

引用格式:魏星宇,杨永琼,王敬富,等.贵州草海流域下不同土地类型重金属污染空间分布特征及评价[J].贵州师范大学学报(自然科学版) 2021,39(4):39-45. [WEI X Y, YANG Y Q, WANG J F, et al. Spatial distribution characteristics and evaluation of heavy metals pollution in different land types under Caohai watershed in Guizhou province [J]. Journal of Guizhou Normal University ( Natural Sciences) 2021, 39(4) : 39-45. ]

## 贵州草海流域下不同土地类型重金属 污染空间分布特征及评价

魏星宇<sup>1 2</sup> 杨永琼<sup>1\*</sup> 王敬富<sup>2</sup> 杨海全<sup>2</sup> 邓 赞<sup>1</sup> 余 伟<sup>1 2</sup>

(1. 贵州师范大学 地理环境科学学院, 贵州 贵阳 500025; 2. 中国科学院地球化学研究所  
环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081)

**摘要:** 为探究不同土地类型下的土壤重金属污染问题,对草海流域内耕地、林地等 5 种土地利用类型的 136 个表层土壤样品进行重金属元素(Cr、Cu、Zn、As、Cd、Pb)分析评价。采用单因子、内梅罗指数和 Hakanson 潜在生态风险评价指数法,将该流域污染风险空间分布特征进行可视化分析。结果显示:草海流域内不同土地类型中,建设用地重金属含量最高,其中 Pb 含量高出贵州省土壤背景值 3.56 倍;从空间分布上看,东南方向林地、草地和建设用地 Cd 含量较高,Cr、As 含量高值点位主要分布于流域内西南及西北两侧林地中;单因子分析表明,土壤重金属污染以 Cd 为主,处于重度污染状态,且不同土地类型污染指数有所差异;不同土地类型重金属污染 RI 值依次为:林地(175.58) > 建设用地(172.82) > 草地(172.33) > 耕地(141.60) > 沼泽地(116.21);林地、建设用地、草地处于中等风险水平,耕地和沼泽地为轻度风险水平。

**关键词:** 土地类型; 重金属污染; 污染评价; 分布特征; 草海流域

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 1004—5570(2021)04—0039—07

DOI: 10.16614/j.gznunj.zrb.2021.04.005

## Spatial distribution characteristics and evaluation of heavy metals pollution in different land types under Caohai watershed in Guizhou province

WEI Xingyu<sup>1 2</sup>, YANG Yongqiong<sup>1\*</sup>, WANG Jingfu<sup>2</sup>, YANG Haiquan<sup>2</sup>,  
DENG Zan<sup>1</sup>, YU Wei<sup>1 2</sup>

(1. School of Geographical Environmental Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 500025, China;

2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy  
of Sciences, Guiyang, Guizhou 550081, China)

**Abstract:** To explore the problem of soil heavy metal pollution under different land types, 136 surface soil samples of 5 land-use types, including cultivated land and woodland in the Caohai watershed, were analyzed and evaluated for heavy metal elements (Cr, Cu, Zn, As, Cd, Pb). The single-factor, Numero index, and Hakanson potential ecological risk assessment index methods were used to visually an-

收稿日期: 2021-04-19

基金项目: 贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2020]4Y015号、黔科合支撑[2020]4Y006号、黔科合 LH 字[2017]7344号)

\* 通讯作者: 杨永琼(1984-)女, 博士, 副教授, 研究方向: 环境污染控制与修复, E-mail: yyongqiong@163.com.

alyze the spatial distribution characteristics of pollution risks in the watershed ,The results show that among different land types in the Caohai basin ,the content of heavy metals in construction land is the highest ,and the content of Pb is 3.56 times higher than the soil background value in Guizhou province; From the spatial distribution ,the content of Cd in woodland ,grassland and construction land in the southeast is higher ,and Cr ,the high As content points are mainly distributed in the woods ,on the southwest and northwest sides of the basin; Single-factor analysis shows that heavy metal pollution in soil is mainly Cd ,which is in a severely polluted state ,and the pollution index of varying land types is different; The *RI* values of heavy metal pollution of different land types are as follows: woodland (175.58) > construction land (172.82) > green (172.33) > cultivated land (141.60) > marshland (116.21); Forest land ,construction land ,and grassland are at a medium risk level ,and cultivated land and swampland are at moderate risk level.

**Key words:** land types; heavy metals pollution; pollution evaluation; distribution characteristics; Caohai basin

## 0 引言

土壤是人类最重要和最宝贵的自然资源之一。受火山喷发、岩石风化等自然过程及工业化、城市化等人类活动的影响,大量的重金属富集在土壤中(其中,矿山尾矿、城市固废、富含重金属污泥是造成土壤重金属污染的主要来源<sup>[1]</sup>),不仅对人类健康造成了巨大威胁,也严重阻碍了城市的发展<sup>[2]</sup>。由于重金属具有不可自然降解的性质,会在土壤中保留数十年,甚至更长时间,且不同土地利用类型土壤中的重金属积累量与生态风险也存在较大差异<sup>[3]</sup>,为此,国内外不少研究者对不同土地类型的重金属污染进行了相关研究。如王锐等<sup>[4]</sup>通过对重庆市汞矿区不同土地利用类型土壤重金属的生态风险评价,发现该研究区土壤 Cd 潜在生态风险较高;Mayuri<sup>[5]</sup>分析了加兹阿巴德地区的土壤重金属污染空间的分布情况,并使用聚类分析对其癌症风险进行了估算。

草海位于贵州省威宁县,是喀斯特天然淡水湖泊型湿地,同时也是国家一级保护动物黑颈鹤的重要越冬栖息地<sup>[6]</sup>。鉴于流域范围内铅锌矿分布广泛且冶炼活动场所较多,对生态环境具有潜在影响,加之草海流域不同土地类型下的重金属污染空间分布及评价也少见报道,为此,本研究利用卫星遥感技术将草海流域内土地划分为耕地、林地、草地、建设用地和沼泽地,分析土壤样品中重金属(Cd、As、Cu、Pb、Cr、Zn)含量的空间分布特征及流域重金属污染状况的风险评价,以期为草海流域内土壤的生态环境保护和管理工作提供借鉴。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

草海湿地位于贵州省威宁彝族回族苗族自治县县城西南侧(地理坐标:26°47′~26°52′N,104°10′~104°20′E),该区域地处乌蒙山麓中,具有云贵高原腹地中少有的天然淡水湖泊湿地生态系统特征。草海湿地保护区面积 120 km<sup>2</sup>,为亚热带季风气候,年平均气温 10.9℃,年均降水量 950.9 mm<sup>[7]</sup>,其生态环境具有脆弱性、典型性、重要性、生物多样性和气候特殊性等特点。近年来,因工农活动和城镇化的影响,湿地生态系统开始退化,加之“土法炼锌”工业时期大量的废弃炉渣遗留,该区域的土壤生态环境严重污染<sup>[8]</sup>。

### 1.2 样品采集与处理

根据不同土地利用现状,围绕草海流域采用蛇形布点法确定采样点位置,由于土壤在空间分布上具有一定的不均匀性,故进行多点采样。每个样点设计 5 m×5 m 正方形,利用木铲垂直采集对角线和中心点 0~20 cm 处的表层土壤样品 1 kg,共计采样 136 个,采样点分布见图 1。根据地形及土地利用类型的面积,土壤样品数分别为林地 23 个、草地 18 个、耕地 53 个、建设用地 22 个、沼泽地 20 个。土壤样品现场去除掉表面杂质和砾石,并用四分法<sup>[9]</sup>取样约 1 kg,装入干净布袋中贴好标签,记录 GPS 上的地理坐标后带回实验室。土壤样品经(自然)风干、敲碎,研磨过 200 目尼龙筛,装入密封袋中保存备用<sup>[10]</sup>。

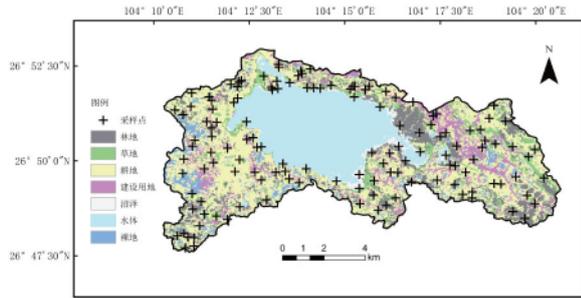


图 1 不同土地类型采样点分布图

Fig.1 Distribution of sampling points for different land types

### 1.3 重金属含量测试分析

准确称取 0.05 g 样品,置于聚四氟乙烯容器中,土壤采用硝酸( GR) -氢氟酸( GR) 消解,重金属含量用电感耦合等离子体质谱仪( NexION 300Q) 测定。在其测试过程中加入国家标准土壤分析物质 GBW07562( GSS-71) 进行全程质量控制,结果显示土壤重金属的回收率在 90.1% ~ 102.3% 之间,分析过程满足质量控制要求。

### 1.4 土壤污染评价法

#### 1.4.1 单因子指数法与内梅罗综合污染指数法

土壤污染评价标准以贵州土壤环境背景值为参照标准。单因子指数法可以确定主要的重金属含量的危害程度,通过土壤污染的实测值与贵州省土壤元素背景值<sup>[11]</sup> 相比来说明污染物的状况。

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

式中:  $P_i$  指土壤中重金属  $i$  的污染指数;  $C_i$  指土壤重金属  $i$  中的实测浓度值( mg/kg);  $S_i$  为重金属  $i$  的评价标准值( mg/kg)。当  $P_i \leq 1$ ,表示土壤重金属  $i$  的含量未超标;  $P_i > 1$  时,值越大表示土壤重金

属  $i$  的含量超标越严重。

土壤重金属污染往往是多种不同元素的复合污染,为全面反映各污染物对土壤的不同作用,采用内梅罗综合污染指数法进行评价,该方法兼顾单因子指数法平均值和最高值,能突出环境中污染较重的污染物<sup>[12]</sup>。

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{(P_{\text{imax}})^2 + (P_{\text{iave}})^2}{2}} \quad (2)$$

式中:  $P_{\text{综}}$  表示重金属元素  $i$  的内梅罗综合污染指数;  $P_{\text{imax}}$  指重金属元素  $i$  的单因子污染指数最大值;  $P_{\text{iave}}$  为重金属元素  $i$  的单因子污染指数的算术平均值。依据单因子指数法和内梅罗综合污染指数法将土壤重金属污染分为 5 个等级,具体见表 1。

#### 1.4.2 潜在生态危害指数法

Hakanson<sup>[13]</sup> 于 1980 年提出潜在生态危害指数法,该方法将重金属的生态效应、毒理效应和环境效应联系起来,目前在生态风险评价中使用较为广泛<sup>[14]</sup>,根据该方法评价草海 5 种不同土地类型中的潜在生态风险,计算公式如下:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_z^i = \sum_{i=1}^n (T^i \times C_z^i) = \sum_{i=1}^n (T^i \times \frac{M_z}{N_z}) \quad (3)$$

式中:  $RI$  为多种重金属的综合潜在生态风险指数;  $E_z^i$  为  $h$  样点重金属  $i$  的单项潜在生态风险系数;  $T^i$  为重金属  $i$  的毒性系数(  $T^{\text{Cr}} = 2, T^{\text{Cu}} = 5, T^{\text{Zn}} = 1, T^{\text{As}} = 10, T^{\text{Cd}} = 30, T^{\text{Pb}} = 5$ );  $C_z^i$  为重金属  $i$  的富集系数;  $M_z$  为重金属  $Z$  的实测值;  $N_z$  为重金属  $Z$  的参比值。土壤重金属污染指数<sup>[15]</sup> 与潜在生态风险指数的分级标准见表 1。

表 1 土壤重金属污染指数评价分级标准

Tab.1 Soil heavy metal pollution index evaluation grading standard

等级划分	单因子污染指数	单项潜在生态风险系数	综合污染指数	综合潜在生态风险指数
1	无污染( $P_i \leq 0.7$ )	轻微风险( $E_z^i \leq 40$ )	无污染( $P_{\text{综}} \leq 0.7$ )	轻微风险( $RI < 150$ )
2	轻微污染( $0.7 < P_i \leq 1.0$ )	中等风险( $40 \leq E_z^i < 80$ )	轻微污染( $0.7 < P_{\text{综}} \leq 1.0$ )	中等风险( $150 \leq RI < 300$ )
3	轻度污染( $1.0 < P_i \leq 2.0$ )	较强风险( $80 \leq E_z^i < 160$ )	轻度污染( $1.0 < P_{\text{综}} \leq 2.0$ )	较强风险( $300 \leq RI < 600$ )
4	中度污染( $2.0 < P_i \leq 3.0$ )	很强风险( $160 \leq E_z^i < 320$ )	中度污染( $2.0 < P_{\text{综}} \leq 3.0$ )	很强风险( $600 \leq RI \leq 1\ 200$ )
5	重度污染( $P_i > 3.0$ )	极强风险( $E_z^i \geq 320$ )	重度污染( $P_{\text{综}} > 3.0$ )	极强风险( $RI \geq 1\ 200$ )

### 1.5 风险可视化制图与数据处理

利用 ENVI 5.3 与 ArcGIS 10.5 软件对选取影像进行分析与处理,对 5 种土地利用类型分别进行( IDW) 反距离权重插值法制图,将重金属含量统计图与不同土地利用类型矢量图结合,得到研究区

域的土壤重金属含量风险指数空间分布图。IDW 以插值点与样本点间的距离为权重进行加权平均,用采样点已知的数值估算其周围的数值来确定草海不同土地类型土壤重金属的空间分布特征。所有数据采用 Excel 2010 和 SPSS 24.0 进行统计分

析,数据结果用 Origin 2017 制图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同土地类型重金属含量分布特征

研究区内耕地、林地、草地、建设用地和沼泽地土壤中 Cr、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 平均含量见表 2。由表 2 可知:土壤样品的 Cr、Cu、Zn、As、Cd、Pb 平均含量分别为 111.62、35.19、121.26、17.36、2.56、125.23 mg/kg,分别是贵州省土壤背景值<sup>[11]</sup>的 1.16、1.10、1.22、0.87、3.88、3.56 倍;变异系数(CV)标准差与均值的比值可反映元素在土壤中的变异程度<sup>[16]</sup>,草海流域土壤 Cd(55.39%)、Pb(66.91%)变异系数均超过了 50%,变异特征明显,表明流域土壤受到明显的人类活动影响,而流域土壤重金属 Cr、Cu、Zn、As 属中等变异水平。此外,由表 2 还得知:在耕地、草地土壤类型中,除 As 元素外,其余元素均超过贵州省土壤背景值,这可能是流域土壤重金属来源复杂和长期积累的结果;在林地中,土壤 Cr、Cd 含量最高,Cu、As 含量低于

贵州省土壤背景值;建设用地土壤中土壤的 Cu、Zn、As、Pb 含量均高于其他土地类型及贵州省土壤背景值。

研究区土壤重金属污染受农业活动、土法炼锌等影响较为明显。本研究显示,耕地土壤污染主要来源于化肥施用及大气沉降,这与郭平等<sup>[17]</sup>研究结果相似。林文杰认为土法炼锌造成土壤中 Pb、Zn、Cd 元素积累进而导致土壤环境受到污染<sup>[18]</sup>,许朋柱等发现城市固废和农田化肥是导致 Cr 污染高值的主要来源<sup>[19]</sup>,这些均致使该区域土壤中 Pb、Zn、Cd 含量明显高于贵州省土壤背景值。另外,大气沉降重金属也会对土壤重金属含量上升造成间接影响<sup>[20]</sup>,由于草地在流域中分布零散,故推测草地土壤重金属主要受大气干湿沉降作用影响。建设用地土壤中重金属含量主要受汽车尾气和城市固废影响,与邵莉等研究结果一致<sup>[21]</sup>。此外,基础设施落后、人口稠密、不合理的矿产资源开发<sup>[22]</sup>等因素,也导致产生的污染流入保护区内<sup>[23]</sup>,对沼泽地内土壤的重金属含量产生相关影响。

表 2 不同土地类型土壤重金属含量特征

Tab.2 Characteristics of soil heavy metal content in different land types

类型		重金属含量( mg · kg)					
		Cr	Cu	Zn	As	Cd	Pb
耕地	最大值	160.15	69.16	201.50	38.21	5.73	382.46
	最小值	66.13	15.16	75.21	5.25	0.52	20.14
	均值 ± 标准差	111.38 ± 21.96	38.76 ± 9.70	114.87 ± 21.49	17.26 ± 6.60	2.31 ± 1.20	129.43 ± 86.24
林地	最大值	155.13	44.57	160.21	35.26	6.35	215.00
	最小值	65.22	15.90	105.31	9.26	1.32	7.62
	均值 ± 标准差	117.03 ± 26.24	30.26 ± 8.20	129.86 ± 17.34	16.79 ± 5.61	3.09 ± 1.48	110.74 ± 63.66
草地	最大值	158.70	52.36	148.52	38.66	5.86	296.30
	最小值	53.70	21.63	76.21	8.65	1.13	66.12
	均值 ± 标准差	108.95 ± 34.41	36.68 ± 8.81	111.03 ± 21.20	18.35 ± 7.66	2.92 ± 1.49	147.45 ± 76.31
建设用地	最大值	153.13	80.70	280.63	70.96	8.45	420.12
	最小值	80.15	20.46	94.12	8.63	1.07	50.00
	均值 ± 标准差	112.72 ± 19.43	43.82 ± 13.32	163.40 ± 47.92	20.78 ± 12.38	2.73 ± 1.92	181.31 ± 90.34
沼泽地	最大值	156.16	26.46	76.16	24.25	4.33	72.76
	最小值	60.23	17.65	120.36	6.56	0.60	28.62
	均值 ± 标准差	107.29 ± 27.34	20.57 ± 2.41	91.14 ± 10.59	13.63 ± 5.13	2.11 ± 0.92	49.09 ± 10.02
总计	均值	111.62	35.19	121.26	17.36	2.56	125.23
	变异系数(%)	22.31	33.47	27.64	45.00	55.39	66.91
贵州省土壤背景值		95.90	32.00	99.50	20.00	0.659	35.20

### 2.2 重金属污染空间分布格局

由图 2 可见,土壤重金属元素 Cu、Cr、Pb 含量呈“东北部高、西南部低”的空间分布特征。其中,

土壤 Cu 含量高值集中在东北部,与王志杰<sup>[24]</sup>等研究结果相似,该地块以城镇建设用地、林地为主,Cu 污染的主要来源为区域中电焊厂、化肥厂及钢

铁类等工业加工厂; Cr 含量呈带状分布于场地南、北两侧, 高值分布于研究区域的西南、西北角, 该区域以耕地林地为主及少量建设用地, Cr 的主要污染来源于工业生产活动, 经大气迁移扩散富集于土壤中<sup>[25-26]</sup>; Zn 和 Pb 的高值出现于场地西南部、西北部, 该区域以耕地、林地、建设用地为主, 因 Zn 和 Pb 受人类活动影响较强, 故土法炼锌过程产生大量 Zn 和 Pb 会排放到土壤环境中; As 在流域中分

布均匀, 高值呈点状分布, 其污染程度较小, 未超过贵州省土壤背景值; Cd 含量高值集中出现于场地的东南部, 该区域有耕地、林地、草地及少量建设用地, 此外分析区域地质矿产分布特征时发现, 场地西部及南部有重要的黔西北铅锌矿, 因技术原因矿产资源不完全开采, 使得 Cd 等重金属元素积累到地表中, 加上土法炼锌排放的含 Cd 废水经雨水冲刷后均滞留于土壤中<sup>[27]</sup>。

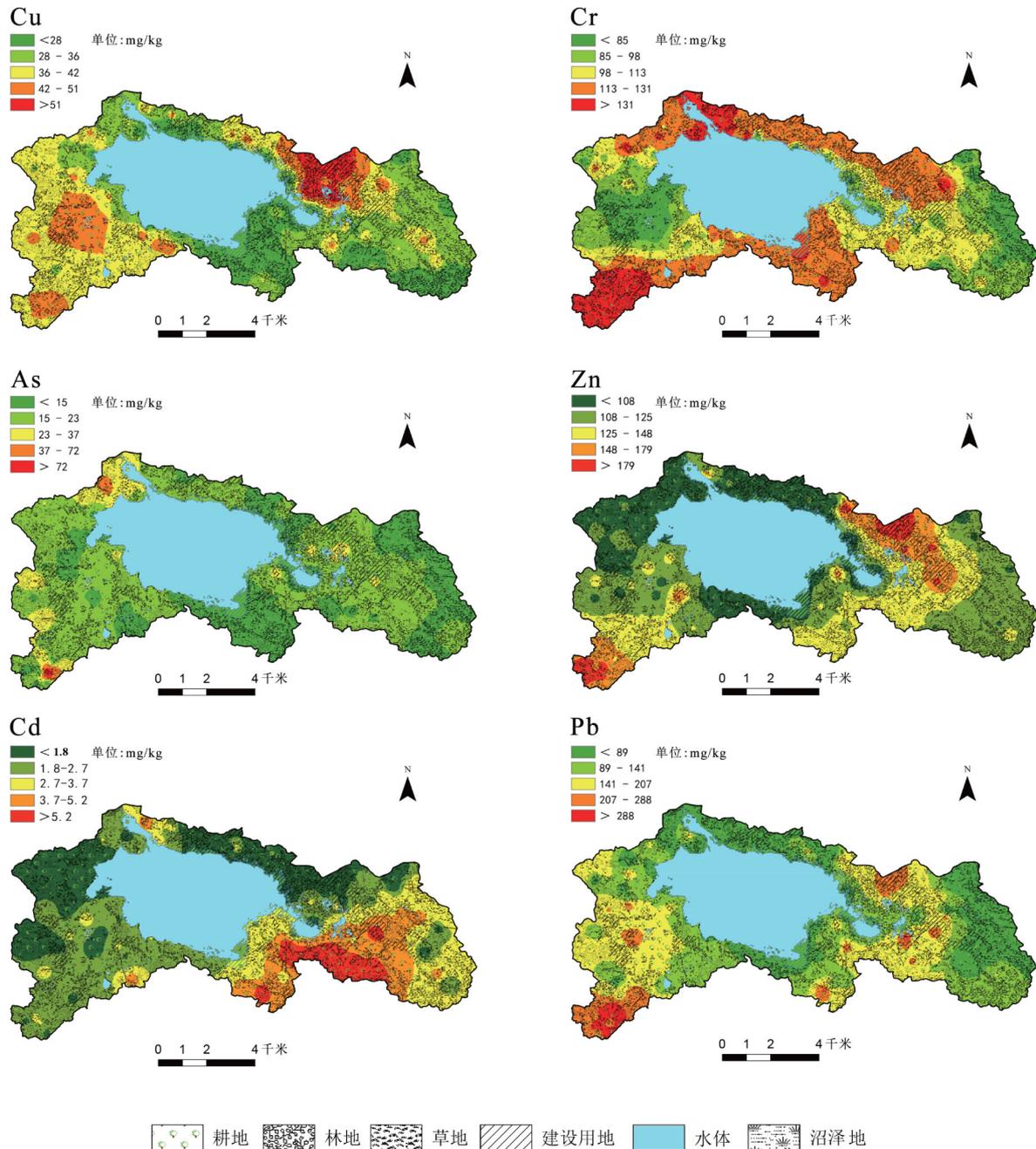


图 2 重金属含量空间分布指数

Fig. 2 Spatial distribution index of heavy metal content

2.3 不同土地类型重金属污染水平评价

2.3.1 单因子指数评价与内梅罗指数评价

由图 3(a) 可见: 根据重金属潜在生态危害的单因子指数大小排序, 耕地依次为 Pb(3.68) > Cd(3.50) > Cu(1.21) > Cr(1.17) > Zn(1.16) > As(0.86), 除 As 外, 其他重金属元素均超过贵州省土壤背景值, Pb、Cd 为重度污染元素, 污染指数大于 3, Cu、Cr、Zn 污染数值均大于 1, 处于轻度污染, As 的单因子指数小于 1, 污染等级为清洁; 林地依次为 Cd(4.69) > Pb(3.15) > Zn(1.31) > Cr(1.22) > Cu(0.95) > As(0.84), 其中 Cd、Pb 污染指数均大于 3, 处于重度污染, Zn、Cr、As 污染值大于 1, 处于轻度污染, Cu 的单因子指数小于 1, 污染等级为清洁; 草地依次为 Cd(4.44) > Pb(4.19) > Cu(1.15) > Cr(1.14) > Zn(1.12) > As(0.92), 其中 Cd、Pb 污染指数均大于 3, 处于重度污染, Cu、Cr、Zn 污染值大于 1, 处于轻度污染, As 的单因子指数小于 1, 污染等级为清洁; 建设用地依次为 Pb

(5.15) > Cd(4.14) > Zn(1.65) > Cu(1.37) > Cr(1.17) > As(1.06), 其中除 Pb、Cd 污染指数均大于 3, 处于重度污染, 其余 4 种重金属的单因子指数均大于 1, 污染等级处于轻度污染; 沼泽地依次为 Cd(3.20) > Pb(1.39) > Cr(1.12) > Zn(0.92) > As(0.68) > Cu(0.64), 其中 Cd 污染指数大于 3, 处于重度污染, Pb、Cr 值大于 1, 处于轻度污染, Zn、As、Cu 的单因子指数小于 1, 污染等级为清洁。由上可见, 该研究区域 Pb、Cd 重金属元素污染严重, Cu、Cr、Zn 污染较轻。

由图 3(b) 可知: Cr 在 5 种土地类型中均处于轻度污染; Cu 在建设用地中处于中度污染, 在沼泽地中为轻微污染, 其余均为轻度污染; Zn 除在建设用地中处于中度污染, 其余均为轻度污染; As 在林地中为重度污染, 建设用地中为中度污染, 沼泽地为轻度污染; Cd 在 5 种土地利用类型中都呈重度污染状态; Pb 除在沼泽地中为中度, 其余均为重度污染。

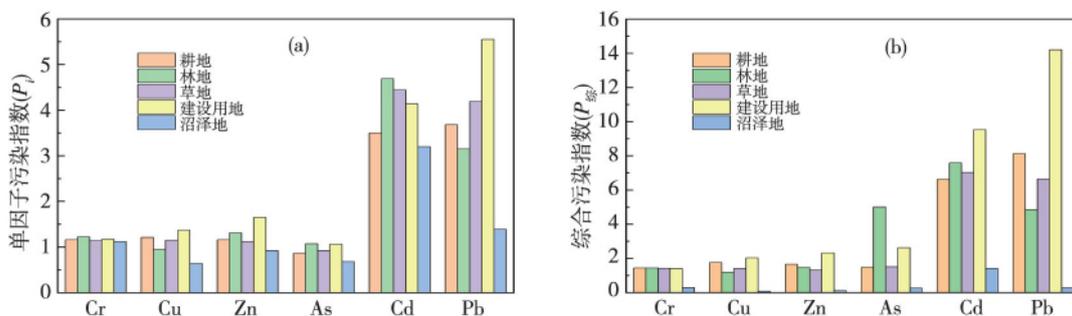


图 3 不同土地类型单因子污染与综合污染指数

Fig. 3 Single factor pollution and comprehensive pollution index of different land types

2.3.2 潜在生态风险评价

潜在生态风险指数 *RI* 能够综合反映耕地、林地、草地、建设用地及沼泽中 Cr、Cu、Zn、As、Cd、Pb 的潜在生态危害性。由表 3 可知, 沼泽与耕地潜在生态风险指数小于 150, 处于轻微风险, 草地、建设用地及林地的潜在生态风险处于中等风险。总体上, 流域土壤重金属潜在生态风险为林地 > 建设用地 > 草地 > 耕地 > 沼泽地, 其中, Cd 对耕地土壤重金属污染的潜在生态风险贡献率为 74.19%, 草地中的 Cd 的贡献率为 77.23%, 林地中 Cd 的贡献率为 80.12%, 建设用地中的贡献率为 71.84%, 沼泽地中的 Cd 贡献率为 82.66%。由此可见, 草海流域土壤重金属的潜在生态风险主要受制于 Cd 元素, 应引起高度重视。

表 3 不同土地类型土壤综合潜在生态风险指数

Tab. 3 Comprehensive potential ecological risk index of soil of different land types

不同土地类型	( <i>RI</i> ) 潜在生态风险指数	风险度
耕地	141.60	轻微风险
草地	172.33	中等风险
林地	175.58	中等风险
建设用地	172.82	中等风险
沼泽地	116.21	轻微风险

3 结论

草海流域内 5 种类型土壤中, 建设用地 Cu、Zn、As、Pb 含量最高, 其中 Pb 含量高, 高出贵州省土壤背景值 3.56 倍, Cd、Pb 元素变异特征明显, 受人类活动影响较大。单因子指数法评价结果表明, 研究

区不同土地类型中耕地土壤重金属污染最为突出, Pb 污染超标较严重。综合污染指数评价结果表明, 流域土壤 Cd 处于重度污染水平。5 种土地利用类型重金属潜在生态风险指数排序为: 林地(175.58) > 建设用地(172.82) > 草地(172.33) > 耕地(141.60) > 沼泽地(116.21), 林地、草地、建设用地处于中等风险水平, 其余均为轻微风险。研究区土壤重金属潜在生态风险主要受制于 Cd 元素。

致谢: 样品采集及数据收集过程中得到了贵州草海国家级自然保护区管理委员会的大力协助。

## 参考文献:

- [1] 樊霆, 叶文玲, 陈海燕, 等. 农田土壤重金属污染状况及修复技术研究[J]. 生态环境学报, 2013, 22(22): 1727-1736.
- [2] ZHOU Z, GUO Y, HU L, et al. For phytoextraction of cadmium from fields[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(11): 1-12.
- [3] 李春芳, 曹见飞, 吕建树, 等. 不同土地利用类型土壤重金属生态风险与人体健康风险[J]. 环境科学, 2018, 39(12): 5628-5638.
- [4] 王锐, 邓海, 贾中民, 等. 汞矿区周边土壤重金属空间分布特征、污染与生态风险评价[J/OL]. 环境科学, DOI: <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202010140>.
- [5] MAYURI C, ARVIND K N. Heavy metals assessment in urban soil around industrial clusters in Ghaziabad, India: Probabilistic health risk approach[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2013(87): 57-64.
- [6] 杨羽, 夏品华, 林陶, 等. 贵州草海湿地不同水位梯度土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量比分布特征[J]. 湖泊科学, 2020, 32(1): 164-172.
- [7] 汤向宸, 林陶, 夏品华, 等. 贵州草海湿地不同水位梯度沉积物中汞、砷形态分布及风险评价[J]. 湖泊科学, 2020, 32(1): 100-110.
- [8] 郑杰, 王志杰, 王磊, 等. 贵州草海流域不同土地利用方式土壤重金属潜在生态风险评价[J]. 生态毒理学报, 2019, 14(6): 204-211.
- [9] 高令健, 毛康, 张伟, 等. 贵州万山汞矿区稻田土壤汞的分布及污染特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2021, 40(1): 148-154.
- [10] 郭志娟, 周亚龙, 王乔林, 等. 雄安新区土壤重金属污染特征及健康风险[J]. 中国环境科学, 2021, 41(1): 431-441.
- [11] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境出版社, 1990: 330-369.
- [12] 陈怀满. 环境土壤学[M]. 北京: 中国环境出版社, 2005: 522-523.
- [13] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sediment ecological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 978-1001.
- [14] 周亚龙, 郭志娟, 王成文, 等. 云南省镇雄县土壤重金属污染及潜在生态风险评估[J]. 物探与化探, 2019, 43(6): 1358-1366.
- [15] 李礼, 徐龙君, 李斗. 重庆秀山锰矿区土壤重金属污染分析与评价[J]. 地球与环境, 2014, 42(5): 646-651.
- [16] 张仁铎. 空间变异理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 23-39.
- [17] 郭平, 谢忠雷, 李军, 等. 长春市土壤重金属污染特征及其潜在生态风险评价[J]. 地理科学, 2005, 18(1): 108-112.
- [18] 林文杰. 土法炼锌区生态退化与重金属污染[J]. 生态环境学报, 2009, 18(1): 149-153.
- [19] 许朋柱, 秦伯强, BEHRENDT H, 等. 太湖上游流域农业土地的氮剩余及其对湖泊富营养化的影响[J]. 湖泊科学, 2006, 16(4): 395-400.
- [20] 刘鹏, 胡文友, 黄标, 等. 大气沉降对土壤和作物中重金属富集的影响及其研究进展[J]. 土壤学报, 2019, 56(5): 1048-1059.
- [21] 邵莉, 肖化云, 吴代赦, 等. 交通源重金属污染研究进展[J]. 地球与环境, 2012, 40(3): 445-459.
- [22] 宋以龙, 曾艳, 杨海全, 等. 贵州草海沉积物重金属时空分布特征与生态风险评价[J]. 生态学杂志, 2016, 35(7): 1849-1856.
- [23] 陶思明. 草海保护区的压力和可持续管理[J]. 环境保护, 1999, 5(1): 25-28.
- [24] 王志杰, 柳书俊, 郑杰, 等. 草海流域土壤重金属污染及其生态风险评价[J]. 生态环境学报, 2019, 28(28): 2438-2446.
- [25] 李天然. 土壤环境化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1996: 110-126.
- [26] 李宏薇, 尚二萍, 张红旗, 等. 耕地土壤重金属污染时空变异对比: 以黄淮海平原和长江中游及江淮地区为例[J]. 中国环境科学, 2018, 38(9): 3464-3473.
- [27] 黄顺红. 铬渣堆场铬污染特征及其铬污染土壤微生物修复研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
- [28] 顾继光, 周启星. 镉污染土壤的治理及植物修复[J]. 生态科学, 2002, 25(4): 352-356.

责任编辑: 赵建华