doi: 10.19388/j.zgdzdc.2023.05.14
引用格式: 柴晨晖,秦越强,王志民,等. 基于 AHP – TOPSIS 方法的薛家湾—龙口镇露天煤矿大型排土场生态修复效果评价[J]. 中国地质调查,2023,10(5): 118 – 127. (Chai C H,Qin Y Q,Wang Z M,et al. Evaluation of ecological restoration effect of large waste dump in Xuejiawan – Longkou open – pit coal mine based on AHP – TOPSIS method[J]. Geological Survey of China,2023,10(5): 118 – 127.)

基于 AHP – TOPSIS 方法的薛家湾—龙口镇露天煤矿大型排土场生态修复效果评价

柴晨晖, 秦越强, 王志民, 孙宇飞, 李朋伟, 辛 凯, 张 鑫
(中国地质调查局廊坊自然资源综合调查中心,河北 廊坊 065000)

摘要: 排土场修复是矿山生态修复取得突破性进展和显著成效的关键之一。为进一步优选排土场生态修复技术组合,支撑矿山生态修复和绿色矿山建设,以薛家湾—龙口镇露天煤矿 5 个不同修复技术组合排土场板块为研究对象,选取生态效益和经济效益 2 类 9 个评价指标,运用层次分析(analytic hierarchy process,AHP)法和优劣解距离(technique for order preference by similarity to an ideal solution,TOPSIS)法构建排土场生态修复效果综合评价模型,确定最终权重并进行综合评价。研究区排土场修复最优解决方案为: 工程措施采用平整覆土 + 挡水围堰 + 坡面整形 + 条播技术; 植被措施采用柳树 + 沙打旺 + 草木犀 + 苜蓿 + 冰草 + 老芒麦。研究表明,在矿山生态修复效果的成效评价中,使用定性加定量的评价方法,能更好地反映出生态修复效果,可为科学评价生态修复效果提供支撑。

关键词: 露天开采; 排土场; 生态修复; 综合评价
中图分类号: S157.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095 – 8706(2023)05 – 0118 – 10

0 引言

随着我国社会经济的快速发展,露天煤矿的采矿规模逐年增加,为满足我国经济建设的需要,地区原有的自然生态系统受到严重破坏[1],造成了土地资源浪费[2]、地质灾害[3-4]、植被破坏、水土流失、地下水位下降和沙土尘扬沙等一系列生态环境问题,亟需开展矿山环境的生态修复工作。20 世纪初,西方发达国家就开始了矿山生态修复的相关工作,先后制定了有关露天采矿土地复垦方面的法规[5]。我国对矿山废弃地生态修复的研究起步较晚,20 世纪 60 年代,我国才开始矿山土地复垦实践[6],相应地,针对矿山生态修复的研究也越来越多,到 90 年代发展到了一定的阶段[1,7-10]。

目前,对于煤矿生态修复效果研究大多采用综合评价的方法,评价方法主要有层次分析(analytic hierarchy process, AHP)法[11-13]、变异系数法[14-15]、模糊评价法[16-19]、物元分析法[20-22]、优劣解距离(technique for order preference by similarity to an ideal solution,TOPSIS)法等。本文采用 AHP 与 TOPSIS 相结合的方法对研究区进行综合评价,AHP 法是一种简单、方便、灵活、实用的多准则决策方法,量化了决策者的经验,适用于数据缺乏、目标结构复杂的情况[23-24]。TOPSIS 法是常见的组内综合评价方法,能充分利用原始数据的信息,其结果能精确地反映各评价方案之间的差距。两者结合可以更有效地对矿山生态修复效果进行定性和定量地分析,更加科学客观地进行评价。本文以薛家湾—龙口镇已治理的露天煤矿排土场为研究对象,采用 AHP 与 TOPSIS 相结合的综合评价方法,从生态效益和经济效益 2 个层面,评价不同修复技

收稿日期: 2023 – 02 – 27; **修订日期:** 2023 – 08 – 25。
基金项目: 中国地质调查局“鄂尔多斯市准格尔旗煤炭矿集区生态修复支撑调查(编号: DD20208078)”项目资助。
第一作者简介: 柴晨晖(1992—),男,工程师,主要从事矿山生态修复支撑调查、地质灾害、地质矿产等方面的工作。Email: chai7@126.com。
通信作者简介: 秦越强(1987—),男,高级工程师,主要从事生态修复支撑调查、地质灾害、地质矿产等方面的工作。Email: qyq331851187@163.com。

术组合的生态修复效果,旨在筛选出适宜有效的生态修复技术方法,为排土场修复治理提供参考。

1　研究区概况

研究区位于内蒙古鄂尔多斯市准格尔旗薛家湾—龙口镇境内。大陆性气候突出,属于典型的半干旱地区,降水量少,主要集中在夏秋季节,年日照时间为3 000 h 以上,全年平均气温为6.2 ~8.7 ℃。地处晋、陕黄土高原与鄂尔多斯高原的连接处,由北西向南东倾斜,为典型的丘陵沟壑区。出露地层主要有古生界二叠系、中生界三叠系和侏罗系、新生界新近系以及第四系。二叠系、三叠系和侏罗系岩性主要为泥岩、粉砂岩、砂岩、砂砾岩; 新近系和第四系岩性主要为红色泥岩、砂质黏土、风积沙和黄土。

通过调查,研究区内露天煤矿排土场采用的生态修复技术手段主要包括工程修复措施与植被修复措施[25-28]。本次调查选取了 5 个露天煤矿排土场作为生态修复效益评价对象(图 1)。

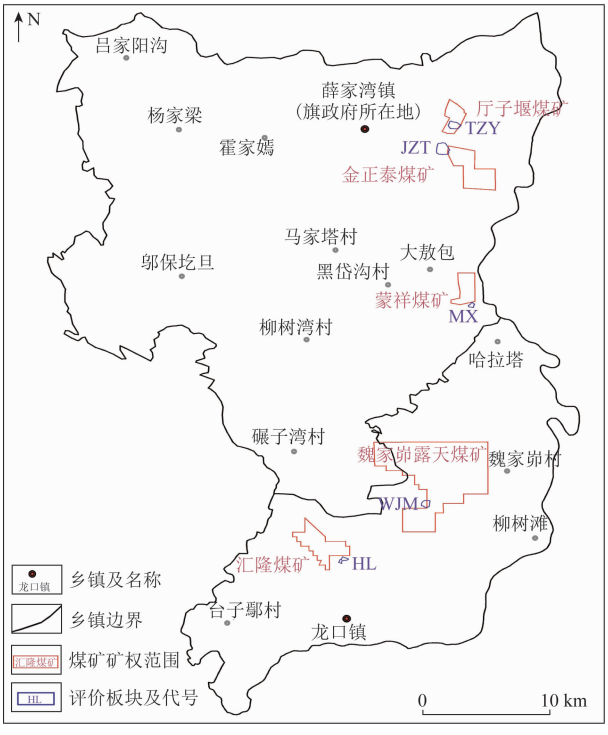


图 1　研究区位置示意图

Fig. 1　Location of the study area

2　研究方法

2.1　不同修复技术组合

研究区内采取的修复措施主要有以下几种。

(1)平整覆土措施。主要是将原先剥离存储的表土在排土场上进行平整覆土,覆土的目的主要是为了满足复垦植被生长条件的需要。

(2)坡面整形措施。在形成排土场时,对坡面要进行削方整形,主要是将不规则不稳定的起伏边坡压实整形为直线坡; 坡面较大时,采取挖推法,即用挖土机开挖坡面,推土机推运土,受天气影响不大,施工工期较短,成本相对较低。

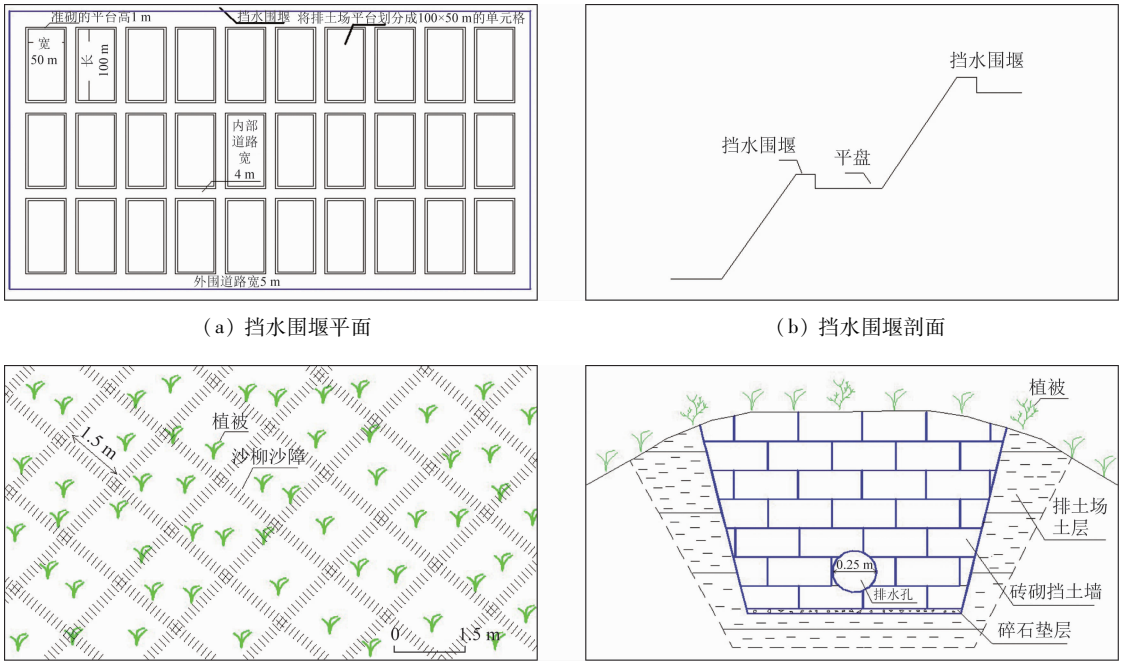
(3)挡水围堰措施。为防治土壤侵蚀同时方便管理,在平台边缘堆砌挡水围堰(图 2(a),(b)),然后按照规格将排土场平台分为 100 m × 50 m 或 50 m × 50 m 大小的网格,并在各网格四周堆砌高 1 m 的平台,起到防止水土流失、防风固沙的作用。

(4)设置沙障措施。选用沙柳作为防护材料,边坡上铺设沙柳沙障(图 2(c)),沙障呈菱形状网格,边长为 1.5 m × 1.5 m,沙柳高 0.5 m,插入深度为 0.3 m,出露地面 0.2 m。在沙障网格中撒上草籽,可以增加边坡稳定,起到固土保墒的作用。

(5)挡土墙排水沟措施。利用砖和水泥修建挡水墙,基底直接坐浆砌筑,砌砖前应根据中心线放出墙基线,摆砖撂底,砌砖完成将墙面涂上水泥,不留缝隙,避免渗水,下方留置 PVC 管口引流。砖砌挡土墙排水沟适用于各类矿山边坡的截排水(图 2(d))。该类排水沟优点在于成本较低且整体稳定性较好,后期维护方便,缺点在于不太美观。

(6)植被复绿措施。在排土场内,分为乔灌木条带及牧草条带,乔灌木条带间隔为 3 ~5 m,牧草条带采用条播的方式,间隔为 0.3 ~0.5 m。

汇隆煤矿排土场(以下简称 HL)南部排土场技术组合为平整覆土 + 挡水围堰 + 坡面整形 + 沙打旺 + 草木犀植被复绿; 蒙祥煤矿排土场(以下简称 MX)技术组合为平整覆土 + 挡水围堰 + 坡面整形 + 沙柳沙障 + 挡土墙排水沟 + 油松 + 苜蓿 + 沙打旺植被复绿; 厅子堰煤矿排土场(以下简称 TZY)技术组合为平整覆土 + 挡水围堰 + 坡面整形 + 苜蓿 + 草木犀植被复绿; 金正泰煤矿排土场(以下简称 JZT)技术组合为平整覆土 + 挡水围堰 + 坡面整形 + 油松 + 枣树 + 沙棘 + 紫花苜蓿植被复绿; 魏家峁露天煤矿排土场(以下简称 WJM)技术组合为平整覆土 + 挡水围堰 + 坡面整形 + 油松 + 柳树 + 苜蓿 + 冰草 + 老芒麦植被复绿。



（a）挡水围堰平面　　（b）挡水围堰剖面

（c）沙柳沙障平面　　（d）砖砌挡土墙排水沟剖面

图 2　排土场工程措施

Fig. 2　Engineering measures for the waste dump

2.2　评价指标及其赋值

矿山排土场生态修复效果分为生态效益、经济效益、社会效益 3 部分[28-31]，本文主要是以不同矿山的排土场板块作为评价对象，研究区内矿山的管护手段基本一致，差异不大，重点考虑生态系统的稳定性和修复效果，并且评价面积相对很小，故在生态效益中，矿山管护手段和管护成本的差异可以暂不考虑，并且在社会效益价值上几乎不体现，所以将目标层只划分了生态和经济两部分。根据矿山环境和现有资料，构建了排土场生态修复效果评价体系（表 1）。

表 1　排土场生态修复效果综合评价体系

Tab. 1　Comprehensive evaluation system of ecological restoration effect of the waste dump

目标层 A	准则层 B	指标层 C
排土场生态修复效果综合评价体系	经济效益 B_1	效益费用比　C_1
		固碳收益　C_2
	生态效益 B_2	NDVI　C_3
		生长状态　C_4
		含水率　C_5
		覆土厚度　C_6
		有机质含量　C_7
		土壤 pH 值　C_8
		修复年限　C_9

注：NDVI 为归一化植被指数，是反映植被长势的重要参数之一，英文全称为 Normalized Difference Vegetation Index。

（1）效益费用比。效益费用比是单位面积植被经济收益与单位面积修复费用的比值，即：效益费用比 = 单位面积植被经济收益/单位面积修复费用。修复费用是根据研究区矿山土地复垦方案得到的场地工程及修复治理的材料单价。场地工程费用主要包括场地削坡、场地覆土平整、修建挡土墙和排水沟等费用。植被费用主要包括植被苗木成本费用、牧草种子成本费用及其他费用。各项费用明细见表 2。

表 2　各板块修复费用

Tab. 2　Repair costs for each sector

评价板块	HL	MX	TZY	JZT	WJM
表土剥离/（元 · m^{-3}）	8.50	8.50	8.50	8.50	8.50
土地平整/（元 · m^{-3}）	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26
边坡覆土/（元 · m^{-3}）	—	12.92	—	—	—
平台覆土/（元 · m^{-3}）	12.92	—	12.92	12.92	12.92
排水沟/（元 · m^{-3}）	—	289.29	—	—	—
道路管护/（元 · m^{-3}）	1.51	—	1.51	1.51	1.51
草本种植/（元 · m^{-2}）	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36
沙柳沙障/（元 · m^{-2}）	—	2.24	—	—	—
乔木种植/（元 · $株^{-1}$）	—	—	—	20.36	20.36
灌木种植/（元 · $株^{-1}$）	—	2.40	—	2.40	—

注：“—”表示没有数据。

植被经济收益主要包括栽种乔木若干年后取得的经济效益，播种牧草不仅可以熟化土地，自身还具有经济价值。为方便统计，我们按理想的植被状态进行计算。经网上查阅统计可得：2 ~ 3 m 的

油松市场均价为 110 元/株,油松 4 a 可达到 2 ~ 3 m 的高度,这里油松按单株年收入 27.5 元计算;沙棘一亩年收入均价为 2 000 元/亩,取值每 m^2 收入约 3 元;苜蓿等草本一亩年收入均价为 2 250 元/亩,取值每 m^2 收入约 3.37 元。由上文公式计算得出各板块效益费用比(表 3)。

表 3　各板块效益费用比

Tab. 3　Benefit – cost ratio for each sector

评价板块	单位面积修复费用/元	单位面积收益/元	效益费用比
HL	25.55	3.37	0.1319
MX	315.57	6.37	0.020 2
TZY	25.55	3.37	0.131 8
JZT	48.31	33.87	0.701 1
WJM	45.91	30.87	0.672 4

(2)固碳效益。生态系统固碳分为植物固碳和土壤固碳两部分,这里使用碳税法计算不同植被类型所产生的固碳效益,运用 InVEST 碳储量计算模型得到不同覆被类型下的总碳储量,然后再查询最近碳交易所的平均交易单价,最后通过计算得到它的固碳效益。研究区的固碳效益也是结合 InVEST 碳储量模型,根据不同土地利用类型的地上和地下物质、枯落物、土壤有机碳量化来评价固碳的总量。固碳效益计算公式为

$$C_{\text{stored}} = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{soil}} + C_{\text{dead}} \quad , \qquad (1)$$

$$\text{固碳效益} = C_{\text{stored}} \times \text{各板块面积} \times \text{碳排放交易价格} \quad 。 \qquad (2)$$

式中:C_{stored}为总碳储量,t/hm^2;C_{above}为地上物质碳储量,t/hm^2;C_{below}为地下物质碳储量,t/hm^2;C_{soil}为土壤碳储量,t/hm^2;C_{dead}为枯枝落叶碳储量,t/hm^2;碳排放交易价格选用全国碳市场最近 CEA 挂牌协议交易平均价格,为 58.72 元/t。

参照表 4 及固碳效益计算公式得出以下不同技术组合评价板块的固碳效益,如表 5 所示。

表 4　各土地覆被类型碳储量参数

Tab. 4　Carbon storage parameters for each land cover type

土地覆被类型	C_{above}/(t·hm^{-2})	C_{below}/(t·hm^{-2})	C_{soil}/(t·hm^{-2})	C_{dead}/(t·hm^{-2})	C_{stored}/(t·hm^{-2})
草原	2.33	7.3	43.72	3.8	57.15
草丛	3.37	7.48	44.36	4.47	59.68
稀疏草地	1.66	3.41	10.93	2.00	18.00
稀疏灌木林	1.31	2.42	29.90	0.35	33.98
落叶阔叶灌木林	7.14	3.09	64.29	2.00	76.52

①1 亩 = 666.6 m^2;②1 hm^2 = 10 000 m^2。

表 5　各板块固碳效益

Tab. 5　Carbon sequestration benefits for each sector

评价板块	面积/hm^2	固碳总效益/元	单位面积固碳效益/元
HL	16.00	56 070.55	3 504.40
MX	19.54	38 988.27	1 995.30
TZY	57.01	191 316.89	3 355.84
JZT	28.78	129 315.86	4 493.25
WJM	1.50	4 124.78	2 749.85

(3)NDVI 。植被覆盖度是指植被(包括叶、茎、枝)在地面的垂直投影面积占统计区总面积的百分比[32]。归一化植被指数(nomralized difference vegeattion index,NDVI),又称标准化植被指数,是植被覆盖度遥感估算方法中最常见、最经典的植被指数。本次研究采用 NDVI 值来代表植被覆盖度。通过遥感图像处理平台(The Environment for Visualizing Images,ENVI)和地理信息系统(Arc Geographic Information System,ArcGIS)对遥感影像进行分析,得到图 3 和表 6。植被覆盖度公式为

$$V_{\text{FC}} = \frac{(\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\min})}{(\text{NDVI}_{\max} - \text{NDVI}_{\min})} \quad 。 \qquad (3)$$

式中:V_{FC}为植被覆盖度;$\text{NDVI}_{\max}$和$\text{NDVI}_{\min}$分别为区域内最大和最小的 NDVI 值。

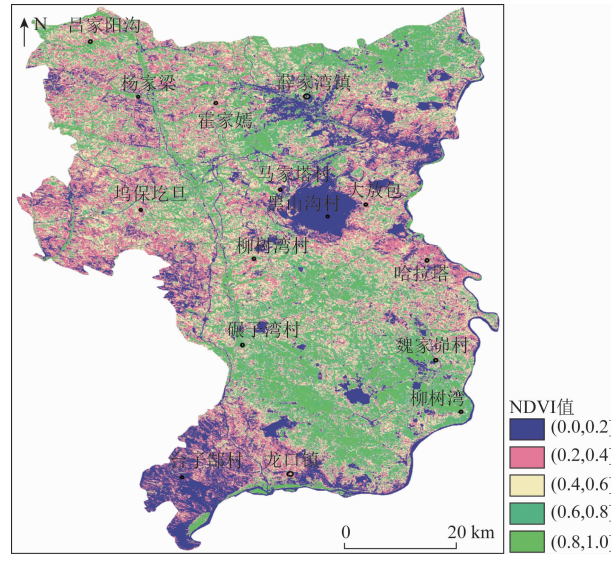


图 3　研究区植被覆盖度

Fig. 3　Vegetation coverage of the study area

表 6　各板块 NDVI 值

Tab. 6　NDVI index of each sector

评价板块	HL	MX	TZY	JZT	WJM
NDVI 值	0.789 061	0.275 325	0.319 656	0.199 63	0.207 662

(4)生长状态。生长状态主要是根据实地样地调查,调查样地中植被的平均高度和株行距。根据调查样地的植物高度和干径,对其进行等级划分,如表 7 所示。

表 7 乔灌草生长状况评价等级

Tab.7 Tree, shrub and grass growth evaluation grade

类型	评价等级		
	I	II	III
乔木	高度 >2 m, 干径 >5 cm	高度[1, 2] m, 干径[2, 5] cm	高度 <1 m, 干径 <2 cm
灌木	高度 >0.8 m	高度[0.3, 0.8] m	高度 <0.3 m
草本	高度 >1 m	高度[0.5, 1] m	高度 <0.5 m

(5)含水率。植物在生长过程中,根系与外界生长的土壤之间存在一定的关系。植物根部在吸收土壤中水分时,会伴随着吸收土壤中的无机营养物质。当土壤中水分较高时,植物就会更容易的吸收到土壤中的营养物质;当土壤中的水分含量不足时,植物吸收土壤营养物质也会相应的减少,会对植物的生长产生一定的影响。

(6)覆土厚度。植被生长需要一定的排土场覆土厚度,不同的覆土厚度会有不同的土壤理化性质,覆土厚度不同,植被生长状态也会存在一定的影响。

(7)有机质含量。通过生态修复可有效改良土壤,能够体现生态修复的效果。土壤有机质含量是指土壤中有机质占土壤干重的百分比(图 4)。

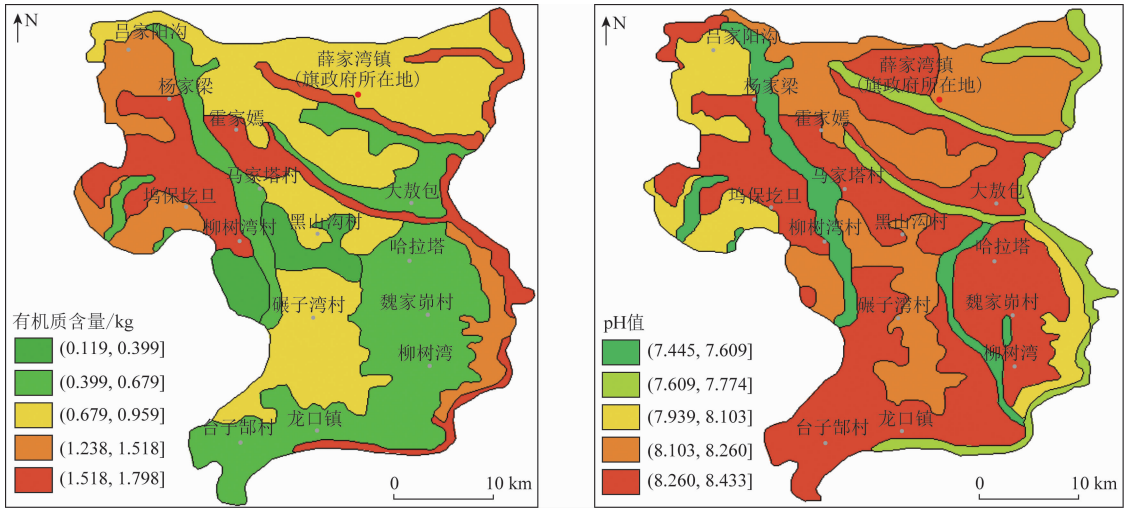


图 4 研究区有机质分布(左)及 pH 值分布(右)[32]

Fig.4 Organic matter distribution (left) and pH distribution (right) in the study area[32]

(8)土壤 pH 值。土壤 pH 值作为检验土壤酸碱程度的强度指标(图 4),pH 值的大小直接影响着土壤养分、土壤结构、土壤微生物活动以及各种动植物的生存发育,对生态修复有巨大的意义。

(9)修复年限。随着修复年限的增加,植被会呈现出不同的生长状态。含水率、覆土厚度及修复年限等数据见表 8。

表 8 其他指标数据值

Tab.8 Values of other indicators

评价板块	含水率/%	覆土厚度/m	有机质含量/(g·kg^{-1})	土壤 pH 值	修复年限/a
HL	0.120	0.5	0.645 7	8.132	3
MX	0.089	0.3	0.550 1	8.316	3
TZY	0.120	0.5	0.685 1	8.115	2
JZT	0.080	0.5	0.691 8	8.115	5
WJM	0.110	0.5	0.550 1	7.445	3

2.3 权重确定

运用 AHP 法,判断每两个指标的重要程度,确定指标权重,构建出判断矩阵。矩阵 A 的最大特征根 λ_{max} 和特征向量 W 计算公式为

$$AW = \lambda_{max} \cdot W \quad , \tag{4}$$

$$\sum_{i=1}^{n} W_i = 1 \quad 。 \tag{5}$$

式中:A 为判断矩阵;λ_{max} 为最大特征根;W_i 为第 i 个指标的权重。

在实际中,一般采用方根法和求和法得到 λ_{max} 和 W 的近似解,即先将矩阵各行元素相乘,得到 M_i,再将 M_i 开 n 次方,得到 W_i 的平均值 $\overline{W_i}$,对 W_i 的平均值 $\overline{W_i}$ 归一化处理后得到 W_i,最后计算出 λ_{max}。具体公式为

$$M_i = \prod_{k=1}^{n} a_{ik}, (i,k-1,2,\ldots,n) \quad , \tag{6}$$

$$\overline{W_i} = \sqrt[n]{M_i}, (i = 1,2,\ldots,n) \quad , \tag{7}$$

$$W_i = \overline{W_i} / \sum_{i=1}^{n} \overline{W_i}, (i = 1,2,\ldots,n) \quad , \tag{8}$$

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \frac{(AW)_i}{W_i}, (i = 1,2,\ldots,n) \quad 。(9)$$

式中: M_i 为新向量; $\overline{W_i}$ 为 W_i 的平均值; W_i 为第 i 个指标的权重; $\lambda_{\max}$ 为最大特征根; $\boldsymbol{A}$ 为判断矩阵; a_{ik} 为 M_i 新向量数据; n 为评价指标的个数。

最后进行矩阵的一致性验证,通过计算矩阵的最大特征值的方法来衡量一个矩阵的一致性指标(consistency index,CI)。为衡量 C_I 大小,引入随机一致性指标(random index,RI),定义一致性比率(consistent ratio,CR)。当 $C_R = C_I/R_I < 0.1$ 的时候,我们则认为可行通过。如果一致性验证不通过,则需要重新构造对比矩阵。

通过上述层次分析法确定各指标权重,结果见表 9—表 12。

表 9　目标层 $A-B$ 判断矩阵及权重系数结果

Tab. 9　Target layer $A-B$ judgment matrix and weight coefficient results

	B_1	B_2	权重系数	一致性检验
B_1	1	1/4	0.20	$\lambda_{\max}=2.0$
B_2	4	1	0.80	$C_R=0<0.1$ 通过

表 10　准则层 B_1-C 判断矩阵及权重系数结果

Tab. 10　Criteria layer B_1-C judgment matrix and weight coefficient results

	C_1	C_2	权重系数	一致性检验
C_1	1	1/3	0.25	$\lambda_{\max}=2.0$
C_2	3	1	0.75	$C_R=0<0.1$ 通过

表 11　准则层 B_2-C 判断矩阵及权重系数结果

Tab. 11　Criterion layer B_2-C judgment matrix and weight coefficient results

	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	权重系数	一致性检验
C_3	1	1	5	1	5	3	4	0.260 2	
C_4	1	1	2	3	2	1	5	0.223 3	
C_5	1/5	1/2	1	1	3	1/3	1	0.086 2	
C_6	1	1/3	1	1	3	3	2	0.167 7	$\lambda_{\max}=7.797\ 1$ $C_R=0.097\ 7<0.1$ 通过
C_7	1/5	1/2	1/3	1/3	1	1/4	1/3	0.045 4	
C_8	1/3	1	3	1/3	4	1	3	0.148 8	
C_9	1/4	1/5	1	1/2	3	1/3	1	0.068 5	

表 12　各指标权重最终结果

Tab. 12　Finally determined weight for each indicator

指标	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9
权重	0.05	0.15	0.208 2	0.178 6	0.054 8	0.068 9	0.134 2	0.036 3	0.119

2.4　TOPSIS 评价方法

首先,根据各指标评价标准及各板块指标值的情况和数据,计算一个评价板块与最大值和最小值的距离,得出此评价板块的得分。然后,对各评价板块进行得分排序,得出评价结果,从而判断植被修复效果的好坏。具体步骤如下。

(1)指标正向化。使用倒数法将指标正向化,公式为

$$y_i = \frac{1}{x_i} \quad 。 \tag{10}$$

式中: y_i 为指标正向化数据; x_i 为评价指标数据。

(2)标准化处理。为保证结果的客观性,需要对原始数据进行标准化处理,公式为

$$y = \frac{x_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} x_i^2}} \quad 。(11)$$

式中: y 为指标标准化数据; x_i 为评价指标数据。

(3)计算最大值和最小值。构建由 n 个评价对象与 m 个评价指标(已经正向化)组成的标准化评价指标矩阵 $\boldsymbol{Z}$,其中 $\boldsymbol{Z}_{nm}$ 代表第 n 个评价对象的第 m 个指标值。最大值和最小值代表指标数值经过正向化以及标准化之后排序得到的最优和最劣组合,公式为

$$\boldsymbol{Z} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{Z}_{11} & \boldsymbol{Z}_{12} & \cdots & \boldsymbol{Z}_{1m} \\ \boldsymbol{Z}_{21} & \boldsymbol{Z}_{22} & \cdots & \boldsymbol{Z}_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \boldsymbol{Z}_{n1} & \boldsymbol{Z}_{n2} & \cdots & \boldsymbol{Z}_{nm} \end{bmatrix} \quad 。 \tag{12}$$

式中: $\boldsymbol{Z}$ 为新构建的判断矩阵。

分别找出最大值 $\boldsymbol{Z}^+$ 和最小值 $\boldsymbol{Z}^-$,公式为

$$\boldsymbol{Z}^+ = (\boldsymbol{Z}_1^+, \boldsymbol{Z}_2^+, \ldots, \boldsymbol{Z}_m^+,) = (\max\{\boldsymbol{Z}_{11}, \boldsymbol{Z}_{21}, \ldots \boldsymbol{Z}_{n1}\}, \max\{\boldsymbol{Z}_{12}, \boldsymbol{Z}_{22}, \ldots \boldsymbol{Z}_{n2}\}, \ldots, \max\{\boldsymbol{Z}_{1m}, \boldsymbol{Z}_{2m}, \ldots$$

$$\boldsymbol{Z}_{nm}\}) \quad , \tag{13}$$

$$\boldsymbol{Z}^{-} = (\boldsymbol{Z}_1^{-},\boldsymbol{Z}_2^{-},\ldots,\boldsymbol{Z}_m^{-},) = (\min\{\boldsymbol{Z}_{11},\boldsymbol{Z}_{21},\ldots\boldsymbol{Z}_{n1}\}, \min\{\boldsymbol{Z}_{12},\boldsymbol{Z}_{22},\ldots\boldsymbol{Z}_{n2}\},\ldots,\min\{\boldsymbol{Z}_{1m},\boldsymbol{Z}_{2m},\ldots \boldsymbol{Z}_{nm}\}) \quad 。 \tag{14}$$

式中：$\boldsymbol{Z}^{+}$为矩阵最大值；$\boldsymbol{Z}^{-}$为矩阵最小值。

(4)计算评价对象与最大值和最小值的距离，即最优理想解和最劣理想解。不同评价对象与最大值 $\boldsymbol{Z}^{+}$和最小值 $\boldsymbol{Z}^{-}$之间的最大距离和最小距离分别为 D_i^{+}、D_i^{-}，公式为

$$D_i^{+} = \sqrt{\sum_{j=1}^{m} w_j(\boldsymbol{Z}_j^{+} - \boldsymbol{Z}_{ij})^2}(i = 1,2,\ldots,n) \quad , \tag{15}$$

$$D_i^{-} = \sqrt{\sum_{j=1}^{m} w_j(\boldsymbol{Z}_j^{-} - \boldsymbol{Z}_{ij})^2}(i = 1,2,\ldots,n) \quad 。 \tag{16}$$

式中：W_j 为第 j 个指标的权重值；D_i^{+} 为最优理想解；D_i^{-} 为最劣理想解。

(5)得分计算。根据 TOPSIS 法计算与最大距离 D_i^{+} 的相对接近度 S_i，S_i 越接近于 1，说明修复效果越好。S_i 计算公式为

$$S_i = \frac{D_i^{-}}{D_i^{-} + D_i^{+}} \quad 。 \tag{17}$$

式中：S_i 为最终得分，D_i^{+} 为最优理想解，D_i^{-} 为最劣理想解。

3 综合评价结果及分析

3.1 评价结果

通过 TOPSIS 法对不同修复技术组合的排土场进行综合评价和排序，排序结果由高到低分别为 HL、WJM、TZY、JZT、MX(表 13)。在得到最优(劣)理想解之后，将各个指标最优(劣)理想解对应不同的评价板块发现：排名第一的 HL 评价指标中植被覆盖度、含水率、覆土厚度为最优理想解；排名第二的 WJM 评价指标中生长状况、土壤厚度、土壤 pH 值为最优理想解；排名第三的 TZY 评价指标中生长状况为最优理想解；排名第四的 JZT 评价指标中效益费用比、固碳效益、覆土厚度为最劣理想解；排名第五的 MX 评价指标中效益费用比、固碳效益土壤 pH 值为最劣理想解，含水率、覆土厚度、有机质含量仅次于最劣理想解。

表 13 评价结果排序

Tab. 13 Ranking of evaluation results

评价板块	D_i^{+}	D_i^{-}	S_i	效益等级
HL	0.168	0.242	0.590	1
MX	0.267	0.103	0.279	5
TZY	0.216	0.148	0.407	3
JZT	0.253	0.153	0.377	4
WJM	0.220	0.194	0.468	2

3.2 结果分析

根据评价结果，对排名靠前的技术组合板块进行分析。

(1)HL 技术组合。该板块位于汇隆煤矿排土场西南侧，主要措施为平整覆土 + 坡面整形 + 挡水围堰 + 条播技术，植被类型为沙打旺 + 草木犀。该板块综合评价得分为 0.59，排名第一。现场调查发现该板块经过多年工程修复，地质条件稳定，修建了挡水围堰，并且在平台上采用网格法种植，网格边缘均设置了 1 m 的平台，起到了一定的防风固土保墒的作用。上覆土壤相对比较疏松，厚度满足植物生长的需要，保水条件较好，植被物种的选择在初期对于水土的保持也是非常有效的。该板块种植的沙打旺和草木犀在土壤贫瘠的条件下能生长地很好，适应能力强，还具改良土壤的作用。通过 NVDI 值可以看出种植的沙打旺、草木犀覆盖度高，成活率好，生长状态好，固碳效益在评价板块中也排在前列，可以作为研究区露天开采煤矿排土场修复案例进行推广。

(2)WJM 技术组合。该板块位于魏家峁煤矿排土场北侧，主要措施为平整覆土 + 坡面整形 + 挡水围堰 + 乔草型植被，植被类型主要为油松 + 柳树 + 苜蓿 + 冰草 + 老芒麦。该板块综合评价得分为 0.468，排名第二。工程措施为土地平整后覆土，修建挡水围堰，在围堰上种植油松，防止土体滑落，还可以将降水汇聚于平台区域。植被修复方式为乔草型，排土场覆土后，在其周边种植成排的柳树，营造防护林，起到防风固沙的效果，平台上为苜蓿、冰草、老芒麦混播，可提高植物的多样性。在评价指标中，生长状态为评价板块中最好，植被修复效果良好，值得推广。

(3)TZY 技术组合。该板块位于厅子堰煤矿排土场南侧，主要措施为平整覆土 + 挡水围堰 + 坡面整形，植被类型为苜蓿 + 草木犀。该板块综合评价得分为 0.407，排名第三。结合现场调查来看，该板块挡水围堰边缘未设平台，水土有一定的流失，建

议增设排水设施,减少养分流失。植被多样性和植被覆盖度较低,修复效果次之。

(4)JZT 技术组合。该板块位于金正泰煤矿排土场西北侧,主要措施为平整覆土 + 挡水围堰 + 坡面整形,植被类型为油松 + 枣树 + 沙棘 + 紫花苜蓿。该板块综合评价得分为 0.377,排名第四。该板块植被配置固氮效益最高,经济效益最好,但植被生长状态欠佳,可相应地调整植被组合方式。

(5)MX 技术组合。该板块位于蒙祥煤矿排土场南侧,主要措施为平整覆土 + 挡水围堰 + 坡面整形 + 沙柳沙障 + 挡土墙排水沟,植被类型为油松 + 苜蓿 + 沙打旺。该板块综合评价得分为 0.279,排名第五。该板块成本较高,经济收益最低。结合现场调查来看,覆土厚度低,植被覆盖度一般。固碳效益低,植被配置可以增加豆科植物比例,增强生物固碳效应,进一步提升植被修复效果。

4　讨论

HL 板块选择的植被种植技术为机械条播,将土壤与种子拌匀,随后播种到坡面平台开垦的成行的沟内。条播技术便于管理,植被受光均匀,通风良好,利于成苗。植被类型选择成活率高、耐旱的植物,并且在这些先锋植物中还要选择固碳能力较强的植被,增加固碳效益。

WJM 板块选择乔草型种植模式,这种多层次、多树种的方式可以使树种相互促进,抵御害虫的侵害,同时充分利用土壤的空间,保护地力,使经济效益提高。选择合适的植被组合也很重要,因为在相同模式下,不同植被组合修复效果也会有差别。例如蒙祥煤矿排土场板块与魏家峁煤矿排土场板块模式相同,但是植被组合配置不理想,植被恢复效果一般。

合理地去开展实施修复工程,充分考虑修复的成本。施工布设要合理,质量把控要严格,只有经济适用型的修复模式才能得到更大范围的推广。

有机质含量与覆土厚度也存在一定的相关性,随着修复年限的增加,土壤中的有机质养分也会逐渐流失。并且,排土场边坡部分经雨水冲刷,水土大量流失,营养物质也会相应地随之流失。建议在边坡上不仅仅是设置沙障这样简单的工程措施,还要增加排水沟等排水措施。

AHP 与 TOPSIS 相结合的方法能够更加客观地做出评价,并且评价的结果与现场调查结果基本一致。

5　结论

(1)生态修复效果是一个复杂的、受多因素影响的对象,本文采用 AHP 法和 TOPSIS 法确定最终权重及综合评价结果,能够比较客观地对排土场生态修复效果进行定量评价,可为今后的矿山生态修复效果评价方法提供参考。

(2)通过 TOPSIS 法得到综合评价最终结果,对各个排土场修复板块综合得分进行排序: 排名第一的 HL 煤矿排土场技术组合综合评价得分为 0.59,主要植被措施为沙打旺 + 草木犀; 排名第二的 WJM 技术组合综合评价得分为 0.468,主要植被措施为油松 + 柳树 + 苜蓿 + 冰草 + 老芒麦; 排名第三的 TZY 技术组合综合评价得分为 0.407,主要植被措施为苜蓿 + 草木犀。通过对排名前三的技术组合进行分析,该地区目前较为合适的生态修复技术方法为: 工程措施采用平整覆土 + 挡水围堰 + 坡面整形 + 植被条播技术; 植被措施可以选用油松 + 柳树 + 沙打旺 + 草木犀 + 苜蓿 + 冰草 + 老芒麦。该方法可清楚地反应各排土场不同技术组合修复效果的好坏,从而根据各因子制定相应的修复对策。

(3)在排土场修复治理过程中,不同的植被组合会带来不同的生态效益,经过地形重塑、土壤重构、植被恢复可带来经济、生态效益双赢的良好效果,对促进生态环境发展具有重要意义,可为土地恢复工作提供参考。但是影响生态修复效果的因子可能存在其他方面,文中提到的相关因子存在局限性,今后希望可以建立一个更加完善的评价体系。

参考文献(References):

[1] 张琳,陆兆华,唐思易,等. 露天煤矿排土场边坡植被组成特征及其群落稳定性评价[J]. 生态学报,2021,41(14):5764 - 5774.
Zhang L,Lu Z H,Tang S Y,et al. Slope vegetation characteristics and community stability at different restoration years of open - pit coal mine waste dump[J]. Acta Ecologica Sinica,2021,41(14):5764 - 5774.

[2] 颜建东,李玥. 采煤活动对土地资源影响的现状及其可持续发展——以山西焦煤集团东曲煤矿为例[J]. 中小企业管理与科技(上旬刊),2019(8):56 - 57.
Yan J D,Li Y. Present situation of the influence of coal mining activities on land resources and its sustainable development:Taking

Dongqu coal mine of Shanxi coking coal group as an example[J]. Management & Technology of SME,2019(8):56 - 57.

[3] 汤银锁. 矿山地质灾害区的生态恢复治理研究[D]. 唐山:华北理工大学,2020.
Tang Y S. Study on Ecological Restoration and Management of Mine Geological Disaster Area[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology,2020.

[4] 董佳慧,牛瑞卿,亓梦茹,等. InSAR 技术和孕灾背景指标相结合的地灾隐患识别[J]. 地质科技通报,2022,41(2):187 - 196.
Dong J H,Niu R Q,Qi M R,et al. Identification of geological hazards based on the combination of InSAR technology and disaster background indicators[J]. Bulletin of Geological Science and Technology,2022,41(2):187 - 196.

[5] 王杨扬,赵中秋,原野. 露天煤矿复垦中生物多样性响应研究进展[J]. 中国矿业,2017,26(S1):148 - 153.
Wang Y Y,Zhao Z Q,Yuan Y. Research progress on biodiversity response in reclamation of open coal mines[J]. China Mining Magazine,2017,26(S1):148 - 153.

[6] 谭晓东,张紫昭,张利飞,等. 新疆哈巴河县某金属矿山地质环境保护与土地复垦治理措施[J]. 世界有色金属,2021(5):186 - 187.
Tan X D,Zhang Z Z,Zhang L F,et al. Geological environment protection and land reclamation measures of a metal mine in Habahe County,Xinjiang[J]. World Nonferrous Metals,2021(5):186 - 187.

[7] 李晓莹. 唐山铁尾矿植被恢复生态效益分析与评价[D]. 保定:河北农业大学,2014.
Li X Y. The Ecological Efficiency Analysis and Evaluation of Revegetation in Iron Tailings in Tangshan[D]. Baoding: Hebei Agricultural University,2014.

[8] 李鹏飞. 基于无人机遥感的排土(矸)场立地对植被盖度影响研究[D]. 北京:北京林业大学,2020.
Li P F. Influence Study of Sites on Vegetation Coverage in Dumps and Gangue Fields Based on UAV Remote Sensing Technology[D]. Beijing: Beijing Forestry University,2020.

[9] 张昕. 乌海、灵武排土(矸)场生态修复模式 LFA 评价研究[D]. 北京:北京林业大学,2020.
Zhang X. Study on LFA Evaluation of Ecological Restoration Models of Wuhai and Lingwu Disposal(waste) Fields[D]. Beijing: Beijing Forestry University,2020.

[10] 毕银丽,刘涛. 露天矿区植被协同演变多源数据时序分析——以准格尔矿区为例[J]. 煤炭科学技术,2022,50(1):293 - 302.
Bi Y L,Liu T. Time series analysis of multi - source data of coordinated evolution of vegetation in open - pit mining area: Taking Jungar Mining Area as an example[J]. Coal Science and Technology,2022,50(1):293 - 302.

[11] 李喜,殷坤龙,陈标典,等. 武汉白沙洲长江两岸岩溶塌陷易发性评价与地铁建设过程中的防治对策[J]. 地质科技通报,2020,39(6):121 - 130.
Li X,Yin K L,Chen B D,et al. Evaluation of susceptibility to karst collapse on both sides of the Yangtze River in Baishazhou, Wuhan and preventive measures in the process of metro construction[J]. Bulletin of Geological Science and Technology,2020,39(6):121 - 130.

[12] 赵玉灵. 基于层次分析法的矿山环境评价方法研究——以海南岛为例[J]. 国土资源遥感,2020,32(1):148 - 153.
Zhao Y L. Study and application of analytic hierarchy process of mine geological environment: A case study of Hainan Island[J]. Remote Sensing for Land & Resources,2020,32(1):148 - 153.

[13] 丁鸿浩,赖宁静,邓林昊,等. 基于 AHP - TOPSIS 最优组合赋权的闽侯县生态敏感性评价[J]. 中国城市林业,2022,20(3):94 - 101.
Ding H H,Lai N J,Deng L H,et al. Ecological sensitivity evaluation of Minhou county based on AHP - TOPSIS optimal combination weighting[J]. Journal of Chinese Urban Forestry,2022,20(3):94 - 101.

[14] Toebe M,Machado L N,Tartaglia F L,et al. Sample size for estimating mean and coefficient of variation in species of crotalarias[J]. Anais da Academia Brasileira de Ciências,90(2):1705 - 1715.

[15] Ayyoub H N,Khoo M B C,Saha S,et al. Multivariate coefficient of variation charts with measurement errors[J]. Computers & Industrial Engineering,2020,147:106633.

[16] Alaee N H,Mozafari A,Mirzaee M,et al. Fuzzy evaluation method for the identification of subsidence susceptibility in an underground mine (case study in Tabas coal mine of Iran)[J]. Natural Hazards,2019,99(2):797 - 806.

[17] Xing Y H,Li S,Liao J J,et al. Suitability evaluation of rural tourism based on AHP and fuzzy evaluation method[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,2019,267(3):032007.

[18] Cui X L. Coal mine flood risk analysis based on fuzzy evaluation method[J]. Journal of Physics Conference Series,2018,1176(4):042095.

[19] Cui X L. Coal mine flood risk analysis based on fuzzy evaluation method[J]. Journal of Physics Conference Series,2018,1176(4):042095.

[20] Xia P,Ying C Y. Research on the stability evaluation method of anchored slopes based on group decision making and matter element analysis[J]. Scientific Reports,2021,11(1):16588.

[21] Xie X F,Pu L J. Assessment of urban ecosystem health based on matter element analysis: a case study of 13 cities in Jiangsu province,China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health,2017,14(8):940.

[22] Wang Y S,Anderson N,Torgashov E. Selection of geophysical methods based on matter - element analysis with analytic hierarchy process[J]. Exploration Geophysics,2021,52(6):669 - 679.

[23] 季贵斌,梁力,赵颖. 高速公路边坡混播植被群落生态适应性综合评价[J]. 安全与环境学报,2016,16(6):360 - 365.
Ji G B,Liang L,Zhao Y. Evaluation for the ecological adaptability of the mixed vegetation group of highway slopes[J]. Journal of Safety and Environment,2016,16(6):360 - 365.

[24] 赵金召,张兆长,李艳晨,等. 基于层次分析法的矿山高陡岩

质边坡生态修复绿化效果评价研究[J]. 中国矿业,2022,31(4):80 – 85.
Zhao J Z,Zhang Z C,Li Y C,et al. Evaluation of ecological restoration and greening effect of mine high and steep rock slope based on analytic hierarchy process[J]. China Mining Magazine,2022,31(4):80 – 85.

[25] 韩琳,李永峰,巫长悦,等. 基于遥感生态指数的宝日希勒露天矿区生态修复效果评估[J]. 中国矿业,2022,31(4):54 – 61.
Han L,LI Y F,Wu C Y,et al. Evaluation of ecological restoration effect in Baorixile Open – pit Mine Area based on remote sensing ecological index[J]. China Mining Magazine,2022,31(4):54 – 61.

[26] 董飞洋. 露天煤矿排土场不同植被恢复措施对坡面水土流失的影响[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2021.
Dong F Y. Influence of Different Vegetation Restoration Measures on Soil and Water Loss on Slope of Open – pit Mine Dump[D]. Hohhot:Inner Mongolia Agricultural University,2021.

[27] 宫鹤忆. 黑岱沟露天煤矿排土场土壤保水性能和养分改良研究[D]. 上海:华东师范大学,2021.
Gong H Y. Study on Soil Water Holding Capacity and Nutrient Improvement of Dumping Site in Open Pit Coal Mine of Heidaigou[D]. Shanghai:East China Normal University,2021.

[28] 杨帆. 矿区外排土场生态修复及其环境价值评价[D]. 赣州:江西理工大学,2009.
Yang F. Ecological Restoration and Environmental Value Evaluation of Dump Outside Mining Area[D]. Ganzhou:Jiangxi University of Science and Technology,2009.

[29] 高俊华,刘莎莎,杨金中,等. 基于遥感的露天煤矿集中区地质环境灰关联评价——以准格尔煤田为例[J]. 国土资源遥感,2021,33(1):183 – 190.
Gao J H,Liu S S,Yang J Z,et al. Gray correlation evaluation of geological environment in the open – pit coal mine concentration area based on remote sensing: A case study of Zhungeer Coalfield[J]. Remote Sensing for Land & Resources,2021,33(1):183 – 190.

[30] 李潇,吴克宁,刘亚男,等. 基于生态系统服务的山水林田湖草生态保护修复研究——以南太行地区鹤山区为例[J]. 生态学报,2019,39(23):8806 – 8816.
Li X,Wu K N,Liu Y N,et al. Ecological protection and restoration of mountains – rivers – forests – farmlands – lakes – grasslands based on ecosystem services: Taking Heshan section of Southern Taihang as an example[J]. Acta Ecologica Sinica,2019,39(23):8806 – 8816.

[31] 高云峰,徐友宁,祝雅轩,等. 矿山生态环境修复研究热点与前沿分析——基于 VOSviewer 和 CiteSpace 的大数据可视化研究[J]. 地质通报,2018,37(12):2144 – 2153.
Gao Y F,Xu Y N,Zhu Y X,et al. An analysis of the hotspot and frontier of mine eco – environment restoration based on big data visualization of VOSviewer and CiteSpace[J]. Geological Bulletin of China,2018,37(12):2144 – 2153.

[32] 戴永久,上官微. 中国土壤有机质数据集[EB/OL]. (2021 – 04 – 19). https://data.tpdc.ac.cn/en/data/8ba0a731 – 5b0b – 4e2f – 8b95 – 8b29cc3c0f3a/.
Dai Y J,Shangguan W. Dataset of soil properties for land surface modeling over China[EB/OL]. (2021 – 04 – 19). https://data.tpdc.ac.cn/en/data/8ba0a731 – 5b0b – 4e2f – 8b95 – 8b29cc3c0f3a/.

Evaluation of ecological restoration effect of large waste dump in Xuejiawan – Longkou open – pit coal mine based on AHP – TOPSIS method

CHAI Chenhui, QIN Yueqiang, WANG Zhimin, SUN Yufei, LI Pengwei, XIN Kai, ZHANG Xin
(*Langfang Center for General Survey of Natural Resources*, *China Geological Survey*, *Hebei Langfang* 065000, *China*)

Abstract: Waste dump restoration is one of the key points restricting the breakthrough progress of mine ecological restoration. In order to further optimize the technical combination of waste dump ecological restoration, and support mine ecological restoration and green mine construction, the authors in this paper chose 5 waste dump sectors with different restoration technologies as the study case. Nine evaluation indexes in the categories of ecological benefit and economic benefit were selected and AHP and TOPSIS methods were used to construct a comprehensive evaluation system and determine the final weight and conduct comprehensive evaluation. The results showed that the optimal solution for waste dump restoration in the study area was using the engineering measures as flat soil covering + water retaining cofferdam + slope shaping + strip seeding technology, and the vegetation measures as willow + cladawang + grass luteus + alfalfa + ice grass + laomangmai. During the process of mine ecological restoration effect evaluation, using the qualitative and quantitative evaluation methods could better reflect the ecological restoration effect and provide support for the scientific evaluation of ecological restoration effect.

Keywords: open – pit working; waste dump; ecological restoration; comprehensive evaluation

(责任编辑: 刘丹)