

# 内蒙古包头铁矿区土壤重金属污染特征及其评价

郭伟<sup>1,2</sup>, 赵仁鑫<sup>2</sup>, 张君<sup>3</sup>, 包玉英<sup>1\*</sup>, 王宏<sup>4</sup>, 杨明<sup>2</sup>, 孙小丽<sup>2</sup>, 金帆<sup>2</sup>

(1. 内蒙古大学生命科学学院, 呼和浩特 010021; 2. 内蒙古大学环境与资源学院, 呼和浩特 010021; 3. 内蒙古大学化学化工学院, 呼和浩特 010021; 4. 包头市环境保护局, 包头 014030)

**摘要:** 对位于内蒙古草原生态系统的包头尾矿库区和白云鄂博铁矿开采区土壤中重金属的污染状况进行了调查研究, 旨在为治理草原矿区的土壤重金属污染提供理论依据. 结果表明, 包头尾矿库区周围不同方向的土壤都受到了重金属 Pb、Cu、Zn 和 Mn 的污染, 单项污染指数法评价表明各重金属污染程度为  $Mn > Zn > Pb > Cu$ ; 内梅罗综合污染指数法评价表明, 尾矿区东北、东南、西南、西北方向土壤重金属综合污染指数分别为 2.43、10.2、1.88、1.64, 主要受包头尾矿区常年主导风向西北风的影响, 处于下风向的东南方位污染最为严重; 除 Cu 外, 尾矿库区各方位土壤重金属污染最严重为距尾矿库边缘 50 m 范围以内的区域. 对于白云鄂博采矿区, 单项污染指数评价表明, 调查的 6 个区域内土壤也都受到了重金属 Pb、Cu、Zn 和 Mn 不同程度的污染; 内梅罗综合污染指数评价表明, 采矿区、排土场、场区外、城区外、铁路东侧和铁路西侧区域的土壤重金属综合污染指数分别为 14.3、4.30、2.69、3.41、2.88、2.20, 污染程度最严重的是采矿区内的土壤, 另外铁路运输矿石也已经造成了沿线土壤的重金属污染. 包头尾矿库区和白云鄂博采矿区的土壤具有相似的重金属污染特征, 与尾矿砂中同种重金属浓度相对应, 已经对当地草原生态系统的健康稳定构成了威胁.

**关键词:** 包头尾矿库区; 白云鄂博采矿区; 土壤; 重金属污染; 评价

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)10-3099-07

## Distribution Characteristic and Assessment of Soil Heavy Metal Pollution in the Iron Mining of Baotou in Inner Mongolia

GUO Wei<sup>1,2</sup>, ZHAO Ren-xin<sup>2</sup>, ZHANG Jun<sup>3</sup>, BAO Yu-ying<sup>1</sup>, WANG Hong<sup>4</sup>, YANG Ming<sup>2</sup>, SUN Xiao-li<sup>2</sup>, JIN Fan<sup>2</sup>

(1. College of Life Science of Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China; 2. College of Environment and Resources of Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China; 3. College of Chemistry and Chemical Engineering of Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China; 4. Baotou Environmental Protection Bureau, Baotou 014030, China)

**Abstract:** The pollution status and total concentration of soil heavy metals were analyzed around tailing reservoir of Baotou and iron mining of Bayan Obo located in Inner Mongolia grassland ecosystem. Aim of the study is to control soil heavy metal pollution of grassland mining area and provide the basic information. The results indicated that the soils from different directions of the tailing reservoir were contaminated by Pb, Cu, Zn and Mn. According to the single factor pollution index, the pollution degree was  $Mn > Zn > Pb > Cu$ . According to Nemerow integrated pollution index, the indexes of the northeast, southeast, southwest, and northwest of the tailing reservoir, were 2.43, 10.2, 1.88, 1.64. Soils from the southeast had the most serious heavy metal contamination because of the dominant wind of northwest. Within 50 m from the edge of tailing reservoir, heavy metal contamination was most serious except Cu. With regard to Bayan Obo iron mining, the single factor pollution index indicated that the soils from the six surveyed regions were contaminated by Pb, Cu, Zn and Mn. The integrated pollution index indicated that the indexes of the six regions, such as the mining area, the dump, outside the dump, outside the urban area, east region of the railway, and west region of the railway, were 14.3, 4.30, 2.69, 3.41, 2.88, and 2.20, respectively. The soil pollution degree of the mining area was the highest. Additionally, the transport of ore resulted in soil heavy metal pollution along railway. In general, soils of the two studied areas had the similar pollution characteristic, and the elements of heavy metal contamination were corresponding with the concentrations of tailings. The health and stabilization of grassland ecosystem are being threatened by soil heavy metals.

**Key words:** tailing of Baotou; Bayan Obo iron mining; soil; heavy metal pollution; assessment

随着社会经济的发展, 人类对矿产资源的开发速度日趋加快, 而矿产开发也导致了一系列严重的生态与环境问题, 例如采矿地区地质地貌的破坏, 矿区及其周边地区水体水质的恶化, 矿区土壤的重金属污染, 矿区植被的破坏以及物种多样性的丧失, 水土流失与土地沙漠化等问题都日益严重<sup>[1,2]</sup>. 尤其是土壤重金属污染问题, 已引起了国内外越来越多

学者的关注<sup>[3-9]</sup>. 目前, 国内外有关矿区土壤重金属

收稿日期: 2010-11-03; 修订日期: 2011-04-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(40861018); 内蒙古自然科学基金项目(20080404MS0611); 中国博士后科学基金面上项目(20100471489); 国家大学生创新性实验计划项目(20091012607)

作者简介: 郭伟(1976~), 女, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为土壤污染的控制与治理技术, E-mail: guowei-1976-z@hotmail.com

\* 通讯联系人, E-mail: ndbyy@imu.edu.cn

的研究重点多集中在土壤重金属污染评价、污染特征、污染机制、重金属污染的生态修复和生物效应等,涉及到了矿区周围的农田、城市、水域等生态系统<sup>[10~16]</sup>.然而,国内外针对矿区土壤重金属污染对草原生态系统影响的研究则鲜有报道.内蒙古矿产资源极其丰富,种类繁多;矿产资源储量潜在价值达13万亿元,占全国的10%以上,居第3位<sup>[17]</sup>.与其它地区的矿业开采活动相比,由于内蒙古的矿业开采活动处于抗干扰能力较弱的草原生态系统中,其导致的生态破坏与环境污染问题也更加严重,具有其特殊性.位于草原上的金属矿山的开采,矿石的加工、运输、储存,尾矿的堆积等所造成的土壤重金属污染问题会对当地草场、牧民、牲畜等造成很大影响<sup>[18, 19]</sup>,进而对草原生态系统造成不容忽视的危害,所以对草原矿区及其周围土壤重金属污染状况、特征进行调查和评价显得尤为重要.

本研究对位于内蒙古草原生态系统的包头尾矿库区和白云鄂博铁矿开采区以及周边地区土壤重金属污染特征进行调查分析,运用单因子指数法和内梅罗综合污染指数法对土壤重金属污染进行评价,旨在为草原生态系统土壤重金属污染治理和矿区的生态恢复重建提供科学的理论依据,从而减少矿产资源开发和利用过程中重金属对人类健康和当地草原生态系统造成的危害.

1 研究区概况

由于所调查的包头白云鄂博铁矿采矿区与包头选矿、冶炼及尾矿堆存区处于不同地点,两者相距175 km,所以土壤重金属污染调查针对于包头铁矿

分为两部分,一是包头尾矿库区,二是位于白云鄂博的铁矿采矿区.包头尾矿坝位于包头市区西12 km之外,九原区和昆都仑区交界处.1965年正式投产使用,是平地筑坝围成,其东西宽约3.2 km,南北长约3.5 km,坝体周长11.5 km,占地面积约12 km<sup>2</sup>,有效库容0.688 3亿m<sup>3</sup>.周围临近地区包括打拉亥上下村、新光村一、三、八村等5个村庄和九原工业区.白云鄂博矿区属内蒙古自治区包头市所辖,矿区南距包头市区149 km,区域面积328 km<sup>2</sup>.白云鄂博铁矿于1957年建矿,是一座大型的铁、铌、稀土等多种金属共生矿床,矿物种类繁多,已发现有110余种.主要铁矿物有磁铁矿、赤铁矿、假象赤铁矿、褐铁矿等,矿物组成中含有方铅矿、闪锌矿、锰铌铁矿、钽铁锰矿、黄铜矿等.该矿是包头钢铁公司的主要原料基地,开采方式为露天开采,矿区居住总人口约3万人.包钢从白云鄂博铁矿采矿,经铁路运至包头选矿厂,经选矿工艺后将剩余矿浆全部输入包头尾矿坝.两区域均属内陆干燥气候区,低温少雨,干旱多风,温差变化大,常年主导风向为西北风,土壤类型均以栗钙土为主.

矿区周围土壤重金属的污染,主要是由于铁矿石的开采加工以及铁尾矿砂的堆积导致的.经测定包头尾矿坝铁尾矿砂中Pb、Cu、Cr、Zn、Ni、Mn和As这7种重金属的含量,如表1所示.根据铁矿物中所含矿石类型,尾矿砂中重金属的组成和含量差异以及内蒙古地区土壤中不同元素的背景值含量,选择重金属Pb、Cu、Zn和Mn作为研究的目标元素,以探讨它们对尾矿库区和采矿区周围土壤造成的影响.

表1 铁尾矿砂中重金属含量/mg·kg<sup>-1</sup>  
Table 1 Heavy metal concentrations in the iron tailing/mg·kg<sup>-1</sup>

| 重金属元素 | Pb    | Cu    | Cr    | Zn    | Ni    | Mn     | As    |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| 含量    | 172.1 | 38.45 | 16.42 | 1 076 | 7.411 | 13 388 | 3.150 |

2 材料与方法

2.1 土壤样品的采集

包头尾矿库区常年主导风向为西北风,以此为依据共设计了4个采样方位,如图1所示,分别为垂直于主导风向的东北方位(S1)和西南方位(S3),下风向的东南方位(S2)以及上风向的西北方位(S4).以尾矿坝底边缘为起始点,由近及远分别采集50、100、300和500 m范围内的土壤样品各6个,每个

方位采样24个,以期研究该地区主导风向对尾矿库周边地区所造成的土壤重金属污染的影响.根据白云鄂博铁矿区的实际布局情况结合主导风向西北风,有针对性的把调查采样区划分为6个区域,如图1中S5~S10(S5矿区内,S6排土场,S7场区外,S8城区外,S9铁路东,S10铁路西),采样样本数分别为19、13、9、13、8和8;负责运输铁矿石至包头选矿厂的铁路两侧区域沿垂直铁路方向采集50 m范围内的土壤样品<sup>[20, 21]</sup>.对所选定的10个区域从

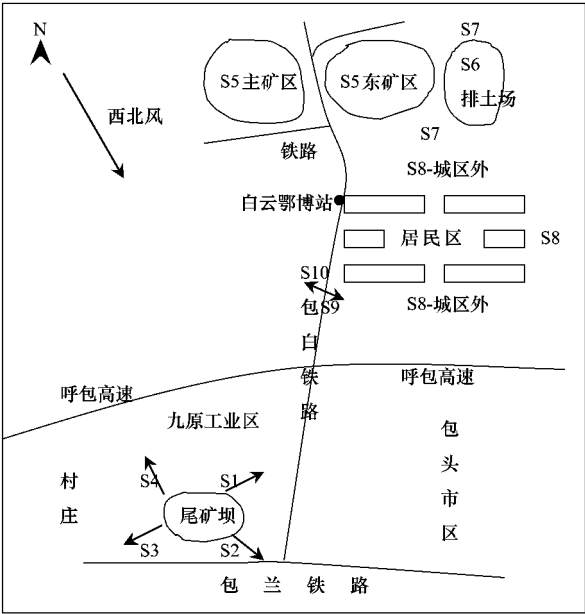


图 1 包头铁矿区土壤样品采集区域示意

Fig.1 Collecting areas of soil samples in Baotou iron mining area

2009 年 5 ~ 9 月进行了采样,具体采样方法是每个采样点采用多点取样混合一个代表样的方法,采样

表 2 土壤的基本理化性质

| Table 2 Physical and chemical properties of the soil in mining area |             |             |             |             |                          |                          |                            |
|---------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|
| 研究区域                                                                | pH          | 有机质/%       | 全 N/%       | 全 P/%       | 速效 P/mg·kg <sup>-1</sup> | 速效 K/mg·kg <sup>-1</sup> | CEC/cmole·kg <sup>-1</sup> |
| 包头尾矿库区                                                              | 7.38 ± 0.58 | 1.59 ± 0.77 | 0.10 ± 0.04 | 0.11 ± 0.08 | 11.0 ± 8.22              | 86.5 ± 37.4              | 13.7 ± 2.85                |
| 白云鄂博矿区                                                              | 7.23 ± 0.95 | 1.52 ± 0.83 | 0.12 ± 0.05 | 0.13 ± 0.06 | 8.36 ± 4.50              | 92.4 ± 33.7              | 15.1 ± 3.06                |

2.3 土壤重金属污染评价方法

根据不同采样点位和不同区段的整体调查,对研究区域土壤重金属污染状况分别采用单因子指数法和内梅罗综合污染指数法进行综合评价.

2.3.1 单因子指数法

单因子指数法是国内外普遍采用的方法之一,是对土壤中的某一污染物的污染程度进行评价<sup>[24]</sup>.其计算公式为:

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

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 (mg·kg<sup>-1</sup>);  $S_i$  为污染物  $i$  的评价标准 (mg·kg<sup>-1</sup>), 选用内蒙古土壤中重金属元素的

深度为 0 ~ 20 cm, 每个混合样采集 1 ~ 2 kg. 研究区土壤的基本理化性质见表 2.

2.2 土壤样品前处理与分析

土壤样品采集后去除沙砾、植物根系等异物, 避光自然风干, 对每一份样品采用四分法取样进行磨碎处理, 过 100 目 (0.149 mm) 土壤筛, 保存待消煮测定<sup>[22]</sup>. 土壤样品的分析采用王水-高氯酸 (HNO<sub>3</sub>-HCl-HClO<sub>4</sub>) 开放式消煮法<sup>[23]</sup>, 称取土壤 1 g 左右, 加王水 5 mL, 120℃ 消煮 24 h 左右, 至消煮液为 1 mL 左右, 冷却至室温后加高氯酸 3 mL, 140℃ 继续消煮 72 h, 直至土壤消煮至灰白色, 消煮液透明澄清为止. 消煮过程结束后, 消煮液用超纯水稀释至 50 mL, 然后过滤到经酸泡过的干净 PE 塑料瓶中. 空白和标准样品 (GBW08303, 国家标准物质研究中心) 同时消煮, 以确保消煮及以后测定的准确度和用于回收率的计算. 采用 ICP-OES (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer, Optima 2000 DV, Perkin Elmer, USA) 测定土壤样品消煮液中的重金属 Pb、Cu、Zn、Mn 含量.

几何平均值.

2.3.2 内梅罗综合污染指数法

内梅罗综合污染指数法可全面反映土壤中各污染物的平均污染水平, 也突出了污染最严重的污染物给环境造成的危害<sup>[24]</sup>. 其计算公式为:

$$P_N = \{ [(c_i / S_i)_{\max}^2 + (c_i / S_i)_{\text{ave}}^2] / 2 \}^{1/2} \tag{2}$$

式中,  $P_N$  为综合污染指数;  $(c_i / S_i)_{\max}$  为各污染物中污染指数最大值;  $(c_i / S_i)_{\text{ave}}$  为各污染物中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可将土壤重金属污染划分为 5 个等级, 如表 3 所示.

表 3 土壤重金属污染分级标准

| Table 3 Criteria for classification of soil heavy metal pollution |                      |                      |      |            |
|-------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|------|------------|
| 等级划分                                                              | 单项污染指数               | 综合污染指数               | 污染等级 | 污染水平       |
| 1                                                                 | $P_i \leq 0.7$       | $P_N \leq 0.7$       | 安全   | 清洁         |
| 2                                                                 | $0.7 < P_i \leq 1.0$ | $0.7 < P_N \leq 1.0$ | 警戒限  | 尚清洁        |
| 3                                                                 | $1.0 < P_i \leq 2.0$ | $1.0 < P_N \leq 2.0$ | 轻污染  | 土壤开始受到污染   |
| 4                                                                 | $2.0 < P_i \leq 3.0$ | $2.0 < P_N \leq 3.0$ | 中污染  | 土壤受中度污染    |
| 5                                                                 | $P_i > 3.0$          | $P_N > 3.0$          | 重污染  | 土壤受污染已相当严重 |

3 结果与讨论

3.1 土壤重金属含量测定结果

3.1.1 包头尾矿库区周围土壤重金属含量

包头尾矿库区不同方向土壤重金属含量见图 2. 从中可知,随着采样点距尾矿坝边缘距离的增加,东北、东南和西南方向土壤中 Pb、Zn、Mn 这 3 种重金属在 50 m 范围内含量值最大,之后随距离的增

加 3 种重金属的含量逐渐降低,其中在尾矿坝东南方向含量变化趋势最为明显;Pb、Zn、Mn 这 3 种重金属的含量在尾矿坝西北方向不同采样距离均没有显著变化;尾矿库区 4 个研究方向土壤中 Cu 的含量随距离变化均不显著,可能是铁尾矿砂中 Cu 的含量较低的原因.在距离尾矿坝边缘相等的采样区间内尾矿库区东南方向土壤重金属平均含量值最大,其次为东北 > 西南 > 西北.

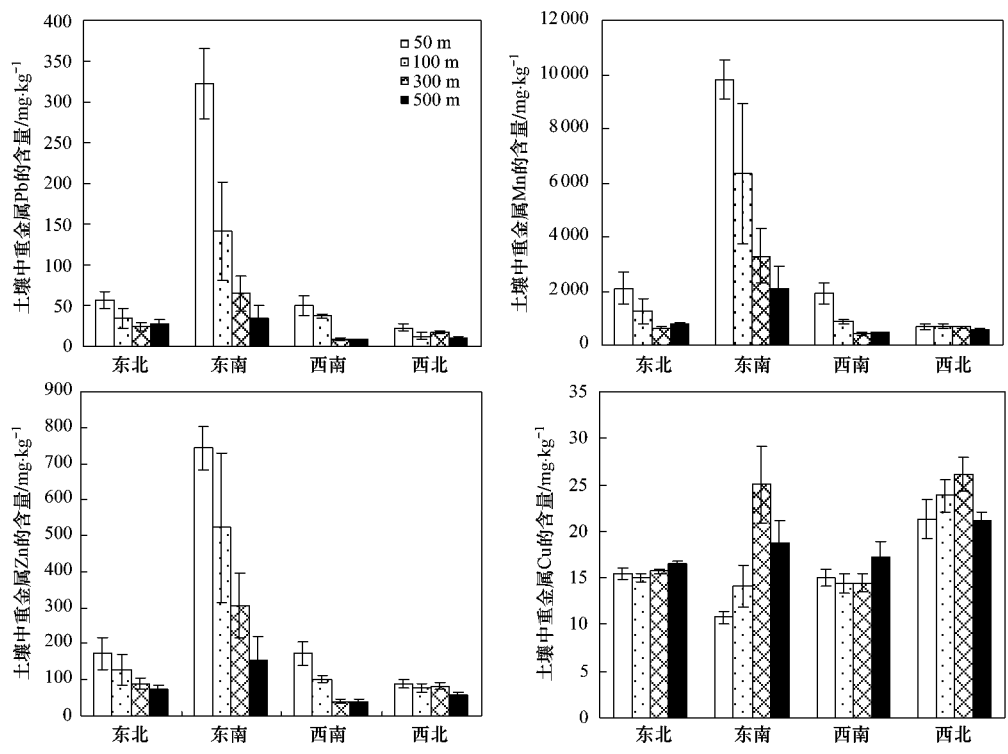


图 2 包头尾矿库区不同方向土壤重金属含量  
Fig. 2 Heavy metal concentrations in the soils from different directions of Baotou tailing area

3.1.2 白云鄂博铁矿区土壤重金属含量

白云鄂博铁矿区及周围地区土壤中重金属含量见表 4. 在白云鄂博铁矿调查研究的 6 个区域土壤中,重金属 Pb、Cu、Zn 和 Mn 的平均含量值差异均较显著,且都高于各自的内蒙古土壤的几何平均值. 其中,矿区内土壤中 4 种重金属平均含量值最大,其次为排土场 > 城区外围 > 铁路东侧 > 场区外围 > 铁路西侧,这说明在矿山的长期开采过程中已经引起矿区内及周边土壤中重金属元素的积累,造成了土壤的重金属污染问题.

3.2 土壤重金属污染评价

根据包头尾矿库区不同方向和白云鄂博铁矿不同区域土壤中 Pb、Cu、Zn、Mn 这 4 种重金属的平均含量、污染物的评价标准和公式(1)、(2),分别

采用单因子指数法和内梅罗综合污染指数法评价土壤重金属污染情况,得到土壤重金属污染评价指数,如表 5 所示.

对于包头尾矿库区周边不同方向土壤,分析表 5 中各单项污染指数可知,尾矿库区周围土壤都受到了重金属 Pb、Cu、Zn 和 Mn 不同程度的污染,其中东北方向 Pb、Zn 和 Mn 的单项污染指数处于 2.0 ~ 3.0,污染级别均为中度污染;东南方向土壤中 Pb、Zn 和 Mn 的单项污染指数分别为 9.38、8.90 和 12.1,都达到了重污染;西南和西北方向 Pb、Zn 和 Mn 的污染级别为轻污染;尾矿的 4 个方向 Cu 都处在轻度污染水平. 各重金属的平均污染程度为 Mn > Zn > Pb > Cu. 这表明铁尾矿的堆积已经导致了尾矿坝周边土壤中重金属不同程度的积累

表 4 白云鄂博铁矿区土壤重金属含量/mg·kg<sup>-1</sup>

Table 4 Heavy metal concentrations in the soils from the iron mining area of Bayan Obo/mg·kg<sup>-1</sup>

| 采样区                        | 样本数 | Pb            | Cu              | Zn            | Mn            |
|----------------------------|-----|---------------|-----------------|---------------|---------------|
| 矿区内最小值                     | 19  | 32.04         | 22.74           | 233.2         | 1 221         |
| 矿区内最大值                     |     | 346.8         | 122.0           | 2 953         | 8 624         |
| 平均值                        |     | 130.7 ± 22.52 | 50.57 ± 6.296   | 860.4 ± 173.7 | 3 745 ± 552.5 |
| 排土场最小值                     | 13  | 24.65         | 21.56           | 123.7         | 3 034         |
| 排土场最大值                     |     | 92.29         | 98.33           | 380.2         | 788.6         |
| 平均值                        |     | 47.29 ± 5.456 | 41.64 ± 5.713   | 232.7 ± 23.40 | 1 715 ± 206.2 |
| 场区外最小值                     | 9   | 12.76         | 10.03           | 87.09         | 665.2         |
| 场区外最大值                     |     | 60.47         | 36.67           | 195.8         | 2 321         |
| 平均值                        |     | 33.38 ± 5.127 | 21.46 ± 2.524   | 143.7 ± 12.33 | 1 216 ± 168.0 |
| 城区外最小值                     | 13  | 13.56         | 17.28           | 77.07         | 643.5         |
| 城区外最大值                     |     | 138.9         | 57.49           | 373.0         | 2 999         |
| 平均值                        |     | 45.90 ± 11.23 | 26.10 ± 2.783   | 184.6 ± 27.74 | 1 333 ± 232.4 |
| 铁路东侧最小值                    | 8   | 23.98         | 19.72           | 94.83         | 774.8         |
| 铁路东侧最大值                    |     | 65.93         | 23.61           | 201.8         | 1 755         |
| 平均值                        |     | 39.37 ± 4.664 | 22.31 ± 0.460 5 | 151.4 ± 12.81 | 1 289 ± 114.9 |
| 铁路西侧最小值                    | 8   | 17.66         | 19.20           | 86.42         | 664.0         |
| 铁路西侧最大值                    |     | 44.82         | 24.79           | 160.0         | 127 5         |
| 平均值                        |     | 28.73 ± 3.915 | 22.16 ± 0.637 0 | 115.3 ± 10.06 | 918.3 ± 74.97 |
| 内蒙古土壤几何平均值 <sup>[25]</sup> |     | 15.0          | 12.9            | 48.6          | 446           |

表 5 包头尾矿库区和白云鄂博铁矿区土壤重金属污染评价指数

Table 5 Pollution appraisal indexes of soil heavy metal in the two studied areas

| 采样区域    | 单项污染指数( $P_i$ ) |      |      |      | 综合污染指数<br>( $P_N$ ) |
|---------|-----------------|------|------|------|---------------------|
|         | Pb              | Cu   | Zn   | Mn   |                     |
| 包头尾矿库区  |                 |      |      |      |                     |
| 尾矿东北方向  | 2.40            | 1.22 | 2.40 | 2.66 | 2.43                |
| 尾矿东南方向  | 9.38            | 1.33 | 8.90 | 12.1 | 10.2                |
| 尾矿西南方向  | 1.74            | 1.19 | 1.83 | 2.05 | 1.88                |
| 尾矿西北方向  | 1.10            | 1.79 | 1.58 | 1.45 | 1.64                |
| 白云鄂博采矿区 |                 |      |      |      |                     |
| 矿区内     | 8.71            | 3.92 | 17.7 | 8.40 | 14.3                |
| 排土场     | 3.15            | 3.23 | 4.79 | 3.85 | 4.30                |
| 场区外     | 2.23            | 1.66 | 2.96 | 2.73 | 2.69                |
| 城区外     | 3.06            | 2.02 | 3.80 | 2.99 | 3.41                |
| 铁路东侧    | 2.62            | 1.73 | 3.12 | 2.89 | 2.88                |
| 铁路西侧    | 1.92            | 1.72 | 2.37 | 2.06 | 2.20                |

富集,造成了土壤的污染,严重影响了周边的生态环境.杜立宇等<sup>[26]</sup>对辽宁抚顺红透山铜尾矿区土壤重金属污染状况进行研究,也获得了同样的结果,认为尾矿中 Pb、Cu、Zn 等均出现不同程度的富集现象,对周围土壤有较大的环境威胁.从内梅罗综合污染指数可以看出,尾矿东南方向土壤重金属污染最为严重,综合污染指数为 10.2,已经到达了重度污染水平;其次是东北方向,污染水平为中度污染;污染水平最轻的是西南和西北方向,但这 2 个方向土壤中的重金属也达到了轻度污染水平(见表 5).结合包头尾矿库区常年主导风向为西北风以及该地区地势平坦开阔的实际情况分析,尾矿周围地区 4 个方

位的土壤重金属污染水平最严重的正是处于下风向的东南方向,污染最轻的为上风向的西北方向,与王哲等<sup>[27]</sup>的研究结果一致,其研究表明包头尾矿坝土壤受污染程度为尾矿坝南面>西面>中心>东面>北面.这是由于尾矿库采用尾矿粉筑坝,矿粉暴露面积大,坝体外坡又基本未采取抑尘措施,致使粉尘随风飘散,沉降于周边土壤所造成的.通过以上结论与分析,包头尾矿库区的土壤环境治理与污染防治工作的重点为在尾矿库坝体外坡采取抑尘措施,可以防止尾矿粉的扩散,抑制尾矿库区周边土壤重金属污染程度进一步加重.坝体外坡的抑尘防护可以采取工程措施,但成本较高;也可以在坝体外坡种植适

宜的本地草本植物,一方面可以加固坝体,另一方面又可起到固定尾矿粉的作用. 相关的研究正在进行,包括筛选适宜的本地草本植物品种,同时采取生物工程措施接种丛枝菌根真菌加强草本植物对于尾矿砂基质毒害的抗性,已经取得初步的研究结果.

对于白云鄂博铁矿区,依据表 5 中单项污染指数可知,调查采样的 6 个区域内土壤也都受到了重金属 Pb、Cu、Zn 和 Mn 不同程度的污染,尤其是采矿区内和排土场的土壤中 4 种重金属的单项污染指数都大于 3.0,其中矿区内 Zn 的单项污染指数为 17.7,均达到了重度污染水平. 这是因为在矿区内矿石的开采,将地下一定深度的矿物暴露于地表环境,致使矿物的化学形态和存在形式发生改变,加大了重金属向环境释放通量,造成了区域内土壤的污染. 在其他的 4 个研究区域中,Pb、Cu、Zn 和 Mn 的单项污染指数均超过了 1.0,土壤受到了重金属的轻度污染、中度污染或是重污染,也应引起足够的重视. 从各元素的单项污染指数可以看出白云鄂博矿区的污染状况与包头尾矿库区周围土壤重金属污染情况基本一致,而且造成这 2 个研究区土壤重金属污染的元素种类与铁尾矿砂中同种重金属含量也相对应(见表 1). 从综合污染指数分析可知,白云鄂博所调查的 6 个区域内土壤重金属污染水平都比较高,矿区内、排土场和城区外土壤重金属综合污染指数分别为 14.3、4.30、3.41,都已达到了重度污染水平. 城区外围的土壤之所以也受到了重度污染,一方面是因为其本身正处在铁矿开采区的下风向,另一方面可能是由于运输铁矿石的铁路从城区外围通过. 另外,场区外、铁路东西两侧区域土壤重金属综合污染指数分别为 2.69、2.88、2.20,为中度污染水平(见表 5). 结合这些研究区域的土壤重金属含量和污染指数可知,造成土壤污染的主要贡献元素是 Pb、Cu、Zn 和 Mn,这是因为白云鄂博铁矿是一个大型的综合性多金属共生矿床,其不同矿体的主要矿物组成中含有方铅矿、闪锌矿、锰铈铁矿、钡铁锰矿、黄铜矿等,故容易造成这些区域土壤中 Pb、Cu、Zn 和 Mn 等重金属的污染. 这些污染特点也表明铁矿的开采、加工、堆积等过程所造成的不同区域土壤重金属污染程度是不同的,这与廖国礼等<sup>[28]</sup>对某典型有色金属矿山不同片区土壤重金属污染研究结果相似,郑佳佳等<sup>[29]</sup>对广东大宝山矿区土壤进行分区域研究也说明矿区内部污染程度最为严重,储彬彬<sup>[30]</sup>和陈翠华等<sup>[31]</sup>对不同金属矿区所进行的研究也得出了相应的结论. 另外,负责运输矿

石的铁路两侧土壤也受到重金属的污染,是由于长期以来运输过程未采取有效防护措施,矿石洒落经风蚀、淋洗等因素作用造成的重金属污染. 受该地区常年主导风向西北风的影响,污染的特征是处于下风向的铁路东侧区域土壤重金属污染程度要大于处于上风向的铁路西侧区域. 曲蛟等<sup>[32]</sup>对葫芦岛市钼矿区交通运输干线周边菜地土壤所进行的研究表明,菜地土壤重金属污染的主要原因也是矿石运输过程中矿石的遗落等作用造成的,这对运输干线近范围内重金属的污染有较强的作用;王再岚等<sup>[33]</sup>对鄂尔多斯地区公路两侧土壤的研究也表明了运输煤和其他矿石会造成重金属污染. 建议相关部门改善铁矿石的运输方式,对铁矿石运输火车进行改装,并用蓬布等遮盖,矿石运输造成的重金属污染将会得到有效控制.

针对包头铁矿区土壤污染状况和其周围草原生态系统特性,建议当地相关部门加强环境保护宣传力度,使人们重视和认识土壤重金属污染与草原生态系统健康稳定的利害关系;要合理利用矿产资源,重视成矿元素和伴生元素的复合污染,实行清洁生产制度,加强管理,规范开采、选冶和运输方式,最大程度地防止尾矿、废水、矿渣等对当地草原生态环境及居民、牲畜等造成危害;选择合理的生态恢复措施,增加矿区周围的草场面积,来恢复受污染的土壤.

#### 4 结论

(1) 土壤中 4 种重金属的含量和污染指数法评价的结果表明,包头尾矿库区和白云鄂博采矿区土壤都受到了重金属 Pb、Cu、Zn 和 Mn 不同程度的污染,污染最严重的区域分别为尾矿东南方向和采矿区内,说明铁矿的开采和尾矿的堆积等过程造成了土壤中重金属元素的积累,对矿区所处的草原生态系统造成了危害.

(2) 尾矿库区不同方向土壤中重金属的含量分布和污染指数表明,在距尾矿坝边缘 50 m 范围内 Pb、Zn、Mn 重金属的含量值最大,之后随着采样点距离的增加 3 种重金属含量逐渐降低,而 Cu 的变化趋势不显著;土壤重金属污染最严重的区域为处于下风向的东南方位. 包头地区常年的主导风向——西北风是影响尾矿库区周边土壤重金属分布特征的主导因素.

(3) 白云鄂博到包头的铁路运输沿线两侧 50 m 范围内的土壤重金属污染情况表明,铁路运输矿

石已经造成沿线土壤的重金属污染,污染水平为中度污染,同样受主导风向的影响铁路东侧区域土壤重金属污染程度大于铁路西侧区域.

参考文献:

[ 1 ] 石平,王恩德,魏忠义,等. 辽宁矿区尾矿废弃地及土壤重金属污染评价研究[J]. 金属矿山, 2008, **2**: 118-121.

[ 2 ] 范英宏,陆兆华,程建龙,等. 中国煤矿区主要生态环境问题及生态重建技术[J]. 生态学报, 2003, **23**(10): 2144-2152.

[ 3 ] Machender G, Dhakate R, Prasanna L, *et al.* Assessment of heavy metal contamination in soils around Balanagar industrial area, Hyderabad, India [J]. Environment Earth Sciences, 2010, **10**: 325-334.

[ 4 ] Zhuang P, Zou B, Li N Y, *et al.* Heavy metal contamination in soils and food crops around Dabaoshan mine in Guangdong, China: implication for human health [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2009, **31**: 707-715.

[ 5 ] Bhattacharyya P, Tripathy S, Chakrabarti K, *et al.* Fractionation and bioavailability of metals and their impacts on microbial properties in sewage irrigated soil[J]. Chemosphere, 2008, **72**: 543-550.

[ 6 ] Soriano-Disla J M, Speir T W, Gómez I, *et al.* Evaluation of different extraction methods for the assessment of heavy metal bioavailability in various soils [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2010, **213**: 471-483.

[ 7 ] 赵秀峰,王强盛,石宁宁,等. 石化园区周边农田土壤重金属污染分析与评价[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(1): 133-141.

[ 8 ] 许雅玲,欧阳通,陈江奖. 某铜矿区土壤重金属污染状况研究[J]. 环境科学与技术, 2009, **32**(11): 146-151.

[ 9 ] 李静,俞天明,周洁,等. 铅锌矿区及周边土壤铅、锌、镉、铜的污染健康风险评价[J]. 环境科学, 2008, **29**(8): 2327-2330.

[ 10 ] Lei M, Zhang Y, Khan S, *et al.* Pollution, fractionation, and mobility of Pb, Cd, Cu, and Zn in garden and paddy soils from a Pb/Zn mining area [J]. Environmental Monitoring Assessment, 2010, **168**: 215-222.

[ 11 ] 孙宏飞,李永华,姬艳芳,等. 湘西汞矿区土壤中重金属的空间分布特征及其生态环境意义[J]. 环境科学, 2009, **30**(4): 1159-1165.

[ 12 ] 邓超冰,李丽和,王双飞,等. 典型铅锌矿区水田土壤重金属污染特征[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(11): 2297-2301.

[ 13 ] 付善明,周永章,赵宇鹄,等. 广东大宝山铁多金属矿废水对河流沿岸土壤的重金属污染[J]. 环境科学, 2007, **28**(4): 805-812.

[ 14 ] Bermea O M, Alvarez E H, Lozano R, *et al.* Spatial distribution of heavy metals in top soils around the industrial facilities of

Cromatos de Mexico, Tultitlan Mexico [J]. Bulletin of Environment Contamination and Toxicology, 2010, **85**: 520-524.

[ 15 ] Escarré J, Lefèbre C, Raboyeau S, *et al.* Heavy metal concentration survey in soils and plants of the Les Malines mining district (Southern France): implications for soil restoration [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2009, **201**: 485-504.

[ 16 ] 高卫强,丁振华,谢陈笑,等. 某大型金-铜矿对环境的重金属污染及生态影响[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2006, **45**(增刊): 281-285.

[ 17 ] 中央政府门户网站. [http://www.gov.cn/test/2005-08/10/content\\_21510.htm](http://www.gov.cn/test/2005-08/10/content_21510.htm).

[ 18 ] 胡自治. 制止牧区工业无序发展,保护生态屏障——草原[J]. 草原与草坪, 2004, **3**: 6-9.

[ 19 ] 康志文,白红玉. 论制定草原环境保护规范的必要性[J]. 内蒙古环境保护, 2005, **17**(1): 65-66.

[ 20 ] 索有瑞,黄雅丽. 西宁地区公路两侧土壤和植物中铅含量及其评价[J]. 环境科学, 1996, **17**(2): 74-76.

[ 21 ] 秦莹,姜翼来,姜勇,等. 沈哈高速公路两侧土壤重金属污染特征及评价[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(4): 663-667.

[ 22 ] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999. 2-4. 9-10.

[ 23 ] 雷鸣,曾敏,郑袁明,等. 湖南采矿区和冶炼区水稻土重金属污染及其潜在风险评价[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(6): 1212-1220.

[ 24 ] 陈怀满. 环境土壤学[M]. 北京: 科学出版社, 2005. 522-523.

[ 25 ] 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.

[ 26 ] 杜立宇,梁成华,刘桂琴. 红透山铜尾矿重金属分布及其对土壤重金属污染的影响[J]. 土壤通报, 2008, **39**(4): 938-941.

[ 27 ] 王哲,张国盛,王颖. 包钢尾矿坝土壤重金属污染诊断[J]. 安徽农业科学, 2008, **36**(12): 5149-5150, 5168.

[ 28 ] 廖国礼,吴超. 矿山不同片区土壤中 Zn、Pb、Cd、Cu 和 As 的污染特征[J]. 环境科学, 2005, **26**(3): 157-161.

[ 29 ] 郑佳佳,姜晓,张晓军. 广东大宝山矿区周围土壤重金属污染状况评价[J]. 环境科学与技术, 2008, **31**(11): 137-139.

[ 30 ] 储彬彬,罗立强. 南京栖霞山铅锌矿地区土壤重金属污染评价[J]. 岩矿测试, 2010, **29**(1): 5-8, 13.

[ 31 ] 陈翠华,倪师军,何彬彬,等. 江西德兴矿区土壤重金属污染的富集因子分析[J]. 金属矿山, 2005, **12**: 57-60.

[ 32 ] 曲蛟,马振宇,丛俏,等. 钼矿区交通运输干线周边菜地土壤重金属污染分析与评价[J]. 农业环境科学学报, 2008, **27**(1): 178-181.

[ 33 ] 王再岚,何江,刘玉虹,等. 鄂尔多斯地区公路两侧土壤重金属污染特征[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2006, **30**(2): 15-19.