

DOI: 10.20103/j.stxb.202403110490

武春丽, 侯晓磊, 杨建英, 赵廷宁, 邓雅元, 麻文章, 巩子涵, 曾文杰, 芦治源, 吴国伟. 宁东煤炭基地矸石山生态修复技术模式评价. 生态学报, 2025, 45(1):461-474.

Wu C L, Hou X L, Yang J Y, Zhao T N, Deng Y Y, Ma W Z, Gong Z H, Zeng W J, Lu Z Y, Wu G W. Evaluation of ecological restoration technology model of Gangue Mountain in Ningdong Coal Base. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(1):461-474.

宁东煤炭基地矸石山生态修复技术模式评价

武春丽¹, 侯晓磊¹, 杨建英^{1,2,3,*}, 赵廷宁^{1,2,3}, 邓雅元¹, 麻文章¹, 巩子涵¹, 曾文杰¹, 芦治源¹, 吴国伟⁴

1 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083

2 北京林业大学林业生态工程教育部工程研究中心, 北京 100083

3 北京林业大学国家林业和草原局水土保持重点实验室, 北京 100083

4 宁夏大学, 银川 750021

摘要: 针对西北干旱煤炭矿区生态环境问题识别不清, 生态修复技术模式针对性不强, 措施单一等问题, 以宁东煤炭基地 6 座煤矸石山及周边自然地为研究对象, 运用主成分分析法进行立地类型划分, 运用复合模糊物元熵权法从土壤改良效果、植被恢复效果和技术措施状况(技术措施完整性和经济性)3 个方面共 19 项指标构建评价体系, 确定各指标权重及进行综合评价, 筛选不同立地类型对位生态修复技术模式, 旨在为西北干旱区生态修复提供技术支撑。结果表明:(1) 坡向、坡度和土层厚度为立地类型划分主导因子, 据此将矸石山分厚层急阴坡、中层斜阴坡、厚层斜阴坡、薄层急阳坡、中层斜阳坡、厚层斜阳坡、中层斜半阴半阳坡、厚层斜半阴半阳坡、薄层急半阴半阳坡及厚层平台 9 种立地类型;(2) 中层斜半阴半阳坡立地类型, 推荐“砾石沙障”模式或“活体沙障”模式; 厚层急阴坡、薄层急阳坡立地类型, 推荐“撒播草籽+挡矸墙+环保树脂网工程护坡+排水沟+微喷”模式; 中层斜阴坡、中层斜阳坡立地类型, 推荐“撒播草籽+挡矸墙+排水沟+草方格”模式; 厚层平台立地类型, 推荐“植苗造林+草方格+截水沟”模式。

关键词: 煤炭矿区; 煤矸石山; 立地类型; 技术模式; 复合模糊物元熵权法

Evaluation of ecological restoration technology model of Gangue Mountain in Ningdong Coal Base

WU Chunli¹, HOU Xiaolei¹, YANG Jianying^{1,2,3,*}, ZHAO Tingning^{1,2,3}, DENG Yayuan¹, MA Wenzhang¹, GONG Zihan¹, ZENG Wenjie¹, LU Zhiyuan¹, WU Guowei⁴

1 College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Engineering Research Center of Forestry Ecological Engineering, Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

3 Key Laboratory of Soil and Water Conservation, National Forestry and Grassland Administration, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

4 Ningxia University, Yinchuan 750021, China

Abstract: For the northwest arid coal mining area ecological environment problem identification is not clear, ecological restoration technology model is not targeted, a single measure and other issues, this study to Ningdong coal base six Gangue Mountain and the surrounding natural land for the object of study, the use of principal component analysis method for the division of the stand type, the use of composite fuzzy object entropy weight method from the effect of soil improvement, the effect of vegetation restoration and the status of the technical measures (technical measures integrity and using the composite

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2022BG02001)

收稿日期: 2024-03-11; 网络出版日期: 2024-09-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jyyang@bjfu.edu.cn

fuzzy entropy weight method, we constructed an evaluation system with 19 indicators in 3 aspects, determined the weights of each indicator and comprehensive evaluation, and screened the ecological restoration technology models of different land types, aiming to provide technical support for the gangue mountain in the Northwest Arid Zone. The results show that: (1) Slope direction, slope gradient and soil thickness are the dominant factors in the classification of land types, according to which the gangue mountain is classified into four land type groups: yin slope, yang slope, semi-yin and semi-yang slope and platform land type groups, and nine types of land types: thick sharp yin slope, middle sloping yin slope, thick sloping yin slope, thin sharp yang slope, middle sloping yang slope, thick sloping yang slope, middle sloping semi-yin and semi-yang slope, thick sloping semi-yin and semi-yang slope, thin sharp semi-yin and semi-yang slope and thick layer. Platform elevation type; (2) for the land type of middle-layer sloping semi-yin and semi-positive slope, the recommended mode is “gravel sand barriers” or “living sand barriers”; the mode of thick-layer rapid sand barriers is “sand barriers”; and the mode of thick-layer rapid sand barriers is “sand barriers”. “mode; thick layer acute yin slope, thin layer acute yang slope land type, recommended” sowing grass seed+gangue wall+environmental protection resin network engineering slope protection+drainage ditch+micro-spraying“ mode; middle layer sloping yin slope, middle layer slope land type, recommended” sowing grass seed+gangue wall+drainage ditch+grass square“ mode; middle layer sloping yin slope, middle layer slope land type, recommended” sowing grass seed+gangue wall+drainage ditch+grass square“ mode. Drainage ditch+grass square lattice” mode; thick layer platform land type, recommended “seedling planting+grass square lattice+intercepting water ditch” mode.

Key Words: coal mining area; coal gangue mountain; stand type; technology model; composite fuzzy object element entropy method

矿产资源是我国国民经济的重要组成部分,我国矿产资源开采量和消费量均居世界前列,矿产开发在为经济社会发展做出巨大贡献的同时,也带来了一系列的社会环境问题^[1]。例如开采过程中会产生较多的煤矸石固体废弃物^[2],其堆积形成的煤矸石山会占压土地、破坏植被与生态环境、污染土壤、水体及空气。据中国能源报显示,截至 2021 年,我国规模较大的煤矸石山数量达 2600 余座,累计堆存煤矸石 60 亿—70 亿 t,且仍以每年 3 亿 t 以上的速度持续增加^[3]。因此,对矸石山进行生态修复已经成为目前研究的重点和难点问题^[4]。

党的十八大以来,生态文明建设被提升到前所未有的高度,废弃矿山生态修复成为我国生态文明建设的重要任务^[5]。为解决矸石开采及堆放产生的一系列问题,政府投入了巨大的资金,根据矿山生态系统退化及被破坏现状,采取了诸如地形重塑技术、坡面防护技术、植被重建技术及后期养护技术等一系列有针对性的技术措施^[6],但一些地区一味追求“绿色”而过度修复,忽略了“因害设防、因地制宜”原则,造成了资源的浪费,要想改变这种现状,对矸石山进行科学分类是非常有必要的。不同立地类型区限制因子差异较大,需要采取的修复措施也会有所不同,对研究区进行科学分类,依据不同立地特征有针对性地采取相应的技术措施,可以极大地提高修复效益。朱新雨对高寒露天煤矿进行立地划分,调查分析不同立地类型适宜植物种,为后期植被重建提供了依据^[7]。张灵等对露天煤矿进行立地类型划分,分析不同立地类型立地质量,旨在为后续生态修复技术的选择提供依据^[8]。然而,只进行矸石山生态修复,不注重后期效果监测是行不通的。评价指标体系是进行后期效果监测的重要环节,是判别生态修复合理与否的关键,它是由若干个相互联系的指标构成的有机体,是将抽象研究对象根据其本身的某一方面属性和特征转化为具有行为化、可操作化的结构^[9]。但截至目前,还没有形成一套普遍适用于大多数地区的生态修复体系,所以构建一套适用于西北干旱矿区及相似立地的生态修复技术模式评价指标体系对于后期不同立地类型对位生态修复技术选择具有重要意义。近几十年来,国内外学者为实现预期目标,构建了较多评价体系,但不同学科、不同区域、不同学者选用的评价指标和建立的评价体系不同^[10]。如 Bradshaw 从可持续性、抵御入侵、生产力、营养保持力及生物间产生相互作用

五个方面提出了生态修复的评价标准^[11];李武斌^[12]从生物多样性、矿区生态安全与稳定、矿区生态修复效益等方面进行修复效果评价;李全生等^[13]从保水保土、土壤改良重构、植被恢复及景观功能 4 方面构建评价体系,筛选露天矿排土场生态恢复关键技术。综上可知,立地划分及后期监测是矿山生态修复不可或缺的 2 大环节,但目前大部分研究只针对其中某一方面进行研究,很少将二者联系起来,关于立地类型对位生态修复技术模式筛选的研究更是鲜而有之。基于以上问题及需求,本研究通过前期资料收集及现场调查,探究西北干旱煤炭矿区植被恢复胁迫因子,进行立地类型划分。以不同立地类型为单元,运用复合模糊物元熵权法开展矿区现有生态修复技术模式评价,筛选不同立地类型对位生态修复技术模式。

1 研究内容与方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏回族自治区东部灵武市宁东煤炭基地,位置如图 1 所示,地理坐标为 106°21'39"—106°56'34"E、37°04'48"—38°17'41"N,为中温带干旱半荒漠气候,干旱少雨,降水集中在 7—9 月,多年平均降水量为 206.2—255.2 mm,多年平均气温 8.8 ℃,水源稀缺且矿化程度较高,无法被有效利用^[14]。风力资源丰富,季风季节显著,且主要集中在春秋两季,主导风向为北风及西北风,春季偶有沙尘暴天气。区域内土壤类型主要有风沙土、灰钙土和少量新积土,土壤结构较差、养分含量低^[15],土壤侵蚀主要以风蚀和水蚀为主。植被以旱生或超旱生灌木、半灌木及草本为主^[16],其抗逆性、耐旱能力强,主要植物种有侧柏(*Platycladus orientalis*)、黑沙蒿(*Artemisia ordosica*)、柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、苦豆子(*Sophora alopecuroides*)、猫头刺(*Oxytropis aciphylla*)及雾冰藜(*Grubovia dasyphylla*)等。研究区煤炭资源丰富,目前已探明储量约 273 亿 t,远景储量高达 1400 亿 t,主要包括优质动力煤和化工用煤,但煤炭开采加工可能带来环境压力,需强化环保措施,确保经济与环境协调发展。

1.2 研究方法

1.2.1 样地布设

2023 年 8 月—10 月在宁夏回族自治区灵武市宁东煤炭基地进行了为期 2 个月的外业调查,选取宁东煤炭基地具有代表性、治理年限为 3—5 年的梅花井、羊场湾、石槽村、麦垛山、枣泉和灵新 6 座煤矸石山及周边自然地进行调查和数据采集(各矿区基本情况见表 1)。每个矿依据不同微地形(坡面、平台)、坡度(平台 0—5°、斜坡 5°—25°、陡坡 25°—33°、急坡 33°—45°)、坡向(阴坡、阳坡、半阴半阳坡)、土层厚度、海拔高度以及土壤质地等选择海拔高度为 1111.70—1376.90 m、坡度为 0—42°、坡向为 -1(平台)和 0—360°、土壤硬度为 11.55—45.36、覆土厚度为 30—100 cm、坡长 16.30—48.78 m、土壤质地砂土和砂壤土、容重为 1.40—1.74 g/cm³的具有代表性的样地 36 个。除此之外,还要调查不同矿区不同立地条件下的生态修复技术的完整性(研究区是否布设固土技术、截排水技术、栽植技术、养护技术)和经济性(工程措施成本、建植成本、养护成本)等。

采用“样方法”对各样地(图 1)进行调查,根据具体地形条件,设置乔木样方规格 20 m×20 m 或 10 m×10 m,每个乔木样方内设置 5 个 2 m×2 m 的灌木样方,5 个 1 m×1 m 的草本样方^[17],对样方内的基本情况进

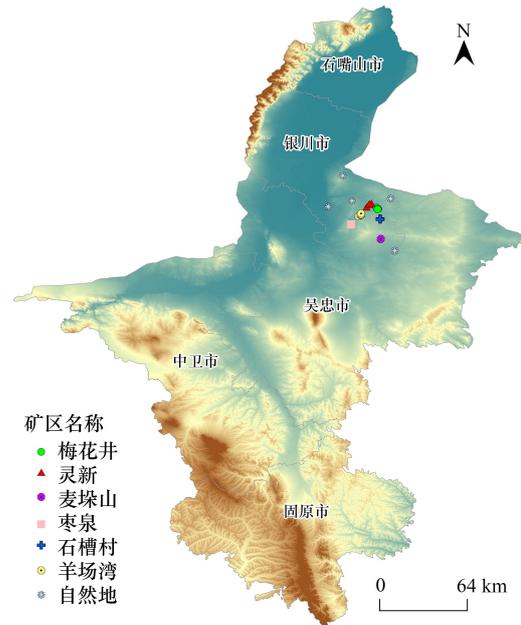


图 1 研究区位置图

Fig.1 Location map of the study area

行调查。乔木记录其名称、高度、株数、胸径、冠幅等;灌木样方记录其名称、高度、株数、盖度等;同时记录经纬度、海拔高度、坡向、坡度等环境特征。

表 1 各矿区基本情况表

Table 1 The basic situation of each mining area

排矸场名称 The name of the dumping site	治理年限 Years of treatment/a	开采方式 Mining methods	堆放位置 Stacking location	修复面积 Rehabilitation area/hm ²	海拔高度 Altitude/m	位置坐标 Location coordinates	植被组成 Vegetation composition
梅花井	3	地下开采	采空区	14.70	1270.90—1323.30	38°1'55"N 106°42'10"E	侧柏、酸枣、猪毛菜、紫花苜蓿、藜、虎尾草、稷、雾冰藜、秋英、拂子茅及红砂等
灵新	5	地下开采	采空区	4.00	1281.80—1299.00	38°4'8"N 106°39'34"E	柠条锦鸡儿、紫花苜蓿、雾冰藜、沙地旋覆花、白茎盐生草、猫头刺、蒙古虫实及油蒿等
麦垛山	4	地下开采	原始地貌	8.75	1346.70—1376.90	37°49'54"N 106°43'17"E	樟子松、乳苣、侧柏、新疆杨、拂子茅及芦苇等
枣泉	3	地下开采	原始地貌	15.41	1322.10—1339.30	37°55'43"N 106°31'28"E	红花多枝柽柳、柠条、杨柴、芦苇、茵陈蒿及油蒿等
石槽村	3	地下开采	采空区	5.87	1322.10—1339.30	37°55'43"N 106°42'56"E	侧柏、黄花蒿、雾冰藜、藜、猫头刺、沙地旋覆花、紫花苜蓿、虎尾草及蒙古虫实等
羊场湾	4	地下开采	原始地貌	10.04	1319.40—1344.00	37°58'54"N 106°34'29"E	柠条、油蒿、猫头刺、草木樨状黄芪、狗尾草、鹅绒藤、蒙古虫实及白茎盐生草等

1.2.2 植被与土壤样品采集

样地布设结束后,通过无人机拍摄样地照片,经软件处理得出植被盖度。植被地上生物量采用收获法将样方内地上部分的植物齐地面刈割,除去黏附的土壤、砾石等杂质装入密封塑料袋中带回实验室,在 85℃ 恒温箱内烘干至恒重,测定地上生物量^[18]。

用 5 点取样法对各样地进行土壤分析样品采集,按 0—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm 分层取土,每层 3 个重复,装入塑封袋内带回实验室后置于阴凉处风干后过筛,去除石子、植物根系,用于测定土壤化学性质。取环刀样时,要将地表的枯枝落叶进行剥离,使土层裸露,用环刀顺着土层方向采集土壤剖面样品,同一个剖面每层取 3 个重复,以便后期计算土壤容重、孔隙度、饱和含水量、持水量等物理性质。

1.2.3 土壤理化性质测定方法

土壤容重、孔隙度、饱和含水量、持水量等物理性质通过环刀法进行测定;土壤团聚体通过激光粒度仪测定;全氮含量采用半微量凯氏定氮法测定;全磷含量采用 NaOH 熔融钼锑抗比色法测定;全钾含量采用氢氧化钠火焰光度法测定;有机碳含量采用重铬酸钾稀释热法测定。

1.3 立地类型划分

研究区位于宁夏回族自治区宁东煤炭基地,属于中温带干旱半荒漠气候,气候条件相似,因此不考虑气候条件的影响。本文将大尺度地形地貌与土壤特征结合,初步选取海拔高度、坡度、坡向、土壤质地、土层厚度、土壤养分等多方面指标,进行实地调查。采用主成分分析法筛选该区域主导因子,进行立地类型划分。因子分级参照 GB/T38360—2019《裸露坡面植被恢复技术规范》以及实地调查情况,主要影响因子分级标准如表 2 所示:

1.4 生态修复技术模式评价体系

1.4.1 评价体系构建

从土壤改良效果、植被恢复效果、技术措施状况三个方面选取指标,构建评价体系(图 2)。土壤改良效果层包括土壤容重、土壤毛管持水量、土壤总孔隙度、PH、土壤碱解氮、速效磷、速效钾、土壤有机质和土壤团聚体 9 个指标;植被恢复效果层包括植被覆盖度、群落层次结构、物种数、地上生物量、生物多样性指数以及均匀

度指数 6 个指标;技术模式状况层包括技术完整性和经济性(工程措施成本、建植材料成本、养护成本)4 个指标。

表 2 主要立地因子分级标准

Table 2 Grading criteria for main site factors

立地因子 Site factors	分级标准 Grading criteria			
	1	2	3	4
土壤质地 Soil texture	壤土	砂土		
坡向 Slope direction	阴坡 0—45°, 315—360°	半阴半阳坡 45—135°, 225—315°	阳坡 135—225°	
土层厚度 Soil thickness	厚层 >60cm	中层 (30, 60]	薄层 ≤30	
坡度 Slope	平台 0—5°	斜坡 5—25°	陡坡 25—33°	急坡 33—45°
海拔 Altitudes	低海拔 <500m	中海拔 500—2000m	中高海拔 2000—3500m	高海拔 >3500m

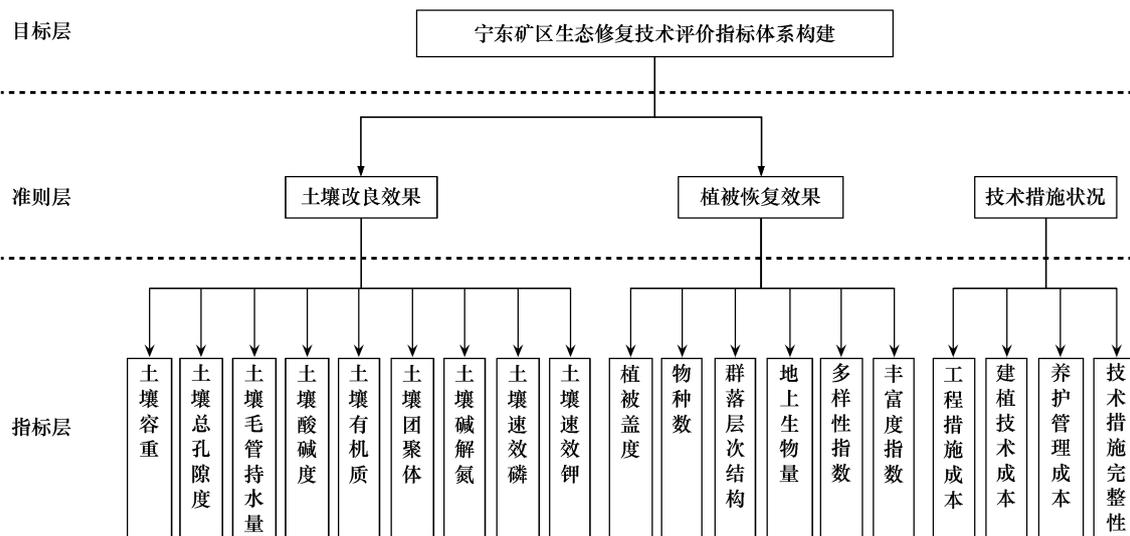


图 2 评价指标体系

Fig.2 Evaluation index system

1.4.2 复合模糊物元-熵权法

熵权法考虑了各指标数据的分布情况和不确定性,能够综合考虑数据的多样性;通过数据本身的特性计算权重,可以有效避免主观因素对权重的影响;不要求指标之间满足线性关系,适用范围广,可以处理非线性的多指标评价问题。模糊物元法能够处理指标之间存在模糊性、不确定性的情况,更适用于实际问题中存在的模糊不清晰的情形;能够较好地处理指标之间的关联性,对于关联性较强的指标有较好的适用性;能够通过模糊集合和物元的联合运用,更好地模拟实际问题,提高了综合评价的适用性和准确性。

(1) 复合模糊物元

1) 模糊物元与复合模糊物元

在物元分析中,物元 $R(M, c, x)$ 由事物的名称 M 以及它的特征 c 和量值为组成。如果给定事物 M , 由 n 个特征及其相对应的模糊值, 那么这 m 个 n 维模糊物元即可构成复合模糊物元 R_{mn} , 具体公式如下:

$$R_{mn} = \begin{bmatrix} & M_1 & \cdots & M_m \\ c_1 & x_{11} & \cdots & x_{m1} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ c_n & x_{1n} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

2) 根据从优隶属度原则,描述各项评估指标相对应的模糊量值的隶属程度。

越大越优型指标(正向指标):

$$u_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \quad (2)$$

越小越优型指标(逆向指标):

$$u_{ij} = \frac{\max x_{ij} - x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \quad (3)$$

式中, u_{ij} 为第*i*个类型第*j*个指标对应的量值; $\max x_{ij}$ 、 $\min x_{ij}$ 为*i*类型第*j*个指标所对应的所有量值中的最大值和最小值。 $\min x_{ij}$ 由此可构建从优隶属度模糊物元 R'_{mn}

$$R'_{mn} = \begin{bmatrix} & M_1 & M_2 & \cdots & M_m \\ c_1 & u_{11} & u_{21} & \cdots & u_{m1} \\ c_2 & u_{12} & u_{22} & \cdots & u_{m1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_n & u_{1n} & u_{2n} & \cdots & u_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

3) 标准模糊物元和差平方复合模糊物元

R'_{mn} 中各指标的从优隶属度中的最大值或最小值建立标准模糊物元 R_{0n} 。如果标准模糊物元与从优隶属度模糊物元中的各项指标差的平方为 Δ_{ij} ,即 $\Delta_{ij} = (\mu_{0j} - \mu_{ij})^2$,那么组成差平方复合模糊物元 R_{Δ} ,可表示为:

$$R_{\Delta} = \begin{bmatrix} & M_1 & M_2 & \cdots & M_m \\ c_1 & \Delta_{11} & \Delta_{21} & \cdots & \Delta_{m1} \\ c_2 & \Delta_{12} & \Delta_{22} & \cdots & \Delta_{m1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_n & \Delta_{1n} & \Delta_{2n} & \cdots & \Delta_{mn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

(2) 熵权法赋权

1) 构建 m 个评价对象 n 个评价指标的原始判断矩阵 R

$$R = (x_j)_{mn} \quad (i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots,n) \quad (6)$$

2) 将判断矩阵进行归一化处理得到归一化判断矩阵 A 。

正向指标

$$a_{ij} = \frac{r_{ij} - \min}{\max - \min} \quad (7)$$

逆向指标

$$a_{ij} = \frac{\max - r_{ij}}{\max - \min} \quad (8)$$

式中, a_{ij} 为 r_{ij} 进行归一化之后的数据, $a_{ij} \in [0,1]$ 。

3) 计算指标熵值

$$H_j = -\frac{1}{\ln m} \left(\sum_{i=1}^m f_{ij} \ln f_{ij} \right) \quad (9)$$

其中

$$f_{ij} = \frac{1 + a_{ij}}{\sum_{j=1}^n (1 + a_{ij})} \tag{10}$$

4) 计算指标熵权 W

$$w_j = \frac{1 - H_j}{n - \sum_{j=1}^n H_j} \tag{11}$$

式中, $\sum w_j = 1, w_j \geq 0$

5) 欧式贴近度及综合评价

贴近度 ρ_{Hi} 表示样本与标准样本的相互接近程度, 值越大表示越接近最优值:

$$\rho_{Hi} = 1 - \sqrt{\sum_{i=1}^m w_i \Delta_{ij}} \tag{12}$$

1.5 数据处理与分析

使用 Excel 2010 进行数据统计, SPSS 25.0 对数据进行相关性、主成分分析, Python 对构建的评价指标体系中的各指标进行综合评分。

2 结果与分析

2.1 排矸场立地类型划分

根据 KMO 值和 Bartlett 检验结果(表 3)显示, KMO 为 0.605, 满足进行主成分分析大于等于 0.6 的基本要求, 适合进行主成分分析。总方差解释(表 4)表明, 前 3 个主成分的累计方差率为 81.225%, 基本包含了全部指标所具有的主要信息。

表 3 KMO 和 Bartlett 检验结果
Table 3 KMO and Bartlett test results

KMO 和 Bartlett 特检验 KMO and Bartlett test		
KMO 取样适切性量数。 KMO number of sampling suitability measure.		0.605
巴特利特球形度检验 Bartlett's test of sphericity	近似卡方 自由度	23.475 10.000
	显著性	0.009

表 4 总方差解释

Table 4 Comoander bartletterst

成分 Ingredients	初始特征值 Initial eigenvalues			提取载荷平方和 Extract the sum of squares of the load		
	总计 Total	方差百分比/% Variance percentage	累积百分比/% Cumulative percentage	总计 Total	方差百分比/% Variance percentage	累积百分比/% Cumulative percentage
1	2.066	41.317	41.317	2.066	41.317	41.317
2	1.233	24.663	65.980	1.233	24.663	65.980
3	0.762	15.246	81.225	0.762	15.246	81.225
4	0.501	10.020	91.246			
5	0.438	8.754	100.000			

根据主成分分析-成分矩阵(表 5)显示, 在第一主成分中, 坡向和坡度系数最大; 在第二主成分中, 土壤质地和海拔高度系数最大; 在第三主成分中, 土层厚度和坡度系数最大。

表 5 成分分析矩阵

Table 5 Component analysis matrix

	成分 Ingredients				成分 Ingredients		
	1	2	3		1	2	3
坡向 Slope direction	0.769	0.229	-0.315	土壤质地 Soil texture	0.334	0.836	0.013
坡度 Slope	-0.746	0.241	0.442	海拔高度 Altitude	0.585	-0.635	0.216
土层厚度 Soil thickness	0.681	0.141	0.649				

提取方法: 主成分分析法, 提取了 3 个成分

土壤是植物生长发育的主要场所,研究区地处表土资源稀缺的矸石山,其上覆土厚度对植物生长发育具有重要影响;太阳辐射是植物进行光合作用的必要条件,不同坡向上的植物种接收太阳光的程度不同,进而对其上植物的配置有一定影响;坡度会使土壤与水分在重力的作用下,由相对较高的区域流向相对低的区域,造成水分和土壤分布不均,影响其上植被的生长,使贫瘠的地方越来越贫瘠,造成恶性循环。结合本矿区的实际情况及成分分析矩阵,研究区矸石山客土土源差异较小,土壤质地大多为砂土,海拔高度差异在 150m 左右,相差不大。因此选择坡向、坡度和土层厚度这 3 个因子成分作为该样地特征信息的主成分。

基于以上分析,可以得出宁东煤炭基地土层厚度、坡度和坡向是主要影响因素。依据立地类型划分原则,在“土层厚度+坡度+坡向”主导因子组合命名及实地调查的基础上,进行立地类型划分(各立地类型实景图见图 3),具体立地类型划分结果见表 6:

表 6 立地类型划分结果
Table 6 Site type classification results

编号 Number	立地类型 Site type	样地编号 Plot number	立地特征 Terrain characteristics
1	薄层急半阴半阳坡	1	位于矸石山半阴半阳坡,土层厚度在 0—40cm,坡度在 33—45°,为急坡
2	厚层急阴坡	3、8、10	位于矸石山阴坡,土层厚度大于 60cm,坡度在 33—45°,为急坡
3	薄层急阳坡	5、11	位于矸石山阳坡,土层厚度在 0—40cm,坡度在 33—45°,为急坡
4	中层斜阴坡	14、30	位于矸石山阴坡,土层厚度在 40—60cm,坡度在 25—33°,为斜坡
5	中层斜阳坡	16、31	位于矸石山阳坡,土层厚度在 40—60cm,坡度在 25—33°,为斜坡
6	厚层斜阴坡	18	位于矸石山阴坡,土层厚度大于 60cm,坡度在 25—33°,为斜坡
7	厚层斜阳坡	19	位于矸石山阳坡,土层厚度大于 60cm,坡度在 25—33°,为斜坡
8	中层斜半阴半阳坡	20、21、22、23、24、25、26	位于矸石山半阴半阳坡,土层厚度在 40—60cm,坡度在 25—33°,为斜坡
9	厚层平台	7、12、13、15、17、2、4、6、 927、28、29	位于排矸场顶部,土层厚度为 40—60 cm,坡度在 0—5°,为平台

2.2 不同立地类型对位生态修复技术模式评价

2.2.1 评价指标综合权重

用熵权法通过式(9)、(10)和(11),计算各指标熵值和权重,结果如表 7 所示:

表 7 各指标权重
Table 7 Weights of each indicator

准则层 Criterion layer	指标层 Indicator layer	熵值 Entropy	权重 Weight
土壤改良效果 Soil improvement effects	土壤容重	7.8340	0.0575
	土壤毛管持水量	7.1270	0.0523
	土壤孔隙度	7.5140	0.0552
	PH	7.9710	0.0585
	碱解氮	7.7680	0.0570
	速效磷	7.9600	0.0584
	速效钾	7.3090	0.0537
	有机质	9.3260	0.0685
植被恢复效果 Vegetation restoration effects	植被盖度	8.7210	0.0640
	群落层次结构	7.9710	0.0585
	地上生物量	8.4120	0.0618
	Shannon-Wiener 多样性指数	8.3890	0.0616
	植物种数	8.7790	0.0645
	Pielou 均匀度指数	6.9430	0.0510
技术措施状况 Platform stand type group	技术措施完整性	4.8520	0.0356
	工程措施成本	7.1540	0.0525
	建植成本	6.0450	0.0444
	养护成本	6.1390	0.0451

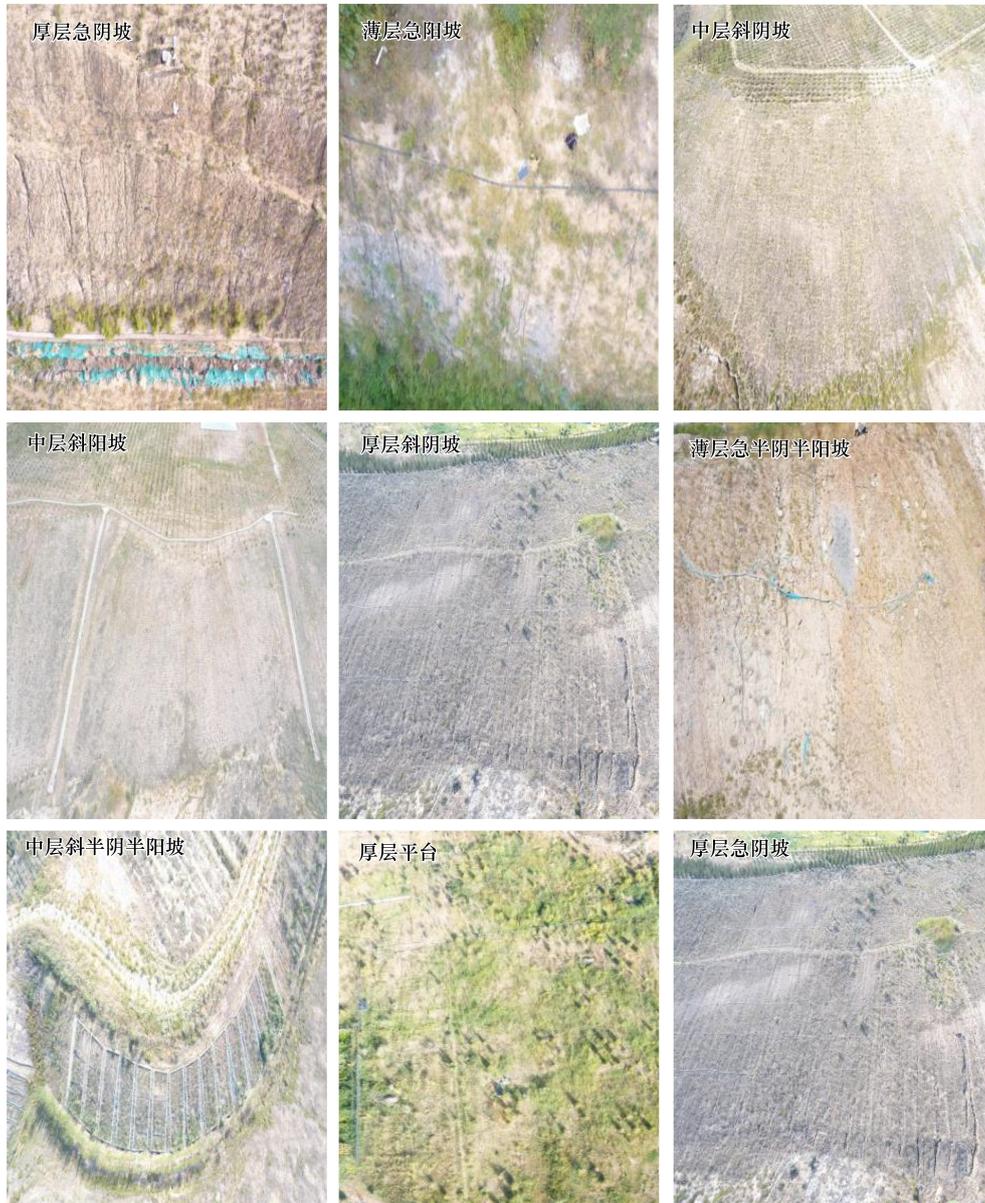


图3 各立地类型实景图

Fig.3 Live view of each stand type

权重可以反映各指标对评价过程的影响程度,权重越大,其波动对结果的影响就越大。由表7可以看出,各指标权重相对较大的有:有机质(0.0685)、物种数(0.0645)、植被盖度(0.0640)、地上生物量(0.0618)及Shannon-Wiener多样性指数(0.0616),各立地类型对位技术下的这些指标变化明显。权重相对较小的指标有:技术措施完整性(0.0356)、建植成本(0.0444)、养护成本(0.0451)以及Pielou均匀度指数(0.0510)。土壤改良效果中,有机质含量权重(0.0685)最大,土壤毛管持水量权重(0.0523)最小;植被恢复效果中,物种数量权重(0.0645)最大,Pielou均匀度指数权重(0.0510)最小;技术措施状况中,工程措施成本权重(0.0525)最大,技术措施完整性权重(0.0356)最小。综上所述,不同立地类型对位生态修复技术模式下土壤质量、植被生长状况变化相对较为明显,技术措施较为完整,每平方米花费的金额差距不大。

2.2.2 复合模糊物元熵权法评价结果分析

通过式(12)对不同立地类型对位生态修复技术模式进行评价,旨在筛选适宜西北干旱区不同立地类型

下的生态修复技术模式,各立地类型评价结果如表 8 所示:

表 8 不同立地类型对位生态修复技术模式评价结果

Table 8 Evaluation results of different site types of aligned ecological restoration technology models

立地类型组 Stand type group	立地类型 Site type	技术模式 Technical mode	样地编号 Plot number	欧式贴合度 European fit	排序 Sort
阴坡立地类型组 Shaded slope terrace type group	厚层急阴坡	撒播草籽+挡矸墙+截水沟土坎+微喷	3	0.3560	3
		撒播草籽+挡矸墙+环保树脂网工程护坡+排水沟+微喷	8	0.4440	2
		撒播草籽+挡矸墙+环保树脂网工程护坡+排水沟+微喷	10	0.4520	1
	中层斜阴坡	撒播草籽+挡矸墙+排水沟+微喷	14	0.3550	2
		撒播草籽+挡矸墙+排水沟+草方格	30	0.3960	1
		厚层斜阴坡	植苗造林+筑土堰+滴灌	18	0.3860
阳坡立地类型组 Sunny slope stand type group	薄层急阳坡	自然地	32	0.4980	-
		撒播草籽+挡矸墙+截水沟土坎+微喷	5	0.4610	2
		撒播草籽+挡矸墙+环保树脂网工程护坡+排水沟+微喷	11	0.4700	1
	中层斜阳坡	撒播草籽+挡矸墙+排水沟+微喷	16	0.4070	2
		挡矸墙+排水沟+撒播草籽+草方格	31	0.4640	1
		厚层斜阳坡	植苗造林+筑土堰+滴灌	19	0.4020
半阴半阳坡立地类型组 Semi-shaded, semi-sunny slope stand type group	中层斜半阴半阳坡	自然地	33	0.3960	-
		撒播草籽+草帘覆盖+生态袋+滴灌	20	0.3967	7
		撒播草籽+草帘覆盖+生态棒+滴灌	21	0.4125	6
		撒播草籽+草帘覆盖+铁丝石笼+滴灌	22	0.5356	4
		撒播草籽+草帘覆盖+砾石沙障+滴灌	23	0.5725	1
		撒播草籽+草帘覆盖+活体沙障+滴灌	24	0.5535	3
		撒播草籽+草帘覆盖+麦草沙障+滴灌	25	0.5283	5
	撒播草籽+草帘覆盖+普通风沙土+灌草籽+滴灌	26	0.5724	2	
	厚层斜半阴半阳坡	植苗造林+筑土堰+滴灌	19	0.4321	1
	薄层急半阴半阳坡	撒播草籽+挡矸墙+截水沟土坎+微喷	1	0.4156	1
平台立地类型组 Platform stand type group	厚层平台	自然地	34	0.4321	-
		撒播草籽+微喷	7	0.3160	5
		植苗造林+草方格+截水沟	12、13	0.4910	1
		撒播草种+植苗造林+排水沟+滴灌	15	0.4440	2
		植苗造林+筑土堰+滴灌	17	0.4080	4
		植苗造林+撒播草种+滴灌	2、4、6、9 27、28、29	0.4200	3
自然地	35	0.5146	-		

在中层斜半阴半阳坡立地类型下,生态修复效果表现为:撒播草籽+草帘覆盖+砾石沙障+滴灌>撒播草籽+草帘覆盖+普通风沙土+灌草籽+滴灌>撒播草籽+草帘覆盖+活体沙障+滴灌>撒播草籽+草帘覆盖+铁丝石笼+滴灌>撒播草籽+草帘覆盖+麦草沙障+滴灌>撒播草籽+草帘覆盖+生态棒+滴灌>撒播草籽+草帘覆盖+生态袋+滴灌。其中砾石沙障模式修复效果最好,欧式贴合度为 0.5725;生态袋模式修复效果相对最差,欧式贴合度为 0.3967。采用的 9 种生态修复技术模式中,有 8 种欧式贴合度均优于自然地,总体来说修复效果较为明显。但生态袋模式修复效果不好,这是由于生态袋内植物种选择及其基质配比不适用于研究区干旱少雨的立地条件,所以恢复效果较差。

在厚层急阴坡立地类型下,生态修复效果表现为:撒播草籽+挡矸墙+环保树脂网工程护坡+排水沟+微喷

>撒播草籽+挡矸墙+截水沟土坎+微喷。其中撒播草籽+挡矸墙+环保树脂网工程护坡+排水沟+微喷的修复效果最好,欧式贴合度为 0.4520;撒播草籽+挡矸墙+截水沟土坎+微喷的修复效果相对最差,欧式贴合度为 0.3560。这是由于环保树脂网起到了固土、削弱降雨击溅侵蚀以及防止水土流失的作用。

在中层斜阴坡立地类型下,生态修复效果表现为:挡矸墙+排水沟+撒播草籽+草方格>撒播草籽+挡矸墙+排水沟+微喷。其中挡矸墙+排水沟+撒播草籽+草方格修复效果较好,欧式贴合度为 0.3960;撒播草籽+挡矸墙+排水沟+微喷修复效果相对最差,欧式贴合度为 0.3550。这是由于宁东煤炭基地地处干旱半干旱区,且风力相对较大,从而导致该区域风蚀较为严重,而草方格的使用,可以极大地降低风力对矸石山的侵蚀作用。

阴坡立地类型组自然地综合得分为 0.498,采取生态修复技术模式后,只有极少数的生态修复效益可以与自然条件相接近且不超过自然条件下的生态修复效益,这是由于自然条件下,阴坡水热条件较好且没有人为扰动,其上土壤理化性质较矸石山更加适宜植被生长。而煤矸石会影响其上覆盖土壤 PH、地温、重金属含量等,从而会进一步影响其上植被的生长状况,所以在矸石山进行植被重建具有一定的难度。

在薄层急阳坡立地类型下,生态修复效果表现为:挡矸墙+环保树脂网工程护坡+排水沟+微喷>撒播草籽+挡矸墙+截水沟土坎+微喷。其中撒播草籽+挡矸墙+环保树脂网工程护坡+排水沟+微喷修复效果较好,欧式贴合度为 0.4700;撒播草籽+挡矸墙+截水沟土坎+微喷修复效果相对最差,欧式贴合度为 0.4610。

在中层斜阳坡立地类型下,生态修复效果表现为:挡矸墙+排水沟+撒播草籽+草方格>撒播草籽+挡矸墙+排水沟+微喷。其中挡矸墙+排水沟+撒播草籽+草方格修复效果较好,欧式贴合度为 0.4640;撒播草籽+挡矸墙+排水沟+微喷修复效果相对最差,欧式贴合度为 0.4071。

阳坡立地类型组自然地综合得分为 0.396,矸石山采用相关技术措施的 5 个样地中,所有样地生态修复效益均较为显著,这是由于自然情况下,阳坡太阳辐射较为充足、干旱缺水,而研究区风力较大且土壤湿润度不够,为风沙天气的形成创造了条件,导致水土流失较为严重,并使植被生长的环境越来越恶劣,限制了地上植被的生长。而采取相应技术措施以后,这些措施起到了固持土壤的作用,相应的后期灌溉养护措施也较为完善,为植被的生长发育创造了条件,形成良性循环,加速了生态修复进程。

在厚层平台立地类型下,生态修复效果表现为:植苗造林+草方格+截水沟>撒播草籽+植苗造林+排水沟+滴灌>植苗造林+撒播草籽+滴灌>植苗造林+筑土堰+滴灌植苗造林+筑土堰+滴灌>撒播草籽+微喷。其中植苗造林+草方格+截水沟修复效果较好,欧式贴合度为 0.4640;撒播草籽+微喷修复效果相对最差,欧式贴合度为 0.4071。这是由于宁东煤炭基地地处干旱半干旱区,风力又相对较大,从而导致该区域风蚀较为严重。而草方格是一种应用广泛的治沙措施,其可以通过增加地表粗糙度的方式来降低地表风速,降低风沙颗粒的运移从而达到防风固沙、保持水土、降低水土流失的作用。

2.3 不同立地类型生态修复技术模式选择

调查研究区现有生态修复技术及相应模式下的植物特征,从土壤改良效果、植被恢复效果及技术措施状况这 3 个方面构建评价指标体系,筛选出不同立地类型对位生态修复技术模式 1—2 项,具体筛选结果见表 9:

3 讨论

对研究区进行科学分类,因地制宜地采取相应措施,可以极大地提高修复效益。本研究在进行立地类型划分时,筛选坡向、坡度及土层厚度为主导因子,坡向会影响植被接收太阳辐射情况,从而影响生态系统水热平衡^[20—22]、土壤养分^[23]及植被生长状况。向阳坡阳光较为充足,水分蒸发和植被蒸腾作用较强,在水分充足的情况下,植被生长较快,向阴坡相对阳坡光照条件较差,土壤水分及地温等条件相对较好。坡度会影响土壤水分、养分的再分配^[24]以及各侵蚀力对坡面的侵蚀程度,坡度越陡水土流失越严重,植被生长的条件就越苛刻。土壤是植物生长发育的主要场所,研究区地处表土资源稀缺的矸石山,其上覆土厚度会对植物生长发育具有重要影响,它与土壤持水量和植被耗水机制密切相关,是植被生长发育的基础条件之一^[25—26]。本文将大

尺度地形地貌与土壤特征结合选取海拔高度、坡度、坡向、土壤质地、覆土层厚度及土壤养分等多方面指标进行统计分析,筛选坡向、坡度及土层厚度为主导因子,樊津嘉^[27]筛选土层厚度和坡向为主导因子、李瑞鹏^[28]筛选坡向、坡度、土层厚度为主导因子,与本研究结果基本一致,而杨宇平^[24]筛选坡度、土层厚度、土壤质地为主导因子,这与本研究不完全重叠。这是由于研究区域不同,其上的限制因子不同,筛选的主导因子也会有较大差异,只有找到研究区的限制因子,才能够依据这些限制因子有针对性地采取相应的措施,从而提高生态修复效果。因此,今后在进行立地类型划分时,要充分考虑研究区的限制因子,采取相应的措施,以期达到更好的修复效果。

表 9 立地类型对位生态修复技术模式选择建议

Table 9 Suggestions for the selection of site type alignment ecological restoration technology models

立地类型 Site type	生态修复技术模式 Technical mode	植物种 Plant species
中层斜阴阳坡 Mid-level sloping yin and yang slopes	砾石沙障模式 活体沙障模式	柠条、梭梭、细枝岩黄耆、草木樨状黄耆、狗尾草、红砂、苦马豆、角蒿、中华草沙蚕及乳苣等 柠条、梭梭、细枝岩黄耆、狗尾草、红砂、苦马豆、骆驼蓬及黄花蒿等
厚层急阴坡 Steep and shady slope with thick layers	撒播草籽+挡矸墙+环保树脂网工程护坡+排水沟+微喷	柠条、紫花苜蓿、雾冰藜、沙地旋覆花、白茎盐生草、猫头刺、蒙古虫实及油蒿等
中层斜阴坡 Mid-level sloping shady slopes	撒播草籽+挡矸墙+排水沟+草方格	柠条、紫花苜蓿、雾冰藜、猫头刺、苦豆子、冷蒿及黄花蒿等
薄层急阳坡 Thin-sectioned sharp sunny slope	挡矸墙+环保树脂网工程护坡+排水沟+微喷	雾冰藜、尖头叶藜、猫头刺、白茎盐生草、油蒿和狗尾草等
中层斜阳坡 Mid-level sloping slopes	撒播草籽+挡矸墙+排水沟+草方格	柠条、油蒿、猫头刺、草木樨状黄芪、狗尾草、鹅绒藤、蒙古虫实及白茎盐生草等
平台 Platform	植苗造林+草方格+截水沟	樟子松、柠条、乳苣、侧柏、新疆杨、拂子茅及芦苇等

阴坡立地类型组贴合度为 0.3550—0.4520;半阴半阳坡立地类型组贴合度为 0.3967—0.5725;阳坡立地类型组贴合度为 0.4020—0.4700;厚层平台立地类型组贴合度为 0.3160—0.4910,总体修复效果表现为:半阴半阳坡>阳坡>平台>阴坡,造成这种情况的原因是在进行播种以后,虽然阳坡蒸发和蒸腾作用较强,但前期的灌溉频次较多,养护措施比较到位,土壤中的含水量可以满足植被生长需求,而阴坡在土壤含水量能够满足要求情况下,植被接收的太阳辐射转而成其生长的限制因子,导致阴坡修复效果不理想,这与和璐璐^[29]研究结果一致。而平台生态修复效果不理想是因为平台上只布设了相应的建植和养护技术,而没有相应的固土技术支撑(如草方格),只依靠植被来固持土壤,导致修复效果不理想。而研究区地处干旱半干旱区,风力又相对较大,风蚀较为严重,草方格的铺设可以增加地表的粗糙度降低风速,如果后期腐烂后可以为土壤增加有机质^[30],如果其存活下来,还可以充当护坡植物种,进一步固持水土。因此建议在厚平台、中层斜阴坡和中层斜阳坡铺设草方格。三维网护坡技术覆盖面较广、易于操作、成本低且稳定性较强^[31],该技术的应用可以对坡面和草籽起到一定的保护作用,甚至在植被的生长后期与植物根系相互作用起到加筋固坡的作用。推荐在厚层急阴坡和薄层急阳坡立地类型处进行一些常规措施外,还要铺设三维网进行护坡。砾石沙障模式和活体沙障模式在半阴半阳坡较为推荐使用,这与叶金鹏^[32]、李文焯等^[33]的研究结果基本一致,造成这种情况的原因是风蚀和水蚀是宁东研石山水土流失的主要原因,而砾石沙障和活体沙障可以较好地降低风蚀造成的水土流失。因此,比较推荐在半阴半阳坡布设砾石沙障和活体沙障。讨论结果与实地调查所得结论相对较为一致。所以,今后在对研石山进行恢复时,要先区分不同立地类型,然后再因地制宜地采取相应的技术措施,只有这样才能达到更好的恢复效果。

4 结论

(1) 本研究筛选出坡向、坡度和土层厚度为主要限制因子,以“土层厚度+坡度+坡向”主导因子组合命

名,进行立地类型划分,将宁东煤炭基地矸石山共分为 9 种立地类型。

(2) 中层斜阴坡立地类型,推荐“砾石沙障”模式或“活体沙障”模式;厚层急阴坡、薄层急阳坡立地类型,推荐“撒播草籽+挡矸墙+环保树脂网工程护坡+排水沟+微喷”模式;中层斜阴坡、中层斜阳坡立地类型,推荐“撒播草籽+挡矸墙+草方格+排水沟”模式;厚层平台立地类型,推荐“植苗造林+草方格+截水沟”模式。

在进行矸石山生态修复前,应充分了解当地的立地条件,并进行科学地立地类型划分,为选择合适的生态修复技术模式提供依据。在实施生态修复时,应综合考虑各种修复技术(固土技术、截排水技术、建植技术、养护技术)的综合应用,以达到最佳效果。同时应加强对生态修复过程的监测和评估,以确保修复效果,并及时发现并解决问题,优化修复技术方案。总之,本研究为煤矸石生态修复提供了有益的指导有助于提高生态修复的成功率和可持续性。

参考文献(References):

- [1] 贾宗谦,吕向前,胡思虎,孙芹,孟丽英. 甘肃省煤炭资源开发对生态环境影响的探讨. 能源环境保护, 2020, 34(5): 104-108.
- [2] 党倩楠,王进鑫,姚丽霞,吕国利,张瑞琦. 干旱荒漠区煤矸石山覆土区土壤水分物理性质的空间异质性. 应用生态学报, 2021, 32(1): 281-288.
- [3] 仲蕊. 煤矸石资源化综合利用提质空间大. 中国能源报, 2022-06-13.
- [4] 张进德,郗富瑞. 我国废弃矿山生态修复研究. 生态学报, 2020, 40(21): 7921-7930.
- [5] 胡一帆,王浩,焦磊,张立伟,南维鸽,董治宝. 青藏高原重大建设工程生态修复综合效益评估指标体系. 生态学报, 2022, 42(18): 7565-7576.
- [6] 胡振琪,王培俊,李晶. 中国矿山迹地的生态恢复(英文). *Journal of Resources and Ecology*, 2012, 3(4): 289-296.
- [7] 朱新雨. 基于植被分类和立地类型划分的灵泉露天矿植被重建方法[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- [8] 张灵,白中科,景明,曹银贵,陈晓辉. 黄土区大型露天煤矿复垦排土场植被恢复立地类型划分——以安太堡露天煤矿为例. 水土保持研究, 2014, 21(6): 54-60.
- [9] 骆汉,胡小宁,谢永生,王继军,郭满才. 生态治理技术评价指标体系. 生态学报, 2019, 39(16): 5766-5777.
- [10] Wang Z Y, Lechner A M, Yang Y J, Baumgartl T, Wu J S. Mapping the cumulative impacts of long-term mining disturbance and progressive rehabilitation on ecosystem services. *The Science of the Total Environment*, 2020, 717: 137214.
- [11] Halme P, Allen K A, Auniš A, Bradshaw R H W, Brūmelis G, Čada V, Clear J L, Eriksson A M, Hannon G, Hyvärinen E, Ikauniece S, Iršėnaitė R, Jonsson B G, Junninen K, Kareksela S, Komonen A, Kotiaho J S, Kouki J, Kuuluvainen T, Mazziotta A, Mönkkönen M, Nyholm K, Oldén A, Shorohova E, Strange N, Toivanen T, Vanha-Majamaa I, Wallenius T, Ylisirniö A L, Zin E. Challenges of ecological restoration: lessons from forests in northern Europe. *Biological Conservation*, 2013, 167: 248-256.
- [12] 李武斌. 九寨沟马脑壳金矿露天矿山生态恢复研究[D]. 重庆: 西南大学, 2011.
- [13] 李全生,韩兴,赵英,林海军,王新民. 露天煤矿植被修复关键技术集成与应用研究——以胜利露天矿外排土场为例. 环境生态学, 2021, 3(6): 47-53.
- [14] 李风军,冯晓秀,陆桂琴. 宁东能源化工基地生态环境脆弱性评价研究. 生态科学, 2014, 33(5): 1017-1022.
- [15] 杜灵通,徐友宁,宫菲,丹杨,王乐,郑琪琪,马龙. 宁东煤炭基地植被生态特征及矿业开发对其的影响. 地质通报, 2018, 37(12): 2215-2223.
- [16] 闫军. 宁夏宁东能源化工基地矿区土地生态环境研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
- [17] 覃文更,韦国富,谭卫宁. 广西木论自然保护区青檀群落特征及其多样性研究. 广西林业科学, 2004, 33(3): 126-129.
- [18] 侯兆疆,赵成章,董小刚,李钰,张茜,马小丽. 祁连山北坡天然草地不同尺度地上生物量空间格局对地形的响应. 生态学杂志, 2014, 33(1): 10-15.
- [19] 康文妮,袁浩瀚,丁振宇. 基于熵权的模糊物元模型在空气质量评价中的应用. 项目管理技术, 2020, 18(3): 126-130.
- [20] Deng S F, Yang T B, Zeng B, Zhu X F, Xu H J. Vegetation cover variation in the Qilian Mountains and its response to climate change in 2000 - 2011. *Journal of Mountain Science*, 2013, 10(6): 1050-1062.
- [21] Wypych A, Ustrnul Z, Schmatz D R. Long-term variability of air temperature and precipitation conditions in the Polish Carpathians. *Journal of Mountain Science*, 2018, 15(2): 237-253.
- [22] Tian A, Wang Y H, Webb A A, Liu Z B, Ma J, Yu P T, Wang X. Water yield variation with elevation, tree age and density of larch plantation in

- the Liupan Mountains of the Loess Plateau and its forest management implications. *The Science of the Total Environment*, 2021, 752: 141752.
- [23] 刘佳琪, 闫焯琛, 杨建英, 王美琪. 大清河流域山丘区大兰小流域立地分类与评价. *中国水土保持科学(中英文)*, 2023, 21(5): 62-70.
- [24] 杨宇平. 灵武矿区采煤迹地立地类型划分及其特征研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020.
- [25] 冯喆, 马理辉, 王志昊. 山地枣树在不同土层厚度下的土壤水分状况变化. *西北林学院学报*, 2024, 39(1): 140-146.
- [26] Buttle J M, Dillon P J, Eerkes G R. Hydrologic coupling of slopes, riparian zones and streams: an example from the Canadian Shield. *Journal of Hydrology*, 2004, 287(1/2/3/4): 161-177.
- [27] 樊津嘉. 辽东山区典型水源涵养林水文功能及立地类型划分研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2023.
- [28] 李瑞鹏, 史常青, 杨建英, 魏广阔, 刘佳琪, 奎国娴, 艾宪锋, 肖飞, 苏瑞东. 草原区露天煤矿排土场立地类型划分及生态修复技术筛选. *Journal of Resources and Ecology*, 2023, 14(4): 757-766.
- [29] 和璐璐, 张萱, 章毓文, 王晓霞, 刘亚栋, 刘岩, 范子莹, 何远洋, 席本野, 段劫. 辽东山区不同坡向长白落叶松人工林树冠特征与林木生长关系. *植物生态学报*, 2023, 47(11): 1523-1539.
- [30] 朱若柠, 师文龙, 王冬. 基于压草覆沙一体机的草方格沙障固沙研究//中国土木工程学会总工程师工作委员会. 中国土木工程学会总工程师工作委员会 2021 年度学术年会暨首届总工论坛会议论文集. *施工技术(中英文)*, 2021.
- [31] 张俊荣. 三维网植草护坡在北高干渠节水改造中的应用. *水利科技*, 2014(3): 37-39.
- [32] 叶金鹏. 宁东羊场湾煤矿排矸场生态修复示范工程效果初步评价[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [33] 李文焯, 叶金鹏, 郭小平, 林雅超, 薛东明, 李国旗, 杨帆, 张伟, 顾清敏. 不同生态恢复模式对灵武排土场边坡减流减沙及植被恢复的影响. *Journal of Resources and Ecology*, 2023, 14(4): 822-832.