

铜尾矿库土壤修复效应及周边植被恢复模式研究

包扬¹, 苏德², 杨巍¹, 赵艳华¹

(1. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 2. 国家环境保护区域生态过程与
功能评估重点实验室, 北京 100012)

摘要: 基于山西省南部某铜尾矿库出现的土壤贫瘠和金属污染问题, 采用经典样方法共设置 36 个 20 m×20 m 的调查样方, 进行植物多样性和重要值分析, 针对土壤理化性质分别提出不同的修复方法, 运用 ArcGIS 绘制营养元素和污染元素的空间分布, 进行修复效果检验, 并结合 AHP 层次分析法进行生态适宜性评价。结果表明: 研究区内灌草层较乔木层植物更加丰富, 且重要植物以玉米、苜蓿、苘蒿、雏菊为主; 松土、深翻、客土和植物覆盖对于土壤物理性质的改善具有明显效果, 而种植常年生长且落叶多的豆科植物可明显提高矿区土壤的有机质、全氮、全磷等营养物质含量; 种植红三叶对于铜金属污染具有良好的治理效果。研究区范围内采样和排土场宜草、西部区域宜林、南部和东部区域宜耕。本研究为今后因地制宜生态恢复提供科学依据, 并为其类似矿区提供参考价值。

关键词: 铜尾矿库; 土壤修复; 植被恢复; 空间分布; AHP 层析分析法

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2022.01.010

中图分类号: TD989 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2022) 01-0074-08

矿产资源开采为社会带来巨大经济效益的同时, 也严重破坏了当地的生态环境, 造成一系列土壤、地下水污染, 植被群落退化, 农牧业破坏等问题^[1]。植被修复作为矿区土壤污染治理和生态恢复最经济的方法^[2], 要求在对矿区植物多样性和群落特征进行调查分析的基础上, 筛选相应的富集、耐受植物^[3], 据此针对土壤的理化性质采取不同的生态修复方法, 运用 ArcGIS 绘制营养元素和污染元素的空间分布状况^[4], 进行修复效果检验, 并结合 AHP 层析分析法构建适用于该矿区的评价指标体系, 最终为矿区的生态恢复提供参考。

1 研究区概况

山西省南部某铜尾矿库位于中条山矿带, 其矿产资源极其丰富, 约储存铜金属 330 万 t, 主要包括黄铜矿、斑铜矿、蓝铜矿^[5]。该尾矿库有效库容 8500 万 m³, 占地面积约 68 万 m², 尾矿库及周边土地划分为撂荒地湿地、撂荒地、撂荒地工业

用地, 农田废弃地和绿地, 由于往年开采形成以重金属 Cu 为主要毒害的原生裸地, 其土壤中包含大量硫化物及有毒物质, 不但严重破坏周围生态环境, 甚至通过空气和食物传播威胁到当地居民生命安全^[6]。

目前该尾矿库下游约存在生活居民 300 户, 且存在农田、铁路及公路设施。该区域属于暖温带半湿润大陆性季风气候, 夏季雨水充足, 年平均降水量约 780 mm, 导致尾矿库中重金属元素通过地表径流和大气降雨方式流经地表, 从而对下游居民生产生活和交通运输产生威胁^[7]。故针对该铜尾矿库及周边范围内的土壤进行修复, 并进行植被恢复模式的相关研究具有一定的现实意义, 同时可为类似矿区提供参考。

2 研究方法

2.1 样本调查

本次调查主要针对尾矿库及周边 15 km² 范围

收稿日期: 2021-08-15

作者简介: 包扬 (1988-), 女, 助研, 主要从事生态环境监测评估、生态修复、生态环境规划等研究。

通信作者: 杨巍 (1981-), 男, 助研, 主要从事生态环境监测评估、生态修复、生态环境规划等研究。

内的植物种类、群落进行调查。首先按计划对研究区范围内的乔木、灌木和地被进行种类调查。以农田废弃地边界为起点，采用经典样方法共设置36个20 m×20 m的调查样方，并在每个样方内再分别设置10个2 m×2 m的草本样方和10个1 m×1 m的灌木样方^[8]。其中需要注意的是在设置调查样方时应尽量选取无明显中断且表现均匀的群落片段，并且应每隔10 m在样线上设置一样方，分别调查并记录样方范围内的乔木、灌木、草本植物的种名、数量、高度、多度等数据，参照《中国植被》^[9]对研究区范围内的乔木、灌木、草本进行划分，最后进行植物群落多样性分析。

2.2 多样性计算

针对铜尾矿库周边植物多样性进行调查时，适用于 α 多样性分析^[10]，即区域均匀的生境内植物数目多样性计算，其具体计算公式如下：

$$D = \frac{S-1}{\ln N} \quad (1)$$

式中： D 表示植物多样性； S 表示植物群落中的种类总数； N 表示调查到植物种类的个体数量。

通过对研究区范围内植物进行样本调查可知，研究区存在植物共计36科80属127种植物，其中主要以菊科、豆科、禾木科和松科为主。植物群落分布呈现为灌草-乔灌草，主要为6种乔木和11种灌草植物，由于该区域地势高，灌草种类多而乔木种类偏少，且植物耐旱性、抗逆性强。根据调查结果结合式(1)计算灌草层多样性系数为2.36，乔木层多样性系数为1.67，这说明在该铜尾矿范围内灌草层比乔木层植物丰富度更高。

2.3 重要值计算

重要值是针对研究区群落的一个定量指标，用于表征植物在群落中的相对重要值，主要通过相对频度、相对多度、相对显著度和相对盖度对灌草和乔木层进行计算^[11]，计算公式如下：

$$\begin{cases} R_d = \frac{d}{\sum d} \\ R_f = \frac{f}{\sum f} \\ R_p = \frac{p}{\sum p} \\ R_c = \frac{c}{\sum c} \end{cases} \quad (2)$$

式中： d 表示某个种的株数； f 表示频度； p 表示断面积； c 表示盖度。

针对灌草和乔木层进行重要值计算时采用以下公式：

$$\begin{cases} V_{\text{灌草}} = R_d + R_f + R_c \\ V_{\text{乔}} = R_d + R_f + R_p \end{cases} \quad (3)$$

根据多样性分析可知研究区灌木数量最多，其高度范围达10~120 cm，其中玉米和向日葵层高为60~120 cm，苜蓿和茼蒿高为20~100 cm，雏菊和草高度较低，主要构成研究区植物灌草层群落。根据式(2)计算该区域灌草层重要值见表1，其中占据主导优势的是玉米和苜蓿，其重要值分别达50.67、47.22；其次茼蒿和雏菊的重要值分别达32.66、31.08，构成研究区群落重要植物，而其他植物重要值均小于30，属于不稳定植物。

3 土壤修复效应分析

目前研究区内仍存在大量植物生长缓慢甚至死亡的现象，土壤物理结构差且铜污染严重，环境恢复困难，故确定研究区修复方法并采用相关重建技术进行生态恢复，从而提高植物成活率。

3.1 土壤修复方法

土壤质量的评价因子主要包括土壤物理性质、化学性质和污染物三者共同反映^[12]。根据以往现场测试数据中土壤容重值偏高，针对其改良物理性质方法采取土壤松土和合理深翻，在局部严重区域更换1 m深度表土层的客土覆盖，并利用常年植物进行固土降温的植物覆盖，从而有效避免土壤板结及次生盐碱化现象，改良土壤的通气情况；根据以往现场测试数据中土壤pH值呈现弱酸性，改良化学性质方法采取在化学性质差的区域集中种植豆科植物以提高土壤肥力^[13]，需要注意的是在选择豆科植物时应尽量选取落叶多且常年生长的种类，如大豆、苹果、甜菜等；对于污染元素的改良主要采用重度污染区域集中种植红三叶来减少土壤中污染元素的分布^[14]。

3.2 土壤物理性质分析

对于研究区36个采样方中点区域土壤分别采集深度0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm的表层土壤，在取样完成后对样品做风干处理，在除去植物器官后过100目筛并密封备用，将样品三分，采用环刀法测定土壤样品的容重、毛管孔隙

表 1 研究区群落特征
Table 1 Community characteristics in the study area

序号	植物	多度	频度	盖度	相对多度	相对频度	相对盖度	重要值
1	玉米	9	0.35	0.22	28.34	15.34	6.99	50.67
2	苜蓿	16	0.43	0.16	31.67	13.67	1.88	47.22
3	茼蒿	4	0.28	0.03	18.34	11.72	2.60	32.66
4	雏菊	7	0.26	0.02	14.37	9.62	7.09	31.08
5	向日葵	4	0.30	0.03	13.64	7.61	5.06	26.31
6	葡萄	3	0.23	0.02	10.95	7.23	5.58	23.76
7	狗尾草	3	0.18	0.01	8.66	3.25	5.31	17.22

度和非毛管孔隙度，采用烘干法测定土壤样品的含水量，最后取三次实验结果的平均值。

差检验，并结合五年前的现场测试结果进行对比分析，其结果见表 2。

对实验数据运用 SPSS 22.0 软件进行单因素方

表 2 土壤物理性质统计
Table 2 Statistics of soil physical properties

土壤厚度/cm	土壤容重/(g·cm ⁻³)		毛管孔隙度/%		非毛管孔隙度/%		含水量/%	
	改良前	改良后	改良前	改良后	改良前	改良后	改良前	改良后
0~20	1.68	1.62	39.26	37.82	1.83	1.95	4.92	5.05
20~40	1.76	1.71	37.51	36.04	2.54	2.67	4.73	4.96
40~60	1.81	1.72	34.17	32.15	2.96	3.11	4.52	4.71

根据对比结果可知，改良前后土壤容重降低说明通过增加群落物种的多样性使土壤板结状况得到缓解；毛管孔隙度降低而非毛管孔隙度增大说明研究区内植物群落乔木、灌木、草本搭配较为合理，充分利用生态位从而有效增加土壤的疏松程度；含水量增加说明提高植物群落覆盖率可有效改善土壤肥力。综上说明采取松土、深翻、客土和植物覆盖改善土壤物理性质的可行性。

3.3 土壤化学性质分析

此次样品采集与分析物理性质时类似，对 36 个采样方分别采集深度 0~20 cm 的表层土壤，进行风干、除器官、过 0.15 mm 筛等操作后密封备用，将样品三等分，主要测定土壤中以下营养元素和污染元素：测定有机质时采用重铬酸钾容量法，测定全磷时采用 X-射线荧光光谱法，测定速效磷和速效钾时采用电感耦合等离子体发射光谱法，测定全氮时采用凯氏-容量法，测定碱解氮时采用容量法，测定有效硫时采用燃烧-碘量法，测定酸碱度时采用离子选择性电极法，测定污染元素铜、镉、铅、镍、锌时采用电感耦合等离子体质谱法，测定铬采用 X-射线荧光光谱法，测定砷、汞时采用氢化物-原子荧光光谱法^[15]，采用烘干法对土壤进行处理，最后取三次实验结果的平

均值。根据实验结果，运用 SPSS 22.0 软件对上述各测试指标进行描述性分析，其具体结果见表 3。

由表 3 可知，研究区内营养元素氮、磷、钾元素含量较丰富，其均值超过 100 mg/kg，而污染元素中主要以铜为主，均值达 105 mg/kg，且较高的标准差说明上述元素在空间分布上不均匀，差异性较大；有机质、有效硫、速效磷的变异系数大于 1，具有较强的变异性，而其他营养元素和污染元素属于中等变异。为直观明确研究区土壤元素的空间分布，运用 ArcGIS 10.2 软件绘制上述营养元素和污染元素的分布状况，见图 1、2。

根据图 1 营养元素空间分布并对比修复前测试数据可知，修复后 pH 值略有增高但仍呈现弱酸性，且偏高区域主要集中在采场及排场附近，分析原因主要是 Cu²⁺易与大气和土壤水中 H⁺结合形成氢氧化铜固体从而呈现弱酸性；修复后有机质含量 6.8125 明显高于修复前水平，说明种植落叶多的植物通过地表分解产生有机质，增加的根际微生物促进土壤中有机质含量上升；全氮、全磷作为植物生长和新陈代谢的主要营养物质，在修复后水平较之前增加范围达 12%~17%，说明在研究区采用种植豆科植物来提高土壤肥力的可行性；碱解氮、速效磷、速效钾含量增高的原因在

表3 研究区测试指标统计
Table 3 Statistical table of test indicators in study area

元素	极小值	极大值	均值	标准差	变异系数
有机质	0.08	72.63	6.8125	7.6472	1.428
pH值	1.3	8.9	6.862	0.9145	0.127
有效硫	8.47	328.47	25.4723	22.1461	1.181
全氮	96.24	4259.24	964.2571	816.4482	0.682
碱解氮	9.26	354.12	58.16	49.2170	0.571
全磷	118.24	1678.22	458.2547	298.3314	0.457
速效磷	0.512	225.62	20.6318	23.7781	1.426
速效钾	32.25	1427.36	182.3476	143.2571	0.723
铜	12.25	425.18	105.3326	72.1468	0.751
镉	0.23	1.58	0.3546	0.2547	0.421
铅	8.33	84.25	25.4437	21.1576	0.511
镍	14.33	108.58	34.1755	30.2245	0.462
锌	18.63	152.33	48.2275	40.3361	0.387
铬	19.22	147.56	52.1156	47.3257	0.369
砷	1.35	34.17	8.6654	6.5214	0.227
汞	0.014	2.45	0.0514	0.0355	0.051

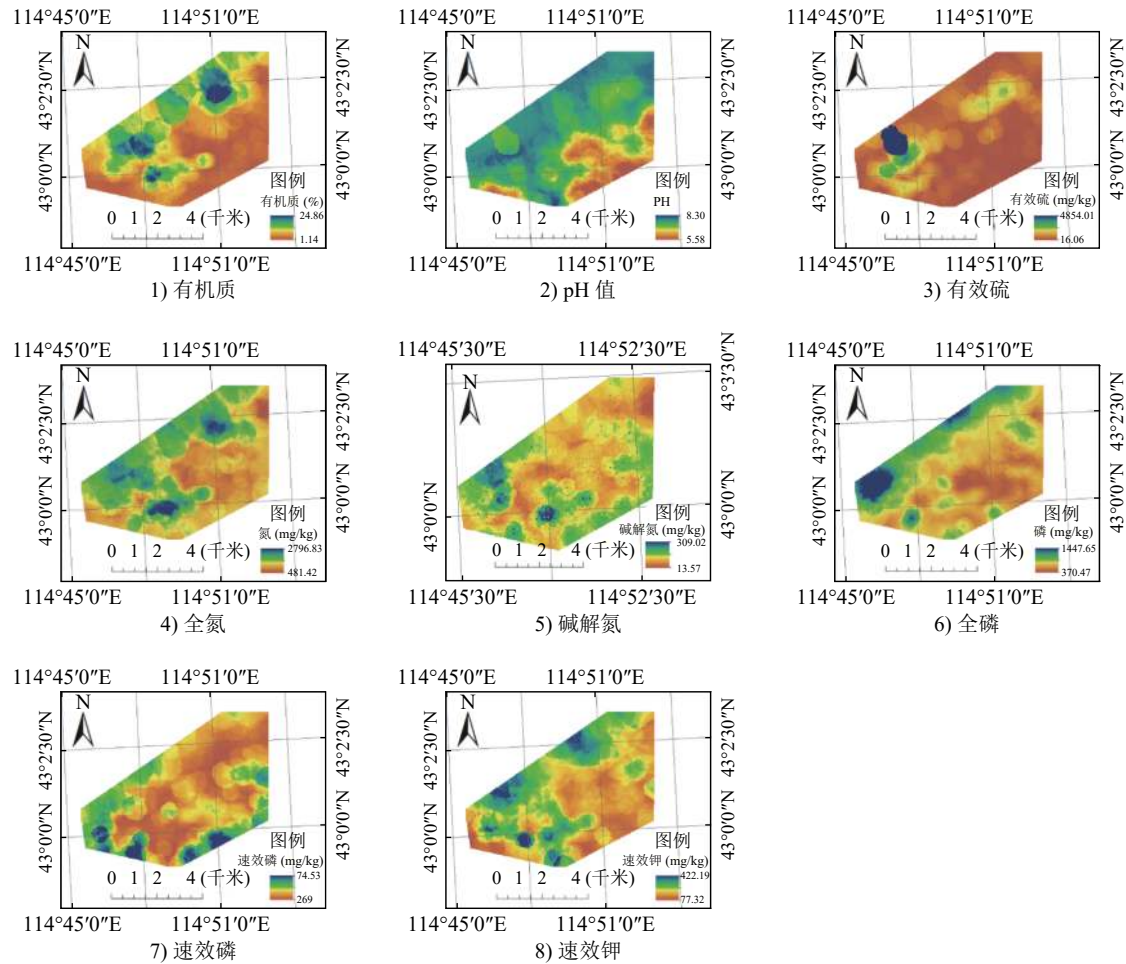


图1 营养元素空间分布状况
Fig.1 Spatial distribution of elements

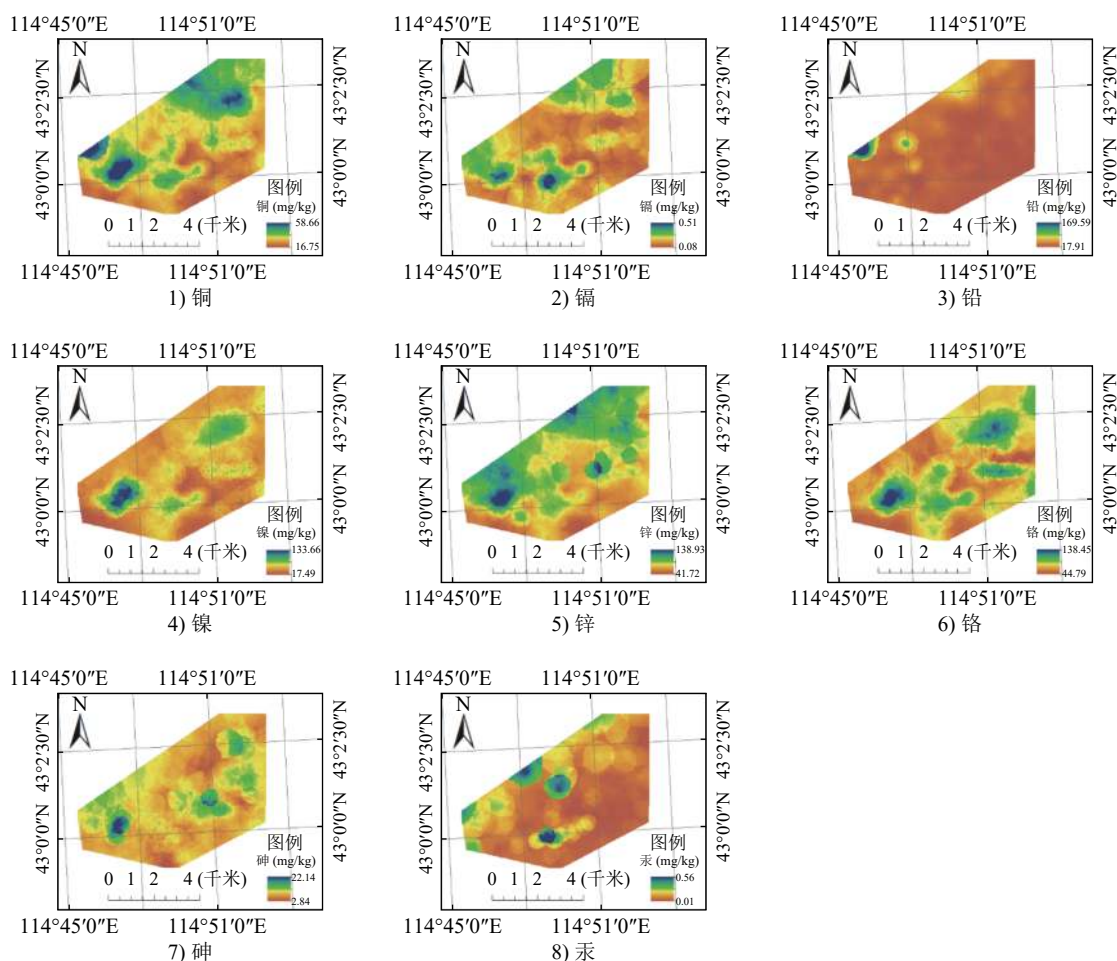


图2 污染元素空间分布状况

Fig.2 Spatial distribution of pollution elements

于研究区植物群落覆盖率较高，且修复时种有落叶植物，从而使得植物与土壤进行不断的物质能量交换，说明种植豆科植物改善土壤化学性质的可行性。

根据图2和修复后数据对比可知，该矿区污染元素主要以铜元素为主，在采用红三叶进行铜污染修复时，重度污染区域的铜元素水平由三年前的15.84~618.49 mg/kg减少至12.25~425.18 mg/kg，其极小值变化不明显，而极大值锐减幅度高达31.22%，且均值由157.7538 mg/kg减少至105.3326 mg/kg，增幅约为-33.12%，说明集中种植红三叶对于铜元素的污染处理具有良效。但由于地理位置、土壤条件等多因素影响，该影响程度仍需进一步考量。

4 生态修复评价

4.1 金属污染评价

由于土壤中金属污染常表现为综合污染，故

对于土壤样品中不同污染物运用内梅罗指数法^[16]进行金属污染评价更加全面具体，其计算如下：

$$P_N = \sqrt{\frac{(C_i/S_i)_{\max}^2 + (C_i/S_i)_{\text{ave}}^2}{2}} \quad (4)$$

式中： P_N ——土壤综合污染指数；

C_i/S_i ——土壤中第*i*种污染物的单项污染指数；

$(C_i/S_i)_{\max}$ ——单项污染指数的最大值；

$(C_i/S_i)_{\text{ave}}$ ——单项污染指数的平均值。

运用式(4)对矿区范围36个样方内720个土壤样品的铜、镉、铅、镍、锌、铬、砷、汞共计八种金属元素进行计算，其结果见表4；并参照国家土壤环境质量标准(GB 15618—2018)^[17]划分样品污染等级程度，其具体结果见表5。

根据计算结果可知，矿区范围内以铜污染尤为严重，其综合污染指数3.654达重度污染；其次为镉、镍、锌、铬，其污染指数在1.2~1.5范围

表 4 金属污染评价结果/%
Table 4 Evaluation results of metal pollution

元素	铜	镉	铅	镍	锌	铬	砷	汞
最小值	2.481	0.624	0.082	0.682	0.885	0.934	0.227	0.463
最大值	4.827	1.833	0.204	1.576	1.982	1.877	0.458	0.825
平均值	3.654	1.228	0.143	1.129	1.433	1.405	0.342	0.644

表 5 研究区污染程度
Table 5 Pollution degree in the study area

样品总数	样品个数	比例	等级
720	82	11.39%	安全
720	93	12.92%	警戒
720	322	44.72%	轻度污染
720	114	15.83%	中度污染
720	109	15.14%	重度污染

内，达轻度污染；汞元素达轻微污染而其他元素均处于安全水平，且研究区土壤中 15.14% 的样品已达重度污染，严重威胁当地生态环境，急需进一步进行生态恢复。

4.2 生态恢复评价

依据土地利用总体规划、土地复垦耕地优先、综合效益优先、土地可持续利用等原则，结合前述的样品调查结果，构建包含目标层、准则层、因素层、指标层的矿区生态修复适宜性评价指标体系，运用 AHP 层次分析法^[18]，结合目标层、准则层、因素层和指标层构建各层级相互影响的递阶层次模型，根据重要程度对各评价因子建立判断矩阵并以 1~9 进行赋值，采用和积法和方根法计算判断矩阵的最大特征向量进行层次单排序，最后将层次单排序的计算结果综合得出对更上一层次的优劣顺序，从而得出各评价指标权重见表 6。

表 6 土地利用与生态修复适宜性评价指标权重
Table 6 Land use and ecological restoration suitability evaluation index weight table

评价指标	权重		
	宜耕	宜林	宜草
土壤有效厚度	0.04	0.02	0.07
土壤质地	0.07	0.08	0.03
土壤容重	0.17	0.13	0.18
全盐含量	0.04	0.06	0.03
有机质含量	0.26	0.32	0.28
砾石含量	0.09	0.04	0.07
铜	0.06	0.08	0.05
植被覆盖度	0.13	0.11	0.09
植被生长情况	0.08	0.13	0.12

4.3 周边植被恢复模式

根据宜耕、宜林、宜草三个评价方向划分 4 个适宜等级，通过分析土壤与植被调查结果，确定各评价指标的数值范围，综合考虑《土地复垦质量控制标准》^[19]要求和 4 个适宜等级，确定各评价指标的评价标准，结合内梅罗污染指数评价结果和 ArcGIS 10.2 将各评价指标进行空间分布叠加，按照指标权重进行计算，得出各评价指标的指数和值，按照《土地复垦质量控制标准》得出每个单元的适宜性评价等级，见图 3。通过图 3 可看出，在采场和排土场区域适宜种草，在研究区西部区域更适宜发展林地，而南部和东部区域更适宜耕种，在今后生态恢复过程中应因地制宜采取更加具有生态效益和经济效益的恢复模式。

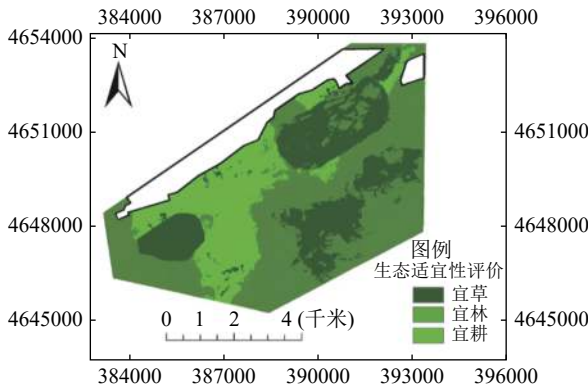


图 3 生态适宜性评价结果
Fig.3 Results of ecological suitability evaluation

5 结 论

(1) 该铜尾矿范围内灌草层的植物丰富度高于乔木层，且群落内重要植物以玉米、苜蓿、茼蒿和雏菊为主。

(2) 通过松土、深翻、客土和植物覆盖的方式可明显改善矿区土壤的物理性质，种植落叶多且常年生长的豆科植物显著提高了矿区土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮、速效磷、速效钾等营养物质含量。

(3) 研究区主要以铜污染为主，达重度污

染,通过种植红三叶可明显改善土壤中铜元素含量。

(4) 研究区范围内采场和排土场宜草、西部区域宜林、南部和东部区域宜耕,在今后生态恢复中应因地制宜采取相应的恢复模式,同时满足生态和经济要求。

参考文献:

- [1] 李瑞娟,周冰.安徽铜陵铜尾矿土壤污染评价及综合利用研究[J].矿产综合利用,2021(4):36-40.
- LI R J, ZHOU B. Study on soil pollution evaluation and comprehensive utilization of Tongling tailings in Anhui[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(4):36-40.
- [2] Qiu Linjing, Wu Yiping, Yu Mengzhen, et al. Contributions of vegetation restoration and climate change to spatiotemporal variation in the energy budget in the loess plateau of China[J]. Ecological Indicators, 2021, 127:107780.
- [3] 王圳,张均,陈芳,等.贵州省磷矿固体废弃物治理现状与建议[J].矿产综合利用,2019(1):11-15.
- WANG Z, ZHANG J, CHEN F, et al. Present situation and suggestion of management of phosphate rock solid waste[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(1):11-15.
- [4] 宫贵臣,韩跃新,李艳军.辽宁某铁矿石工艺矿物学研究[J].矿产综合利用,2018(2):77-80.
- GONG G C, HAN Y X, LI Y J. Study on technological mineralogy of an iron ore in Liaoning[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2018(2):77-80.
- [5] 杜志杰.铜矿峪矿浮选工艺流程的改造[J].矿业研究与开发,2002(3):35-36.
- DU Z J. Transformation of the flotation process of Tongkuangyu Mine[J]. Mining Research and Development, 2002(3):35-36.
- [6] Liang Qinglin, Song Xieyan, Wirth Richard, et al. Implications of nano- and micrometer-size platinum-group element minerals in base metal sulfides of the Yangliuping Ni-Cu-PGE sulfide deposit, SW China[J]. Chemical Geology, 2019, 517:7-21.
- [7] 罗谦,李英菊,秦樊鑫,等.铅锌矿区周边耕地土壤团聚体重金属污染状况及风险评估[J].生态环境学报,2020,29(3):605-614.
- LUO Q, LI Y J, QIN F X, et al. Pollution status and risk assessment of heavy metals in soil aggregates in the surrounding arable land of lead-zinc mining areas[J]. Acta Eco-Environmental Sciences, 2020, 29(3):605-614.
- [8] 刘淑鹏,张小伟.基于区域协同减量化的矿山尾矿综合信息管理构想研究[J].矿产综合利用,2021(4):17-20.
- LIU S P, ZHANG X W. Research on comprehensive information management of mine tailings based on regional cooperative reduction[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(4):17-20.
- [9] 钟理,杨春燕,左相兵,等.中国植物区系研究进展[J].草业与畜牧,2010(9):6-9.
- ZHONG L, YANG C Y, ZUO X B, et al. Research progress of China's flora[J]. Grass Industry and Animal Husbandry, 2010(9):6-9.
- [10] 吴玉元,何东升,胡洋,等.某铜铁矿尾矿工艺矿物学研究[J].矿产综合利用,2019(2):75-78.
- WU Y Y, HE D S, HU Y, et al. Mineralogical study on a copper-iron ore tailings process[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(2):75-78.
- [11] 卫智军,李青丰,贾鲜艳,等.矿业废弃地的植被恢复与重建[J].水土保持学报,2003(4):172-175.
- WEI Z J, LI Q F, JIA X Y, et al. Vegetation restoration and reconstruction of abandoned mining land[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003(4):172-175.
- [12] 罗妍,黄艺,余大明,等.东北典型煤矿区重金属环境影响评价与分析[J].矿产综合利用,2021(4):50-58.
- LUO Y, HUANG Y, YU D M, et al. Environmental assessment of heavy metals in typical coal mining areas in Northeast China[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(4):50-58.
- [13] 钟娇娇,陈杰,陈倩,等.秦岭山地天然次生林群落MRT数量分类、CCA排序及多样性垂直格局[J].生态学报,2019,39(1):277-285.
- ZHONG J J, CHEN J, CHEN Q, et al. MRT quantitative classification, CCA ordination and vertical pattern of diversity in natural secondary forest communities in Qinling Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(1):277-285.
- [14] 李勇胜.红三叶铜元素富集规律研究[D].兰州:兰州大学,2019.
- LI Y S. Study on the enrichment law of copper in red clover[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019.
- [15] 王素,齐向红,田江涛,等.河北省某铜尾矿综合回收试验研究[J].矿产综合利用,2019(3):113-117.
- WANG S, QI X H, TIAN J T, et al. Experimental study on comprehensive recovery of a copper tailings in Hebei[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(3):113-117.
- [16] 刘应冬,代力,张卫华.青海某金矿矿集区土壤重金属污染评价及综合利用讨论[J].矿产综合利用,2018(5):97-100.

LIU Y D, DAI L, ZHANG W H. Evaluation of soil heavy metal pollution and discussion on comprehensive utilization of a gold mine concentrated area in Qinghai[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2018(5):97-100.

[17] 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]. 北京: 中国标准出版社, 1995.

National Environmental Protection Administration, National Bureau of Technical Supervision. GB 15618 —1995 soil environmental quality standards[S]. Beijing: China Standards Press, 1995.

[18] 李得立, 曾小波, 魏友华, 等. 矿山企业矿产资源开发利

用水平评价方法研究 ——以湖南省金矿矿山为例[J]. 矿产综合利用, 2019(5):22-27.

LI D L, ZENG X B, WEI Y H, et al. Research on evaluation method of mineral exploration level for mine enterprise-taking Hunan province gold mine enterprise as an example[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(5):22-27.

[19] TD/T 1036-2013, 土地复垦质量控制标准 [S]. 中华人民共和国国土资源部. 2013.

TD/T 1036-2013, Quality control standard for land reclamation[S]. Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. 2013.

Study on Soil Remediation Effect of Copper Tailings Pond and Surrounding Vegetation Restoration Model

Bao Yang¹, Su De², Yang Wei¹, Zhao Yanhua¹

(1.Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing, China; 2.Key Laboratory of Regional Eco-Process and Function Assessment and State Environment Protection, Beijing, China)

Abstract: Based on the poor soil and metal pollution of a copper tailings pond in southern Shanxi Province, a total of 36 survey plots of 20 m × 20 m were set up using the classic sample method to analyze plant diversity and important values, respectively, according to the physical and chemical properties of the soil. Propose different restoration methods, use ArcGIS to map the spatial distribution of nutrient elements and pollution elements, test the restoration effect, and evaluate the ecological suitability combined with the AHP analytic method. The results show that the shrub and grass layer in the study area is more abundant than the arbor layer, and the important plants are mainly corn, alfalfa, chrysanthemum and daisy; loose soil, deep plowing, extra soil and plant mulching have obvious effects on the improvement of soil physical properties, And planting legumes that grow all the year round with many deciduous leaves can significantly increase the organic matter, total nitrogen, total phosphorus and other nutrient content of the soil in the mining area; And planting red clover has good control effect on copper pollution. sampling and dumping sites within the study area are suitable for grass, the western region is suitable for forestry, the southern and eastern regions The area is suitable for farming. This study will provide a scientific basis for ecological restoration in the future according to local conditions and provide reference value for other similar mining areas.

Keywords: Copper tailings pond; Soil restoration; Vegetation restoration; Spatial distribution; AHP tomographic analysis