

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2018042603

赵斌, 朱四喜, 李相兴, 等. 贵州草海不同土地利用方式表层土壤重金属污染现状评估[J]. 环境化学, 2018, 37(10): 2219-2229.

ZHAO Bin, ZHU Sixi, LI Xiangxing, et al. Assessment of heavy metal pollution in the surface soils of different land use patterns in Caohai, Guizhou[J]. Environmental Chemistry, 2018, 37(10): 2219-2229.

贵州草海不同土地利用方式表层 土壤重金属污染现状评估*

赵斌^{1, 2} 朱四喜^{1, 2**} 李相兴^{1, 2} 杨东方^{1, 2} 杨秀琴^{1, 2} 曾龙^{1, 2}

(1. 贵州民族大学喀斯特湿地生态研究中心, 贵阳, 550025; 2. 贵州民族大学生态环境工程学院, 贵阳, 550025)

摘 要 土壤重金属污染问题日益加剧, 而土壤重金属来源解析及污染评价对其污染防治具有重要意义. 以贵州草海沼泽地、耕地和林地表层土壤(0—20 cm)为研究对象, 采用电感耦合等离子发射光谱仪(ICP-OES)和原子荧光测定仪(AFS)测定土壤中 Zn、Cr、Pb、Ni、Cu、As 等 6 种重金属元素含量, 并对其进行源解析及污染现状评估. 结果表明, 草海整体研究区表层土壤元素含量为 $\text{Zn} (144.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}) > \text{Cr} (93.03 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}) > \text{Pb} (45.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}) > \text{Ni} (45.08 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}) > \text{Cu} (29.48 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}) > \text{As} (25.19 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1})$, 其中 Zn、Pb、Ni、As 含量高于贵州背景值, 分别高于背景值的 45.48%、28.78%、25.97%、15.29%. 元素 As 在耕地和林地, 元素 Cr、Cu、Pb 在沼泽地和林地, 以及元素 Zn 在沼泽地、耕地和林地都具有显著差异($P < 0.05$), 而 Ni 在 3 种土地利用方式中均无显著差异($P > 0.05$). 3 种土地利用方式中, 元素 Zn、Pb、Ni、As 可能主要来源于工业、农业、交通运输等人为源, 而 Cr、Cu 来源于母岩风化、植被凋落物等自然源. 土壤重金属污染评价表明, 贵州草海不同土地利用方式表层土壤重金属污染处于轻微状态, 未造成严重的潜在生态风险. 本研究能够为贵州草海土地利用的合理规划、土壤资源保护和重金属污染防治提供数据支持.

关键词 土壤重金属, 土地利用方式, 贵州草海, 内梅罗综合指数法, 生态风险指数.

Assessment of heavy metal pollution in the surface soils of different land use patterns in Caohai, Guizhou

ZHAO Bin^{1, 2} ZHU Sixi^{1, 2**} LI Xiangxing^{1, 2} YANG Dongfang^{1, 2}
YANG Xiuqin^{1, 2} ZENG Long^{1, 2}

(1. Institute of Karst Wetland Ecology, Guizhou Minzu University, Guiyang, 550025, China;

2. College of Eco-environment Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang, 550025, China)

Abstract: It is of great significance to analyze the pollution sources of soil heavy metals for their prevention and controls under the situation of increasing heavy metal pollution in soils. This study focused on the surface soils (0—20 cm) of the marsh lands, cultivated lands and forest lands in Caohai, Guizhou. The concentrations of six heavy metals in soils including Zn, Cr, Pb, Ni, Cu and As, were determined by ICP-OES and AFS. Source analysis and pollution status evaluation of the heavy metals in soils were carried out. The results showed that the average concentrations of Zn, Cr,

2018 年 4 月 26 日收稿 (Received: April 26, 2018).

* 2015 年国家自然科学基金(31560107), 2018 年贵州省科技支撑计划项目(黔科合支撑[2018]2807)和 2017 年贵州省研究生科研基金(KYJJ2017006)资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China in 2015 (31560107), Guizhou Provincial Science-technology Support Plan Projects in 2018 (Guizhou Science Support [2018]2807) and Guizhou Provincial Graduate Research Foundation in 2017 (KYJJ2017006).

** 通讯联系人, Tel: 15185004218, E-mail: zhusixi2011@163.com

Corresponding author, Tel: 15185004218, E-mail: zhusixi2011@163.com

Pb, Ni, Cu and As in the surface soils, were 144.75, 93.03, 45.33, 45.08, 29.48 and 25.19 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. Among them, the concentrations of Zn, Pb, Ni and As were significantly higher than the soil background values of Guizhou, which were 45.48%、28.78%、25.97%、15.29%, respectively. The concentrations of As, Cr, Cu, Pb and Zn in the three land use patterns were significantly different ($P<0.05$), while there was no significant variation in Ni ($P>0.05$). Zn, Pb, Ni and As in the surface soils mainly derived from human sources such as industry, agriculture, and transportation. However, Cr and Cu came from natural sources such as parent rock weathering and vegetation litter. Based on the evaluation of soil heavy metal pollution, it can be seen that the surface soil heavy metal pollution in different land use patterns was mild and did not cause serious potential ecological risk in Caohai, Guizhou Province. Therefore, this study can provide a data reference for the rational planning of land use, protection of soil resources and the prevention and control of heavy metal pollution in Caohai, Guizhou.

Keywords: soil heavy metals, Caohai, land use pattern, Nemerow comprehensive pollution index, ecological risk index.

土壤是人类赖以生存和农业生产的重要自然资源^[1-2].随着工农业化的迅速发展、城镇化的加快推进,大量土地被开发利用,导致土壤环境污染问题日益严重^[3].尤其土壤重金属污染问题已引起人类的高度重视^[4].由于重金属具有毒性强、不可逆性、易富集等特征,伴随食物链进入人体并危害人体健康^[5-6].目前,国内外学者对土壤重金属污染问题已经开展了大量研究工作^[7-8].对不同土地利用方式中土壤重金属含量分布研究也大有存在^[9-12].污染评价方法有富集系数法^[13]、污染负荷法^[14]、地累积指数法^[15]、内罗梅综合指数法^[16]和潜在生态危害指数法^[17]等.但各种评价方法均有一定的局限性,通常结合多种方法对土壤重金属污染进行现状评价^[18].了解土壤重金属污染现状,对于土地利用规划、土地资源保护和土壤重金属污染防治具有重要意义.

草海作为典型的高原喀斯特湿地生态系统,与滇池、青海湖并称我国三大高原天然淡水湖泊,其为人提供了安全的饮用水,并具有补给地下水的功能,以及旅游、科研等价值^[19].以黑颈鹤为代表的鸟类越冬栖息地,每年吸引了许多爱鸟人士前来观看^[20].草海湿地生态系统与威宁县城相毗邻,威宁县城产生的污水处理不彻底或未经处理进行排放,农田耕作、交通运输等均会引起草海土壤重金属含量变化,逐渐对该生态系统的稳定性造成破坏^[21].为了保护草海湿地生态系统的稳定性、物种多样性,研究草海不同土地利用方式土壤重金属含量及污染评价具有重要意义.近年来,草海湿地生态系统的研究工作主要集中于土壤与农作物的有机物污染^[22]、生物多样性^[23-24]及湖泊沉积物中重金属污染方面^[25-26].关于草海不同土地利用方式中土壤重金属的研究鲜有报道.

该研究以草海的沼泽地、耕地和林地 3 种不同土地利用方式为研究对象,分别测定其表层土壤(0—20 cm)中 Zn、Pb、Cr、Cu、Ni 元素含量,并做相关性分析和主成分分析推测重金属来源,进行重金属污染现状评估,为草海湿地土地规划利用和生态系统保护提供科学的数据支撑.

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 研究区域概况

草海是贵州境内最大的天然淡水湖泊,属于典型的高原湿地生态系统,位于贵州省威宁县城西部 ($26^{\circ}49'—26^{\circ}53' \text{ N}$, $104^{\circ}12'—104^{\circ}18' \text{ E}$).其海拔约为 2171.7 m,属于亚热带湿润季风气候,年均降雨量为 950 mm,无霜期 208.6 d,年日照时数约 1805.4 h.沿湖边缘向外呈现沼泽地、耕地和林地的分布格局,越冬鸟类主要有黑颈鹤、丹顶鹤、白尾海雕等^[27].水生植物种类繁多,构成挺水、浮水和沉水水生植物群落.在草海湿地生态系统的外围存在小板块森林,如云南松林、华山松林、蒙自桉木林等,而且森林多为中、幼龄,成熟林极少,灌丛较稀疏,则森林覆盖率低,水土保持性能差.农田种植主要以蔬菜、玉米、马铃薯为主,种植方式有单种(蔬菜)、套种(玉米+马铃薯、红豆+玉米)等,沼泽地面积约 2547.4 hm^2 ,耕地约 4200.00 hm^2 ,林地约

1929.59 hm²^[28].草海农田曾经遭受周边铅锌冶炼、县城垃圾和居民的废渣污染^[29].据草海周边种植区施肥调查,折纯化肥施用量高达 1500 余吨^[30].这些均会对草海湿地生态系统安全构成威胁.

1.2 土壤样品的采集与分析

2017 年 7 月对草海湿地生态系统进行实地考察和土样采集.根据实地考察的结果,选择具有代表性的地点布置采样点(图 1),按 100 m×100 m 的矩形网格布置,沿两条对角线上等距离取 8 个点作为采样点,沼泽地和耕地各设 9 个站点点,而林地设 4 个站点点,共有 176 采样点,每个采样点用 GPS 记录地理坐标.用工具采集沼泽地、耕地和林地的 0—20 cm 土壤,使其均匀混合作为表层土样,去除植物残根、碎石,装入密封袋中并对应标号,放置于含冰袋的保鲜盒中,带回实验室经自然风干,使用臼式球磨仪研磨,过 100 目筛,密封袋保存.采用硝酸-氢氟酸-高氯酸微波消解法^[31-32],然后把消解的样品放置于 DB-3A 型智能控温电热板上(北京市泰和格润仪器有限公司)去除多余的酸并定容,最后使用电感耦合等离子发射光谱仪(ICP-OES)(型号:Thermo630,美国 ThermoFisher)测定样品中重金属 Zn、Pb、Cr、Cu、Ni 含量,而 As 用原子荧光测定仪(AFS,北京吉天仪器有限公司)测定,同样品设置 3 次重复.重金属标准质控买于国家标准物质研究中心,各元素回收率为 89.4%—108.7%.使用酸均为优级纯,水为超纯水(制水机型号:Genpure UF,滕州新瑞分析仪器有限公司).

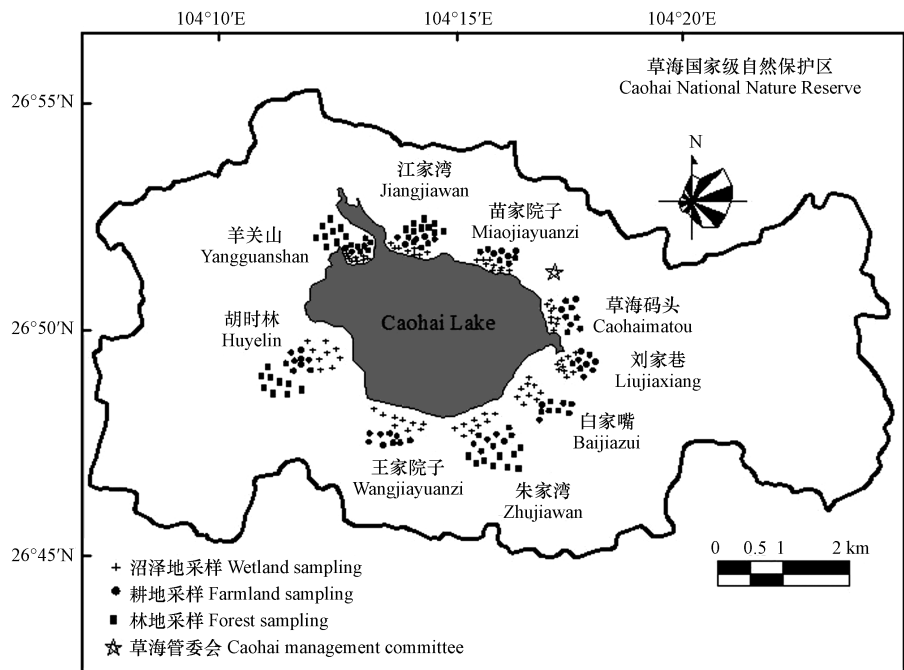


图 1 研究区采样点分布图
Fig.1 Map of the sampling sites in the study area

1.3 土壤重金属污染评价方法

1.3.1 内梅罗综合污染指数法

改进内梅罗综合污染指数法是在单因子指数法的基础上推导而成,而单因子指数法是以研究地区的背景值作为评价标准.考虑到土壤环境及生态环境会受各元素影响的因素,通过使用加权计算,计算出污染物综合污染指数的平均值^[33].其计算公式为:

$$P_i = C_i/B_i \tag{1}$$

$$P_T = \sqrt{\frac{\left[\frac{\sum_{i=1}^n w_i P_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right]^2}{2} + P_{i(\max)}^2} \tag{2}$$

式(1)、(2)中, C_i 为土壤中元素*i*的实测质量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); B_i 为贵州省土壤中元素*i*的含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); w_i

为元素 i 的权重^[34], 权重值 $As = Pb = 3 > Cr = Cu = Ni = Zn = 2$; P_i 为单因子污染指数. 当 P_i 值大于 1.0 时, 说明土壤重金属污染受人为活动影响; P_i 小于 1.0 时, 未受到或很少受到人为活动影响; $P_{i(\max)}$ 表示元素 i 的最大污染指数; P_T 为 n 种重金属的综合污染指数, 污染评价等级见表 1.

1.3.2 潜在生态风险指数法

采用瑞典科学家 Hakanson 的潜在生态风险指数法^[35], 具体公式如下:

$$E_r^i = T_r^i P_i$$

(3)

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i$$

(4)

式(3)、(4)中, E_r^i 为单因子潜在生态危害系数; P_i 同(1); T_r^i 为重金属元素 i 的毒性系数, 元素毒性系数分别为 $Zn = 1 < Cr = 2 < Cu = Pb = Ni = 5 < As = 10$ ^[36]; RI 为 n 重金属综合潜在生态风险指数; 危害系数、危害指数及危害等级划分如表 1 所示.

表 1 内梅罗综合污染指数和潜在生态风险指数分级标准

Table 1 Grading standard of Nemerow pollution index and potential ecological risk index

内梅罗综合污染指数 Nemerow pollution index			潜在生态危害指数 Potential ecological risk index		
P_T	污染等级 Pollution grade	污染程度 Pollution degree	E_r^i	RI	危害程度 Risk degree
$P_T \leq 0.7$	I	清洁 Clean	$E_r^i < 40$	$RI < 150$	轻微生态危害 Slight ecological risk
$0.7 < P_T \leq 1.0$	II	警戒 Warning line	$40 \leq E_r^i < 80$	$150 \leq RI < 300$	中等生态危害 Medium ecological risk
$1.0 < P_T \leq 2.0$	III	轻污染 Slight pollution	$80 \leq E_r^i < 160$	$300 \leq RI < 600$	强生态危害 Strong ecological risk
$2.0 < P_T \leq 3.0$	IV	中污染 Medium pollution	$160 \leq E_r^i < 320$	$RI \geq 600$	很强生态危害 Very strong ecological risk
$P_T > 3.0$	V	重污染 Heavy pollution	$E_r^i \geq 320$		极强生态危害 Best strong ecological risk

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 和 SPSS23.0 软件对数据处理及分析, 数据都为均值. One-way ANOVA 比较重金属含量的组间的差异, 差异显著时进行 Duncan's test 多重比较. 图形由 CAD2007、origin8.0 软件完成.

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 草海表层土壤中重金属含量描述统计

从研究区的整体土壤情况来看(表 2), 元素含量按高至低依次为 Zn、Cr、Pb、Ni、Cu、As, 其值分别为 144.75、93.03、45.33、45.08、29.48、25.19 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 与贵州省土壤元素背景值相比, 元素 As、Ni、Pb、Zn 含量分别超过背景值的 25.97%、15.29%、28.78%、45.48%. 而 Cu 和 Cr 的含量分别低于 7.87% 和 2.99%. 据相关研究, 土壤 Cu 和 Cr 的主要分布于黔西南的盘县-普定等地区^[38-39]. 其中 Cu 和 Cr 低于背景值的原因, 可能是草海土壤中重金属 Cu 和 Cr 本底值实际就比贵州背景值低, 何况贵州背景值是指贵州省整体的平均值, 难免出现部分地区较高或较低现状. 变异系数可用于衡量土壤中某一元素分布均匀程度, 如果某一元素的变异系数值越大, 可表明该元素的含量在空间分布上越不均匀^[40]. 根据变异系数的值将变异划分为小变异 ($0 < CV < 16\%$)、中等变异 ($16\% \leq CV < 36\%$) 和高度变异 ($CV \geq 36\%$)^[41]. As、Ni、Pb 等 6 种重金属元素的空间分布, 除 Cu ($CV = 60.49\%$) 外, 其余 5 种的变异系数处于 19%—30% 内, 变异程度为中等. 说明草海湿地的重金属分布不均匀, 原因可能是该研究区土壤类型种类多, 包括石质土、沼泽土、石灰土、黄棕壤等^[42]. 并且土壤中重金属含量分布受其土壤粒径、黏度、有机质等理化性质影响^[43].

表 2 草海表层土壤中重金属含量描述统计

Table 2 Description of heavy metal concentrations in the surface soils of Caohai

项目 Item	重金属元素 Heavy metal element/(mg·kg ⁻¹)					
	As	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
最小值 Min	10.80	44.14	10.10	20.08	25.60	76.10
最大值 Max	44.01	134.21	92.29	60.67	78.31	249.00
均值 Mean	25.19	93.03	29.48	45.08	45.33	144.75
标准差 S.D	7.35	15.10	17.83	8.61	12.84	39.50
变异系数 CV/%	29.19	16.23	60.49	19.10	28.33	27.29
背景值 Background value	20.00	95.90	32.00	39.10	35.20	99.50

注:以贵州省土壤重金属元素含量作为背景值^[37],下同。
Note: The content of heavy metal elements in Guizhou province was used as the background value, the same below.

由表 3 可知,在沼泽地、耕地和林地土地利用方式中,同一种重金属元素含量分布存在差异.3 种土地利用方式中各元素含量由高至低及分布情况:元素 As 为耕地>林地>沼泽地,并在沼泽地与耕地、林地无显著差异($P>0.05$),耕地与林地有显著差异($P<0.05$);元素 Zn 为林地>耕地>沼泽地,在 3 种土地利用方式中均有显著差异($P<0.05$);元素 Cr、Cu、Ni、Pb 均为沼泽地>耕地>林地,其中 Cr、Cu、Pb 在沼泽地与林地均存在显著差异($P<0.05$),与耕地无显著差异($P>0.05$),而 Ni 在 3 种土地利用方式中均无显著差异($P>0.05$).沼泽地土壤中 Cr、Cu、Ni、Pb 含量偏高的原因,可能与沼泽地生长的竹叶眼子菜、光叶眼子菜、蘆草等湿地植物有关^[44].林地和耕地表层土壤被降雨带入沼泽地,而被沼泽地湿地植被所拦截,导致沼泽地土壤中重金属含量偏高.元素 Zn 在林地土壤中含最高,反映出土法炼锌残留的废渣对草海环境的影响.同样与背景值比较可得,3 种土地利用方式中的元素 As、Ni、Pb 和 Zn 含量偏高,而 Cr 和 Cu 偏低,这与研究区整体表层土壤重金属含量结果一致.

表 3 草海不同土地利用方式的表层土壤重金属元素含量统计

Table 3 Statistics of heavy metal elements in the surface soils of different land use patterns in Caohai

土地 利用 方式 land uses	项目 Item	重金属元素 Heavy metal element/(mg·kg ⁻¹)					
		As	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
沼泽地 Marsh	范围 Range	12.7—32.8	78.1—106.9	14.4—91.6	27.0—59.0	31.8—77.3	76.1—249.0
	均值±标准差 Mean±S.D	24.6±5.3ab	94.1±8.6a	31.7±22.7a	45.9±6.7a	46.4±12.9a	134.4±42.8c
耕地 Cultivated	范围 Range	17.2—43.3	44.9—134.2	10.3—69.4	20.2—57.5	25.1—74.6	81.8—191.0
	均值±标准差 Mean±S.D	26.6±7.4a	93.6±20.6a	28.7±15.9ab	45.1±9.6a	45.5±15.1ab	146.3±32.6b
林地 Forest	范围 Range	10.8—44.3	71.4—114.2	16.5—36.3	28.1—60.3	31.8—55.2	103.4—240.7
	均值±标准差 Mean±S.D	23.3±11.0b	89.4±13.9b	26.3±7.7b	43.1±10.9a	42.7±6.9b	164.8±42.6a
背景值 Background value		20.0	95.9	32.0	39.1	35.2	99.5

注:数据后的小写字母表示同列差异显著($P=0.05$).
Note: The different lowercase letters after the data indicate significant differences with the columns ($P=0.05$).

2.2 草海表层土壤重金属源解析

相关性分析和主成分分析方法被广泛用于土壤重金属源解析^[45].分别对不同土地利用方式中 6 种重金属元素含量进行相关性(Pearson)分析,可推测研究区土壤重金属元素间是否具有共同行为、来源等特征^[46].若不同重金属元素含量之间存在显著或极显著相关,则说明两种或多种元素的来源途径相似或存在复合污染^[47-48].由表 4 可知,沼泽地土壤中 Zn 与 Pb、Ni 间呈显著相关性($P<0.05$),相关性系数分别为 0.550 和 0.466,Ni 与 Pb 的相关性系数为 0.649,极显著相关性($P<0.01$),故 Zn 与 Ni 和 Pb 具有相似污染源;耕地 Cu 与 Cr 间和 As 与 Pb 间是极显著相关性,Zn 与 Pb、Ni、As 间的相关系数达到显著水平,同样可以推测 Zn 与 Pb、Ni、As 存在复合污染或同污染源,而 Cu 和 Cr 来源相同;林地 Zn 与 Pb 的

相关系数达到 0.874,为极显著相关性,Pb 与 Ni 为显著相关性,林地的 Cu 与 Cr 跟耕地和林地相一致,同样为显著相关性.因此,3 种土地利用方式中元素 Zn、Pb、Ni、As 具有相似的来源,而且 Cu 和 Cr 来源也相似.

表 4 草海不同土地利用方式的表层土壤重金属的相关性分析

Table 4 Correlation analysis of surface soil heavy metals in different land use patterns of Caohai							
土地利用方式 Land uses	元素 Element	As	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
沼泽地 Marsh	As	1					
	Cr	-0.109	1				
	Cu	0.162	-0.569 *	1			
	Ni	0.256	0.035	0.454 *	1		
	Pb	0.477 *	0.001	0.316	0.649 **	1	
	Zn	0.3	-0.318	0.138	0.466 *	0.550 *	1
耕地 Cultivated	As	1					
	Cr	0.418 *	1				
	Cu	-0.007	0.740 **	1			
	Ni	-0.539 *	0.371	0.323	1		
	Pb	0.667 **	0.25	-0.226	0.154	1	
	Zn	0.528 *	0.083	0.102	0.511 *	0.545 *	1
林地 Forest	As	1					
	Cr	0.222	1				
	Cu	0.597 *	0.694 *	1			
	Ni	-0.26	0.323	-0.358	1		
	Pb	0.192	-0.011	-0.101	0.589 *	1	
	Zn	0.667 *	0.3	0.274	0.326	0.874 **	1

注: ** 表示在 0. 01 水平(双侧)上显著相关; * 表示在 0. 05 水平(双侧)上显著相关;沼泽地和耕地 $N_1 = 72$,林地 $N_1 = 32$.
Note: ** significant relevant at the level of 0.01; * significant relevant at the level of 0.05; Marsh and Cultivated $N_1 = 72$, Forest $N_1 = 32$.

为了进一步探讨土壤重金属元素的来源,采用最大方差旋转方法,对 3 种土地利用方式中 6 种重金属含量进行主成分分析,并且提取出特征值>1 的因子.利用 SPSS23.0 统计软件对 3 种土地类型的土壤重金属元素含量数据进行 KMO 和 Bartlett's 球形检验,沼泽地、耕地和林地的 KMO 检验统计值依次为 0.439、0.710、0.662,而 Bartlett 球形检验相伴概率为 0.021、0.000、0.009.从图 2 可看出,沼泽地土壤中元素 As、Ni、Zn、Pb 在因子 1(PCA1)上具有较高的载荷,Cr 和 Cu 在因子 2(PCA2)上有较高的载荷,由此可推测沼泽地土壤重金属主要有 2 个方面的来源.另外,耕地和林地土壤元素 Zn、Pb、As、Ni 在因子 1(PCA1)上载荷较高,因子 2(PCA2)为 Zn、Pb 载荷较高,其中耕地在因子 1(PCA2)含部分 Cr,林地在因子 2(PCA2)含部分 As,同理可推测耕地、林地土壤中的重金属元素来源 2 个方面.因子 1(PCA1)主要是由重金属元素 Zn、Pb、As、Ni 构成,因子 2(PCA2)主要为重金属元素 Cu 和 Cr.根据相关文献,元素 Pb、As 分别是机动车污染和农药污染源的标识元素^[49-50],土法炼锌会产生含 Zn、Pb 元素的污染物^[51],化肥含磷复合肥含有一定含量的 Zn、As、Pb 等元素^[52];元素 Cr、Cu 之间具有很强的地球化学关系,有极为相似的地球化学行为^[53].1970—2000 年间草海周边存在大规模的土法炼锌活动,并且草海湿地生态系统保护区有公路(326 国道和 102 省道)通过^[54].因此,草海湿地生态系统元素 Cr、Cu 主要来源于土壤母岩风化、植被凋落物等自然源;Zn、Pb、Ni、As 主要来源于工业、农业、交通运输等人为源.

2.3 草海表层土壤重金属污染现状评价

在草海表层土壤中,元素 As、Ni、Pb 和 Zn 的单因子指数值处于 1.1—1.6 之间,该 4 种重金属元素受到人为活动的影响;而 Cu、Cr 单因子指数都小于 1.0,说明元素 Cu、Cr 未受到或轻微人为活动的影响.从综合污染指数与表 1 可看出,草海表层土壤重金属污染程度处于轻微污染(图 3A).6 种重金属元素的单因子潜在生态危害系数从大到小为:Zn>Pb>Ni>Cu>Cr>As,其值范围为 1—16,小于轻微生态危害上限值($E_i^* = 40$);对于该 6 种重金属元素的综合潜在生态风险指数值处于 35—40 之间,同样远远小于轻微

生态危害的上限值 (RI = 150), 则草海表层土壤重金属的潜在生态风险污染程度为轻微生态危害 (图 3B).

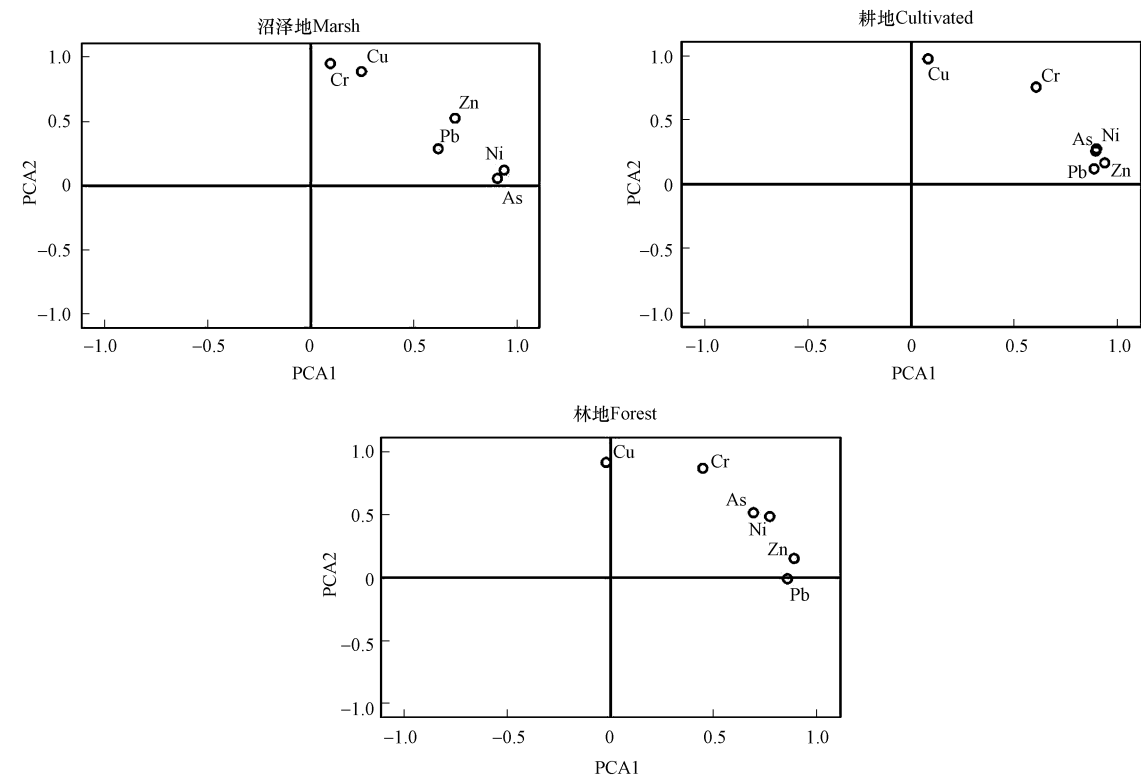


图 2 草海不同土地利用方式中土壤重金属的因子载荷

Fig.2 Factor loading of soil heavy metals in different land use patterns of Caohai

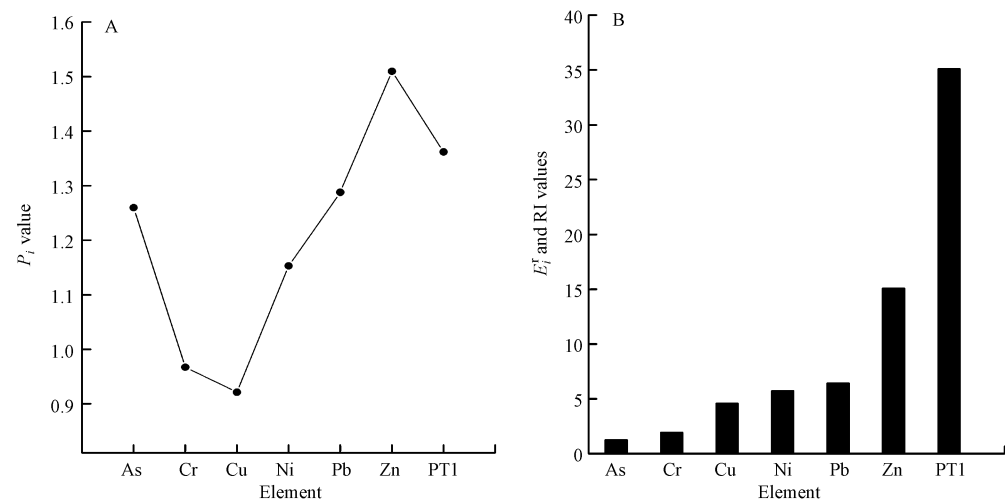


图 3 草海表层土壤内梅罗综合污染指数和潜在生态风险指数

注: PTI、RI 分别为 6 种重金属的综合污染指数和潜在生态风险指数

Fig.3 Nemerow comprehensive pollution index and potential ecological risk index in the surface soils of Caohai

Note: PTI and RI are the comprehensive pollution index and potential ecological risk index of 6 heavy metals respectively

由图 4A 可看出, 3 种不同土地利用方式中, As、Ni、Pb、Zn 元素的单因子指数值分别在 1.1—1.3、1.1—1.2、1.2—1.3、1.3—1.7 之内, 显然都大于 1.0, 同样验证了 As、Ni、Pb、Zn 受人为活动的影响; Cr 和 Cu 的单因子指数值小于 1.0, 据主成分分析元素 Cu、Cr 主要来源于自然源, 两者结果相一致. 林地的内梅综合污染指数 P_T 值最大, 其次为耕地, 沼泽地最小, 其值在 1.2—1.5 之间. 同一种元素在沼泽地、耕地

和林地的生态危害系数变化趋势相似,3 种土地利用方式中重金属的危害系数从大到小都为:As>Pb>Ni>Cu>Cr>Zn(图 4B),其值范围在 1—15 之间;沼泽地和耕地潜在生态风险都处于 32—34 之间,而林地 为 30—32 间,当土壤重金属潜在生态指数 RI 值小于 150 时(表 1),土壤重金属处于轻微生态风险.则 贵州草海不同土地利用方式的表层土壤重金属污染处于轻微状态.

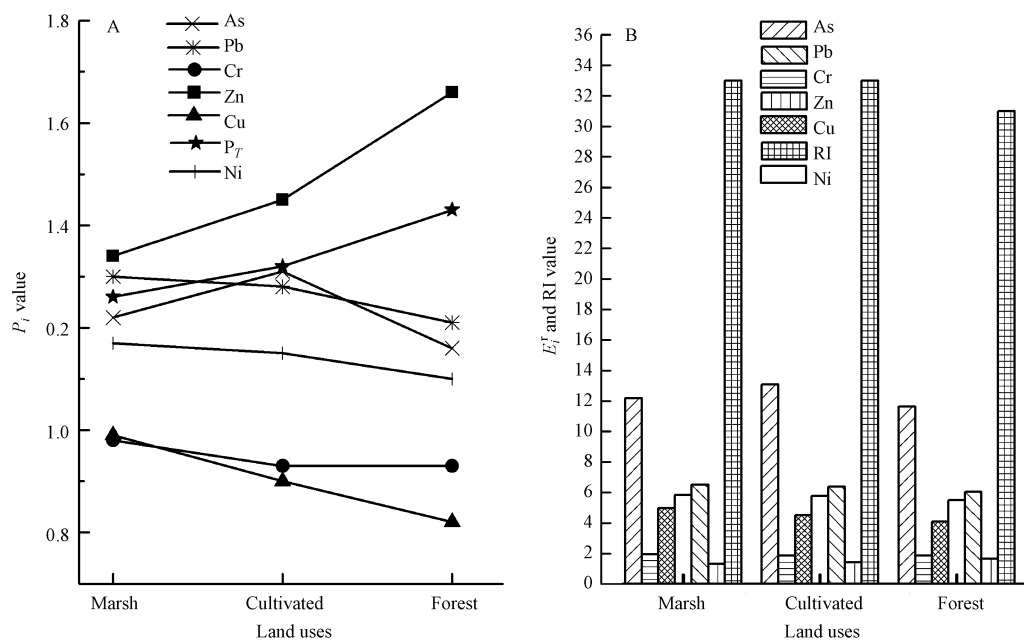


图 4 草海不同土地利用方式表层土壤内梅罗综合污染指数和潜在生态风险指数

Fig.4 Nemerow comprehensive pollution index and potential ecological risk index of different land use patterns of Caohai

3 结论 (Conclusion)

在对贵州草海不同土地利用方式的表层土壤中重金属 As、Ni、Pb 等 6 种元素统计分析、源解析和污染评价的基础上,得出以下结论:

(1) 贵州草海土壤中重金属元素含量按高至低依次 Zn、Cr、Pb、Ni、Cu、As,而元素 As、Ni、Pb、Zn 的含量高于贵州土壤背景值.3 种土地利用方式中,元素 As 含量在沼泽最低、耕地最高, Zn 也是沼泽地最低、但是林地最高,而元素 Cr、Cu、Ni、Pb 含量与 Zn 正好相反.不同土地利用的土壤元素含量呈显著性差异,耕地和林地的 As、沼泽地和林地的 Cr、Cu、Pb,以及 Zn 在沼泽地、耕地和林地均差异显著 ($P<0.05$).

(2) 通过相关性分析和主成分分析,元素 Zn、Ni、As 与 Pb 间存在相关性显著,具有相似的污染来源,Cr 与 Cu 间也有相关性显著,Cu 与 Cr 间来源相同.3 种土地利用方式的土壤重金属 Zn、Pb、Ni、As 主要来源于工业、农业、交通运输等人为源;Cr、Cu 主要来源于母岩风化、植被凋落物等自然源.

(3) 据污染现状评估可知,草海研究区单因子潜在生态危害系数 $Zn>Pb>Ni>Cu>Cr>As$,6 种重金属综合的潜在生态风险指数值处于 35—40 之间;而沼泽地、耕地和林地的单因子潜在生态危害系数都为 $As>Pb>Ni>Cu>Cr>Zn$,其值在 30—34 之间.所以草海表层土壤重金属潜在生态风险危害处于轻微生态风险危害.

参考文献 (References)

[1] ABRAHAMS P W. Soils: Their implications to human health[J]. Science of the Total Environment, 2002, 292:1-32.

[2] 胡国成, 张丽娟, 齐剑英, 等. 贵州万山汞矿周边土壤重金属污染特征及风险评价[J]. 生态环境学报, 2015, 24(5):879-885.

HU G C, ZHANG L J, QI J Y, et al. Contaminant characteristics and risk assessment of heavy metals in soils from Wanshan mercury mine area, Guizhou Province[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(5):879-885(in Chinese).

[3] 周建军, 周桔, 冯仁国. 我国土壤重金属污染现状与治理战略[J]. 中国科学院院刊, 2014, 29(3):315-320, 350.

ZHOU J J, ZHOU J, FENG R G. Status of China's heavy metal contamination in soil and its remediation strategy[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2014, 29(3):315-320, 350(in Chinese).

[4] 张连科, 李海鹏, 黄学敏, 等. 包头某铝厂周边土壤重金属的空间分布及来源解析[J]. 环境科学, 2016, 37(3):1139-1146.
ZHANG L K, LI H P, HUANG X M, Soil heavy metal spatial distribution and source analysis around an aluminum plant in Baotou[J]. Environmental Sciences, 2016, 37(3):1139-1146(in Chinese).

[5] 程先, 王瑞霖, 王健力, 等. 海河流域西部地区水库沉积物重金属潜在生态风险评价[J]. 应用生态学报, 2015, 26(5):1495-1500.
CHENG X, WANG R L, WANG J L, et al. Potential ecological risks assessment of heavy metals in the reservoir sediment of the western Haihe River basin[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, May 2015, 26(5):1495-1500(in Chinese).

[6] XIAO R, BAI J, GAOH, et al. Distribution and contamination assessment of heavy metals in water and soils from the college town in the Pearl River Delta, China[J]. Clean-Soil, Air, Water, 2012, 40:1167-1173.

[7] 冯乙晴, 刘灵飞, 肖辉林, 等. 深圳市典型工业区土壤重金属污染特征及健康风险评估[J]. 生态环境学报, 2017. 26(6):1051-1058.
FENG Y Q, LIU L F, XIAO H L, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in soil of typical industrial district of Shenzhen[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26(6):1051-1058(in Chinese).

[8] IZQUIERDO M, DE M E, ORTEGA M F, et al. Bioaccessibility of metals and human health risk assessment in community urban gardens [J]. Chemosphere, 2015, 135:312-318.

[9] 李清良, 吴倩, 高进波, 等. 基于小流域尺度的土壤重金属分布与土地利用相关性研究-以厦门市坂头水库流域为例[J]. 生态学报, 2015, 35(16):5486-5494.
LI Q L, WU Q, GAO J B, et al. Distribution of heavy metals in topsoils affected by land use patterns at a small watershed scale: A case study in the Bantou Reservoir watershed in Xiamen, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(16):5486-5494(in Chinese).

[10] 陈宗娟, 张倩, 张强, 等. 天津东南部某区域不同土地利用方式下土壤重金属的累积特征[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(2):166-173.
CHEN Z J, ZHANG Q, ZHANG Q, et al. Accumulation characteristics of heavy metals in soils as affected by land use in southeast Tianjin [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2015, 31(2):166-173(in Chinese).

[11] 马剑宇, 赵佐平, 闵锁田. 不同土壤重金属污染评价方法对比研究[J]. 现代农业科技, 2016(13):223-225.
MA J Y, ZHAO Z P, MIN S T. Comparative study of different soil heavy metal pollution evaluation method[J]. Modern Agricultural Sciences and Technology, 2016(13):223-225(in Chinese).

[12] 王丽娟, 庞奖励, 丁敏. 不同土地利用方式下土壤重金属特征及影响研究[J]. 陕西师范大学学报(自科版), 2010, 38(4):88-93.
WANG LJ, PANG J L, DING M. Features and effects of heavy metals under different land use patterns[J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2010, 38(4):88-93(in Chinese).

[13] 李鹏辉, 邹晓燕, 楼婕, 等. 不同季节垃圾填埋场周围重金属污染特征及评价[J]. 环境化学, 2018, 37(1):41-50.
LI P H, ZOU X Y, LOU J, et al. Pollution characteristics and evaluation of heavy metals around landfill in different seasons [J]. Environmental Chemistry, 2018, 37(1):1479-1485(in Chinese).

[14] 赵倩, 马琳, 刘翼飞, 等. 北京东南郊典型地层重金属分布特征与潜在生态风险[J]. 环境科学, 2016, 37(5):1931-1937.
ZHAO Q, MA L, LIU Y F, et al. Distribution characteristics and potential ecological hazards assessment of soil heavy metals in typical soil profiles in southeast suburb of Beijing[J]. Environmental Sciences, 2016, 37(5):1931-1937(in Chinese).

[15] 何姜毅, 张东, 赵志琦. 豫北大田蔬菜种植区地下水重金属的分布特征及来源解析[J]. 环境化学, 2017, 36(7):1537-1546.
HE J Y, ZHANG D, ZHAO Z Q. Distributions and sources of heavy metals in groundwater of vegetable fields in North Henan Province[J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(7):1537-1546(in Chinese).

[16] WEI X, GAO B, WANG P, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in street dusts from different functional area in Beijing, China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, 112:186-192.

[17] 刘丹, 赵永红, 周丹, 等. 赣南某钨矿区土壤重金属污染生态风险评估[J]. 环境化学, 2017, 36(7):1556-1567.
LIU D, ZHAO Y H, ZHOU D, et al. Ecological risk assessment of heavy metals pollution in a tungsten mine soil in south of Jiangxi Province[J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(7):1556-1567(in Chinese).

[18] 易昊旻, 周生路, 吴绍华, 等. 基于正态模糊数的区域土壤重金属污染综合评价[J]. 环境科学学报, 2013, 33(4):1127-1134.
YI H M, ZHOU S L, WU S H, et al. An integrated assessment for regional heavy metal contamination in soil based on normal fuzzy number [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(4):1127-1134(in Chinese).

[19] 夏品华, 喻理飞, 寇永珍, 等. 贵州高原草海湿地土壤有机碳分布特征及其与酶活性的关系[J]. 环境科学学报, 2017, 37(4):1479-1485.
XIA P H, YU L F, KOU Y Z, et al. Distribution characteristics of soil organic carbon and its relationship with enzyme activity in the Caohai wetland of the Guizhou Plateau[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(4):1479-1485(in Chinese).

[20] 杨延峰, 张国钢, 陆军, 等. 贵州草海越冬斑头雁日间行为模式及环境因素对行为的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(23):

- 7280-7288.
- YANG Y F, ZHANG G G, LU J, et al. Diurnal activity patterns and environmental factors on behaviors of Bar-headed Geese *Anser indicus* wintering at Caohai lake of Guizhou, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(23):7280-7288(in Chinese).
- [21] 夏品华, 喻理飞, 曹海鹏, 等. 贵州草海人工湿地系统硝化/反硝化作用研究[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(12):2045-2049.
- XIA P H, YU L, CAO H P, et al. Nitrification and denitrification in constructed wetlands of Caohai[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(12):2045-2049(in Chinese).
- [22] 张家春, 林绍霞, 张清海, 等. 贵州草海耕地土壤与农作物中 DDTs 和 HCHs 残留及污染特征[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(7):1351-1357.
- ZHANG J C, LIN S X, ZHANG Q H, et al. Residue and pollution characteristics of HCHs and DDTs in crops and soils in Caohai watershed in Guizhou[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(7):1351-1357(in Chinese).
- [23] 潘少兵, 任晓东. 草海国家级自然保护区水生植物群落的数量分类与排序分析[J]. *生物学杂志*, 2010, 27(5):60-64.
- PAN S B, REN X D. An analysis on quantitative classification and ordination of aquatic plant communities in Caohai natural reserve[J]. *Journal of Biology*, 2010, 27(5):60-64(in Chinese).
- [24] 潘鸿, 王洋, 晏妮, 等. 贵州草海水禽繁殖区水生植物群落及物种多样性初步研究[J]. *贵州师范大学学报:自然科学版*, 2005, 23(2):15-19.
- PAN H, WANG Y, YAN N, et al. A primary study of hydrophyte community structure and biodiversity at the waterfowl reproducing area of BoJiwan in Caohai lake[J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Science)*, 2005, 23(2):15-19(in Chinese).
- [25] 林绍霞, 张清海, 郭媛, 等. 贵州草海沉积物重金属污染特征及潜在生态风险分析[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(11):2236-2241.
- LIN S X, ZHANG Q H, GUO Y, et al. Pollution characteristics and potential ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Caohai in Guizhou province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(11):2236-2241(in Chinese).
- [26] 钱晓莉, 冯新斌, 闭向阳, 等. 贵州草海沉积物汞的含量和分布特征初步研究[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2009, 31(1):32-36.
- QIAN X L, FENG X B, BI X Y, et al. A preliminary study of the contents and distribution of mercury in the sediments of lake Caohai in Guizhou[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2009, 31(1):32-36(in Chinese).
- [27] 许正亮, 杨帮华, 刘文. 草海国家级自然保护区植被恢复与重建初探[J]. *内蒙古林业调查设计*, 2008, 31(1):5-9.
- XU Z L, YANG B H, LIU W. Preliminary studies on restoration and reconstitution of vegetation in Caohai national nature reservation area[J]. *Inner Mongolia Forestry Survey Design*, 2008, 31(1):5-9(in Chinese).
- [28] 周静, 官加杰. 贵州草海国家级自然保护区生态旅游开发初步研究[J]. *林业调查规划*, 2011, 36(5):49-52.
- ZHOU J, GUAN J J. Eco-tourism development of Caohai national nature reserve in Guizhou[J]. *Forest Inventory and Planning*, 2011, 36(5):49-52(in Chinese).
- [29] 张建利, 吴华, 喻理飞, 等. 贵州草海湿地流域典型喀斯特森林植物群落结构特征[J]. *南方农业学报*, 2013, 44(3):471-477.
- ZHANG J L, WU H, YU L F, et al. Structure feature of typical Karst forest plant community in Caohai wetland watershed of Guizhou province[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2013, 44(3):471-477(in Chinese).
- [30] 欧阳勇, 林昌虎, 何腾兵, 等. 贵州草海水体富营养化的植物修复研究[J]. *贵州科学*, 2011, 29(6):21-25.
- OUYANG Y, LIN C H, HE T B, et al. Study on phytoremediation of eutrophication in Caohai lake of Guizhou[J]. *Guizhou Science*, 2011, 29(6):21-25(in Chinese).
- [31] 龙加洪, 谭菊, 吴银菊, 等. 土壤重金属含量测定不同消解方法比较研究[J]. *中国环境监测*, 2013, 29(1):123-126.
- LONG J H, TAN J, WU Y J, et al. A comparative study on the detection of heavy metal in soil with different digestion methods[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2013, 29(1):123-126(in Chinese).
- [32] 唐贵才, 刘明, 袁廷香. 贵州城市生活垃圾焚烧过程中重金属分布和迁移特征[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(4):686-691.
- TANG G C, LIU M, YUAN T X. Research on the distribution and migration rule of heavy metals in waste incineration in Guizhou city[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(4):686-691(in Chinese).
- [33] 陈小敏, 朱保虎, 杨文, 等. 密云水库上游金矿区土壤重金属空间分布/来源及污染评价[J]. *环境化学*, 2015, 34(12):2248-2256.
- CHEN X M, ZHU B H, YANG W, et al. Sources, spatial distribution and contamination assessments of heavy metals in gold mine area soils of Miyun reservoir upstream, Beijing, China[J]. *Environmental Chemistry*, 2015, 34(12):2248-2256(in Chinese).
- [34] SWAINE D J. Why trace elements are important[J]. *Fuel Processing Technology*, 2000(65-66):21-33.
- [35] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8):975-1001.
- [36] 方明, 吴友军, 刘红, 等. 长江口沉积物重金属的分布/来源及潜在生态风险评价[J]. *环境科学学报*, 2013, 33(2):563-569.
- FANG M, WU Y J, LIU H, et al. Distribution, source and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of the Yangtze river estuary[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(2):563-569(in Chinese).
- [37] 范明毅, 杨皓, 黄先飞, 等. 典型山区燃煤型电厂周边土壤重金属形态特征及污染评价[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(8):

2425-2436.

FANG M Y, YANG H, HUANG X F, et al. Chemical forms and risk assessment of heavy metals in soils around a typical coal-fired power plant located in the mountainous area[J]. China Environmental Science, 2016, 36(8):2425-2436(in Chinese).

[38] 邹滔, 黎应书, 肖宪国. 贵州火山岩型铜矿床的分布特点和地质特征[J]. 有色金属(矿山部分), 2009, 61(2):36-37.

ZOU T, LI Y S, XIAO X G. Distribution and geological characteristics of the volcanic type copper deposit of Guizhou[J]. Nonferrous metals (mines) 2009, 61(2):36-37(in Chinese).

[39] 石金芳, 张瑞雪, 吴攀, 等. 贵州省地表环境重金属空间分布特征研究[J]. 环保科技, 2015, 21(3):9-14.

SHI J F, ZHANG R X, WU P. et al. Review on spatial distribution of heavy metals in supergene environment of Guizhou Province[J]. Environmental Protection and Technology, 2015, 21(3):9-14(in Chinese).

[40] 王小莉, 陈志凡, 魏张东, 等. 开封市城乡交错区农田土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 环境化学, 2018, 37(3):513-522.

WANG X L, CHENG Z F, WEI Z D, et al. Heavy metal pollution and potential ecological risk assessment in agricultural soils located in the peri-urban area of Kaifeng City[J]. Environmental Chemistry, 2018, 37(3):513-522(in Chinese).

[41] 芦宝良, 陈克龙, 曹生奎, 等. 青海湖典型湿地土壤重金属空间分布特征[J]. 水土保持研究, 2012, 19(3):190-194.

LU B L, CHEN K L, CAO S K, et al. Spatial distribution characteristics of soil heavy metals of wetlands in some representative regions around Qinghai lake[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(3):190-194(in Chinese).

[42] 蔡晓玲, 黄小柱, 廖德平. 草海国家级自然保护区耕地土壤化学性质分析[J]. 内蒙古农业科技, 2010(3):60-61.

CAI X L, HUANG X Z, LIAO D P. Analysis of chemical properties of farmland soil in Caohai national nature reserve[J]. Inner Mongolia Agricultural Science and Technology, 2010(3):60-61(in Chinese).

[43] 潘胜强, 王铎, 吴山, 等. 土壤理化性质对重金属污染土壤改良的影响分析[J]. 环境工程, 2014, 32(s1):600-603.

PAN S Q, WANG D, WU S, et al. Impact of soil properties on Improvement of Heavy metal contaminated soil[J]. Environmental Engineering, 2014, 32(s1):600-603(in Chinese).

[44] 段素明, 黄先飞, 胡继伟, 等. 贵州草海湿地植物根际沉积物磷素形态特征[J]. 环境科学研究, 2013, 26(7):743-749.

DUAN S M, HUANG X F, HU J W, et al. Study on speciation of phosphorus in rhizosphere sediments from Caohai wetland[J]. Research of Environmental Sciences, 2013, 26(7):743-749(in Chinese).

[45] 杨勇, 刘爱军, 朝鲁孟其其格, 等. 锡林郭勒露天煤矿矿区草原土壤重金属分布特征[J]. 生态环境学报, 2016, 25(5):885-892.

YANG Y, LIU A J, CHAO L M, Q Q G, et al. Spatial distribution of soil heavy metals of open cut coal mining in inner Mongolia Xilingol typical steppe[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(5):885-892(in Chinese).

[46] 许兴斌, 焦黎, 王勇辉. 夏尔西里自然保护区土壤重金属相关性分析及污染风险评价[J]. 水土保持研究, 2015, 22(5):336-341.

XU X B, JIAO L, WANG Y H. Risk evaluation and correlation Analysis of soil heavy metal contamination in Xiaerxili nature reserve[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(5):336-341(in Chinese).

[47] 侯凤兰, 吕光辉, 马辉英, 等. 乌鲁木齐水磨河沿岸土壤痕量金属污染特征与来源解析[J]. 环境化学, 2017, 36(11):2451-2461.

HOU F L, LV G H, MA H Y, et al. Contamination characterization and source apportionment of trace metals in riparian soils of Shuimo River in Urumqi[J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(11):2451-2461(in Chinese).

[48] YE C, LI S, ZHANG Y, et al. Assessing heavy metal pollution in the water level fluctuation zone of China's three gorges reservoir using geochemical and soil microbial approaches[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, 185(1):231-240.

[49] FACCHINELI A, SACCHI E, MALLIN L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soil[J]. Environmental Pollution, 2001, 114(3):313-324.

[50] Gray C W, MCLAREN R G, ROBERTS A H C. The effect of long-term phosphatic fertilizer applications on the amounts and forms of cadmium in soils under pasture in New Zealand[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1999, 54(3):267-277.

[51] 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.

LIN W J. Ecological degeneration and heavy metals pollution in zinc smelting areas[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(1):149-153(in Chinese).

[52] 王美, 李书田. 肥料重金属含量状况及施肥对土壤和作物重金属富集的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(2):466-480.

WANG M, LI S T. Heavy metals in fertilizers and effect of the fertilization on heavy metal accumulation in soils and crops[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(2):466-480(in Chinese).

[53] 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.

SONG Y L, ZENG Y, YANG H Q, et al. Spatiotemporal distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in the sediments of lake Caohai, Guizhou, China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(7):1849-1856(in Chinese).

[54] 陶思明. 草海保护区的压力和可持续发展管理[J]. 生态与自然保护, 1999, 1:25-28.

TAO S M. Pressures of Caohai reservation and sustainable management[J]. Ecology and Natural Conservation, 1999, 1:25-28(in Chinese).