉积物及沿岸土壤重金属污染特征研究

吴心慈, 张洋, 潘用昕, 王浩, 冯珊珊, 邓江啸

宿州学院资源与土木工程学院, 安徽 宿州

收稿日期: 2023年3月27日; 录用日期: 2023年5月23日; 发布日期: 2023年5月30日

摘要

为了解塌陷湖沉积物及沿岸土壤的污染特征, 以芦岭塌陷湖为研究对象, 测定了Cu、Zn、Ni、Cr、Pb和Hg六种元素的含量, 结合安徽表层土壤重金属背景值进行比较, 通过地累积指数法和单因子指数法进行污染等级评价、分析主要污染元素的空间分布特征。结果显示: 沿岸土壤六种金属含量的平均值从大到小分别为Pb、Zn、Ni、Cr、Cu、Hg; 沉积物中Cu、Cr的平均值含量低于安徽省表层土壤背景值, Ni较接近于背景值, Zn、Pb和Hg的均值含量均高于背景值。研究区域内, Zn、Pb、Ni沿岸土壤中集中分布在西北角区域、南部和东部区域, 在沉积物中主要集中在西部区域。结合地累积污染指数和单因子污染指数, 发现Zn、Pb、Ni的指数相对较高, 应加以重视。

关键词

土壤重金属, 地累积指数法, 单因子指数法, 污染评价, 沉积物

Pollution Characteristics of Heavy Metals in Sediments and Coastal Soils of Luling Subsided Lake

Xinci Wu, Yang Zhang, Yongxin Pan, Hao Wang, Shanshan Feng, Jiangxiao Deng

College of Resources and Civil Engineering, Suzhou University, Suzhou Anhui

Received: Mar. 27th, 2023; accepted: May 23rd, 2023; published: May 30th, 2023

Abstract

In order to understand the pollution characteristics of the sediments and the soil along the subsided lake, the Luling subsided lake was taken as the research object, the contents of Cu, Zn, Ni, Cr, Pb and Hg were determined and compared with the background values of heavy metals in the

surface soil of Anhui province, the pollution grade was evaluated and the spatial distribution characteristics of the main pollution elements were analyzed by the Earth Accumulation Index Method and the single factor index method. The results: the average contents of six metals in coastal soils were Pb, Zn, Ni, Cr, Cu and Hg; the average contents of Cu and Cr in the sediments were lower than the background values of the surface soil in Anhui province, Ni was close to the background values, and the average contents of Zn, Pb and Hg were higher than the background values. In the study area, Zn, Pb and Ni coastal soils were mainly distributed in the northwest corner, the south and the east, and the sediments were mainly distributed in the west. Combined with the cumulative pollution index and single factor Pollution Index, it was found that the indexes of Zn, Pb and Ni were relatively high, which should be paid attention to.

Keywords

Soil Heavy Metals, Soil Accumulation Index, Single Factor Index, Pollution Assessment, Sediment

Copyright © 2023 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

在国家经济高速发展的过程中,工业活动会排放废气、污水等,其中所含的重金属最后都会汇聚于土壤中,进而可能会导致重金属污染;同时农业发展中,喷洒农药、施化,也会引起土壤中一定程度的重金属污染。煤炭作为人类资源不可或缺的一部分,其生产消费巨大,给人们带来生活方便的同时,其开采之后残留的废弃物对人们的健康也会造成危害,甚至还会过度开采形成塌陷湖,并带来一系列生态环境问题。矿区周围的土壤,不仅能为水体-土壤系统提供营养物质,而且还是水体重金属污染物的重要“源”与“汇”[1];表层重金属经过雨水冲刷、风化等一系列反应,在水的流动下,重金属流向塌陷湖,绝大部分与固体悬浮物结合,经化学吸附和物理沉淀作用保存在湖底沉积物中[2] [3] [4],造成沉积物的重金属污染。重金属含量的超标,对人体,动植物,甚至微生物都会带来一定的影响[5] [6],所以土壤重金属污染的治理是一项重大工程。煤矿开采后其残留的重金属对塌陷湖水体-沿岸土壤-沉积物系统也会造成危害。

近年来,不同学者对于煤炭周边土壤重金属也有所研究,就如李武江[7]等人研究表明,Cu、Ni、Zn、Pb、Cr、As 按照从大到小顺序均有超标;矿区周边土壤由矿区煤矸石经过风化、淋溶等产生的粉煤灰,淋溶液经沉降、迁移累积到土壤中。杨森[8]等人的研究提到,煤矸石土壤中 Cd、Hg、Pb、Cu、Zn、和 As 均超过河南省土壤背景值。上述学者的文章可证明煤矿及其残留物对当地土壤均有一定程度污染。然而,芦岭塌陷湖沉积物及沿岸土壤重金属污染的研究相对较少,并且缺乏对塌陷湖沉积物及沿岸土壤重金属污染情况和空间分布的研究。

基于此,本文以煤矿塌陷湖沉积物及沿岸土壤重金属含量为研究对象,通过重金属含量分析与污染等级评价,将为后续煤矿塌陷湖沉积物及土壤重金属污染的治理与保护提供科学依据。

2. 采样与测试

2.1. 研究区概况

本文取样位于安徽省宿州市芦岭塌陷湖区(图 1),宿州作为安徽省重要的煤炭基地,同时也会带来重

金属污染。芦岭[9]位于宿州埇桥区东南部，地处平原地带，地势略呈西高东低、南低北高；属于温带季风气候，降雨集中在每年的6月下旬~8月中旬；芦岭镇境内河道属淮河水系，主要河道为沱河。

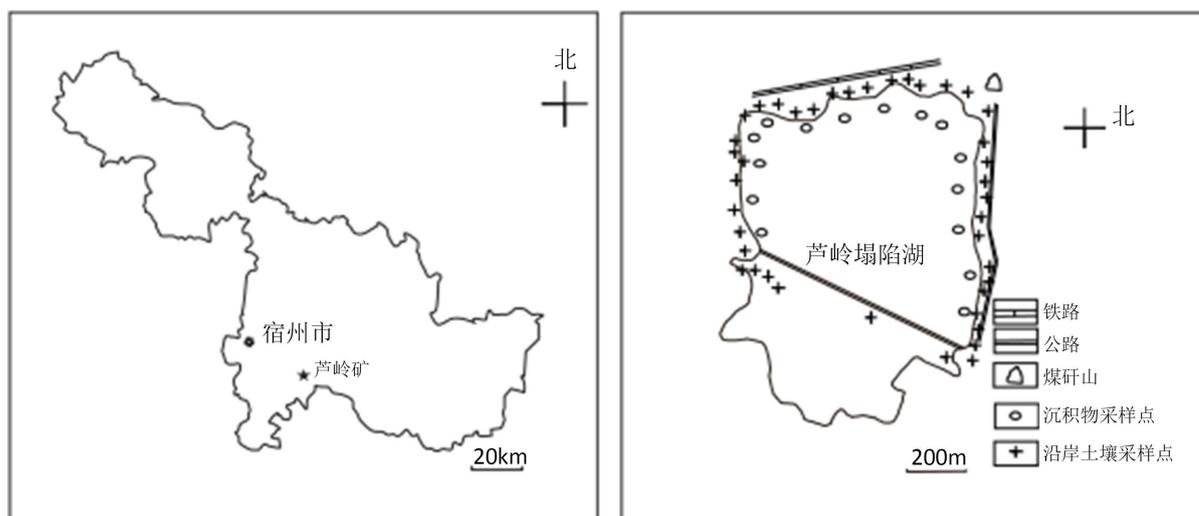


Figure 1. Location of the research area and distribution of sampling points

图 1. 研究区位置及采样点分布

2.2. 样品的采集与处理

研究所用的土样全部取自芦岭塌陷湖内以及周边的土壤。对于土样，需采集沉积物和沿岸土壤，仔细记录土样采集的位置坐标，将样本装进聚乙烯塑料袋，封口并贴上标签，沿岸土壤采集距离岸边 0.3~2 m，沉积物采集 0.5~1 kg 的表层沉积物，现场剔除明显的植物根茎、石砾等杂质后装入聚乙烯塑料袋中，封口并贴上标签。共布设采样点 55 个，沿岸土壤 40 个，沉积物 15 个。

将采集的土样在预处理实验室里进行自然晾干，待样品晾干后，挑出石块与杂草，然后用玛瑙研钵进行研磨，研磨之后再行过筛，随后使用手动压片机将过筛之后的土样进行压片处理，为后期测试做准备。

2.3. 样品测试

样品测试均在安徽省煤炭勘探工程技术研究中心完成，土样通过 X 射线荧光光谱仪(XRF)检测 Cu、Fe、Zn、Co、Ni、Cr、Mn 等重金属的含量。

2.4. 评价标准与方法

本文采用安徽表层土壤重金属背景值与该塌陷区域所测得的重金属含量进行比较[10][11]，同时也采用两种污染评价方法进行土壤重金属污染评价。

1) 地累积指数

地累积指数[12][13]是 20 世纪 60 年代晚期发展起来的重金属评价方法，它是利用一种重金属的总含量与其他地球化学背景值的关系，来评价沉积物中重金属的污染程度，其计算方法如下式：

$$I_{geo} = \log_2 [C_n / kB_n] \quad (1)$$

式中 I_{geo} 为地累积指数； C_n 为土壤中重金属元素 n 的实测含量， B_n 为土壤中重金属 n 的背景含量，本文以安徽省土壤背景值作为参考； k 为修正系数，根据各地岩石差异引起的背景值决定(本文取 1.5)。其等级分类标准见表 1。

Table 1. Classification standard of local cumulative pollution index
表 1. 地累积污染指数等级分类标准

I_{geo}	污染等级	污染程度
≤ 0	0	无污染
$0 < I_{geo} \leq 1$	1	轻微污染
$1 < I_{geo} \leq 2$	2	轻度污染
$2 < I_{geo} \leq 3$	3	中度污染
$3 < I_{geo} \leq 4$	4	偏重污染
$4 < I_{geo} \leq 5$	5	重度污染
$5 < I_{geo} \leq 6$	6	严重污染

2) 单因子指数法

单因子指数法[14] [15]是国内外比较常用的方法,也是比较简单的一种评价方法,研究一种重金属污染物在一定背景值下的污染程度。单因子指数法能比较直观地反映重金属污染情况,其计算方法如下式:

$$P_i = C_i/S_i \quad (2)$$

式中 P_i 为土壤中重金属 i 的污染指数; C_i 为土壤中重金属的质量分数; S_i 为重金属的评价标准。其等级分类标准见表 2。

Table 2. Single factor pollution index grade classification standards
表 2. 单因子污染指数等级分类标准

等级划分	单因子污染指数	污染等级	污染水平
1	$P_i \leq 0.7$	安全	清洁
2	$0.7 < P_i \leq 1.0$	警戒线	尚清洁
3	$1.0 < P_i \leq 2.0$	轻污染	轻污染
4	$2.0 < P_i \leq 3.0$	中污染	中污染
5	$P_i \geq 3.0$	重污染	重污染

3. 结果与讨论

3.1. 土壤重金属含量特征

3.1.1. 沿岸土壤重金属

经过对芦岭塌陷湖沿岸土壤重金属的测试,该研究区沿岸土壤重金属含量如表 3 所示, Cu、Zn、Ni、Cr、Pb 和 Hg 六种元素的重金属含量范围分别为 2.40~36.17 mg/kg, 130.48~223.64 mg/kg, 15.53~70.45 mg/kg, 28.40~36.87 mg/kg, 165.42~224.60 mg/kg, 0.00~1.15 mg/kg, 平均值从大到小分别为 Pb、Zn、Ni、Cr、Cu、Hg, 将六种重金属元素的平均值与安徽省表层土壤背景值的比较可知: Hg 的平均值与背景值接近, Cu、Cr 的平均值低于背景值; 而 Zn、Ni、Pb 三种元素均超过安徽省土壤背景值, Zn、Ni、Pb 的含量分别为背景值的 2.5、1.27、7.52 倍, Hg 的含量只有少部分样品含有, 其余样品均为 0 mg/kg。

变异系数是显示样品重金属含量的离散程度, 变量值越大, 其离散程度越高, 反之越小[16]。一般认为 $CV < 10\%$ 为弱变异, $10\% \sim 100\%$ 为中等强度变异, $CV \geq 100\%$ 为强变异[17]。从表 3 的结果可以看出: 六种元素中只有 Cr 为弱变异, Cu、Zn、Ni、Pb 均为中等强度变异, Hg 为强变异; Cu、Ni 均大于 30%, Zn 和 Pb 均在 10%~20% 之间; Cu、Ni 和 Hg 三种元素变异系数较高, 反应离散程度大, 可能受外源影响较大。

Zn 元素含量的最大值可能与周围垃圾的堆放,其取样位置位于公路旁,可能与汽车尾气的排放有关;Ni、Pb、Hg 元素含量的最大值均取自铁路附近,由于周围有煤矸石的堆放,可能对于重金属元素的积累有一定作用。

Table 3. Content of heavy metal elements in soil along Luling Collapsed Lake (mg/kg)

表 3. 芦岭塌陷湖沿岸土壤重金属元素含量(mg/kg)

统计参数	重金属元素					
	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Hg
最大值	36.17	223.64	70.45	36.87	224.60	1.15
最小值	2.40	130.48	15.53	28.40	165.42	0.00
平均值	11.54	157.49	37.89	32.12	200.04	0.045
标准差	9.98	24.57	12.99	2.36	20.87	0.24
变异系数	0.87	0.16	0.34	0.07	0.10	4.90
安徽省表层土壤背景值	20.40	62.00	29.80	66.50	26.60	0.50

3.1.2. 沉积物重金属

将塌陷湖中沉积物重金属含量测定的结果与安徽省土壤背景值对比,结果如表 4 所示,Cu、Zn、Ni、Cr、Pb 和 Hg 六种元素的平均值分别为 6.74、145.45、31.19、32.83、194.40 和 1.73 mg/kg。除 Cu、Cr 的平均值含量低于安徽省表层土壤背景值,Ni 较接近于安徽省表层土壤背景值,其余三种元素 Zn、Pb 和 Hg 的均值含量均高于,分别是安徽省表层土壤背景值的 2.35、7.42、3.46 倍,说明研究区内沉积物已达到不同程度的污染。

由沉积物变异系数分析结果可知,Zn、Cr 和 Pb 为弱变异,含量均小于 10%,Cu、Ni 为中等强度变异,Hg 为强变异;其中 Cu、Ni 和 Hg 的变异系数较高,离散程度较大,可能受到外源因素影响。通过塌陷湖沿岸土壤和沉积物含量的分析可知,两种类型土壤的重金属含量各种参数相似。

Table 4. Content of heavy metal elements in sediments of Luling collapsed Lake (mg/kg)

表 4. 芦岭塌陷湖沉积物重金属元素含量(mg/kg)

统计参数	重金属元素					
	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Hg
最大值	19.73	159.77	54.72	38.90	220.99	21.35
最小值	2.31	135.66	0.00	27.94	168.02	0.00
平均值	6.74	145.45	31.19	32.83	194.40	1.73
标准差	5.42	7.28	15.20	2.79	19.04	5.56
变异系数	0.80	0.05	0.49	0.09	0.10	3.21
安徽省表层土壤背景值	20.40	62.00	29.80	66.50	26.60	0.50

3.2. 土壤重金属空间分布特征

通过对研究区内沿岸土壤及沉积物重金属含量的分析,发现 Zn、Pb、Ni 的含量较高,于是利用克里金插值分析方法,得出三种重金属的空间分布。

沿岸土壤 Zn (图 2(a))的高值区出现在南部、东部和西部偏北区域,整体呈现从西北往东南方向增大

的趋势。其中东部和南部两边有公路，可能与公路上所排出的尾气有关；西北部有铁路。沉积物中 Zn (图 2(b))的高值区出现在西边部分地区和西北角区域，西边主要为农田区，可能与农作物种植过程中农药、化肥的使用有关；西北角区域是煤炭运输的铁道，可能与火车的运输有关，也可能运输过程中掉落的物质对该区域造成了影响。

沿岸土壤中 Pb (图 3(a))的高值区出现在西北角和东北角区域，并且从北部和西部逐渐向东南向递增；西北角区域积累的原因可能与火车的运输有关，东北角区域周围有煤矸山；北部和西部邻近公路，导致 Pb 累积的原因可能与汽车尾气的排放，以及汽车轮胎摩擦残留下的物质有关。沉积物中 Pb (图 3(b))的高值区出现在西北部区域，西部主要为农田，北部有铁路。

沿岸土壤中 Ni (图 4(a))的高值区出现在西北角区域，其中东部和南部区域含量也较高，整体呈现往

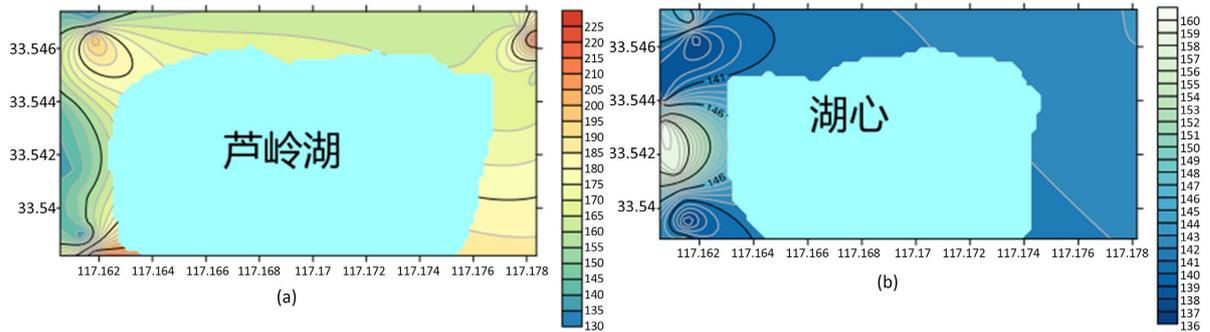


Figure 2. Spatial distribution of Zn content
图 2. Zn 含量空间分布图

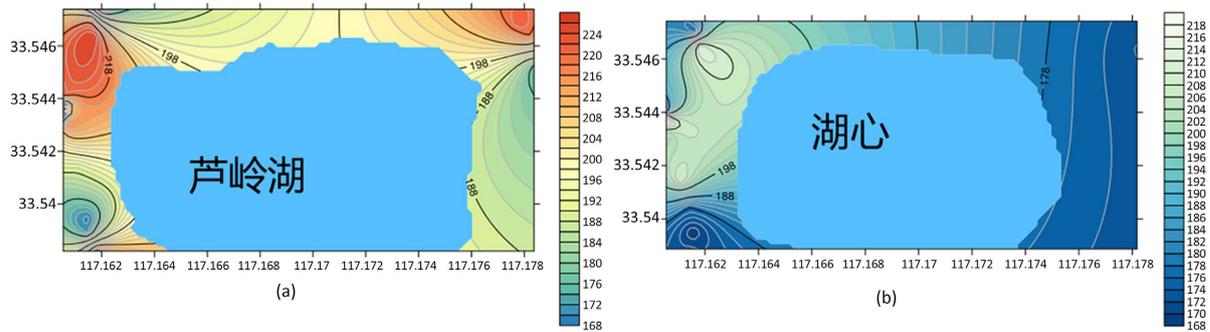


Figure 3. Spatial distribution of Pb content
图 3. Pb 含量空间分布图

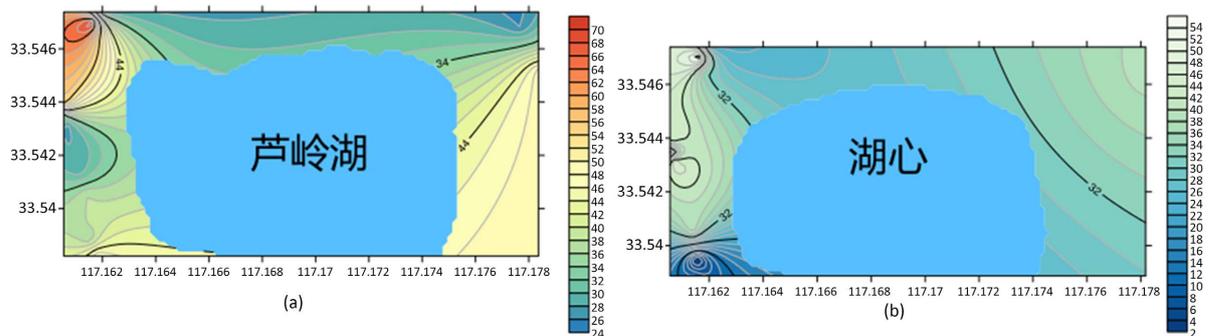


Figure 4. Spatial distribution of Ni content
图 4. Ni 含量空间分布图

东南递增的趋势；东部和南部两边有公路，西北方向有铁路，Ni 的含量可能与火车的运输、尾气的排放等有关。沉积物中 Ni (图 4(b)) 的高值区出现在西部区域和东部区域，其中西部主要为农田，东部有公路，可能对 Ni 的累积造成一定影响。

3.3. 土壤重金属污染评价

3.3.1. 沿岸土壤重金属污染评价

1) 地累积污染指数评价。根据地累积污染指数数据分析可知(见图 5)，研究区内沿岸土壤中 Pb 的污染指数相对比较大，达到中度污染程度，其中 Pb 的地累积污染指数的范围为 2.052~2.493，全部都属于中度污染程度；而重金属 Zn 和 Hg 的地累积污染指数相对较小，处于轻微污染程度，其中 Hg 的地累积污染指数只有一个样品的污染指数超过 0，其余样品都属于无污染程度；Cu、Cr 和 Ni 的地累积污染指数均值均处于无污染程度，其中 Cu 仅有两个样品处于轻微污染程度，Ni 有 33.3% 的样品处于轻微污染程度；总体看来 Cu、Zn、Ni、Cr 和 Hg 五种重金属元素的污染累积程度较小。

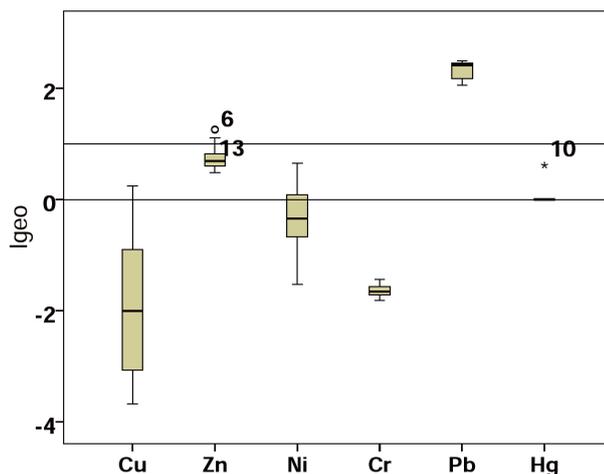


Figure 5. Box pattern of heavy metal cumulative pollution index in coastal soil

图 5. 沿岸土壤重金属地累积污染指数箱型图

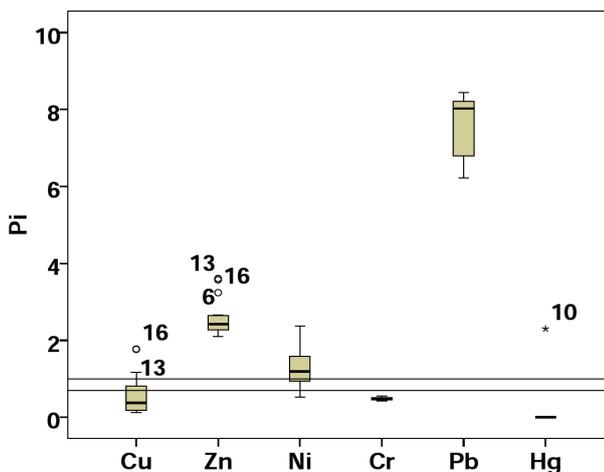


Figure 6. Box pattern of coastal soil heavy metal single factor pollution index

图 6. 沿岸土壤重金属单因子污染指数箱型图

2) 单因子污染指数评价。结合单因子污染指数结果分析可知(见图 6), 芦岭塌陷湖沿岸土壤中重金属 Zn、Ni 和 Pb 的污染指数相对较大, 高于警戒线, 分别处于中污染、轻污染、重度污染水平; Cu、Cr 和 Hg 的污染指数相对较小, 总体呈安全等级, 清洁污染水平, 其中 Cu 有 16.7% 的样品为轻污染水平, 16.7% 的样品处于警戒线内, 整体污染指数结果较小, Hg 仅有一个样品处于警戒线内, 其余均为清洁污染水平。

经过地累积污染指数和单因子污染指数数值的分析与比较, 发现沿岸土壤中 Pb 的重金属污染等级程度较高, 需要对于有关 Pb 元素积累的一系列活动加以重视; 样品中 Hg 有一小部分属于中度污染, 经过对于样品位置的查看分析, 可能是与周围的环境有一定关系; Cu、Zn、Ni 和 Cr 这四种重金属元素污染程度较低, 但也有一部分达到中度污染水平, 说明该研究区沿岸土壤中重金属的污染达到了不同程度的积累。

3.3.2. 沉积物重金属污染评价

1) 地累积污染指数评价地累积污染指数结果分析如图所示(图 7), 从图中可以看出 Cu 和 Cr 的地累

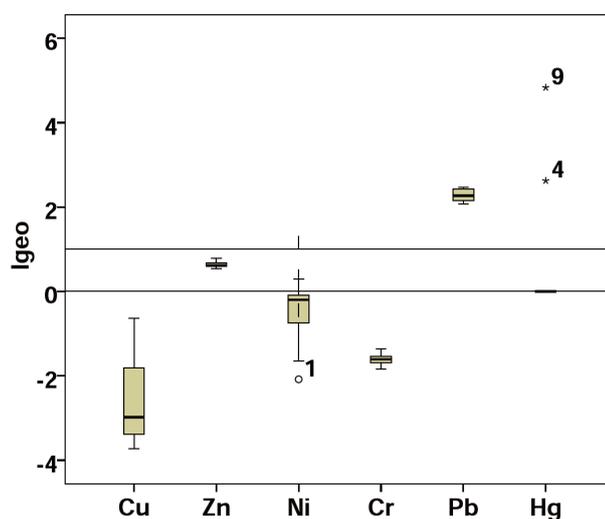


Figure 7. Cumulative pollution index of heavy metals in sediments

图 7. 沉积物重金属地累积污染指数箱型图

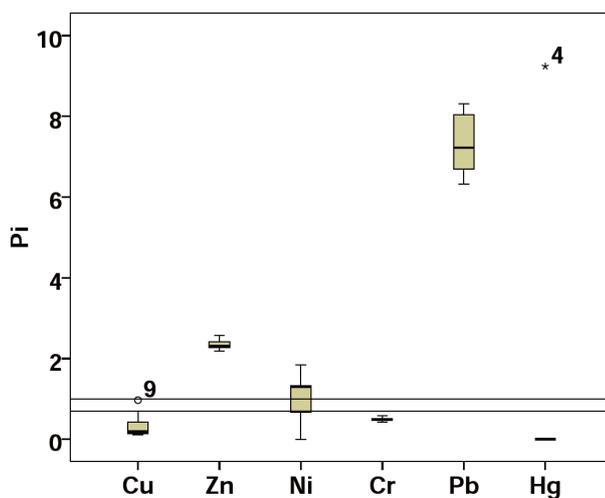


Figure 8. Single factor pollution index of heavy metals in sediments

图 8. 沉积物重金属单因子污染指数箱型图

积指数范围分别为-3.0728~-0.633、-1.836~-1.359,全部都属于无污染程度;Zn属于轻微污染程度;Pb属于中度污染程度,平均污染等级相对于其他五种元素最高;Ni有13.3%的样品处于轻微污染程度,最大值为0.292,最小值为-2.083;Hg有两个样品地累积污染指数异常,其余样品含量为0。

2) 单因子污染指数评价通过对单因子污染指数的分析,结果如图所示(图8)。Hg和Pb的污染指数相对较大,达到了重污染。其中Hg有两个样品处于重污染,其余样品污染指数均为0,为无污染;Pb的样品全部属于重污染等级;其次Zn的单因子指数最大值为2.577,最小值为2.188,全部属于中污染水平;Ni有73.3%的样品达到警戒线之上,甚至有些超过警戒线范围;Cu有6%的样品达到警戒线,其余均为安全等级;Cr全部处于安全范围之内。

经过对比而知,沉积物的地累积污染指数和单因子污染指数的评价结果基本相符。

4. 结论

根据芦岭塌陷湖沿岸土壤样品中的Cu、Zn、Ni、Cr、Pb和Hg这六种元素的检测与分析,得出以下结论:

1) 通过与安徽表层土壤背景值的对比得知:沿岸土壤六种金属含量的平均值从大到小分别为Pb、Zn、Ni、Cr、Cu、Hg;沉积物中Cu、Cr的平均值含量低于安徽省表层土壤背景值,Ni较接近于背景值,Zn、Pb和Hg的均值含量均高于背景值。

2) 研究区内,沿岸土壤中Zn、Pb、Ni集中分布在西北角区域、南部和东部区域。沉积物中Zn、Pb、Ni主要集中在西部区域。根据地累积污染指数和单因子指数分析可知,研究区内沿岸土壤和沉积物中Pb、Zn、Ni的污染指数相对较高,总体上整个区域存在污染风险,需引起重视。

基金项目

2022年国家级大学生创新创业训练计划项目(项目编号:202210379056);2022年宿州学院大学生创新创业训练计划项目(项目编号:ZCXM22-312;YLXYBXM22-81);宿州学院资助省级创新创业训练计划项目,项目名称:盐碱农田重金属污染评价及来源分析——以甘肃酒泉市银达镇为例;2021年安徽省大学生创新创业训练计划项目(项目编号:S202110379192)。

参考文献

- [1] 金相灿. 沉积物污染化学[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992: 327-328.
- [2] Pu, X.C. and Cutright, T.J. (2006) Sorption-Desorption Behavior of PCP on Soil Organic Matter and Clay Minerals. *Chemosphere*, **64**, 972-983. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.01.017>
- [3] He, Y., Xu, J.M., Wang, H.Z., Zhang, Q.C. and Muhammad, A. (2006) Potential Contributions of Clay Minerals and Organic Matter to Pentachlorophenol Retention in Soils. *Chemosphere*, **65**, 497-505. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.01.020>
- [4] Sajidu, S.M.I., Persson, I., Masamba, W.R.L. and Henry, E.M.T. (2008) Mechanisms of Heavy Metal Sorption on Alkaline Clays From Tundulu in Malawi as Determined by EXAFS. *Journal of Hazardous Materials*, **158**, 401-409. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.01.087>
- [5] 符永鹏. 土壤重金属污染修复技术的研究进展[J]. 资源节约与环保, 2021(8): 21-22.
- [6] 孙立强, 孙崇玉, 刘飞, 包先明. 淮北煤矿周边土壤重金属生物可给性及人体健康风险[J]. 环境化学, 2019, 38(7): 1453-1460.
- [7] 李武江, 朱四喜. 某矿区农田土壤重金属分布特征与生态风险评价[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(3): 93-101.
- [8] 杨森, 赵森, 刘涛, 任志胜. 平顶山市煤矿区土壤重金属污染程度评价[J]. 能源环境保护, 2019, 33(6): 51-54.
- [9] 向鹏飞, 郭艳, 张发展, 王进, 刘涵. 芦岭煤矿塌陷区土壤重金属污染特征研究[J]. 河南工程学院学报(自然科学版), 2020, 32(3): 26-30.

- [10] 张雅茹, 黄伊恒, 于博媛. 煤矿周边土壤重金属的含量特征及健康风险评价[J]. 安徽农学通报, 2021, 27(6): 139-144+151.
- [11] 苏海民, 汪兆国, 黄园. 宿州市煤矿区农田土壤重金属污染及生态风险评价[J]. 山东师范大学学报(自然科学版), 2017, 32(2): 99-104.
- [12] 唐世琪, 刘秀金, 杨柯, 郭飞, 杨峥, 马宏宏, 刘飞, 彭敏, 李括. 典型碳酸盐岩区耕地土壤剖面重金属形态迁移转化特征及生态风险评价[J]. 环境科学, 2021, 42(8): 3913-3923.
- [13] 孙浩, 周春财, 徐仲雨, 王兴明, 刘桂建. 淮北矿区土壤重金属空间分布与环境评价[J]. 中国科学技术大学学报, 2018, 48(7): 560-566.
- [14] 张文娟, 王利军, 王丽, 史兴民, 卢新卫. 西安市地表灰尘中重金属污染水平与健康风险评价[J]. 土壤通报, 2017, 48(2): 481-487.
- [15] 毛香菊, 马亚梦, 邹安华, 肖芳, 冯安生, 孙体昌. 内蒙古草原某铜钼矿区土壤重金属污染特征研究[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(6): 156-161+173.
- [16] 付金沐, 盛宜丹, 刘杰云, 李静. 宿州市朱仙庄矿采煤区土壤重金属污染特征研究[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2017, 35(6): 976-979.
- [17] 张雅茹, 桂和荣, 黄伊恒. 煤矿周边土壤重金属空间分布及污染水平评价[J]. 安徽农学通报, 2020, 26(13): 127-130.