

冶炼制造企业土壤重金属含量变化及其污染风险评价

周向红¹, 王平山², 王定华², 成小玲² (1. 湖南科技大学, 湖南湘潭 411201; 2. 湖南西林环保材料有限公司, 湖南长沙 410205)

摘要 [目的]研究冶炼制造企业土壤重金属含量变化及其污染风险评价。[方法]对湖南一冶炼制造企业厂区内土壤中的 As、Cd、Cr、Cu、Mn、Pb、Sb、V、Zn 等共 9 种重金属含量进行调查。以湖南地方性土壤修复标准为背景值, 运用单因子指数法、内梅罗综合指数法对该冶炼制造企业生产区内深度为 5~10、10~15 cm 的土壤进行污染风险评价, 并根据各重金属毒性系数, 对内梅罗综合指数法进行改进。[结果]企业周边均存在不同程度的综合污染, 并以硫酸场、锌 1 车间的土壤重金属污染最为严重。被调查的土壤重金属生态风险大部分处于严重污染状态, 土壤中 Zn、Cd、Pb 等 3 个元素最为严重。[结论]该研究为土壤重金属污染风险评价提供决策参考。

关键词 冶炼制造企业; 重金属; 含量; 污染; 单因子指数法; 内梅罗综合指数法; 风险评价

中图分类号 X53 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2019)01-0060-04

doi: 10. 3969/j. issn. 0517-6611. 2019. 01. 020

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Heavy Metal Content Change and Pollution Risk Assessment of Soil in Smelting and Manufacturing Enterprise

ZHOU Xiang-hong¹, WANG Ping-shan², WANG Ding-hua² et al (1. Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201; 2. Hunan Xilin Environmental Materials Co., Ltd., Changsha, Hunan 410205)

Abstract [Objective] The research aimed to study the change of heavy metal content in soils of smelting and manufacturing enterprises and its pollution risk assessment. [Method] The contents of 9 heavy metals including As, Cd, Cr, Cu, Mn, Pb, Sb, V and Zn in the soil around a lead-zinc manufacturing enterprise in Hunan were investigated. Taking the soil background value of Hunan as the standard, the soil pollution risk was evaluated by the single factor index method and Nemerow comprehensive index method, and the soil surrounding the depth of 5-10 cm and 10-15 cm was evaluated respectively. According to the toxicity coefficient of heavy metals, the Nemerow comprehensive index method was improved. [Result] It was found that there were various degrees of comprehensive pollution around the enterprises, and the heavy metal pollution was most serious in the waste acid field and zinc 1 workshop. Most of the ecological risk of heavy metals in the investigated soils were seriously polluted. Zn, Cd, Pb and other three elements in soil were the most serious. [Conclusion] This study provides decision-making reference for risk assessment of heavy metal pollution in soil.

Key words Smelting and manufacturing enterprises; Heavy metals; Content; Pollution; Single factor index method; Nemerow comprehensive index method; Risk assessment

改革开放以来,我国工业发展迅猛,形成了大量以资源开采、冶炼和简单加工等环节上的制造企业。由于过去偏重于发展规模和速度,质量不高、监管不严,同时企业环保技术水平有限、环保投资动力不足等情况下导致环境遭受重创。在资源的开采和冶炼制造过程中,粗放式的增长导致严重的生态环境问题,尾矿、废渣、废气、废水,使土壤、大气、水体环境遭受污染^[1-2],如冶炼制造企业周边的血铅事件、镉污染事件频发等,过度采矿导致矿区周边的地质地貌遭到破坏。环境中突出问题已得到党和政府的重视,十九大报告明确提出,绿水青山就是金山银山的理念,环境保护与治理提到更加重要的位置^[3]。由于土壤重金属的毒性、长期性、生物累积性,矿山、冶炼企业土壤重金属污染及其风险评估问题已得到政府和学者的关注,成为社会热点^[4]。

现有学者主要针对土壤重金属污染评价方法进行大量研究^[5-14]。对土壤重金属评价的基本方法有单因子指数法^[5]、内梅罗综合污染指数法^[6];对生态风险评价主要有潜在生态危害指数法^[1]。在内梅罗综合指数法应用当中,通常采用简单算术平均法,即考虑各重金属元素的权重相同;而现实中,各重金属元素的危害和影响程度不同,其权重应该

具有差异性。基于此,Swaine^[15]根据重金属元素对环境的影响程度,将重金属元素分成 3 类,即 1 类、2 类、3 类,并分别赋值为 3、2、1 作为权重,而其他赋权方法相对较少。因此,有必要根据重金属元素的特点和性质构建综合评价赋权的评估方法,以更好地反映土壤重金属污染的实际情况。

湖南是有色金属之乡,大量矿山、冶炼制造企业的建设,是当地经济发展的主要力量,但由于当时环保技术发展水平的局限性,导致许多重金属无序外排,严重破坏了人们生存环境,产生了不良的社会影响^[11-12]。笔者选择湖南一大型冶炼制造企业厂区内土壤进行重金属污染风险评估研究,为微观区域重金属治理提供科学的决策依据。

1 资料与方法

1.1 采样点及监测因子 通过对冶炼制造企业区域内土壤污染情况进行调研,结合研究需要,选取重金属 As、Cd、Cr、Cu、Mn、Pb、Sb、V 和 Zn 作为监测因子。

此次监测以冶炼厂烟囱为中心,在其两侧平行线上每 500 m 布设一个采样点进行采样监测,共布设采样点 8 个,每个采样点分 2 层,上层 5~10 cm(采用-1 表示),下层 10~15 cm(采用-2 表示)。该研究选择硫酸场(WS)、铅冶炼车间(QY)、渣山场(ZS)、铅原料区(QL)、锌合金车间(XH)、锌电解-稀贵车间(XX)、锌 I 沸车间(XY)、锌 II 沸车间(XE)等 8 个重点区域(图 1)。采集土样时,用铁锹将采样点表层土挖开,用木片去除与铁锹接触的部分土壤后,取 5 cm 范围内约 1 kg 土样至自封袋。每个采样点处按照梅花布点

基金项目 湖南省重点研发计划-工业领域重点研发项目(2016KG2108);湖南省社会科学基金项目(16YBQ026);湖南省社会科学成果评审委员会重大课题(XSP19ZDA009)。

作者简介 周向红(1981—),男,湖南邵阳人,工程师,博士,从事制造业、评价决策理论及应用研究。

收稿日期 2018-08-10

法(半径为 20 m),采集 5 个土壤土样制成一个混合土样。每个混合样品约取 1 kg,多余部分四分法弃去。

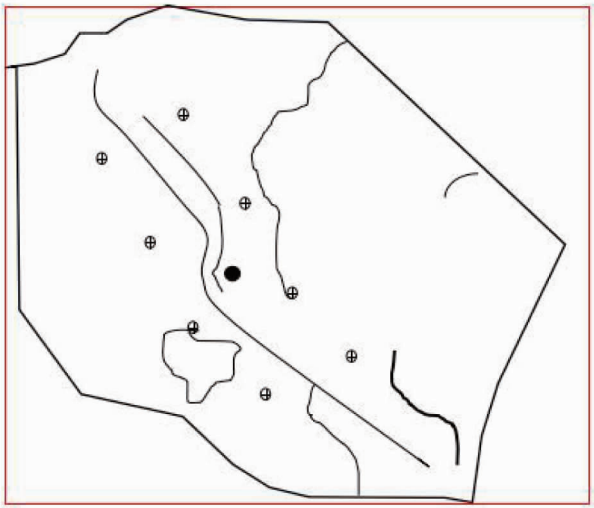


图 1 采样点分布
Fig. 1 Sampling sites distribution

1.2 土壤重金属测试方法 土壤样品中重金属检测依据

《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166—2004)进行样品制备、分析检测、数据处理等。整个分析测定过程试验中所用水均为去离子水,所采用的试剂均为优级纯试剂,所用玻璃器皿均在 10%硝酸中浸泡 24 h 以上。分析过程中采用试剂空白、平行双样、国家标准样品进行质量保证和质量控制,且加标回收率为 95%~105%。

1.3 土壤重金属污染评价方法

1.3.1 冶炼制造企业土壤中的重金属含量水平。为了对该冶炼制造企业厂区内土壤中的重金属含量水平进行分析,共设 8 个区域双层 16 个采样点,有针对性地选择重要监测因子,主要有 As、Cd、Cr、Cu、Mn、Pb、Sb、V 和 Zn。利用 ICP-MS 对采样点的土壤样品进行检测,各采样点重金属的含量如表 1 所示。

1.3.2 单因子污染指数法。单因子污染指数法是以土壤元素背景值为评价标准来评价重金属元素的累积污染程度,其计算公式见式(1):

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

式(1)中, P_i 为*i* 重金属元素的污染指数; C_i 为重金属含量实测值; S_i 为土壤环境质量标准值。土壤重金属背景值选用湖

表 1 土壤中重金属含量
Table 1 Heavy metal content in soil

采样点 Sampling point	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	V	Zn
WS-1	2 300	1 000	92	5 200	7 400	26 300	480	110	82 200
WS-2	4 600	2 500	77	9 700	24 700	40 700	1 100	45	184 000
QY-1	50	20	97	40	240	290	6	110	570
QY-2	73	30	110	99	510	710	9	120	1 300
ZS-1	380	420	70	480	1 600	2 800	69	75	13 400
ZS-2	350	430	68	390	1 400	2 600	50	74	12 600
QL-1	350	140	150	610	980	6 400	81	150	18 300
QL-2	260	120	110	1 200	2 500	1900	32	140	8 900
XH-1	72	210	99	74	570	230	10	100	3 500
XH-2	60	38	93	56	640	140	10	120	1 200
XX-1	390	28	150	120	280	1 100	48	130	2 900
XX-2	120	120	180	170	1 300	400	14	190	10 100
XY-1	1 900	540	48	3 400	3 000	19 800	370	39	292 000
XY-2	2 100	760	65	3 100	3 600	31 600	610	51	187 000
XE-1	200	75	99	240	840	970	25	130	16 000
XE-2	130	72	110	97	780	370	76	130	8 800

南省地方性标准《重金属污染场地土壤修复标准》(DB43/ T1125—2016)中的商业用地作为土壤污染的评价标准,具体数据见表 2。

表 2 重金属污染场地土壤修复总量标准
Table 2 Total soil remediation standards for heavy metal contaminated sites

用地类型 Land type	铅 Pb	砷 As	镉 Cd	汞 Hg	铬 Cr	六价铬 Cr(VI)	钒 V	锰 Mn	铜 Cu	锌 Zn	锑 Sb
居住用地 Residential land	280	50	7	4	400	5	200	2 000	300	500	30
商业用地 Commercial land	600	70	20	20	610	30	250	5 000	500	700	60
工业用地 Industrial land	600	70	20	20	800	30	250	10 000	500	700	60

若 $P_i \leq 1.0$,则重金属含量在土壤背景值含量之内,土壤未受到人为污染;若 $P_i > 1.0$,则重金属含量已超过土壤背景值,土壤已受到人为污染,指数越大则表明土壤重金属累积污染程度越高,具体见表 3。单因子污染指数模型只能分别

反映各个污染物的污染程度,不能全面、综合地反映土壤的污染程度,因此这种方法仅适用于单一因子污染特定区域的评价。

1.3.3 综合污染指数法。内梅罗综合污染指数法全面反映各种重金属对土壤的不同作用,突出高浓度重金属对土壤环境质量的影响。单因子指数只能反映各个重金属元素的污染程度,不能全面地反映土壤的污染状况,而综合污染指数兼顾了单因子污染指数平均值和最高值,可以突出污染较重

的重金属污染物的作用。综合污染指数计算方法如式(2):

$$P_z=\sqrt{\frac{(\bar{P})^2+P_{imax}^2}{2}}$$

(2)

式(2)中, P_z 是采样点的综合污染指数; P_{imax} 为 i 采样点重金属污染物单项污染指数中的最大值; $\bar{P}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n P_i$ 为单因子指数平均值, n 为重金属种类数。综合污染指数评价等级标准见表 3。

表 3 土壤环境质量综合评价等级标准
Table 3 Grade standard for comprehensive evaluation of soil environmental quality

等级 Class	单因子污染指数 Single factor pollution index(P_i)	综合污染指数 Comprehensive pollution index(P_z)	污染等级 Pollution class	污染水平 Pollution level
1	$P_i\leq 0.7$	$P_z\leq 0.7$	安全	清洁
2	$0.7<P_i\leq 1$	$0.7<P_z\leq 1.0$	警戒线	较清洁
3	$1<P_i\leq 2$	$1.0<P_z\leq 2.0$	轻度污染	轻度污染
4	$2<P_i\leq 3$	$2.0<P_z\leq 3.0$	中度污染	中度污染
5	$P_i>3$	$P_z>3.0$	重污染	严重污染

1.3.4 基于重金属毒性系数改进的综合污染评价方法。由于不同重金属对土壤环境、生态环境的影响不同,采用加权计算法来求平均值比较合适,改进后公式如式(3):

$$\bar{P}=\frac{\sum_{i=1}^n w_i P_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

(3)

对于权重 w 的确立,可依据重金属对环境的影响程度。该研究主要采用各重金属的毒性系数来确定各重金属元素的权重^[16],则 As、Cd、Cr、Cu、Mn、Pb、Sb、V、Zn 的权重分别为 10、30、2、5、1、5、5、2、1。

2 结果与分析

2.1 单因子指数法评价结果 采用单因子指数法对该冶炼制造企业厂区内土壤重金属进行污染评价,评价结果如表 4 所示。由表 4 可知,该企业土壤中重金属 Cr、V、Mn 等的污染指数均值都低于 0.7,属于清洁水平。其余指标的污染指数均大于 3,达到了重污染程度,属于严重污染水平。从单个污染指数来看,其余 6 个重金属元素的污染指数均值从大到小依次为 Zn、Cd、Pb、As、Cu、Sb。

表 4 土壤重金属单因子指数评价结果
Table 4 Evaluation results of single factor index of heavy metals in soil

采样点 Sampling point	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	V	Zn
WS-1	32.86	50.00	0.15	10.40	1.48	43.83	8.00	0.44	117.43
WS-2	65.71	125.00	0.13	19.40	4.94	67.83	18.33	0.18	262.86
QY-1	0.71	1.00	0.16	0.08	0.05	0.48	0.10	0.44	0.81
QY-2	1.04	1.50	0.18	0.20	0.10	1.18	0.15	0.48	1.86
ZS-1	5.43	21.00	0.11	0.96	0.32	4.67	1.15	0.30	19.14
ZS-2	5.00	21.50	0.11	0.78	0.28	4.33	0.83	0.30	18.00
QL-1	5.00	7.00	0.25	1.22	0.20	10.67	1.35	0.60	26.14
QL-2	3.71	6.00	0.18	2.40	0.50	3.17	0.53	0.56	12.71
XH-1	1.03	10.50	0.16	0.15	0.11	0.38	0.17	0.40	5.00
XH-2	0.86	1.90	0.15	0.11	0.13	0.23	0.17	0.48	1.71
XX-1	5.57	1.40	0.25	0.24	0.06	1.83	0.80	0.52	4.14
XX-2	1.71	6.00	0.30	0.34	0.26	0.67	0.23	0.76	14.43
XY-1	27.14	27.00	0.08	6.80	0.60	33.00	6.17	0.16	417.14
XY-2	30.00	38.00	0.11	6.20	0.72	52.67	10.17	0.20	267.14
XE-1	2.86	3.75	0.16	0.48	0.17	1.62	0.42	0.52	22.86
XE-2	1.86	3.60	0.18	0.19	0.16	0.62	1.27	0.52	12.57
平均值 Mean	11.91	20.32	0.17	3.12	0.63	14.20	3.11	0.43	75.25
最小值 Minimum	0.71	1.00	0.08	0.08	0.05	0.23	0.10	0.16	0.81
最大值 Maximum	65.71	125.00	0.30	19.40	4.94	67.83	18.33	0.76	417.14

表 4 中数据结果显示,重金属 As 的 P_i 值为 0.71~65.71,均值为 11.91,XH-1 轻度污染、QY 较清洁,XE 中度

污染,其他各点的 P_i 值大部分大于 3,属于严重污染。Cd 的 P_i 值为 1.00~125.00,跨度大,均值为 20.32,大于 3.00,属于

严重污染水平。QY 采样点 P_i 值相对较小,属于轻度污染。Cr 的 P_i 值为 0.08~0.30,均值为 0.17,小于 0.70,属于清洁水平,无此重金属污染。Cu 的 P_i 值为 0.08~19.40,跨度较大,均值为 3.12,大于 3.00,属于严重污染。Mn 的 P_i 值为 0.05~4.94,均值为 0.63,小于 0.70,属于清洁水平,主要 WS 采样点的 P_i 值大于 3.00,属于严重污染,其余采样点均低于 0.70。Pb 的 P_i 值为 0.23~67.83,跨度较大,均值为 14.20,大于 3.00,属于严重污染;QL、XH、XX 和 XE 的 P_i 都小于 2.00,均在轻度污染以下。Sb 的 P_i 值为 0.10~18.33,均值为 3.11,略大于 3.00,属于严重污染;只有 WS、XY 的 P_i 值大于 3.00 外,其余均小于 2.00,在轻度污染以下。V 的 P_i 值为 0.16~0.76,均值为 0.43,小于 0.70,属于清洁水平。Zn 的 P_i 值为 0.81~417.14,均值为 75.25,远大于 3.00,属于严重污染水平,只有 QL 采样点 P_i 值小于 2.00,属于轻度污染。

从各重金属污染值的分布情况来看,重金属元素 Zn 在 2 个采样区的污染风险评价价值高,最高达 417.14。

2.2 综合污染指数评价结果 利用内梅罗综合污染指数法对该冶炼制造企业厂区内土壤进行评价,评价结果如表 5 所示。从 8 个采样点,每个采样点 5~10、10~15 cm 两层土壤重金属的综合污染评价指数(P_z)来看,QY 上下两层 P_z 值分别小于 1.00 和 2.00,在轻度污染以下;XH 的下层土壤 P_z 小于 2.00,属于轻度污染;其余各点 P_z 在 4.11~297.76。从整体采样点来看,综合污染指数均值为 54.78,远大于重污染程度污染指数 3.00,属于严重污染水平。

表 5 内梅罗综合污染指数评价结果
Table 5 Evaluation results for Nemerow comprehensive pollution index

采样点 Sampling point	层深 Layer depth//cm	综合污染指数 Comprehensive pollution index (P_z)	评价等级 Evaluation level	污染程度 Pollution degree
WS-1	5~10	85.60	5	严重污染
WS-2	10~15	191.08	5	严重污染
QY-1	5~10	0.77	2	较清洁
QY-2	10~15	1.41	3	轻度污染
ZS-1	5~10	15.42	5	严重污染
ZS-2	10~15	15.72	5	严重污染
QL-1	5~10	18.94	5	严重污染
QL-2	10~15	9.29	5	严重污染
XH-1	5~10	7.56	5	严重污染
XH-2	10~15	1.42	3	轻度污染
XX-1	5~10	4.11	5	严重污染
XX-2	10~15	10.39	5	严重污染
XY-1	5~10	297.76	5	严重污染
XY-2	10~15	191.56	5	严重污染
XE-1	5~10	16.37	5	严重污染
XE-2	10~15	9.04	5	严重污染

2.3 基于重金属毒性系数改进的综合污染指数评价结果 在式(2)中,采用简单算术平均,其前提是假设各重金属元素的权重是一样的,而没有考虑重金属元素的差异。由于不同重金属对土壤环境、生态环境的影响不同,采用加权计

算法来求平均值比较合适,改进如式(3)。据此计算得到各采样点的综合污染指数 P_z ,如表 6 所示。从表中数据看,与“2.2”的计算值相近。

表 6 改进后内梅罗综合污染指数评价结果
Table 6 Evaluation results of improved Nemerow's comprehensive pollution index

采样点 Sampling point	层深 Layer depth//cm	综合污染指数 Comprehensive pollution index (P_z)	评价等级 Evaluation level	污染程度 Pollution degree
WS-1	5~10	87.07	5	严重污染
WS-2	10~15	195.41	5	严重污染
QY-1	5~10	0.86	2	较清洁
QY-2	10~15	1.52	3	轻度污染
ZS-1	5~10	17.14	5	严重污染
ZS-2	10~15	17.48	5	严重污染
QL-1	5~10	18.94	5	严重污染
QL-2	10~15	9.49	5	严重污染
XH-1	5~10	8.38	5	严重污染
XH-2	10~15	1.58	3	轻度污染
XX-1	5~10	3.23	5	严重污染
XX-2	10~15	10.52	5	严重污染
XY-1	5~10	295.65	5	严重污染
XY-2	10~15	190.39	5	严重污染
XE-1	5~10	16.29	5	严重污染
XE-2	10~15	9.06	5	严重污染

从图 2 可直观看出,重金属毒性系数改进前后 2 种结果具有一致性,且 WS 和 XY 是污染风险高的区域。这是由于毒性系数大(权重大)的镉与砷的含量相对小,其他元素锌的含量相对大,但其毒性系数小(权重小),从而导致结果未有明显差异。

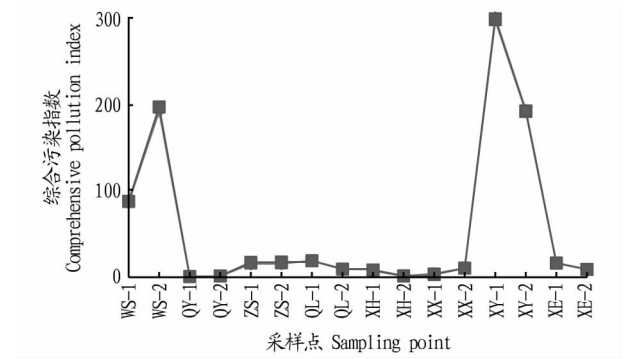


图 2 2 种不同平均值下的综合污染指数分布
Fig.2 Distribution of comprehensive pollution index under two different averages

3 结论

该研究选取湖南省一典型冶炼制造企业为研究区域,调查了该厂区内土壤重金属的污染状况,并采用不同污染评价方法进行了评价。结果表明,该区域大部分采样点的土壤已经受到重金属严重污染,污染的重点区域是污酸厂、锌 I 车间等 2 个区域,厂内污染严重的是 Zn、Cd 和 Pb 等 3 种重金属元素。从综合污染指数评价方法来看,该研究 2 种平均方

(下转第 82 页)

3 讨论

从水质和底质指标来看,种植初期和后期容易造成水质 TN、Chla、 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 等指标上升,2017 年 8、10 月份 20% 三明治种植塘(试验组 II)底质 TN、TP 含量有所上升。前期研究表明 8% 空心菜、5% 鱼腥草适合进行推广^[3,5-6],2016 年采用 5% 三明治塘(鱼腥草-空心菜-鱼腥草)对罗非鱼养殖池塘进行水/底质净化,结果发现其能显著降低吉富罗非鱼养殖池塘水体中 TOC、 COD_{Mn} 、TN、TP 指标和底泥中 TN、TP 指标。该试验结果表明,养殖前期因为中草药植物的投入使得部分水质指标(如 TN、Chla)上升,10 月因中草药植物枯萎死亡形成水体营养物质而导致水质和底质所测指标上升(20% 三明治 TN、TP)。该试验结果表明,当构建三明治浮床时,试验组 I 的净水效果较试验组 II 好。

研究表明,空心菜^[12]、水花生^[13]、苦草、水芹^[14]对总磷的去除效果较好,植物根系附近附着大量微生物,微生物降解作用对水体氮元素的去除率在 60% 以上^[15],根系释放氧气,有利于敞水区好氧菌(氨化细菌和硝化细菌)和浮床区反硝化细菌和氨化细菌的生存^[16],在浮床下悬挂菌种强化填料(如异养硝化-好氧反硝化菌可去除 NO_3^--N)可提高生态浮床的脱氮率^[17]。河蚌^[18]和河蚬^[19]也能起到水质净化的效果。如果需要对三明治模型要素进行进一步优化,可以在冬季选择常青植物(薄荷、水芹、黄菖蒲、千屈菜等),在中层放置河蚌、河蚬,浮床下面悬挂弹性填料,做到技术集成并在合适区域进行示范、推广。

4 结论

2017 年 7—9 月三明治塘 COD_{Mn} 、Chla、TN、 NO_2^--N 、TP、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 显著下降,对磷的去除效果较好,种植初期和后期易造成水质 TN、Chla 等指标上升。

(上接第 63 页)

法具有一致性,采用毒性系数来反映重金属污染权重更加科学合理。

结合该制造企业历史来看,由于制造企业从事铅锌冶炼长达数十年,在多年生产中,土壤中重金属元素不断累积,已造成当前严重污染局面,评价结果也印证了其重金属污染的严重程度。根据评价结果,因地制宜,采用高分子材料吸附固定或重新收集再制造等不同治理路线,有针对性地开展重金属土壤治理,以达到环境标准要求,提升土地利用价值,建立良好的生态环境。

参考文献

- [1] 陈凤,董泽琴,王程程,等. 锌冶炼区耕地土壤和农作物重金属污染状况及风险评价[J]. 环境科学,2017,38(10):4360-4369.
- [2] 贺强,李慧媛,张永清. 我国近十年来土壤重金属污染的相关研究[J]. 山西师范大学学报(自然科学版),2017,31(2):83-87.
- [3] 成鹏飞. 践行绿色发展理念的五个抓手[N]. 经济日报,2017-12-10(008).
- [4] 陈洁,施维林,张一梅,等. 电镀厂遗留场地污染分析及健康风险空间分布评价[J]. 环境工程,2018,36(4):153-159.
- [5] 李秉辉,李海燕. 海绵公园土壤重金属现状调查与评价[J]. 环境工程,2016,34(S1):1016-1020.

参考文献

- [1] 郑尧,赵志祥,祁旭文,等. 种植虎杖对吉富罗非鱼养殖水质和底质的影响[J]. 安徽农业科学,2017,45(15):116-119.
- [2] 郑尧,赵志祥,祁旭文,等. 鱼腥草种植对吉富罗非鱼养殖池塘污染物的影响[J]. 中国农学通报,2017,33(32):140-144.
- [3] 郑尧,祁旭文,范立民,等. 浮床栽培鱼腥草对吉富罗非鱼养殖池塘水质的影响[J]. 中国农学通报,2016,32(14):26-31.
- [4] 史丽娜,可小丽,刘志刚,等. 罗非鱼-鱼腥草共生养殖池塘沉积物菌群结构与功能特征[J]. 中国农学通报,2015,31(14):64-73.
- [5] 郑尧,祁旭文,裴丽萍,等. 浮床栽培鱼腥草对吉富罗非鱼胆汁液中八种免疫因子的影响[J]. 农业环境科学学报,2016,35(9):1680-1685.
- [6] 郑尧,胡庚东,裴丽萍,等. 浮床栽培鱼腥草对吉富罗非鱼血清免疫因子的影响[J]. 生态与农村环境学报,2017,33(10):950-954.
- [7] 郑尧,陈家长. 水产动物中草药成分的应用基础[J]. 中国农学通报,2018,34(8):123-128.
- [8] 祁旭文,陈家长. 浮床无土栽培植物控制池塘富营养化水质[J]. 湛江海洋大学学报,2001,21(3):29-33.
- [9] 陈家长,孟顺龙,胡庚东,等. 空心菜浮床栽培对集约化养殖鱼塘水质的影响[J]. 生态与农村环境学报,2010,26(2):155-159.
- [10] 郑尧,陈家长,胡庚东,等. “空心菜-水芹”轮作对养殖池塘水质和底质环境的影响[J]. 上海海洋大学学报,2018,27(1):98-105.
- [11] 郑尧,赵志祥,陈家长,等. “鱼腥草-空心菜-鱼腥草”三明治模型对吉富罗非鱼养殖池塘水质和底质的影响[J]. 南方农业学报,2017,48(S1):155-158.
- [12] 金树权,周金波,朱晓丽,等. 10 种水生植物的氮磷吸收和水质净化能力比较研究[J]. 农业环境科学学报,2010,29(8):1571-1575.
- [13] 杨雁,李永梅,王自林,等. 漂浮栽培水生植物对入滇河流污水中磷的去除效果研究[J]. 农业环境科学学报,2010,29(9):1763-1769.
- [14] 向文英,彭颖. 重庆冬季水芹浮床对富营养化水体的修复[J]. 环境工程学报,2015,9(11):5393-5398.
- [15] 王超,王永泉,王沛芳,等. 生态浮床净化机理与效果研究进展[J]. 安全与环境学报,2014,14(2):112-116.
- [16] 吴伟,胡庚东,金兰仙,等. 浮床植物系统对池塘水体微生物的动态影响[J]. 中国环境科学,2008,28(9):791-795.
- [17] 汤茵琪,李阳,常素云,等. 好氧反硝化菌强化生态浮床对水体氮与有机物净化机理[J]. 生态学杂志,2017,36(2):569-576.
- [18] 张根芳,张文府,梅凯先. 河蚌的净水作用和淡水珍珠产业的碳汇贡献[J]. 科学养鱼,2017(10):54-55.
- [19] 朱小龙. 河蚬对富营养水体水质改善作用及生态学意义[D]. 无锡:江南大学,2015.
- [6] 郭绍英,林浩,谢好,等. 基于改进灰色聚类法的矿区土壤重金属污染评价[J]. 环境工程,2017,35(10):146-150.
- [7] 齐雁冰,楚万林,蒲洁,等. 陕北某化工企业周围污灌区土壤-作物系统重金属累积特征及评价[J]. 环境科学,2015,36(4):1453-1460.
- [8] 陆泗进,王业耀,何立环. 会泽某铅锌矿周边农田土壤重金属生态风险评价[J]. 生态环境学报,2014,23(11):1832-1838.
- [9] 黄哲,曲世华,白岚,等. 包头城区土壤重金属空间分布特征及污染评价[J]. 环境工程,2017,35(5):149-153.
- [10] 陕永杰,张磊. 塔儿山铁矿区土壤重金属污染评价及来源分析[J]. 环境工程,2016,34(11):141-144.
- [11] 匡晓亮,彭澎,张坤,等. 湘江下游沉积物重金属污染模糊评价[J]. 环境化学,2016,35(4):800-809.
- [12] 潘琼,潘峰. 湖南省治矿城市土壤重金属污染现状及评估[J]. 江苏农业科学,2015,43(10):405-410.
- [13] 高瑞英. 土壤重金属污染环境风险评价方法研究进展[J]. 科技管理研究,2012,32(8):45-50.
- [14] FAIRBROTHER A, WENSTEL R, SAPPINGTON K, et al. Framework for metals risk assessment[J]. Ecotoxicology and environmental safety, 2007, 68(2):145-227.
- [15] SWAINE D J. Why trace elements are important[J]. Fuel processing technology, 2000,65/66:21-23.
- [16] 徐争启,倪师军,虞先国,等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术,2008,31(2):112-115.
- [17] 湖南省环保厅,湖南省质量技术监督局. 重金属污染场地土壤修复标准:DB43/T 1125—2016[S]. 湖南省环保厅,湖南省质量技术监督局,2016.