

网络出版时间:2015-04-13 12:59

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2015.05.026

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20150413.1259.026.html

河南陕县赤泥库周边土壤重金属污染评价

孙 鑫¹, 宁 平¹, 唐晓龙², 易红宏², 周连碧³, 李 凯¹

(1 昆明理工大学 环境科学与工程学院, 云南 昆明 650093;

2 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083; 3 北京矿冶研究总院, 北京 100160)

[摘 要] **【目的】**对河南陕县赤泥库周边土壤重金属污染特性和现状进行调查和评价。**【方法】**在陕县红旗沟、大坪赤泥库周边设置 11 个采样点,采集 0~20 cm 土层土样,测定土壤中重金属 Hg、Cd、As、Cu、Pb、Cr、Ni、Zn 含量,并用污染指数法和潜在生态危害指数法对重金属污染现状进行评价。**【结果】**与河南省土壤背景值相比,河南陕县赤泥库周边土壤重金属 Zn、Cu、Cr、Hg、Ni 的含量均较高,但低于我国土壤环境质量 3 级标准;Pb、Cd、As 含量均明显低于河南土壤背景值和我国土壤环境质量 3 级标准。单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法评价结果显示,研究区土壤污染最小的为 Pb,污染最严重的为 Cr,污染程度由高到低依次为 Cr>As>Ni>Zn>Hg>Cu>Cd>Pb;赤泥库周边 11 个采样点土壤中各重金属元素污染程度属于安全范畴,污染水平为清洁。潜在生态危害指数法评价结果显示,Hg 属于很强生态危害水平,其他重金属属于轻微生态危害水平;该地区总的潜在生态危害指数(RI)值为 238.22,达到中等生态危害,其中 3 号采样点污染最为严重,RI 值达到 536.65,为强生态危害。**【结论】**河南陕县赤泥库周边土壤保护良好,重金属污染状况属于轻度污染,与河南省土壤背景值相比,土壤中重金属 Zn、Cu、Cr、Hg、Ni 的含量有累积,虽远远低于我国土壤环境质量 3 级标准,但其 RI 值达到中等生态危害水平,个别采样点甚至更为突出,因此建议相关部门进一步加强监测防治工作。

[关键词] 赤泥库;土壤重金属;污染指数法;潜在生态危害指数法;污染评价;河南陕县

[中图分类号] X825

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2015)05-0122-07

Heavy metals pollution assessment in soil surrounding Red Mud Ponds in Shaanxian, Henan

SUN Xin¹, NING Ping¹, TANG Xiao-long², YI Hong-hong²,
ZHOU Lian-bi³, LI Kai¹

(1 Faculty of Environmental Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming,

Yunnan 650093, China; 2 Department of Environmental Engineering, University of Science and Technology

Beijing, Beijing 100083, China; 3 Beijing General Research Institute of Mining and Metallurgy, Beijing 100160, China)

Abstract: **【Objective】**This study focused on the investigation and evaluation for heavy metals pollution in soils surrounding Red Mud Ponds (RMP) in Shaanxian, Henan. **【Method】**Eleven sampling sites were selected in surrounding area of RMP in Hongqigou and Daping of Shaanxian and the contents of heavy metals (Cd, As, Zn, Pb, Cu, Hg, Cr, and Ni) in soil depth of 0—20 cm were measured and evaluated using single factor index, Nemerow integrated index and potential ecological risk index. **【Result】**Compared to the background values in Henan, the contents of Zn, Cu, Cr, Hg, and Ni in soil surrounding RMP were higher

[收稿日期] 2013-12-17

[基金项目] 环境保护部公益性行业科研专项“典型大宗工业固体废物环境管理技术体系研究”(201109034)

[作者简介] 孙 鑫(1987—),男,云南昆明人,博士,主要从事固体废弃物处理与处置研究。E-mail:sunxin_china@126.com

[通信作者] 宁 平(1958—),男,山西太原人,教授,博士,博士生导师,主要从事固体废弃物处理与处置及大气污染控制研究。E-mail:ningping1958@163.com

but still lower than their third standards of national soil environmental quality. Contents of Pb, Cd, and As were significantly lower. Single factor index and Nemerow integrated index indicated that the pollution levels of heavy metals were in the order of $\text{Cr} > \text{As} > \text{Ni} > \text{Zn} > \text{Hg} > \text{Cu} > \text{Cd} > \text{Pb}$. The pollution levels of all the monitoring sites were safe. Based on potential ecological risk index method, the *RI* value of this area was 238.22, indicating medium ecological damage. In particular, *RI* value of No. 3 monitoring site was 536.65 with serious ecological damage. 【Conclusion】 The soil in surrounding area of RMP was well protected and the heavy metal pollution level was slight. Compared to the background values in Henan, the contents of Zn, Cu, Cr, Hg, and Ni were lower than their third levels of national standards. But *RI* value indicated medium ecological damage especially in some sites. It is suggested to enhance the monitoring and take protection measures.

Key words: red mud dam; soil heavy metal; pollution index method; potential ecological risk index; pollution evaluation; Shaanxian, Henan

在过去的30多年中,我国经济发展模式属于粗放型,工业经济发展主要依靠物质、资源的投入。为获取物质、原料和资源,在开采、洗选(分选)和冶炼过程中产生了大量的工业固体废物^[1]。第一次污染源普查结果表明,2007年我国工业固体废物产生量达38.52亿t,贮存量为15.99亿t,贮存率为41.5%,工业固体废物的大量产生与堆放,造成土地浪费、资源浪费并带来了潜在的环境风险^[2]。因此,在国家“十二五”规划纲要中将大宗工业固体废物的防治、管理、利用列为重中之重。

大坪沟赤泥库和红旗沟赤泥库位于河南省三门峡市陕县境内,近几年来陕县进一步突出和强化工业的核心与主导作用,充分利用铝资源优势,大力发展矿产品开采及产品系列开发,但同时也带来了严重的环境问题^[3-4]。铝业是金属冶炼行业中仅次于钢铁的第二大产业,我国是氧化铝生产大国,2010年我国氧化铝产量为2 995万t,其废弃物赤泥的产生量约3 000万t,氧化铝产量和赤泥产生量均约占全球的1/3以上。赤泥的产出量因矿石品位、生产方法、技术水平而不同,目前每生产1 t氧化铝会附带产生0.8~1.5 t赤泥。中国作为世界第4大氧化铝生产国,每年排放的赤泥高达数百万t^[5-9],其堆场占据大量土地并给生态环境带来了巨大的危害。因此,赤泥的处理处置与综合利用已成为社会关注的重大环境问题。赤泥的主要污染物为碱、氟化物、铝及钠等^[10-12],碱对人体的危害虽然不直接,但水体pH值的变化常常影响到水中化合物的毒性进而危害环境。同时,堆场表面干结的赤泥由于含有大量钠离子而发生板结形成致密的土块,pH极高(>12),寸草不生,风吹易龟裂产生扬尘污染大气。因此,大宗工业固体废物环境监管责任重大,对尾矿

库周边土壤重金属污染现状进行评价是建立固体废物管理技术体系的重要内容之一。全面提升大宗工业固体废物环境监测、监管水平,对实现资源与环境可持续发展具有重要的现实意义。

本研究对河南陕县赤泥库周边土壤重金属含量进行测定,利用单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法以及潜在生态危害指数法对该地区重金属污染现状进行评价,旨在为大宗工业固体废物的环境监管提供支持。

1 材料与方法

1.1 样品采集

在对河南陕县红旗沟和大坪赤泥库及周边情况进行调查的基础上,分别在赤泥库及渗滤液池周边共布设11个样地,每个样地设置5个采样点,每一采样点在直径100 m范围内采取“S”形或梅花形采样法,选择3~5个0~20 cm耕层土样混合,按四分法取分析样品1.5 kg。采样时间为2011年11月中旬,共采集土壤样品55个。将每个土壤样品充分混合后,采用四分法留取1 kg,带回实验室备测。

土样经风干后过孔径0.149 mm筛,称取土样0.2~1.0 g(精确至0.002 g)于50 mL具塞比色管中,加入10 mL王水,加塞摇匀于沸水浴中消解2 h。吸取一定量的消解试液于50 mL比色管中,依次加3 mL盐酸、5 mL硫脲溶液和5 mL抗坏血酸溶液,用蒸馏水稀释至刻度,摇匀,取上清液用原子荧光分光光度法(双道原子荧光光度计,AFS-3100)对As和Hg进行测定;土壤全量Cu、Zn、Ni、Cr、Pb和Cd采用盐酸-硝酸-氢氟酸-高氯酸全分解的方法测定;Cu、Zn、Ni和Cr采用原子吸收分光光度法(原子吸收分光光度计,AA7000F/AAC)测定;Pb

和 Cd 采用石墨炉原子吸收分光光度法(原子吸收分光光度计,TAS-990AFG)测定。

1.2 评价方法

1.2.1 单因子污染指数法 单因子污染指数法^[13-14]适用于单一因子污染的特定区域的评价,可以反映单一污染物的污染程度,是其他环境质量指数、环境质量分级和综合评价的基础,其表达式为:

$$P_i = C_i / S_i。$$
 (1)

式中: P_i 为土壤中污染物 i 的环境质量指数, C_i 为污染物 i 的实测含量, S_i 为污染物 i 的评价标准。

若 $P_i \leq 1.0$,表示土壤未受到人为污染,否则表示土壤已受到人为污染, P_i 越大则表明农产品污染物累积污染程度越高,其分级标准为: $P_i \leq 1$,非污染; $1 \leq P_i \leq 2$,轻污染; $2 < P_i \leq 3$,中污染; $P \geq 3$,重

污染。

1.2.2 内梅罗综合污染指数法 当以评定区域内的农产品质量作为一个整体与外区域农产品质量进行比较,或土壤同时被多种污染物污染时,需将单因子污染指数按一定方法综合起来应用综合污染指数法进行评价。采用兼顾单因子污染指数平均值和最大值的内梅罗综合污染指数法^[15-17]进行评价,该方法的计算公式为:

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i\right)^2 + P_{i(\text{max})}^2}{2}}。$$
 (2)

式中: $P_{\text{综}}$ 为土壤综合污染指数, $P_{i(\text{max})}$ 为土壤中单项污染物 i 的最大污染指数, n 为污染物的个数。 $P_{\text{综}}$ 的分级标准见表 1。

表 1 土壤综合污染程度的分级标准

Table 1 Classification of comprehensive soil pollution classes

污染等级 Pollution class	$P_{\text{综}}$	污染程度 Pollution degree	污染水平 Pollution level
1	≤ 0.7	安全 Safe	清洁 Clean
2	$>0.7 \sim \leq 1.0$	警戒线 Warning line	尚清洁 Less clean
3	$>1.0 \sim \leq 2.0$	轻污染 Low pollution	污染物超过起初污染值,作物开始污染 Pollutant concentration over initial pollution values and crops is contaminated
4	$>2.0 \sim \leq 3.0$	中污染 Medium pollution	土壤和作物污染明显 Soils and crops are contaminated
5	≥ 3.0	重污染 High pollution	土壤和作物污染严重 Soils and crops are contaminated seriously

但是由于不同重金属对土壤环境、生态环境的影响存在差异,因此可以采用加权计算法求取各污染物综合污染指数的平均值,则改进的内梅罗综合污染指数法的计算公式为:

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{\left(\frac{\sum_{i=1}^n w_i P_i}{\sum_{i=1}^n w_i}\right)^2 + P_{i(\text{max})}^2}{2}}。$$
 (3)

表 2 8 种重金属污染物对环境的重要性分类及其权重值

Table 2 Classification of importance and weights for 8 heavy metals

重金属 Heavy metal	类别 Class	权重 Weight	重金属 Heavy metal	类别 Class	权重 Weight
Hg	I	3	As	I	3
Pb	I	3	Zn	II	2
Cd	I	3	Cu	II	2
Cr	I	3	Ni	II	2

1.2.3 潜在生态危害指数法 潜在生态危害指数法^[19-20]是瑞典科学家 Hakanson 提出的沉积物中重金属危害性的评价方法,可使区域质量评价更具代表性和可比性。根据这一方法,某区域土壤中单一重金属 i 的潜在生态危害系数 E_i 可表示为:

$$E_i = T_i \times F_i。$$
 (4)

式中: w_i 为权重。

对于权重 w_i 的确立,Swaine 按照重金属对环境的影响程度,将环境研究中人们比较关注的重金属元素分成了 I、II、III 3 类,因 I、II、III 类重金属元素对环境污染的重要性逐渐下降,分别将其权重赋值为 3,2,1^[18]。本研究涉及的 8 种重金属的类别及其权重如表 2 所示。

式中: T_i 为重金属 i 的毒性系数, F_i 为重金属 i 的污染因子。

土壤中多种重金属元素的潜在生态危害指数(RI)是各单一重金属元素的潜在生态危害系数 E_i 之和,其表达式为:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n T_i \times F_i。$$
 (5)

本研究涉及的 Hg、Cd、As、Cu、Pb、Cr、Ni、Zn 2,2 和 1,各种重金属潜在生态危害系数和指数与污
等 8 种重金属的毒性系数^[21]分别为 40,30,10,5,5, 染程度的关系如表 3 所示。

表 3 重金属潜在生态危害系数(E_i)与污染程度的关系

Table 3 Relationship of heavy metal potential ecological hazard value and pollution level

污染等级 Pollution class	E_i	RI	污染程度 Pollution degree
1	<40	<150	轻微生态危害 Low
2	$\geq 40\sim<80$	$\geq 150\sim<300$	中等生态危害 Medium
3	$\geq 80\sim<160$	$\geq 300\sim<600$	强生态危害 High
4	$\geq 160\sim<320$	≥ 600	很强生态危害 Very high
5	>320		极强生态危害 Extremely high

2 结果与分析

2.1 赤泥库周边土壤的重金属含量

从表 4 可以看出,河南陕县赤泥库周边土壤表 背景值,但低于我国土壤环境质量 3 级标准的相应
面重金属 Zn、Cu、Cr、Hg、Ni 含量高于河南省土壤 参考值。说明研究区土壤重金属含量符合国家土壤
环境质量标准,但是与河南省背景值相比,重金属元
素 Cu、Zn、Cr、Hg、Ni 在土壤中有一定累积。

表 4 河南陕县赤泥库周边土壤重金属含量($n=55$)

Table 4 Heavy metal contents in the soil surrounding Red Mud Ponds in Shaanxian, Henan ($n=55$) mg/kg

重金属 Heavy metal	平均值 Mean	最小值 Min	最大值 Max	标准差 SD	参考标准 ^[22] Reference standard ^[22]	河南省土壤背景值 ^[23] Background value in Henan ^[23]
Cu	24.04	22.70	27.10	1.23	400.0	19.70
Zn	73.99	68.80	87.50	5.25	500.0	60.10
Pb	14.13	9.84	21.60	3.28	500.0	19.60
Cr	118.73	103.00	139.00	13.02	300.0	63.80
Cd	0.05	0.02	0.10	0.03	1.0	0.07
As	7.97	6.93	10.00	0.91	40.0	11.40
Hg	0.16	0.07	0.42	0.10	1.5	0.03
Ni	37.01	34.50	40.20	1.58	200.0	26.70

2.2 赤泥库周边土壤重金属污染现状评价

2.2.1 单因子指数法和内梅罗综合污染指数法

参照国家土壤环境质量标准以及河南省土壤背景 其 P_i 平均值为 0.03;污染最严重的为 Cr,其 P_i 平
值,采用单因子污染指数、内梅罗综合污染指数对陕 均值为 0.40,污染程度由高到低依次为 $Cr>As>$
县红旗沟、大坪赤泥库周边土壤重金属污染现状进 $Ni>Zn>Hg>Cu>Cd>Pb$ 。11 个采样地 $P_{综}$ 的
行评价。结果(表 5)表明,该地区污染最小的为 Pb, 平均值为 0.30,可知赤泥库周边土壤中各种重金属
元素均值的污染程度属于安全范畴,污染水平为清
洁。

表 5 河南陕县赤泥库周边土壤重金属污染现状评价结果

Table 5 Evaluation of soil pollution status in surrounding area of Red Mud Ponds in Shaanxian, Henan

采样点 Sampling site	P_i								$P_{综}$	污染程度 Pollution degree	污染水平 Pollution level
	Cu	Zn	Pb	Cr	Cd	As	Hg	Ni			
S1	0.06	0.14	0.02	0.34	0.07	0.17	0.10	0.19	0.26	安全 Safe	清洁 Clean
S2	0.06	0.14	0.03	0.35	0.03	0.22	0.13	0.18	0.27	安全 Safe	清洁 Clean
S3	0.06	0.15	0.03	0.37	0.04	0.21	0.28	0.19	0.29	安全 Safe	清洁 Clean
S4	0.06	0.15	0.03	0.35	0.05	0.19	0.09	0.19	0.27	安全 Safe	清洁 Clean
S5	0.06	0.14	0.03	0.37	0.04	0.18	0.08	0.18	0.28	安全 Safe	清洁 Clean
S6	0.06	0.15	0.03	0.41	0.02	0.18	0.05	0.20	0.31	安全 Safe	清洁 Clean
S7	0.07	0.18	0.04	0.46	0.10	0.17	0.12	0.20	0.35	安全 Safe	清洁 Clean
S8	0.06	0.14	0.02	0.46	0.04	0.25	0.13	0.18	0.35	安全 Safe	清洁 Clean
S9	0.06	0.14	0.02	0.39	0.02	0.21	0.05	0.17	0.29	安全 Safe	清洁 Clean
S10	0.06	0.15	0.03	0.42	0.10	0.20	0.06	0.18	0.32	安全 Safe	清洁 Clean
S11	0.06	0.15	0.03	0.43	0.03	0.20	0.11	0.18	0.32	安全 Safe	清洁 Clean
平均值 Mean	0.06	0.15	0.03	0.40	0.05	0.20	0.11	0.19	0.30	安全 Safe	清洁 Clean

2.2.2 潜在生态危害指数法 由表 6 可知,从单个 重金属的潜在生态危害系数来看,河南陕县赤泥库

周边土壤中 Hg 元素的 E_i 值为 193.90, 达到很强生态危害水平。对于各采样点而言, 除 6, 9 号采样点为轻微生态危害及 3 号采样点为强生态危害外, 其余各采样点的重金属污染均为中等生态危害。大部分采样点土壤中重金属 Hg 元素属于很强生态危害水平, 其中 3 号采样点 Hg 元素 E_i 值为 492.94, 达

到极强生态危害水平, 可能是由于 3 号采样点位于大坪村附近, 村民的生产生活污染地对其产生了一定影响所致。除了 Hg 元素之外, 大部分采样点其他重金属的 E_i 值均远远小于 40, 属于轻微生态危害水平。

表 6 河南陕县赤泥库周边土壤重金属潜在生态危害评价

Table 6 Evaluation of heavy metal potential ecological risk index in Shaanxian, Henan

采样点 Sampling site	E_i								RI	生态危害程度 Degree of ecological damage
	Cu	Zn	Pb	Cr	Cd	As	Hg	Ni		
S1	6.12	1.17	2.93	3.23	28.38	6.10	180.00	2.78	231.71	中等 Medium
S2	5.76	1.14	4.44	3.26	12.16	7.66	234.12	2.69	273.23	中等 Medium
S3	5.96	1.26	3.75	3.48	16.22	7.22	492.94	2.82	536.65	强 High
S4	6.14	1.24	3.85	3.32	20.27	6.82	169.41	2.79	217.84	中等 Medium
S5	5.86	1.17	3.62	3.45	16.22	6.33	136.47	2.76	180.88	中等 Medium
S6	6.14	1.29	3.60	3.89	8.11	6.29	98.82	3.01	137.15	轻微 Low
S7	6.88	1.46	5.51	4.36	40.54	6.08	211.76	2.92	286.51	中等 Medium
S8	5.89	1.16	2.70	4.29	16.22	8.77	224.71	2.74	274.48	中等 Medium
S9	5.89	1.19	2.51	3.67	8.11	7.31	82.35	2.58	122.61	轻微 Low
S10	6.40	1.22	3.37	3.95	40.54	7.15	100.00	2.73	175.36	中等 Medium
S11	6.07	1.24	3.37	4.04	12.16	7.14	202.35	2.66	250.03	中等 Medium
平均值 Mean	6.10	1.23	3.60	3.72	19.90	6.99	193.90	2.77	238.22	中等 Medium

由表 6 还可知, 研究区土壤重金属 RI 的平均值为 238.22, 达到中等生态危害水平。其中 3 号采样点重金属的 RI 值最高, 为 536.65, 达到强生态危害水平。

比较不同重金属污染评价方法, 可以发现用污染指数法表征土壤受污染程度时, 大部分采样点中的 Hg 污染程度属于安全水平。但是如果用潜在生态危害指数评价法分析时, Hg 的生态危害程度较为严重, 大部分采样点 Hg 的生态危害程度甚至达到很强生态危害水平, 其原因是重金属 Hg 元素在土壤中的移动性很小, 不易随水淋滤, 不能被微生物降解, 且对农作物、农产品和地下水等产生了重大影响, 并通过食物链危害人体健康。所以只有将重金属在土壤环境中的富积程度与其对生态系统的潜在生态危害程度相结合, 才能全面反映土壤重金属的污染状况^[14]。

3 结 论

1) 与河南省土壤背景值相比, 河南陕县赤泥库周边土壤重金属 Zn、Cu、Cr、Hg、Ni 含量较高, 但低于我国土壤环境质量 3 级标准; Pb、Cd、As 含量均明显低于河南土壤背景值和我国土壤环境质量 3 级标准。

2) 运用污染指数法对陕县赤泥库周边土壤重金属污染现状进行评价, 结果显示该地区污染最小的

为 Pb, 其 P_i 平均值为 0.03; 污染最严重的为 Cr, 其 P_i 平均值为 0.40。8 种重金属的污染程度由高到低依次为 $Cr > As > Ni > Zn > Hg > Cu > Cd > Pb$ 。赤泥库周边土壤各重金属元素的污染程度属于安全范畴, 污染水平为清洁。

3) 采用潜在生态危害指数法对陕县赤泥库周边土壤重金属污染现状进行评价, 可知其中 Hg 元素属于很强生态危害水平, 其他重金属属于轻微生态危害水平。11 个采样点中, 除 6 号和 9 号采样点为重金属轻微生态危害水平及 3 号为强生态危害水平外, 其余采样点均为重金属中等生态危害水平。

[参考文献]

[1] 中华人民共和国环境保护部. 全国环境统计公报 [EB/OL]. (2012-01-18) [2013-08-30]. http://zls.mep.gov.cn/hjtj/qghjtjgb/201201/t20120118_222703.htm.
The Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. The bulletin of environmental statistics [EB/OL]. (2012-01-18) [2013-08-30]. http://zls.mep.gov.cn/hjtj/qghjtjgb/201201/t20120118_222703.htm. (in Chinese)

[2] 中华人民共和国环境保护部, 中华人民共和国国家统计局, 中华人民共和国农业部. 第一次全国污染源普查公报 [EB/OL]. (2010-02-11) [2013-08-30]. http://www.stats.gov.cn/tjgb/qttjgb/qgqttjgb/t20100211_402621161.htm.
Ministry of environmental protection of PRC, National Bureau of Statistics of China, Ministry of Agriculture of PRC. The bulletin of the first nationwide pollution sources census [EB/

- OL]. (2010-02-11)[2013-08-30]. http://www.stats.gov.cn/tjgb/qttjgb/qgqttjgb/t20100211_402621161.htm. (in Chinese)
- [3] Garaua G, Castaldi P, Santona L, et al. Influence of red mud, zeolite and lime on heavy metal immobilization, culturable heterotrophic microbial populations and enzyme activities in a contaminated soil [J]. *Geoderma*, 2007, 142(1/2): 47-57.
- [4] Zouboulis A I, Kydros K A. Use of red mud for toxic metals removal: The case of nickel [J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 1993, 58(1): 95-101.
- [5] 何伯泉, 周国华, 薛玉兰. 赤泥在环境保护中的应用 [J]. *轻金属*, 2001(2): 24-27.
He B Q, Zhou G H, Xue Y L. Application of red mud in environmental protection [J]. *Light Metals*, 2001(2): 24-27. (in Chinese)
- [6] 姚万军, 方 冰. 拜耳法赤泥综合利用研究现状 [J]. *无机盐工业*, 2010, 42(12): 9-11.
Yao W J, Fang B. Present research status of comprehensive utilization of red mud from Bayer process [J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 2010, 42(12): 9-11. (in Chinese)
- [7] 余启名, 周美华, 李茂康, 等. 赤泥的综合利用及其环保功能 [J]. *江西化工*, 2007(4): 125-127.
Yu Q M, Zhou M H, Li M K, et al. Comprehensive utilization of red mud and its application in environmental protection [J]. *Jiangxi Chemical Industry*, 2007(4): 125-127. (in Chinese)
- [8] 石 磊. 赤泥的综合利用及其环保功能 [J]. *中国资源综合利用*, 2007, 25(9): 14-16.
Shi L. Comprehensive utilization of red mud and its application in environmental protection [J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2007, 25(9): 14-16. (in Chinese)
- [9] 姜怡娇, 宁 平. 氧化铝厂赤泥的综合利用现状 [J]. *环境科学与技术*, 2003, 26(1): 40-43.
Jiang Y J, Ning P. An overview of comprehensive utilization of red mud from aluminum production [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, 26(1): 40-43. (in Chinese)
- [10] 田红献. 赤泥堆场环境影响评价模式与管理 [D]. 长沙: 中南大学, 2005.
Tian H X. Environment impact assessment models and management of red mud dams [D]. Changsha: Central South University, 2005. (in Chinese)
- [11] 南相莉, 张延安, 刘 燕, 等. 我国主要赤泥种类及其对环境的影响 [J]. *过程工程学报*, 2009, 9(1): 359-364.
Nan X L, Zhang T A, Liu Y, et al. Main categories of red mud and its environmental impacts [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2009, 9(1): 359-364. (in Chinese)
- [12] Bertocchi A F, Ghiani M, Peretti R, et al. Red mud and fly ash for remediation of mine sites contaminated with As, Cd, Cu, Pb and Zn [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 134(1/2/3): 112-119.
- [13] 叶文虎, 栾胜基. 环境质量评价学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1994: 671-690.
Ye W H, Luan S J. Environmental quality assessment [M]. Beijing: Higher Education Press, 1994: 671-690. (in Chinese)
- [14] 窦 磊, 周永章, 王旭日, 等. 针对土壤重金属污染评价的模糊数学模型的改进及应用 [J]. *土壤通报*, 2007, 38(1): 101-104.
Dou L, Zhou Y Z, Wang X R, et al. Improvement and application of a fuzzy mathematical model for assessment of heavy metal pollution in soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(1): 101-104. (in Chinese)
- [15] 宁晓波, 项文化, 方 晰, 等. 贵阳花溪区石灰土林地土壤重金属含量特征及其污染评价 [J]. *生态学报*, 2009, 29(4): 2169-2177.
Ning X B, Xiang W H, Fang X, et al. Heavy metal concentrations and pollution assessment of limestone forests in Huaxi district, Guiyang City [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(4): 2169-2177. (in Chinese)
- [16] 李 玲, 吴克宁, 张 雷, 等. 郑州市郊区土壤重金属污染评价分析 [J]. *土壤通报*, 2008, 39(5): 1164-1168.
Li L, Wu K N, Zhang L, et al. Soil heavy metals pollution assessment in the suburb of Zhengzhou City [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(5): 1164-1168. (in Chinese)
- [17] 翁添富, 汪 珊, 张 侃, 等. 孝感市孝南区土壤重金属污染的初步研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(S1): 39-42.
Weng T F, Wang S, Zhang K, et al. Pollution of several heavy metals in soils of Xiaonan District of Xiaogan City [J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2007, 26(S1): 39-42. (in Chinese)
- [18] 周广柱, 杨锋杰, 程建光, 等. 土壤环境质量综合评价方法探讨 [J]. *山东科技大学学报: 自然科学版*, 2005, 24(4): 113-118.
Zhou G Z, Yang F J, Chen J G, et al. Research on synthetic assessment method for soil environmental quality [J]. *Journal of Shangdong University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2005, 24(4): 113-118. (in Chinese)
- [19] 邱海源. 土壤重金属潜在生态危害评价及其同源相关性研究 [J]. *资源节约与环保*, 2011(1): 68-70.
Qiu H Y. Potential ecological risk assessment of soil heavy metal and its homologous correlation studies [J]. *Resources Economization & Environment Protection*, 2011(1): 68-70. (in Chinese)
- [20] 张 亮, 曹丛华, 任荣珠, 等. 岚山港海洋临时倾倒地表层沉积物重金属污染、潜在生态风险评价及变化趋势分析 [J]. *海洋通报*, 2011, 30(2): 234-239.
Zhang L, Cao C H, Ren R Z, et al. Evaluation on heavy metals contamination, potential ecological risk evaluation and analysis of the variation trends in the surface sediments of Lanshan Port Temporary Ocean Dumping Site [J]. *Marine Science Bulletin*, 2011, 30(2): 234-239. (in Chinese)
- [21] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 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.
Xu Z Q, Ni S J, Tuo X G, et al. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 31(2): 112-115. (in Chinese)
- [22] 国家环境保护局, 国家技术监督局. GB 15618—1995 土壤环境质量标准 [S]. [出版地不详]: [出版者不详], 1995.

Ministry of Environmental Protection of PRC, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of PRC. GB 15618—1995 Environmental quality standard for soils in China [S]. [S. l.]:[s. n.],1995. (in Chinese)

[23] 国家环境保护局,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,1990:329-493.

Ministry of Environmental Protection of PRC, China National Environmental Monitoring Centre. China's soil element background values [M]. Beijing: China Environmental Science Press,1990:329-493. (in Chinese)

(上接第 121 页)

[12] 王旭静,李为民,唐巧玲,等. 中棉(*Gossypium arboreum*)光诱导基因 *Gacab* 启动子在转基因烟草中的功能缺失分析 [J]. 作物学报,2009,35(6):1006-1012.

Wang X J, Li W M, Tang Q L, et al. Function deletion analysis of light-induced *Gacab* promoter from *G. arboreum* in transgenic tobacco [J]. Acta Agronomica Sinica, 2009, 35(6):1006-1012. (in Chinese)

[13] 蔡金森,王 博,杨 晟,等. *CaDREB3* 启动子分离及其缺失体转基因烟草的获得 [J]. 热带作物学报,2014,35(7):1368-1373.

Cai J S, Wang B, Yang S, et al. Isolation of *CaDREB3* promoter and acquisition of transgenic tobacco plants for its 5' deletion mutation analysis [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2014, 35(7):1368-1373. (in Chinese)

[14] 孙靖然,王丕武,马 建. 拟南芥 *CBF4* 基因启动子缺失载体的构建及转化 [J]. 吉林农业大学学报,2013,35(5):552-557.

Sun J R, Wang P W, Ma J. Subcloning and transformation of the deletion vectors of *CBF4* promoter from *Arabidopsis thaliana* [J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2013, 35(5):552-557. (in Chinese)

[15] 韩 琳. 大豆 *rbcS* 基因启动子的遗传转化及功能分析 [D]. 长春:吉林农业大学,2013.

Han L. Genetic transformation and functional analysis of *rbcS* promoter of soybean [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2013. (in Chinese)

[16] Zhu Q, Dabi T, Lamb C. TATA box and initiator functions in the accurate transcription of a plant minimal promoter *in vitro* [J]. Plant Cell, 1995, 7(10):1681-1689.

[17] Green P J, Kay S A, Chua N H. Sequence-specific interactions of a pea nuclear factor with light-responsive elements upstream of the *rbcS-3A* gene [J]. EMBO J, 1987, 6:2543-2549.

[18] Zhou D X. Regulatory mechanism of plant gene transcription by GT-elements and GT-factors [J]. Plant Science, 1999, 4(6):211-213.

[19] Donald R G K, Cashmore A R. Mutation of either G box or I box sequences profoundly affects expression from the *Arabidopsis rbcS-1A* promoter [J]. EMBO J, 1990, 6:1717-1726.

[20] 贺超英,王伟权,东方阳,等. 大豆 1,5-二磷酸核酮糖羧化酶小亚基基因的转录表达分析 [J]. 科学通报,2001,46(16):1375-1380.

He C Y, Wang W Q, Dongfang Y, et al. Transcriptional analysis of small subunit gene of Rubisco expression from *Glycine max* [J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(16):1375-1380. (in Chinese)

[21] 申秋硕,陈 凤,叶 青,等. 三个逆境相关的水稻启动子的克隆与瞬时表达分析 [J]. 中国生物工程杂志,2012,32(11):29-34.

Shen Q S, Chen F, Ye Q, et al. Cloning and transient expression of the three stress-related rice promoters [J]. China Biotechnology, 2012, 32(11):29-34. (in Chinese)