



## 露天煤矿排土场边坡植被恢复群落稳定性研究

陆兆华 张琳

### 引用本文:

陆兆华, 张琳. 露天煤矿排土场边坡植被恢复群落稳定性研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(1): 334–344.

LU Zhaohua, ZHANG Lin. Ecological stability evaluation of revegetation community on open-pit coal mine dump slopes[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 334–344.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1933>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 降雨工况下露天矿排土场边坡稳定性与治理措施

Stability and control measures of open-pit mine dump slope under rainfall conditions

煤炭科学技术. 2019(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/95733d89-606a-4bea-a203-22a7c886393f>

#### 露天煤矿端帮逆倾软岩边坡稳定性研究

Study on stability of reversed inclined soft rock slope at end slope of surface mine

煤炭科学技术. 2017(3) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/f00b3558-b092-4e97-8dd0-48c14110f588>

#### 斜交断层影响下露天煤矿顺倾层状边坡稳定性研究

Study on dip bedded slope stability of open-pit coal mine under influence of oblique fault

煤炭科学技术. 2020, 48(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/9b828d2b-9279-401e-a20e-3cf8f7ff6ca5>

#### 露天矿背斜区内排土场边坡基底处理方式优选研究

Study on optimization of treatment methods for inclined basement of inner dump slope in anticline area of open-pit mine

煤炭科学技术. 2021, 49(2): 77–84 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.02.010>

#### 胜利东二露天矿南帮滑坡区压煤回采边坡稳定性研究

Research on slope stability of coal recovery on landslide area underlying southern slope in Shengli No.2 East Open-pit Mine

煤炭科学技术. 2019(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/9410f81f-35a9-47fa-a2a5-108e7d798ff7>

#### 内排阻水对非工作帮边坡稳定性影响规律研究

Study on influence of water blocking of internal dumping site on stability of non-working slope

煤炭科学技术. 2021, 49(12): 186–191 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/3226e4b6-bfef-4853-b218-8f33ba54dafc>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

陆兆华, 张琳. 露天煤矿排土场边坡植被恢复群落稳定性研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(1): 334–344.

LU Zhaohua, ZHANG Lin. Ecological stability evaluation of revegetation community on open-pit coal mine dump slopes[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 334–344.

## 露天煤矿排土场边坡植被恢复群落稳定性研究

陆兆华, 张琳

(中国矿业大学(北京)恢复生态研究所, 北京 100083)

**摘要:** 为了揭示露天煤矿排土场边坡植被恢复群落稳定性的动态特征和变化模式, 以内蒙古北电胜利露天煤矿 4 个排土场为研究对象, 选取 Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数、Pielou 均匀度指数和 Simpson 优势度指数、植被盖度、植被高度、地上和地下生物量 8 个指标, 构建了基于群落结构稳定性与群落功能稳定性的排土场边坡植被恢复群落稳定性评价体系, 采用综合评价法对处于人工植被恢复中的内排土场和恢复年限分别为 4 a、5 a、8 a 的沿帮排土场、南排土场和北排土场的南、北方向边坡植被恢复群落稳定性进行综合评估, 并对群落稳定性因子与土壤含水量、有机质、全氮、全磷、全钾等环境因子间关系进行分析, 探究影响排土场边坡群落稳定性的影响因素。结果表明: ①随着恢复年限的增加, 边坡植被群落稳定性整体呈稳步上升趋势, 但与草原站背景值相比, 其综合评价指数处于较不稳定或不稳定状态。②随着恢复年限的增加, 排土场边坡群落稳定性由结构稳定性主导转向功能稳定性主导。恢复初期受人工影响, 物种多样性提高, 结构稳定性较高, 随着时间的推移, 结构稳定性波动下降, 功能稳定性上升, 其中地下生物量增长迅速, 生物量向地下转移, 进而形成矿区特有的植物群落结构稳定与功能稳定转变特征。③从坡向来看, 随着恢复年限的增加, 边坡群落稳定性逐渐由南坡优于北坡转变为北坡优于南坡。④南坡的结构稳定性与环境因子的相关性较高, 而北坡的功能稳定性与环境因子相关性较高, 表明不同坡向的群落采用了不同的响应策略以适应环境的变化, 丰富的有机质和全氮含量对排土场边坡群落功能性稳定性会产生积极影响。

**关键词:** 露天煤矿; 排土场边坡; 群落稳定性; 结构稳定性; 功能稳定性; 生物量

**中图分类号:** X826

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-2336(2024)01-0334-11

### Ecological stability evaluation of revegetation community on open-pit coal mine dump slopes

LU Zhaohua, ZHANG Lin

(Institute of Restoration Ecology, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** To reveal the dynamic characteristics and change patterns of revegetation community stability on the slopes of open-pit coal mine dump, four dumps from the Beidian Shengli open-pit coal mine in Inner Mongolia was selected as the research object. Eight indicators, including the Shannon-Wiener diversity index, Margalef richness index, Pielou evenness index, Simpson dominance index, vegetation coverage, vegetation height, and aboveground and underground biomass, were chosen. A comprehensive evaluation system was employed to assess the stability of revegetation communities on the south and north slopes of the inner dump, which is in the process of artificial revegetation, as well as YANBANG dump, south dump, and the north dump, which have been in the process of restoration periods of 4a, 5a, and 8a. The assessment included the southern slope, northern slope, and embankment slopes to the south, north, and along the embankment. The relationships between stability factors and environmental factors were analyzed to explore the influencing factors on slope community stability. The results indicate: ① With the increase of recovery years, the overall stability of revegetation community on the slopes

收稿日期: 2023-12-18

责任编辑: 黄小雨

DOI: 10.12438/cst.2023-1933

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFF1303203, 2016YFC0501108)

作者简介: 陆兆华(1963—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 教授, 博士。E-mail: luzhaohua@cumtb.edu.cn

shows a steady upward trend, but compared to the background values, its comprehensive assessment index is in a relatively unstable state. ② With the increase of recovery years, community stability on dump slopes shifts from being structure-stability-dominated to function-stability-dominated. In the early stages of recovery, influenced by artificial intervention, species diversity increases and structural stability is high. Over time, structural stability fluctuates and declines, while functional stability increases. Rapid growth of underground biomass and biomass transfer underground gradually form a stable community structure unique to the mining area. ③ From the perspective of slope aspect, with the increase of recovery years, community stability on slopes gradually changes from south slope being superior to north slope to north slope being superior to south slope. ④ The structural stability of the south slope exhibits a higher correlation with environmental factors, while the functional stability of the north slope shows a stronger association with environmental factors. This suggests that communities on different directions employ distinct response strategies to adapt to environmental changes. The abundance of organic matter and total nitrogen content positively influences the functional stability of the community on the slope adjacent to the soil-disposal site.

**Key words:** open-pit coal mine; dump slope; community stability; structure stability; function stability; biomass

## 0 引 言

煤炭资源是中国能源结构的重要组成部分, 2022 年, 煤炭能源占比约为 56%<sup>[1]</sup>。目前, 中国煤炭基地主要分布在干旱、半干旱区域, 该区域降水较少, 风蚀水蚀交错, 生态环境脆弱, 极易退化<sup>[2]</sup>。这一区域是我国北方地区重要的生态屏障, 对防风固沙、水土保持以及国家生态安全的保障至关重要<sup>[3]</sup>。煤矿资源的开采, 特别是露天煤矿的开采对生态环境造成了极大的破坏, 其中, 排土场是露天矿开采过程中废弃物主要集中处置地, 占据了露天煤矿用地的一半以上, 严重破坏了区域原有的地形地貌<sup>[4]</sup>。排土场边坡高而陡, 且表层土壤结构松散, 易造成土壤侵蚀和水土流失, 在大风条件下易扬尘, 对大气和水环境造成污染, 严重破坏了矿区的生态环境<sup>[5]</sup>。因此, 对排土场边坡进行生态修复, 对改善矿区生态环境, 实现矿区的可持续发展具有重要意义。

采用人工手段对排土场边坡进行植被恢复因其成本较小、修复效果显著、后期维护较少、环境效益突出等优点, 成为露天煤矿排土场边坡生态修复的有效手段<sup>[6]</sup>。近年来, 国内外针对露天煤矿排土场植被恢复工作已有许多研究, 主要集中在植物物种配置<sup>[7]</sup>、环境影响因子的筛选<sup>[8]</sup>、植被对土壤质量的影响<sup>[9]</sup>和植被与土壤的关系<sup>[10]</sup>等方面, 但这些研究多注重对群落结构现状的定性或半定量描述, 忽略了各要素之间可能存在的共同作用效应。同时, 对立地类型及环境差异性调查研究的不足, 会导致生态环境改善不明显, 甚至恢复后期群落出现不稳定和退化现象<sup>[11]</sup>。随着矿区植被恢复研究的深入, 群落稳定性作为一种有助于提高对生态系统的描述、理解和保护的实用工具逐渐被引入到研究中<sup>[12]</sup>。植物群落稳定性是植物群落结构和功能的一个综合性特征<sup>[13]</sup>, 对植物群落稳定性进行综合评价可以更为直

接地了解植被本身稳定性的特征和规律<sup>[14]</sup>。然而, 目前对排土场边坡植被恢复群落稳定性的研究仍存在一些不足, 如边坡恢复植被群落结构与群落功能关系、群落地上与地下生物量分配机制、较长时序边坡群落演变的环境驱动要素等关键生态学理论与野外实证研究等方面。尤其在干旱、半干旱草原地区, 排土场边坡植被恢复与重建过程中面临土壤三相失衡、土壤养分贫瘠等问题, 露天煤矿区排土场边坡已成为煤矿区水土流失最严重、植被恢复的重点和难点区域。在植被恢复过程中, 物种的选择、植物的生活型特征、植物自身重力、根系对边坡土壤产生的加固效应等因素均在很大程度上影响植被恢复的成效与稳定性<sup>[15]</sup>。

本研究基于群落结构、群落功能属性 2 大方面, 选取了 8 个指标构建了露天煤矿排土场边坡植被恢复群落稳定性评价体系。采用综合评价法对内蒙古典型草原区北电胜利露天煤矿 4 个不同时期、不同坡向的植被恢复群落稳定性开展生态学野外调查与评价, 探究草原矿区边坡困难立地植被恢复过程中植物群落结构、功能特征及其稳定性演变规律, 辨识群落稳定性影响因素, 为露天煤矿植被群落稳定性理论研究及恢复实践提供科学支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

北电胜利露天煤矿 (115°30' ~ 116°20'E, 43°57' ~ 44°14'N) 位于内蒙古锡林郭勒盟中北部锡林浩特市, 是胜利煤田的主要矿区之一<sup>[16]</sup>。矿区占地面积约 342 km<sup>2</sup>, 矿区整体呈狭长状, 东西方向距离约 45 km, 南北方向距离约 7.6 km。该地区属半干旱草原气候, 全年风沙大, 温差大 (年温差在 35 ~ 43℃), 降水量少 (降水多集中在 7—9 月份, 年平均降水量约为 295 mm)。区域内土壤主要为典型栗钙土、草甸栗钙土、



淡栗钙土和草甸土,植被类型主要为典型草原、草甸草原和荒漠草原。北电胜利露天煤矿有4个排土场,自2008年以来采用相同的方法进行人工植被恢复,恢复群落现已初具规模,但由于恢复时间各不相同(表1),植被恢复效果及稳定性各不相同。不同排土场边坡的空间位置差异和不同的恢复时间为生态稳定性研究提供了理想的自然试验场地。

1.2 植被调查与土壤取样

通过资料收集和野外实地植被调查,采用空间代时间的方法,于2017年7—8月在北电胜利矿区的4个排土场,即正在人工植被恢复中的内排土场和恢复年限分别为4 a、5 a、8 a的沿帮排土场、南排土场和北排土场的南、北方向边坡,以及矿区外以北20 km以外的草原站进行群落调查及土壤采样(图1)。其中,选取草原站作为背景值是由于该区域较少受到直接矿业活动的影响,有助于排除直接矿业干扰对植物群落的影响。同时该区域保护较为完整,受人为干扰较小,更接近于该区域植物群落的自然状态,提高了研究的可行性。选取样地时,结合各地地形条件及植被分布特点,减少样地选择存在的主观因素干扰或现实条件限制所产生的误差,选取具有代表性的样地。由于矿区边坡无

乔木,因此,每块样地设置3个间距为3 m的5 m×5 m的灌木样方,在每个灌木样方内采用“五点取样法”设置5个1 m×1 m草本样方,矿区内共4×2×3×5=120个草本样方,草原站3×5=15个草本样方,共计135个草本样方。记录各样方内植物物种种类、多样性、高度、盖度等指标。通过齐地面刈割植株,当天称取鲜重,带回实验室在105℃下进行30 min杀青处理后,置于65℃烘干至恒重,得到地上生物量。将刈割后的植株周围进行全株挖掘,当天进行清理后测得鲜重,带回实验室在65~75℃下烘干至恒重,除杂称重得到地下生物量。

土壤数据的采集样地与群落样地一致,在每块样地内按“S”形设立3个平行样点进行斜方向多点取样,取样深度为0~10 cm,将土壤样品充分混合(约1 kg)带回实验室进行室内试验分析,分别采用质量法、重铬酸钾法、凯氏定氮法、酸溶-钼锑抗比色法、氢氧化钠熔融-火焰光度法<sup>[17]</sup>测定土壤含水量、土壤有机质、全氮、全磷、全钾等指标。

1.3 群落稳定性评价体系构建

基于数据可得性和可行性,从群落结构和群落功能<sup>[18]</sup>2方面选取8个指标构建了露天煤矿排土场边坡植被恢复群落稳定性评价指标体系(表2)。

表1 各排土场植被恢复情况  
Table 1 Vegetation restoration status in each dump

排土场	植被恢复面积/m <sup>2</sup>	植被恢复年份	主要恢复物种
内排土场	—	2015—2017	斜茎黄耆( <i>Astragalus laxmannii</i> )、紫苜蓿( <i>Medicago sativa</i> )、披碱草( <i>Elymus dahuricus</i> )、小叶锦鸡儿( <i>Caragana microphylla</i> )、栉叶蒿( <i>Neopallasia pectinata</i> )
沿帮排土场	510×10 <sup>4</sup>	2011—2013	
南排土场	253×10 <sup>4</sup>	2009—2012	
北排土场	101×10 <sup>4</sup>	2008—2009	

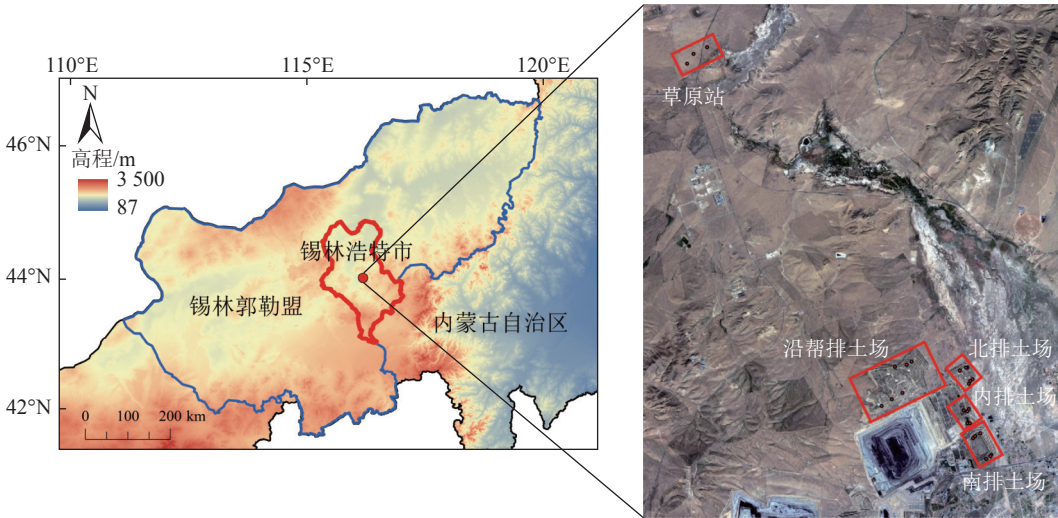


图1 研究区地理位置及研究地点分布

Fig.1 Location of study area and distribution of sampling sites

表 2 排土场边坡植被恢复群落稳定性综合评价体系  
Table 2 Evaluation system for stability of revegetation community on dump slopes

目标层	准则层	指标层
群落稳定性	群落结构	Shannon-Wiener 多样性指数 $H$
		Margalef 丰富度指数 $R$
		Pielou 均匀度指数 $J$
		Simpson 优势度指数 $D$
	群落功能	盖度 $C$
		高度 $H_E$
		地上生物量 $B_A$
		地下生物量 $B_U$

群落结构是植被生长状态的直接响应,反映植被的空间分布和组成情况<sup>[19]</sup>,为植被的生长状况提供了直观的信息。群落结构选取盖度、高度和多样性指标,其中盖度是植被在水平方向上的地表覆盖程度,盖度的增加意味着植物群落对生境的适应性较好,减缓水土流失,保护土壤结构,调节土壤微环境,维持水分平衡。在矿区边坡环境中,植物高度指标可反映植被在垂直方向上利用光能促进生长的能力,利于植被形成有效的垂直群落结构,固定土壤和防止边坡水土流失。多样性指数选取 Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数、Pielou 均匀度指数和 Simpson 优势度指数对物种多样性进行评价,其中 Shannon-Wiener 多样性指数可以反映群落中物种均匀度和丰富度,值越高,多样性越高;Margalef 丰富度指数反映群落物种数目与群落大小间关系,值越高表示两者关系越密切,多样性越高;Pielou 均匀度指数表示群落物种总体分配情况,值越接近 1,表示物种分布越均匀;Simpson 优势度指数重点关注优势种对群落多样性的影响,值越大表示优势物种突出,多样性越低。

群落功能是评价群落健康情况的重要内容,反映植被对生境条件的适应性,以及对水、光照和肥力等环境因素的利用程度<sup>[20]</sup>,生物量是反映植物生长状况和群落功能的关键指标<sup>[21]</sup>,地上生物量是植物在地表的可见部分,反映了植物的光合作用能力,通过地上生物量的评价,可以了解植物对光合作用的利用效率,从而揭示植物对环境的适应性和生长潜力。地下生物量可以反映植物根系的发育程度及植物对土壤的固定和稳定能力,不同植物根系的强度和特性不同,对地上植物的固定和支撑能力及对边坡加固效果也有明显的差异<sup>[22]</sup>,在矿区边坡环境中,具有较大地下生物量的植物能够更好地抵抗土壤侵

蚀,减少边坡水土流失。综合考虑地上和地下生物量,能够更全面地了解植被对生境的适应性和群落的稳定状态。

## 1.4 数据分析

### 1.4.1 物种多样性

Shannon-Wiener 多样性指数:

$$H = - \sum P_i \ln P_i \quad (1)$$

Margalef 丰富度指数:

$$R = (S - 1) / \ln N \quad (2)$$

Pielou 均匀度指数:

$$J = H / \ln S \quad (3)$$

Simpson 优势度指数:

$$D = 1 - \sum P_i^2 \quad (4)$$

式中:  $P_i = N_i / N$ ,  $N_i$  为物种  $i$  中的数量,  $N$  为物种  $i$  所在采样地的所有物种的数量之和;  $S$  为物种  $i$  所在的采样地中所有物种数量。

### 1.4.2 群落稳定性

1) 权重计算。指标权重的计算方法主要分为主观和客观评价 2 种<sup>[23-24]</sup>。主观方法依赖于决策者的经验,而使用实际数据的客观方法可能会受到方差和极值的影响。为了减少主观和客观因素的影响,提供更可靠的结果,采用基于 AHP-熵权法的综合评价模型对排土场边坡恢复植被群落的生态稳定性进行了评价。这种方法平衡了主观和客观因素,使权重结果更准确。

首先利用 Delphi 法对各指标进行成对比较,采用 1-9 比例法进行评判,并构造各指标间的相对重要性判断矩阵,求出该判断矩阵的最大特征根  $\lambda_{\max}$  及标准化特征向量  $w$ ,并将  $w$  归一化,可得出各指标的重要性排序,即各评价指标的权重。为检验该判断矩阵是否具有合理性及较合理地一致性,根据 Saaty 提出的一致性检验公式进行检验,消除主观评判可能出现的偏差<sup>[25]</sup>。按照以上方法对准则层及指标层所有矩阵进行计算,得出各指标在准则层的权重值和准则层指标在目标层的权重值。各指标权重值与其相应的准则层权重值的乘积即为层次分析法总权重值  $C_i$ 。

构建  $m$  个样本,  $n$  个指标的恢复群落稳定性评价的原始评价矩阵  $B = [b_{ij}]_{m \times n}$ ,由于各指标间量纲和类型有差异,为使其具有可比性,将矩阵  $B$  按照极值法进行标准化处理,得到标准化矩阵  $C = [c_{ij}]_{y \times n}$ ,根据熵的定义,计算各指标的熵值( $H_i$ )和熵权( $W_i$ ):

$$H_i = -\left(\frac{1}{\ln n}\right) \sum_{j=1}^n P_{ij} \ln(P_{ij}) \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$$
  
(5)

$$W_i = (1 - H_i) / \sum_{i=1}^n (1 - H_i) \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$
  
(6)

最后,利用熵权法计算的熵权  $W_i$  对层次分析法计算的权重值  $C_i$  进行修正得到指标权重值  $\lambda_i$ :

$$\lambda_i = \frac{C_i W_i}{\sum_{i=1}^n C_i W_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$
  
(7)

权重结果见表 3。

2)综合评价分级。稳定性指数法是对群落稳定性进行综合评价的方法之一,其原理是将各

指标的权重值与该指标数据无量纲化后的值相乘,并求出其累积和,即可得出群落稳定性综合评价得分值:

$$S = \sum_i^n \lambda_i B_i \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$
  
(8)

式中: $S$ 为排土场边坡恢复群落稳定性综合评价得分值; $B_i$ 为各指标无量纲化后值; $\lambda_i$ 为各因子权重值。

为了更直观地阐述露天矿排土场边坡恢复群落稳定性,以矿外以北 20 km 外的草原站数据为背景值,并将其赋值为 1,利用差值百分比法计算综合评价得分,将群落稳定性分为一级(非常稳定)、二级(稳定)、三级(基本稳定)、四级(较不稳定)、五级(不稳定),分级标准见表 4。

表 3 AHP-熵权法综合权重结果

Table 3 Results of Analytic Hierarchy Process (AHP)-entropy weight application

目标层	准则层	指标层	AHP权重	熵权权重	综合权重
群落稳定性	群落结构	Shannon-Wiener多样性指数 $H$	0.184 6	0.072 0	0.153 2
		Margalef丰富度指数 $R$	0.109 7	0.041 0	0.089 0
		Pielou均匀度指数 $J$	0.064 4	0.101 6	0.107 4
		Simpson优势度指数 $D$	0.081 5	0.061 0	0.093 6
	群落功能	盖度 $C$	0.038 2	0.097 1	0.080 8
		高度 $H_E$	0.021 7	0.132 2	0.071 1
		地上生物量 $B_A$	0.250 0	0.105 5	0.215 7
		地下生物量 $B_U$	0.250 0	0.081 1	0.189 1

表 4 群落生态稳定性分级标准

Table 4 Ecological stability classification standard for community

分级Grade	I	II	III	IV	V
稳定性综合评价 $S/\%$	[75,100]	[60,75)	[45,60)	[30,45)	[0,30)

2 结果分析

2.1 群落稳定性

2.1.1 群落结构因子

如图 2 所示,处于恢复进程中的内排土场多样性指数最高,随着恢复年限的增加,Shannon-Wiener 多样性指数和 Margalef 丰富度指数先增加后下降,而 Pielou 均匀度指数和 Simpson 优势度指数则呈下降趋势。南排土场复垦 5 a 的盖度最高,其他 3 个排土场的盖度没有显著差异。内排土场群落高度最低,随着恢复时间的增加高度呈上升趋势。从坡向来看,南坡的 Shannon-Wiener 多样性指数和 Simpson 优势度指数均高于北坡。人工修复早期南坡 Pielou 均匀度指数较高,后期差异不显著,北坡的 Mar-

galef 丰富度指数高于南坡。边坡植被盖度与背景值相比整体较低,随时间呈先上升后下降趋势,在 5 a 时最高,为 44.8%。高度随恢复年限增加呈上升趋势,8 a 高度较在恢复期间内的内排土场上升了 85.35%。

2.1.2 群落功能因子

如图 3 所示,排土场的总生物量随着恢复年限的增加而增加,但与背景值相比仍较低。内排土场的地上生物量约为地下生物量的 3.84 倍,其他排土场的地下生物量均大于地上生物量,随着恢复年限的增加,北排土场复垦 8 a 的南坡和北坡地上生物量分别较沿帮排土场复垦 4 a 增长了 54.67% 和 22.26%,地下生物量分别增长了 44.38% 和 50.31%。说明随着恢复年限的增加,南坡的地上生物量和北坡的地



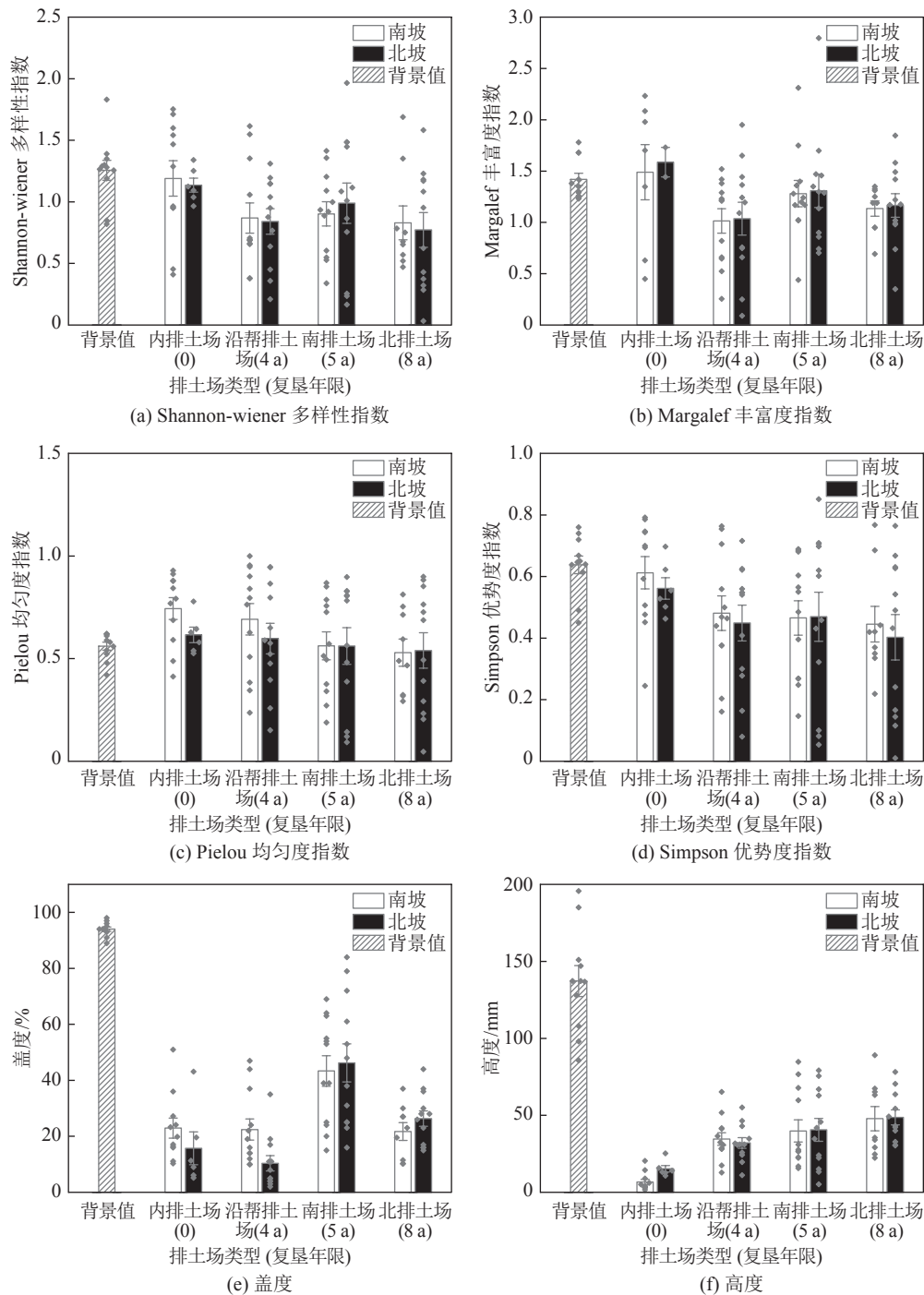


图 2 不同排土场不同坡向群落结构

Fig.2 Result of community structure of different slopes for different dumps

下生物量增长速率较高,说明不同坡向的土壤微环境不同,使得植物群落的功能逐渐发生了变化。

### 2.1.3 稳定性评价结果

综合评价法稳定性结果如图 4 所示。与本底值 (100) 相比, 4 个排土场生态稳定性得分在 20.94 ~ 50.97, 其中, 除内排土场南坡处于基本稳定 (Ⅲ) 状态外, 4 a 南坡、4 a 北坡和 5 a 南坡处于不稳定 (V) 阶段, 其他排土场边坡处于较不稳定 (IV) 阶段。处于

恢复进程中的内排土场群落稳定性整体较高, 随着恢复年限的增加, 稳定性整体呈上升趋势。准则层中, 内排土场结构稳定性最高, 南、北坡结构稳定性分别占群落稳定性得分的 88.65%、99.51%。随着恢复年限的增加, 群落结构稳定性整体呈下降趋势, 群落功能稳定性呈上升趋势, 恢复 8 a 时, 排土场南、北坡群落结构稳定性分别占总稳定性的 38.15% 和 44.94%, 群落功能逐渐占主导位置。从坡向来看, 处

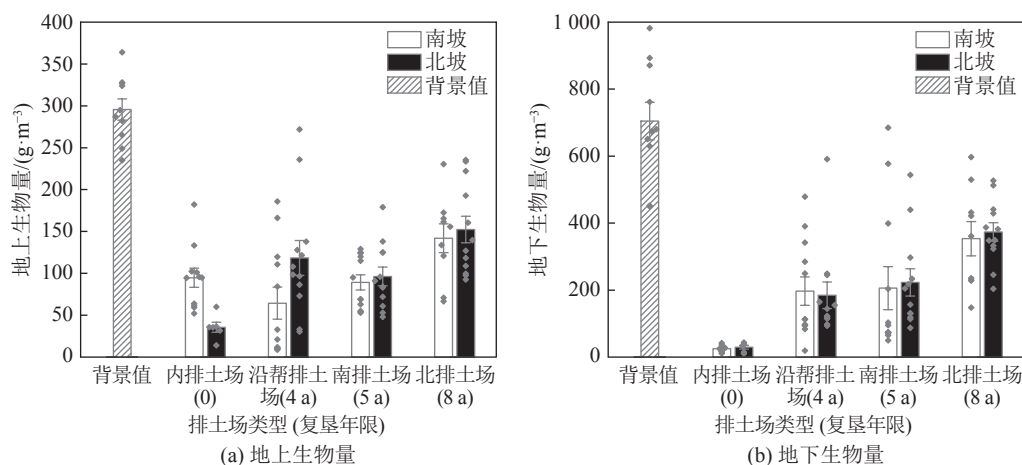


图3 不同排土场不同坡向群落功能

Fig.3 Results of community function of different slopes for different dumps

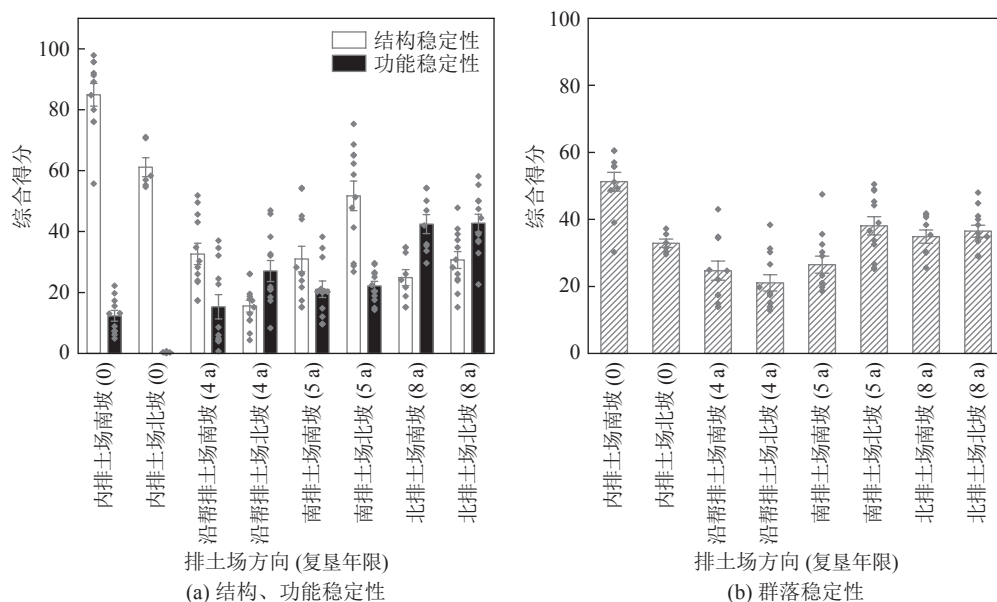


图4 排土场边坡群落稳定性综合评价结果

Fig.4 Comprehensive evaluation score of community stability of different dump slopes

于恢复进程中的内排土场和恢复年限较短的4a排土场的南坡稳定性较高,随着恢复年限的增加,北坡的稳定性逐渐优于南坡。

## 2.2 群落结构与群落功能相关性分析

由图5可知,南坡的Margalef丰富度指数和Pielou均匀度指数间无显著相关性,其余多样性指数均与高度呈显著相关,盖度与Pielou均匀度呈显著相关性,群落功能指数中地下生物量与Pielou均匀度指数和Simpson优势度指数及盖度呈显著相关性,地上生物量与其他因子无显著相关性。北坡盖度与Pielou均匀度指数和Simpson优势度指数呈显著相关,群落功能指数中地下生物量与盖度、高度呈显著正相关,地上生物量仅与盖度呈显著正相关性。

## 2.3 稳定性因子与环境因子相关性分析

将土壤含水量、有机质、全氮、全磷、全钾等环境因子与稳定性因子及结构稳定性和功能稳定性进行相关性分析,结果如图6所示(图6中WC为土壤含水量,SOM为土壤有机质含量,TN为全氮含量,TP全磷含量,TK全钾含量)。结果表明:南坡的高度、地下生物量与除土壤含水量外的其他环境因子均呈显著相关性,结构稳定性与环境因子均呈显著相关性,功能稳定性与有机质和全氮因子呈显著相关性。北坡的高度、地上生物量、地下生物量和功能稳定性均与土壤含水量、有机质、全氮和全磷因子呈显著相关性,与南坡相比,北坡的结构稳定性与环境因子相关性较小,仅与全磷因子显著相关,北坡全钾因子与稳定性因子无显著相关性。多样性指标显示,



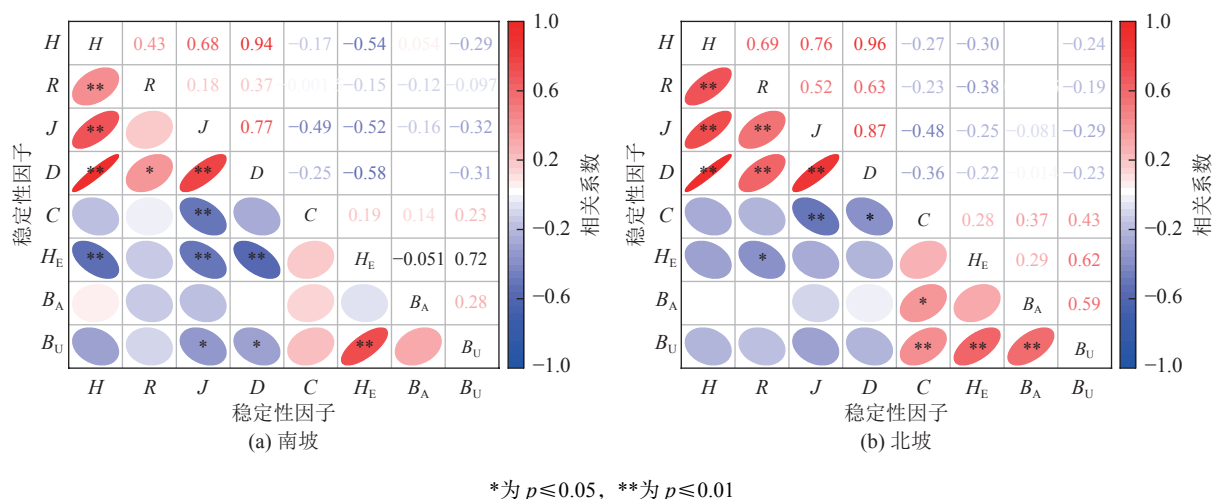


图5 群落结构与群落功能因子相关分析

Fig.5 Correlation analysis of community structure and community function factors

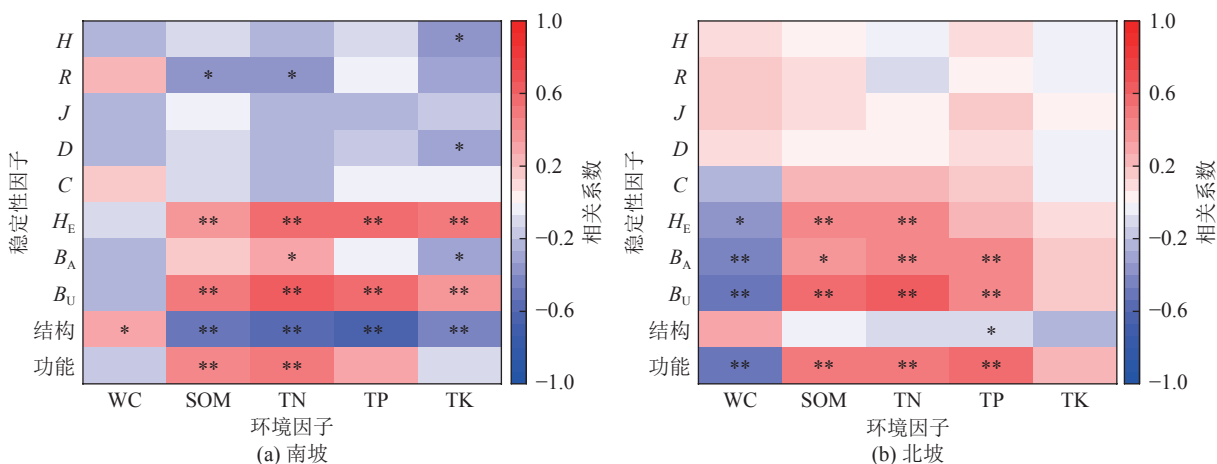


图6 环境因子与稳定性因子相关性分析

Fig.6 Correlation analysis of the environment factors and stability factors

南坡 Margalef 丰富度指数与有机质和全氮因子呈显著相关性, Shannon-Wiener 多样性指数与全钾因子呈显著相关性, 而北坡的多样性指数与环境因子无显著相关性。

### 3 讨 论

#### 3.1 排土场边坡群落稳定性变化

稳定性是反映植物群落结构和功能的综合特征, 极易受到物种组成、多样性和外部因素变化的影响。群落稳定性结果显示, 内排土场的稳定性整体较高, 随着恢复年限的增加, 稳定性整体呈上升趋势。植被恢复是漫长且复杂的过程, 内排土场仍处在人工恢复进程中, 由于恢复时间短, 群落的动态变化不显著, 受人工恢复措施影响较大, 群落结构得分较高, 使得总体稳定性结果较高, 从而在短期内达到较理想的评价结果。随着恢复年限的增加, 群落稳定性上升, 其中群落结构呈先增加后减少趋势, 群落功能

稳定性呈增加趋势, 群落稳定性得分占比由群落结构稳定性占主导逐渐演变为群落功能稳定性占主导, 说明群落发生了一定的演替。植被演替理论认为, 每个演替的阶段都存在稳定的群落, 其稳定性表现出多种特征, 其中, 群落结构特征可以较好地反映群落的生长状况, 是衡量群落稳定性最直观的指标。盖度和高度是群落结构的直观表征, 结果表明, 边坡群落盖度呈先上升后下降趋势, 在一定程度上反映了植被群落组成的变化, 群落高度呈上升趋势, 说明植被在恢复期的生长状况较好。物种多样性是描述群落结构特征的一种数学语言, 并在一定程度上反映了群落的特征、发展阶段和稳定性<sup>[26]</sup>。目前, 一致认为, 物种多样性和群落稳定性之间存在着很强的相关性<sup>[27]</sup>。本研究也观察到了这种相关性, 即排土场边坡恢复群落多样性随着恢复年限的增加呈下降趋势, 与群落稳定性评价结果呈负相关关系。说明排土场边坡群落在人工植被恢复初期物种较丰富,

随着时间推移,物种经历自然选择,逐渐适应矿区环境,适应性较高的物种占据主导地位,物种竞争力减弱,致使多样性降低和稳定性提高<sup>[28]</sup>,在一定程度上反映了群落对特定环境的适应性。从功能稳定性来看,地上和地下生物量随恢复年限的增加呈增加的趋势。内排土场地上生物量较高,其他排土场地下生物量较高且增长速率高于地上生物量。说明随着恢复的推进,生物量的分布偏向于植物的地下部分。矿区排土场土壤贫瘠,水分含量低,限制了植物水分和养分的摄取,植物可能通过地下器官,如根系的生长,以更有效地吸收土壤中的水分和养分,为植被在矿区生境中持续生存和生长提供了可能。

从坡向来看,随着恢复年限的增加,北坡群落稳定性逐渐高于南坡,这可能是由于南坡太阳辐射较强,其土壤表层温度较高,水分蒸发较快,同时较差的土壤养分情况和分化作用导致土壤含水量较低,而北坡土壤水分更为充足,合适的温度和营养物质更适合群落的生长。不同坡向土壤微环境的异质性,导致植物群落结构和功能的差异<sup>[29]</sup>,从而影响了群落稳定性的结果。

### 3.2 排土场边坡群落稳定性因子间及其与环境因子的关系

矿区排土场边坡群落 Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数、Pielou 均匀度指数和 Simpson 优势度指数均较低,但各因子基本呈显著正相关性,说明边坡群落多样性和丰富度较低,没有明显的优势物种,各物种分布较均匀,具有较好的生态状况和相对平衡的生态系统。地下生物量与其他结构稳定性因子的相关性整体高于地上生物量,表明矿区边坡群落地上和地下生物量分布特征存在差异,地下生物量与结构稳定性因子的高度相关凸显了植物地下部分对群落生态特征的贡献。这对于深入理解植被在矿区这种特殊环境中的生态适应性和生长机制提供了重要线索。

不同立地类型的土壤环境各不相同,导致群落结构、群落功能和稳定性存在差异。本研究中,群落边坡植被高度和地下生物量与环境因子相关性较高,表明植被的垂直结构和地下生物量分布受环境因子影响显著,植物根系和土壤通过物质交换频繁地相互作用影响植物根系的发育,从而影响植被的生长高度。说明在矿区环境中,地下生物量对于影响和调节群落结构具有较强重要性。群落结构稳定性与全磷因子呈显著相关,群落功能稳定性与有机质和全氮因子呈显著正相关性,说明边坡植被对磷的敏

感度较低,并且能够从富含有机物质和全氮的土壤中受益。通过对胜利矿区的优势物种进行研究,发现禾本科植物和豆科植物在此环境中扮演着重要的角色<sup>[28]</sup>,两者均对磷需求较低,在适应贫瘠土壤、干旱和富含氮的环境中表现良好<sup>[30]</sup>,与本研究结果相吻合。南坡的结构稳定性与环境因子的相关性较高,而北坡的功能稳定性与环境因子相关性较高,说明不同坡向群落对环境变化的响应策略不同。其中,土壤营养元素与南坡结构稳定性呈显著负相关,并与结构稳定性中的各多样性指数均呈负相关,说明丰富的营养元素可能与群落多样性降低有关,进而使得群落结构稳定性降低。而北坡的功能稳定性与各营养元素呈显著正相关,说明北坡养分含量较高的土壤有助于群落功能稳定性的提升。此外,土壤含水量是影响干旱和半干旱地区植被恢复生长和发育的关键因素,在维持植物生长和代谢方面发挥着重要作用<sup>[31]</sup>。矿区的缺水环境对植被的恢复和生长构成严重挑战,胜利矿区土壤含水量与南坡的结构稳定性呈显著正相关性,而与北坡的功能稳定性呈显著负相关性。说明在较干旱的环境中,植物通过调整生理和功能特征,以适应水分有限的条件,这一现象可能受到植物群落中不同物种对于水分的利用和适应策略的影响,南坡植物可能更偏向于维持结构的稳定性,而北坡植物则通过功能的变异来适应干旱环境。可见,不同坡向群落稳定性对环境因子的响应策略存在差异,土壤含水量为矿区植被恢复的重要限制因子。因此,在进行植被恢复时,需要综合考虑不同因素的作用,以促进矿区植被的综合稳定性,这对于矿区植被的管理和恢复提供了实质性的指导。

## 4 结 论

1) 基于群落结构稳定性与群落功能稳定性,选取 Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数、Pielou 均匀度指数和 Simpson 优势度指数、植被盖度、植被高度、地上和地下生物量等 8 个指标,构建了露天煤矿排土场边坡植被恢复群落稳定性评价体系。

2) 内蒙古北电胜利露天煤矿排土场植被恢复随着恢复年限的增加,排土场边坡群落稳定性整体呈上升趋势,但与外围草原站背景值相比,仅内排土场南坡达到基本稳定(Ⅲ)状态,其他排土场仍处于较不稳定(Ⅳ)或不稳定(Ⅴ)状态。

3) 随着恢复年限的增加,群落稳定性逐渐由结

构稳定性主导向功能稳定性主导演变。在恢复初期,主要受人工措施影响,物种多样性较高,使得群落结构稳定性得分较高。随着时间的推移,群落结构稳定性呈波动下降趋势,而群落功能稳定性呈上升趋势。其中地下生物量增长速率更高,生物量逐渐向地下转移,恢复群落逐渐对矿区土壤环境产生适应性,向矿区特有的群落结构进行演替。

4)从坡向来看,随着恢复年限的增加,群落稳定性由南坡高于北坡转变为北坡高于南坡。

5)南坡的结构稳定性与环境因子的相关性较高,而北坡的功能稳定性与环境因子相关性较高,表明不同坡向的群落采用了不同的响应策略以适应环境的变化。其中,群落功能稳定性与有机质和全氮因子呈显著正相关,说明边坡在进行植被恢复时,应特别关注有机质和全氮的积累,适度的施肥和添加有机质有助于提升边坡植物群落稳定性。

#### 参考文献(References):

- [1] 王 佟,刘 峰,赵 欣,等.“双碳”背景下我国煤炭资源保障能力与勘查方向的思考[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(12): 1-8.  
WANG Tong, LIU Feng, ZHAO Xin, *et al.* Reflection on China's coal resource guarantee capacity and exploration work under the background of “double carbon” [J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(12): 1-8.
- [2] 于海旭,刘 闯,金 磊,等.世界露天煤矿发展综述[J]. 中国煤炭, 2023, 49(6): 116-125.  
YU Haixu, LIU Chuang, JIN Lei, *et al.* Overview of the development of open-pit coal mines in the world[J]. China Coal, 2023, 49(6): 116-125.
- [3] 阎仲康,曹银贵,李志涛,等.内蒙古东部草原区矿山生态修复研究:关键技术与减碳路径[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(3): 570-582.  
YAN Zhongkang, CAO Yingui, LI Zhitao, *et al.* Ecological restoration of mines in eastern grassland area of Inner Mongolia, China: Key technologies and carbon reduction paths[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2023, 40(3): 570-582.
- [4] 王党朝,尚 志,余长超.草原露天矿区重构土壤典型物理性质与生物量的关系[J]. 中国农学通报, 2020, 36(23): 60-65.  
WANG Dangchao, SHANG Zhi, SHE Zhangchao. Relationship between typical physical properties of reclaimed soil and biomass in grassland opencast mine area[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36(23): 60-65.
- [5] 王党朝,申莹莹,杨 震.胜利一号露天煤矿开发建设对生态环境的影响评价[J]. 中国煤炭, 2020, 46(1): 58-66.  
WANG Dangchao, SHEN Yingying, YANG Zhen. Evaluation of the impact of development and construction of Shengli No. 1 Open-pit Coal Mine[J]. China Coal, 2020, 46(1): 58-66.
- [6] 周 际,赵财胜,张丽佳,等.矿区土地复垦与土壤修复研究进展[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2023, 55(1): 151-156.  
ZHOU Ji, ZHAO Caisheng, ZHANG Lijia, *et al.* Research progress of land rehabilitation and soil remediation in mining area[J]. Journal of Northeast Normal University(Natural Science Edition), 2023, 55(1): 151-156.
- [7] 胥玉亭,奚同行,吴治玲,等.不同植物配置模式对人工边坡减流减沙效益的影响[J]. 水土保持通报, 2022, 42(3): 1-7.  
ZAN Yuting, XI Tongxing, WU, Zhiling *et al.* Effects of different plant configuration patterns on flow and sediment reduction of artificial slope[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(3): 1-7.
- [8] ZHANG Yaohua, XU Xianli, LI Zhenwei, *et al.* Effects of vegetation restoration on soil quality in degraded karst landscapes of southwest China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 650(2): 2657-2665.
- [9] HOU Xiaoyun, LIU Shiliang, CHENG Fangyan, *et al.* Variability of environmental factors and the effects on vegetation diversity with different restoration years in a large open-pit phosphorite mine[J]. Ecological Engineering, 2019, 127: 245-253.
- [10] LI Xinhui, LEI Shaogang, LIU Feng, *et al.* Analysis of plant and soil restoration process and degree of refuse dumps in open-pit coal mining areas[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(6): 1975.
- [11] 哈文秀,肖桂英,曹建华,等.喀斯特断陷盆地地区不同恢复阶段群落物种组成与多样性特征[J]. 生态学杂志, 2020, 39(1): 36-45.  
HA Wenxiu, XIAO Guiying, CAO Jianhua, *et al.* Species composition and diversity of plant community at different restoration stages of karst graben basin[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(1): 36-45.
- [12] 史浩伯.阿克苏河中游荒漠河岸林物种多样性与群落稳定性[J]. 水土保持通报, 2020, 40(2): 9-15.  
SHI Haobo. Species diversity and community stability of desert riparian forests in middle reaches of Aksu river[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(2): 9-15.
- [13] 邢福元,常 春.基于生态学视角的叙词表概念稳定性研究[J]. 情报杂志, 2019, 38(7): 146-150.  
XING Fuyuan, CHANG Chun. Research on concept stability of the thesaurus based on ecology[J]. Journal of Intelligence, 2019, 38(7): 146-150.
- [14] WANG Min, LIU Qinghua, PANG Xueyong. Evaluating ecological effects of roadside slope restoration techniques: a global meta-analysis[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 281: 111867.
- [15] ZHANG X N, YOU Y, WANG D C, *et al.* Quality evaluation of the soil-root composites layer of Leymus chinensis grassland based on different degradation degrees[J]. Catena, 2022, 215.
- [16] 包玉英,莫 莉,陈 金,等.北电胜利煤矿排土场土壤AM真菌与土壤理化性状相关性研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(12): 3670-3675.  
BAO Yuying, MO Li, CHEN Jin, *et al.* Correlation between soil AM fungi and physical and chemical properties in the dumping site of Beidian-Shengli Coal Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(12): 3670-3675.



- [17] 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, 2000.
- [18] 巫翠华, 蔡建军, 李 华, 等. 紫柏山壳斗科植物群落物种多样性和稳定性研究 [J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(8): 108–115.  
WU Cuihua, CAI Jianjun, LI Hua, *et al.* Studies on species diversity and stability of the fagaceae community in the Zibai mountain [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2021, 41(8): 108–115.
- [19] 吴训锋, 刘 强, 邢海涛, 等. 宣威宝山镇煤矿区植物多样性以及群落稳定性评价 [J]. 西部林业科学, 2022, 51(6): 115–122.  
WU Xunfeng, LIU Qiang, XING Haitao, *et al.* Assessment of vegetation characteristic and community stability at baoshan mining area of xuanwei city [J]. Journal of West China Forestry Science, 2022, 51(6): 115–122.
- [20] 祝景彬, 张志成, 李红琴, 等. 牧压梯度下高寒草甸植被生物量与土壤理化性质变化特征及相互关系 [J]. 中国科学: 生命科学, 2023, 53(8): 1166–1175.  
ZHU Jingbin, ZHANG Zhicheng, LI Hongqin, *et al.* Characteristics and interrelationship of vegetation biomass and soil properties in alpine meadow under grazing gradients [J]. Scientia Sinica (Vita), 2023, 53(8): 1166–1175.
- [21] 张志明, 孙小妹, 包段红, 等. 祁连山北麓荒漠草原 5 种优势植物生物量与土壤养分特征 [J/OL]. 干旱区地理, 1–15 [2023-12-10] <http://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1103.x.20231130.1457.001.html>.  
ZHANG Zhiming, SUN Xiaomei, BAO Duan hong, *et al.* Biomass and soil nutrient characteristics of five dominant plant species in the desert grassland of the northern foothills of Qilian Mountains [J/OL]. Arid Land Geography, 1–15 [2023-12-10] <http://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1103.x.20231130.1457.001.html>.
- [22] 李金波, 伍红燕, 赵 斌, 等. 模拟边坡条件下常见护坡植物苗期根系构型特征 [J]. 生态学报, 2023, 43(24): 1–11.  
LI Jinbo, WU Hongyan, ZHAO Bin, *et al.* Root architecture characteristic of common slope protection plants at seedling stage under simulated slope conditions [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(24): 1–11.
- [23] OKOLI Chitu, PAWLOWSKI Suzanne D. The Delphi method as a research tool: an example, design considerations and applications [J]. Information & Management, 2004, 42(1): 15–29.
- [24] 施龙青, 梁基业, 翟培合. 基于博弈论组合赋权的矿山地质环境评价 [J]. 中国科技论文, 2022, 17(9): 1035–1042.  
SHI Longqing, LIANG Jiye, ZHAI Peihe. Evaluation of mine geological environment based on combination weighting of game theory [J]. China Sciencepaper, 2022, 17(9): 1035–1042.
- [25] 李紫薇, 马秋莹, 姚晓寒, 等. 泥炭沼泽湿地生态系统稳定性及影响因素研究: 以金川湿地为例 [J/OL]. 生态学杂志, 1–14 [2023-12-10] <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20230712.2041.033.html>.  
LI Ziwei, MA Qiuying, YAO Xiaohan, *et al.* Stability and influencing factors of peatland ecosystem: A case study of Jinchuan-peatland [J/OL]. Chinese Journal of Ecology 1–14 [2023-12-10] <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20230712.2041.033.html>
- [26] 刘玲莉, 井 新, 任海燕, 等. 草地生物多样性与稳定性及对草地保护与修复的启示 [J]. 中国科学基金, 2023, 37(4): 560–570.  
LIU Lingli, JING Xin, REN Haiyan, *et al.* Grassland biodiversity, stability, and implications for grassland conservation and restoration [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2023, 37(4): 560–570.
- [27] KIGEL Jaime, KONSENS Irit, SEGEV Udi, *et al.* Temporal stability of biomass in annual plant communities is driven by species diversity and asynchrony, but not dominance [J]. Journal of Vegetation Science, 2021, 32: e13012.
- [28] 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 Lin, LU Zhaohua, TANG Siyi, *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.
- [29] 米维军, 张 飞, 贾 燕, 等. 银西高铁宁夏段边坡绿植防护中的坡向差异性 [J]. 铁道工程学报, 2021, 38(9): 87–92.  
MI Weijun, ZHANG Fei, JIA Yan, *et al.* Slope aspect difference in slope green plant protection in Ningxia Section of Yinchuan-Xi'an high-speed railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(9): 87–92.
- [30] 赵志芳, 张鸿龄, 王敦誉, 等. 矿区土壤氮磷形态变化及对复垦措施响应研究进展 [J]. 生态科学, 2023, 42(5): 266–272.  
ZHAO Zhifang, ZHANG Hongling, WANG Xueyu, *et al.* Research progress on the dynamics of soil nitrogen and phosphorus form and their responses to reclamation measures in mining areas [J]. Ecological Science, 2023, 42(5): 266–272.
- [31] 魏松涛, 李建安, 仵 涛, 等. 不同水分处理对香根草根际土壤理化性质及细菌群落结构影响 [J]. 公路, 2023, 68(7): 368–376.  
WEI Songtao, LI Jian'an, WU Tao, *et al.* Impact of Different moisture treatment on physicochemical properties and bacterial community structure of vetiver rhizosphere soil [J]. Highway, 2023, 68(7): 368–376.