

干旱砾漠区露天采煤对草地植物群落特征 及其稳定性影响

韩 勇¹, 姜凯升¹, 杜华栋^{2,3}, 毕银丽^{2,3}

(1 国能新疆红沙泉能源有限责任公司, 乌鲁木齐 838100; 2 西安科技大学 地质与环境学院, 西安 710054; 3 西安科技大学 西部
矿山生态环境修复研究院, 西安 710054)

摘 要: 露天煤炭开采对区域地形地貌、水文循环和土壤植被等生态环境因子产生了较大干扰, 但干旱砾漠区露天开采对周边植物群落及其稳定性的影响范围和程度仍有待深入研究, 这个问题的探明才能为矿区植被恢复的精准施策提供科学依据。该文通过定量比较距露天开采区不同距离植物群落组成、多样性、生产力和稳定性变化特征, 分析干旱砾漠区露天采煤对植物群落的影响范围和程度, 并结合土壤性状和微气象因子的测量, 探究影响干旱矿区植物群落特征的主导因子。结果表明: (1) 干旱砾漠区露天开采排土场原始植被消失殆尽, 开采区外围 0~500 m 范围内原优势物种重要值降低, 伴生物种重要值增加, 500 m 后随着距开采区距离的增加优势植物重要值逐渐增加, 至开采区 800 m 外植物群落组成趋于稳定; (2) 开采区外围 0~500 m 范围内植物群落地上生物量、多样性和群落稳定性较 5 000 m 处分别平均下降了 53%、70% 和 37%, 开采区 500 m 以外上述群落指标整体上变化不明显, 而植被覆盖度在开采区外围不同距离并未表现出显著变化趋势; (3) 土壤水分、有机质、有效氮磷钾、可溶性盐与植物群落地上生物量、多样性和稳定性呈正相关关系, 而土壤 pH、光照强度和地表温度与上述植物群落指标呈负相关关系。因此干旱砾漠区露天开采排土场及开采区外围 0~500 m 范围是矿区生态修复过程中重点考虑区域, 同时研究表明干旱砾漠区植被主要分布在砾漠戈壁浅沟和季节性河道等生境相对良好的凹陷微地形条件下, 综合可得出干旱砾漠区植被修复过程中可通过微地形塑造、土壤改良和乡土物种繁殖促进, 以实现干旱矿区生态系统的稳定和可持续发展。

关键词: 露天开采; 干旱砾漠区; 植物群落结构; 群落稳定性; 生态修复

中图分类号: Q948.1 **文献标志码:** A

Effect of Open-pit Coal Mining on Grassland Plant Community Characteristics and Stability in Arid Gravel Desert Area

HAN Yong¹, JIANG Kaisheng¹, DU Huadong^{2,3}, BI Yinli^{2,3}

(1 Guoneng Xinjiang Hongshaquan Energy Co., Ltd, Urumqi 838100, China; 2 College of Geology & Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 3 Western Mine Ecological Environment Rehabilitation Research Institute, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Open-pit coal mining has caused great disturbances to the geomorphology, hydrological cycle, soil and vegetation, and other ecological environmental factors, but the scope and extent of open-pit

收稿日期: 2022-08-25; 修改稿收到日期: 2023-02-23

基金项目: 国家能源集团 2030 重大项目先导资助项目 (CJNY2030XD XM-19-07. 2)

作者简介: 韩 勇 (1977—), 男, 高级工程师, 主要从事露天采矿技术与管理研究。E-mail: 315638761@qq.com

mining on the plant communities and its stability around the mining area still need to be further studied, and it is only when this issue is clarified that a scientific basis can be provided for the precise policy of revegetation on mining sites. In this paper, the influencing scope and extent of open-pit coal mining on plant communities were analyzed at different distances from the mining area in arid gravel desert areas by quantitative comparing the composition, diversity, productivity and stability of plant communities, and the factors affecting the characteristics of plant communities were explored in combination with the soil and micrometeorological factors. The results showed that: (1) Original vegetation disappeared completely in dump sites, the important value (IV) of dominant species decreased within 0—500 m around the mining area, but the IV of companion species increased. The IV of dominant plants gradually increased with the increasing distance from mining area, and the composition of plant community tended to be stable 800 m away from the mining area. (2) The plant community's aboveground biomass, diversity and stability within 0—500 m around the mining area decreased by 53%, 70% and 37% averagely compared with 5 000 m areas, respectively. The above plant community indicators did not change significantly beyond 500 m of the mining area, while the vegetation coverage did not show a significant change at different distances around the mining area. (3) Soil water content, organic matter, available nitrogen, phosphorus, potassium and soluble salt were positively correlated with plant community's aboveground biomass, diversity and stability, while soil pH, light intensity and surface temperature correlated negatively with these plant community indicators. These results indicated that the dump sites and 0—500 m around mining area were the priority area to be considered in the process of ecological restoration in open-pit coal mining in arid gravel desert areas. Meanwhile, vegetation was mainly distributed in the depressed micro-topography with relatively good habitats such as shallow gullies and seasonal river channels in study area. Therefore, it was necessary to micro-topography shaping, improve soil quality, and use local species in the process of vegetation restoration. In these ways, a stable and sustainable ecosystem can be achieved in the arid coal mining area.

Key words: open-pit mining; arid gravel desert areas; plant community structure; community stability; ecological restoration

煤炭开采在带来巨大资源效益和经济价值的同时,也产生了不容忽视的生态环境问题。相比井工开采,露天开采对地面扰动更大,对生态系统的影响也更为强烈,其会引发地质灾害^[1-2]、改变地貌格局^[3]、加剧水土流失^[4]、减少河水流量甚至引起断流^[5]、降低地下水位和疏干浅层地下水^[6]等一系列生态问题。

植被不仅是生态系统的主要组成部分和表征生态系统质量的重要指示因子,还是衡量地表生态健康程度的重要指标之一^[7]。首先,利用遥感技术对露天开采区植被退化因素分析表明,土地的挖损和占压改变了矿区原有的地形地貌和景观生态,生态景观破碎化与连通性降低是植被退化的主导因素^[8];其次,露天开采造成浅层地下水疏干导致地下水位明显下降,使地表土层干化,引发河流断流、水库枯干,进一步引起土壤结构和生物群落等环境要素发生变化^[9];再次,露天开采对地表生态的强烈扰动、矿区沙漠化和土壤侵蚀程度增加,进而使植被分布格局发生改变^[10]。前人关于露天煤炭开采活动对植被影响的研究,大多数集中于半干旱东部草原

排土场、矿坑等采矿活动直接影响区^[11-12],或基于遥感影像判别开采对矿区景观格局和植被覆盖度的影响^[13],而关于干旱砾漠区露天开采对周边区域植被群落结构、组成是否有影响?影响程度和空间范围多大?哪些因子的损害造成地区植物群落特征变化?这些问题尚未有明确答案,但这些问题是生态脆弱区生态修复策略制定首先要解答的。

新疆煤炭以其储量大、埋藏浅、厚度大、易开采的特点在中国能源战略中占有越来越重要地位^[14],但其大量优质资源富集于生态脆弱的戈壁区且主要以露天开采的方式开发,直接导致地表损毁、风蚀加剧、地貌改变、地下水位疏干等生态损害^[15],煤炭开发与生态保护的矛盾亟待破解。

因此,本研究以新疆砾漠戈壁区典型露天开采煤矿为研究对象,定量比较距开采区不同距离植物群落组成、多样性和生产力变化特征,阐明干旱区露天开采对植物群落的影响程度和空间范围,结合矿区土壤理化性状和微气象因子的测量,探究影响研究区植物群落特征的主导因子,以期为干旱区矿区生态恢复的精准施策提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于新疆昌吉回族自治州奇台县准东开发区西黑山产业园(图 1),该区处于古尔班通古特沙漠东缘的卡拉美利山南麓砾漠戈壁区(90°10′—90°40′E,44°20′—44°40′N),属中温带大陆性半沙漠气候,年均气温 3℃,年均降水量仅为 160~200 mm,但年均蒸发量 1 600~2 000 mm;土壤以荒漠盐碱土为主,土质为粉砂土;区域海拔在 500~800 m 之间,主要为砾漠平原,地形平坦开阔,风蚀残丘点缀分布于砾漠戈壁,总体地势北高南低,土地利用类型以荒漠戈壁为主^[16]。

区域内植物组成简单,类型单调,分布稀疏,建群植物主要是由超旱生、旱生的半乔木、灌木、小半灌木以及旱生的一年生草本、多年生草本和中生的短命植物等荒漠植物组成。

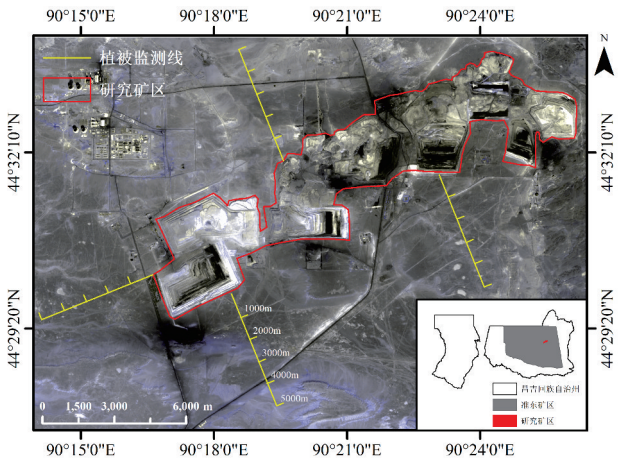


图 1 研究区位置及样地布设图

Fig. 1 Study area and sample plot layout

1.2 样地设置与试验方法

1.2.1 样地设置 研究选择干旱荒漠区煤炭开采最具代表性的新疆砾漠戈壁区露天开采煤矿(图 1),探究干旱砾漠区露天开采对周边区域草地植物群落的影响程度和空间范围大小。

由于矿区东向在地貌及扰动强度上与其他方向存在差异,因此在样地布设中舍弃东向,在矿区南(2条)、西(1条)和北(1条)布设 4 条监测线作为重复,分别在监测线上距离采场边界 0 m,100 m,200 m,300 m,400 m,500 m,600 m,700 m,800 m,900 m,1 000 m,1 200 m,1 400 m,1 600 m,1 800 m,2 000 m,2 500 m,3 000 m 和 4 000 m 和 5 000 m 处分别设置样地,同时在开采区排土场东南西北 4 个方向

各设 1 个样地。

1.2.2 样地调查与数据计算 (1)样地调查与试验方法 每个样地随机设 3 个 2 m×2 m 的草本样方,调查各个样方的植物种类、数量、盖度和频度,并剪取主要物种地上生物量,带回实验室,85℃下烘干称重计算地上生物量。同时在每个样方内随机设置 5 个点,用标准环刀(100 cm³)采集土样用于土壤容重测定,采集表层(0—30 cm)土壤,一部分土样放入铝盒中用于测定土壤水分含量,另一部分土样带回实验室风干备用,测定土壤有机质、有效氮、有效磷、有效钾、pH 和可溶性盐。样地微气象因子集中在 2020 年和 2021 年 8 月 5—15 日无云天气条件下午 14:00—15:00 测量,其中地表温度用点将集团 DJ-6310 针式数显土壤温度计,光照强度和地表蒸发量用点将集团 Vantage Pro2 手持式小型自动气象站获取。距开采区不同距离土壤及微气象因子变化特征如表 1。

(2)植物群落特征指标计算 ①群落物种重要值^[17]:

$$IV = (RF + RC + RH) / 3 \quad (1)$$

式中:RF 为相对频度;RC 为相对盖度;RH 为相对高度。

②群落 Shannon-Wiener 多样性指数^[17]:

$$H' = - \sum_{i=1}^S (P_i \ln P_i) \quad (2)$$

式中:S 为样方种的总数;P_i 为第 i 个物种数占所在样方全部物种个数的比例。

③植物群落稳定性:采用 M. Godron 贡献定律法对群落稳定性进行分析^[18]。分析过程首先将植物群落中所有物种的按频度大小降序排列,计算其累积相对频度与植物种类倒数累积,用百分数表示,以植物种类倒数的累积百分数为 x 轴,以相对频度的累积百分数为 y 轴应画散点图并拟合为平滑曲线,模型为 $y = ax^2 + bx + c$,直线方程为 $y = 100 - x$,其交点(x, y)即为稳定性参考点,交点坐标与点(20, 80)的距离称为欧式距离,该距离越小说明植物群落越稳定,越大则越不稳定。

1.3 数据分析方法

利用 Excel 软件对数据进行描述统计,结果以平均值±标准差的方式表示;采用 SPSS 20 软件的单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较不同样地的差异显著性,显著水平设定为 $\alpha = 0.05$ 。

利用冗余分析方法(RDA)探索环境因子与植物群落特征之间的关系,使用 CANOCO 4.5 软件进行植物群落特征、环境因子和样地排序与作图。

表 1 距开采区不同距离土壤及微气象因子变化特征

Table 1 Variation characteristics of soil and micro meteorological factors at different distances from the mining area

距离 Distance /m	含水量 Water content /(g/g)	容重 Bulk density /(g/cm ³)	土壤 pH Soil pH	可溶性盐 Soluble salt /(g/kg)	有机质 Organic matter /(g/kg)	有效氮 Available nitrogen /(mg/kg)	有效磷 Available phosphorus /(mg/kg)	有效钾 Available potassium /(mg/kg)	地表蒸发量 Soil surface evaporation /(mm/d)	地表温度 Surface temperature /℃	光照辐射强度 Light radiation intensity /[μmol/(m ² ·s)]
0	2.3±0.5d	1.34±0.05a	8.47±0.32a	15.76±2.57c	2.98±1.53f	2.92±0.62g	3.79±0.32b	128.98±7.63c	0.37±0.07b	50.13±0.57a	35.3±2.4a
100	2.7±0.7d	1.19±0.12c	8.72±0.12a	13.52±0.77c	4.91±0.75e	3.58±0.77f	4.24±0.42b	163.38±19.23b	0.37±0.05b	48.42±2.31a	33.7±6.2a
200	2.7±1.6d	1.15±0.12c	8.58±0.28a	17.29±2.68c	4.82±1.71e	5.20±0.29e	5.09±1.05b	160.71±33.48b	0.58±0.07a	46.93±2.81b	32.4±3.1a
300	2.5±0.8d	1.17±0.14c	8.41±0.27a	13.74±2.46c	5.62±1.19d	6.05±0.83d	4.85±0.55b	170.14±19.52b	0.53±0.08a	42.20±2.59b	33.4±2.9a
400	3.2±0.9c	1.19±0.17c	8.36±0.63a	15.93±1.98c	6.57±0.75c	6.49±1.08d	5.20±0.44b	166.93±35.52b	0.48±0.13a	44.75±1.75b	34.4±7.5a
500	3.7±0.7c	1.29±0.22a	8.47±0.39a	18.81±3.69b	6.33±0.72c	8.22±1.13c	4.83±0.92b	220.76±10.37ab	0.41±0.13a	46.77±4.86b	30.9±3.0ab
600	3.2±0.4c	1.22±0.14b	8.29±0.37a	17.72±4.24c	6.22±1.16c	8.47±1.77c	6.98±1.76a	238.72±33.62ab	0.61±0.05a	43.15±8.79b	26.1±2.1b
700	3.3±0.5c	1.32±0.16a	8.43±0.27a	13.55±1.62c	6.45±1.25c	7.40±2.54cd	5.89±0.86b	221.45±22.59ab	0.55±0.09a	36.28±10.12bc	30.1±1.5ab
800	3.6±0.4c	1.31±0.12a	8.11±0.24a	21.56±1.31b	6.93±1.48c	9.61±0.66b	7.09±0.74a	178.04±19.89b	0.49±0.11a	37.20±5.18bc	27.9±3.5b
900	4.3±0.2b	1.34±0.08a	8.23±0.33a	20.07±2.17b	7.02±0.87c	9.54±1.22b	5.72±0.76b	183.88±13.86b	0.53±0.11a	39.12±6.75bc	23.8±4.9b
1 000	4.5±0.8ab	1.27±0.03b	8.15±0.46a	24.21±0.93a	9.73±1.24a	10.52±0.99b	8.86±0.31a	257.31±30.22a	0.49±0.12a	37.17±6.56bc	23.5±3.1b
1 200	5.7±0.7a	1.35±0.10a	7.72±0.39a	22.35±4.18b	9.45±1.02ab	8.51±1.15c	9.71±0.44a	298.75±29.07a	0.53±0.11a	34.02±6.17bc	21.7±3.6b
1 400	5.2±0.4a	1.29±0.04b	8.03±0.31a	22.88±3.02b	9.90±1.84a	13.77±1.81a	9.02±0.94a	285.68±22.47a	0.53±0.12a	33.45±7.88bc	18.6±5.9b
1 600	5.3±0.5a	1.28±0.05b	7.83±0.48a	20.18±2.57b	9.13±1.35ab	11.86±2.08b	8.38±1.13a	286.76±27.97a	0.49±0.10a	27.30±8.24c	22.1±7.8b
1 800	5.2±0.7a	1.27±0.04b	8.22±0.69a	21.41±1.64b	10.96±1.72a	13.06±1.79a	9.56±0.72a	261.35±41.16a	0.37±0.18b	32.55±10.67bc	26.7±1.7b
2 000	5.6±0.5a	1.33±0.10a	7.95±0.42a	20.87±1.94b	10.02±2.33a	8.01±0.93c	7.38±0.39a	275.66±33.57a	0.41±0.22a	35.73±2.64bc	26.3±3.6ab
2 500	4.5±0.8ab	1.24±0.15b	8.34±0.34a	22.43±1.89b	8.71±2.14b	10.44±0.94b	7.89±0.94a	263.13±16.57a	0.57±0.07a	39.32±5.47bc	26.1±5.1ab
3 000	5.2±0.7a	1.27±0.13b	8.27±0.29a	20.95±3.66b	7.18±0.68b	6.39±2.27d	6.33±1.87b	193.56±20.12ab	0.38±0.13ab	34.27±10.14bc	19.2±5.3b
4 000	4.8±1.1a	1.22±0.09b	8.19±0.48a	20.38±2.86b	7.49±1.47b	7.94±0.63c	7.93±0.55a	213.64±24.40ab	0.54±0.12a	29.65±5.05bc	23.5±1.7b
5 000	5.6±1.2a	1.23±0.11b	8.13±0.33a	26.64±3.56a	8.96±1.49b	10.48±0.82b	6.16±0.82b	230.63±41.86ab	0.58±0.06a	30.08±3.89bc	26.2±2.5b

注:不同小写字母表示不同距离差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference at different distances ($P<0.05$).

2 结果与分析

2.1 距开采区不同距离植物群落组成特征

研究矿区草地共调查到植物物种 20 种,分 4 科、17 属。主要优势种分别是盐生假木贼(*Anabasis salsa*)、盐爪爪(*Kalidium foliatum*)、三芒草(*Aristida adscensionis*)和芨芨草(*Neotrinia splendens*) (表 2)。盐生假木贼在群落重要值的比例平均在 60% 以上处于优势地位,其在研究区植物群落中具有较宽广的生态位与干扰能力,是戈壁荒漠草原群落构建的关键种。露天开采排土场植物仅有一年生猪毛菜属植物和角果藜生长。较开采影响较小的 5 km 样地,距开采区 0~500 m 优势物种盐生假木贼重要值平均降低了 37%,原伴生物种雾冰藜(*Grubovia dasyphylla*)、骆驼蓬(*Peganum harmala*)等重要值增加(表 2)。随着距开采区距离增加,优势物种盐生假木贼和芨芨草的重要值增加,至开采区外围 800 m 以外其群落重要值差异较小,且草地物种数基本维持在 4~6 种,其他植物重要值在距开采区不同距离差异亦不显著。

综合可得,露天开采引起开采区外围 0~500 m 盐生假木贼等优势物种显著衰退,伴生物种重要值增加,而 800 m 后植物群落物种组成及其在群落重

要值则较为稳定。

2.2 距开采区不同距离植物群落特征及其稳定性

由图 2,A、B 可知距露天开采区 0~400 m 内草地生物量和 Shannon-Wiener 多样性指数(H')均降低,分别较受开采影响较小的 5 km 样地平均下降了 53% 和 70% ($P<0.05$),开采区 500 m 以外随着距离的增加,开采扰动对植物群落生物量和多样性的影响逐渐减小,其中地表生物量除 1 400 m 和 2 000 m 与 5 km 距离处植物群落生物量相较有显著下降外($P<0.05$),其余距离未表现出差异显著性($P>0.05$);而 H' 与 5 km 距离处相比除 3 000 m 有显著增加外,其余 500 m 以外植物群落多样性并未表现出显著变化($P>0.05$)。开采区排土场生物量与开采扰动较小的 5 km 样地相比并未显著降低,但 H' 降低了 65%。干旱区露天开采并未引起植被覆盖度的变化,距开采区不同距离植被覆盖度差异不显著($P>0.05$)(图 2,C)。干旱区露天开采排土场和距离开采区 0~400 m 植物群落稳定性平均下降了 37% ($P<0.05$),而 500 m 后植物群落稳定性基本不变(图 2,D)。综合可得,干旱砾漠区露天煤炭开采对植物群落生产力、多样性和稳定性影响范围为 400~500 m,而对研究区植被覆盖度影响较小。

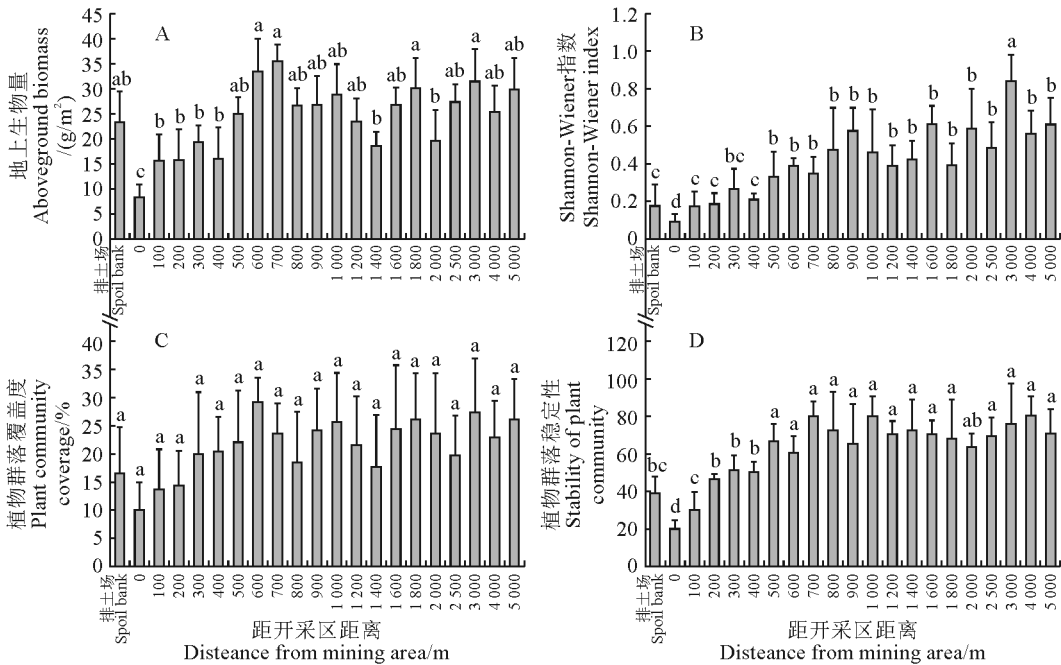
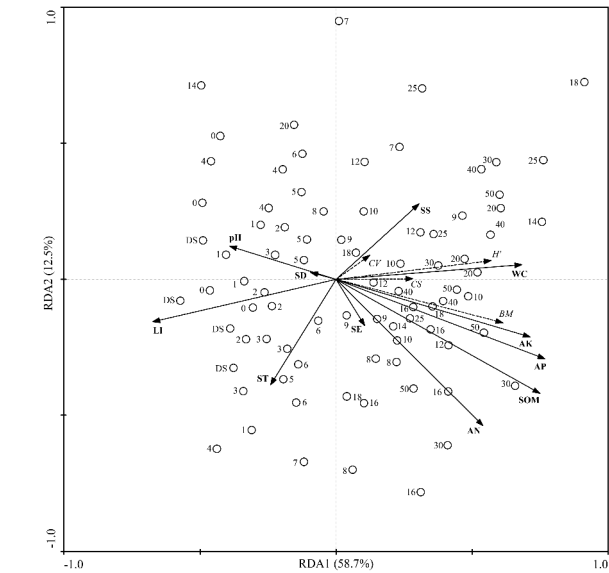


图 2 距开采区不同距离植物群落特征和稳定性

Fig. 2 Productivity, diversity and stability characteristics of plant communities at different distances from the mining area

2.3 不同距离环境因子与植物群落特征关系分析

冗余分析结果显示,植物群落特征与环境因子相关关系第一轴和第二轴的累计比例分别为58.7%和12.5%,即第一轴和第二轴共解释了71.2%的土壤、微环境因子与植物之间的关系,植物群落特征 MonteCarlo 置换检验所有排序轴均达到显著水平($P<0.05$),说明排序结果可较好地反映了群落与环境之间的关系。由图3可知,土壤水分、有机质、可溶性盐、有效氮磷钾与植物群落生物量和稳定性呈正相关关系,地表温度、光照强度和土壤pH与上述植物群落指标呈负相关关系,而土壤容重、地表蒸发量与植物群落特征指标相关性较小;同时表明植物群落覆盖度与土壤因子、微气象因子关系不密切。



○表示采样地,样地号×100为该样地距开采区的距离;
DS. 排土场; WC. 含水量; SD. 土壤容重; SS. 土壤可溶性盐;
SOM. 土壤有机质; AN. 有效氮; AP. 有效磷; AK. 有效钾;
SE. 地表蒸发量; ST. 地表温度; LI. 光辐射强度; H'. 香浓-
威尔多样性指数; VC. 植被覆盖度; CS. 植物群落稳定性;
BM. 地上植物群落生物量。

图3 植物群落特征、环境因子和样地的 RDA 三序图
○ Represents the sampling plots, plots No. × 100 is the
distance between sample points and coal mining area;
DS. Dump site; WC. Soil water content; SD. Soil bulk density;
SS. Soil soluble salt; SOM. Soil organic matter; AN. Soil
available nitrogen; AP. Soil available phosphorus; AK. Soil
available potassium; SE. Ground surface evaporation;
ST. Ground surface temperature; LI. Light radiation intensity;
H'. Shannon-Wiener index; VC. Vegetation coverage;
CS. Plant communities stability; BM. Biomass of aboveground
plant community.

Fig. 3 RDA triplot of soil properties, plant community
characteristics and plots

结合 RDA 排序图中样地随土壤、环境、植物因子梯度变化的分布规律发现,排土场和距离开采区0~500 m 范围主要分布于排序图的第二、三象限,地表温度高、光照强度强、表层土壤水分养分含量低是这些样地最明显的特征,这些生态因子使得此类样地植物群落生物量小、多样性低且稳定性差,土壤因子和植物群落处于退化状态;距离开采区500~5 000 m 的样地主要分布于排序图第一、四象限,该区土壤养分水分状况和植物群落质量均较排土场和开采区外围500 m 范围内好且不同距离间样地分布规律不明显。

3 讨论

煤矿露天开采对生态环境最直接的影响是剥离地表覆盖物后,导致原有土地资源被挖损和压占,改变了原有的地形地貌、水文条件和景观类型,进而使植物群落特征发生变化^[19]。研究表明露天采煤排土场原始植被消失殆尽,自然恢复条件下植被将从裸地演替开始,由于排土场表层松散的土壤结构可增加荒漠区有限降雨的入渗^[20],也可使一年生物种细小的种子进入土壤松散表层下^[21],增加了一年生物种定植成功的机率,故干旱砾漠区排土场一年生的猪毛菜属物种和角果藜等先锋物种率先出现,导致排土场植物群落生物量与多样性较开采影响较小的区域并未呈现显著降低。但由于排土场分割了矿区生境使得生境斑块岛屿化,限制了植物种群的有效交流^[22],因此调查发现研究区排土场多年演替后植物群落也仅为一年生先锋物种,加之排土场土壤熟化程度低、地表光照辐射强度大和研究区干旱的自然条件限制,使得排土场自然植被恢复困难且演替进程缓慢^[23],因此干旱砾漠区露天开采排土场在自然生态恢复多年后植物群落覆盖度、生物量和多样性仍较低。

在开采区周边0~800 m 范围内,原有优势物种盐生假木贼、芨芨草和三芒草等衰退,但仅表现为重要值上减小,说明干旱区露天采煤并未导致植物群落组成发生根本改变,这与东部半干旱草原露天开采区一年生草本植物数量增加出现逆向演替趋势不同^[24],主要原因是由于东部矿区一年生物种具有较大的土壤种子库^[25],优势物种衰退后为一年生物种的萌发与建植创造了条件,而干旱荒漠区持久种子库数量较少^[26],且坚硬的砾漠外壳降低了原优势植物衰退后一年生物种的定植机会。露天采坑的存在造成矿区地下径流和地表径流的通路发生改

变^[4],矿坑周边包气带岩土结构的破坏使得土壤表层水分蒸发散失量加大^[27],表层土壤含水能力下降,进而影响土壤微生物活性,导致砾漠区原本贫瘠的土壤养分分解和转化循环受阻^[28],加之干旱区露天采煤过程引起的扬尘和重金属积累,对矿区周边一定范围土壤、植物生长发育也会造成干扰^[29],这些原因使得 0~500 m 植物群落覆地表生物量、多样性指数和稳定性下降。本研究表明干旱砾漠区原本植被覆盖度较低不超过 30%,开采区周边表层土壤退化和微生境因子恶化引起优势植物退化的同时,也伴随着一些伴生物种覆盖度的增加,因此研究区露天开采并未对周边植物群落覆盖度产生较大影响,这与半干旱区煤炭开采造成地表植被覆盖度降低的结论不同^[30]。综合研究表明,干旱砾漠区草原群落中建群种具有较宽广的生态位与干扰能力,开采仅影响了开采区周边 0~800 m 范围内植物群落组成和 0~500 m 群落生产力和稳定性。

冗余分析结果表明,土壤水分、有效养分和光照强度是影响植物群落生产力和稳定性的主要因子,因为荒漠区水分是植物存活和生长的第一位要素和限制因子,土壤养分在植物发育中也具有较重要的作用,野外调查过程中和前人研究结果^[31]均发现干

旱戈壁荒漠区植物主要分布在砾漠戈壁的凹陷和浅沟、季节性河道等微地形下,这些微地形在春季融雪和夏季短历时暴雨过程中,可以汇聚有限的水分和养分供应植物生长和发育^[32]。由于地表光照强度影响了地表温度,在地表温度较高的地形条件下,只有耐旱耐高温物种才能存活,因此光照与植物群落多样性和均匀度成反比。综合研究矿区植物种类出现频率和重要值发现,研究区乡土草本物种在两种情况下在群落中重要值较大,可作为矿区生态恢复的优先物种:一是分布范围较窄,只在特定的环境下出现,但其在该环境下生长发育良好,可构建较大的生态位宽度,如仅在风沙地广泛分布的苦豆子、仅在季节性河道中分布的芦苇和西伯利亚滨藜;二是分布范围较广,不同立地环境都有分布,且均是该环境建群种,如盐生假木贼、猪毛菜等。结合本次露天采煤对干旱区砾漠植物群落特征及影响因子分析,排土场及开采区外围 0~500 m 范围是矿区生态修复过程中重点考虑区域,在植被恢复过程中不但要通过微地形塑造和土壤改良等措施改善植被生长微环境条件^[33],同时还要促进适应性强的荒漠乡土物种繁殖更新^[34],促进矿区生态系统的稳定和可持续发展。

参考文献:

[1] 王双明,孙强,乔军伟,等.论煤炭绿色开采的地质保障[J].煤炭学报,2020,45(1):8-15.
WANG S M, SUN Q, QIAO J W, et al. Geological guarantee of coal green mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 8-15.

[2] LOUPASAKIS C. Contradictive mining-induced geocatastrophic events at open pit coal mines: The case of Amintaio coal mine, West Macedonia, Greece[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, 13(13): 1-12.

[3] WU Z H. Spatial distribution of the impact of surface mining on the landscape ecological health of semi-arid grasslands[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 111: 105 996.

[4] PARK J, KWON E, CHUNG E, et al. Environmental sustainability of open-pit coal mining practices at baganuur, Mongolia[J]. *Sustainability*, 2019, 12(1): 248.

[5] 董书宁,王海,黄选明,等.基于保障生态地下水位的露天煤矿主动保水技术研究[J].煤炭科学技术,2021,49(4):49-57.
DONG S N, WANG H, HUANG X M, et al. Research on active water conservation technology in open-pit coal mine based on ecological protection groundwater level[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(4): 49-57.

[6] RAY S, DEY K. Coal mine water drainage: The current status and challenges[J]. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series D*, 2020, 101(2): 165-172.

[7] 段语凤,张玉秀,余创.煤炭井工开采对干旱荒漠区植被动态变化的影响[J].生态学报,2020,40(23):8 717-8 728.
DUAN Y F, ZHANG Y X, YU C. Effects of the underground coal mining on the dynamic changes of vegetation in arid desert area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(23): 8 717-8 728.

[8] CHATTERJEE S. Impact of open pit coal mining on the forest landscape ecology using spatial metrics: A study of Barabani C. D. block, West Bengal[J]. *Spatial Information Research*, 2021, 29(5): 645-659.

[9] WORLANYO A S, LI J F. Evaluating the environmental and economic impact of mining for post-mined land restoration and land-use: A review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 279: 111 623.

[10] ZHANG M. Tempo-spatial changes and main anthropogenic influence factors of vegetation fractional coverage in a large-scale opencast coal mine area from 1992 to 2015[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 232: 940-952.

[11] 李全生.东部草原区大型煤电基地开发的生态影响与修复技术[J].煤炭学报,2019,44(12):3 625-3 635.
LI Q S. Progress of ecological restoration and comprehensive remediation technology in large-scale coal-fired power base in the eastern grassland area of China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(12): 3 625-3 635.

[12] 王金满,郭凌俐,白中科,等. 黄土区露天煤矿排土场复垦后土壤与植被的演变规律[J]. 农业工程学报, 2013, **29**(21): 223-232.
WANG J M, GUO L L, BAI Z K, *et al.* Succession law of reclaimed soil and vegetation on opencast coal mine dump of loess area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, **29**(21): 223-232.

[13] LIU X Y. Vegetation coverage change and stability in large open-pit coal mine dumps in China during 1990—2015[J]. *Ecological Engineering*, 2016, **95**: 447-451.

[14] 霍 超. 新疆煤炭资源分布特征与勘查开布局研究[J]. 中国煤炭, 2020, **46**(10): 16-21.
HUO C. Research on distribution characteristics and exploration and development layout of coal resources in Xinjiang[J]. *China Coal*, 2020, **46**(10): 16-21.

[15] 于昊辰,陈 浮,尹登玉,等. 采矿与气候变化对戈壁矿区土地生态系统的影响:以准东煤炭基地为例[J]. 煤炭学报, 2021, **46**(8): 2 650-2 663.
YU H C, CHEN F, YIN D Y, *et al.* Effects of mining activities and climate change on land ecosystem in Gobi mining area: A case study of Zhundong coal base[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, **46**(8): 2 650-2 663.

[16] 程维明,包安明,柴慧霞. 新疆地貌格局及其效应[M]. 北京: 科学出版社, 2018.

[17] 宋永昌. 植被生态学[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2017.

[18] 郑元润. 森林群落稳定性研究方法初探[J]. 林业科学, 2000, **36**(5): 28-32.
ZHENG Y R. Comparison of methods for studying stability of forest community[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2000, **36**(5): 28-32.

[19] 白中科,赵景逢,李晋川,等. 大型露天煤矿生态系统受损研究:以平朔露天煤矿为例[J]. 生态学报, 1999, **19**(6): 870-875.
BAI Z K, ZHAO J K, LI J C, *et al.* Ecosystem damage in a large opencast coal mine: A case study on Pingshuo surface coal mine, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, **19**(6): 870-875.

[20] HUANG Y H. Spatial distribution characteristics of reconstructed soil bulk density of opencast coal-mine in the loess area of China[J]. *Catena*, 2021, **199**: 105 116.

[21] ZIPPER C E, BURGER J A, SKOUSEN J G, *et al.* Restoring forests and associated ecosystem services on Appalachian coal surface mines[J]. *Environmental Management*, 2011, **47**(5): 751-765.

[22] SALLES D M, DO CARMO F F, JACOBI C M. Habitat loss challenges the conservation of endemic plants in mining-targeted Brazilian Mountains[J]. *Environmental Conservation*, 2019, **46**(2): 140-146.

[23] 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): 5 764-5 774.
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): 5 764-5 774.

[24] 毕银丽,李向磊,彭苏萍,等. 露天矿区植物多样性与土壤养分空间变异性特征[J]. 煤炭科学技术, 2020, **48**(12): 205-213.
BI Y L, LI X L, PENG S P, *et al.* Characteristics of spatial variability of plant diversity and soil nutrients in open-pit mining area[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, **48**(12): 205-213.

[25] 张元良,刘 安,黄 威,等. 我国矿区废弃地土壤种子库特征及其在生态修复中的应用[J]. 土壤与作物, 2021, **10**(3): 294-305.
ZHANG Y L, LIU A, HUANG W, *et al.* The characteristics of soil seed bank and its application in ecological restoration of abandoned mining areas in China[J]. *Soil and Crop*, 2021, **10**(3): 294-305.

[26] OLIVEIRA P, SANTOS J, ARAÚJO E, *et al.* Natural regeneration of the vegetation of an abandoned agricultural field in a semi-arid region: A focus on seed bank and above-ground vegetation[J]. *Brazilian Journal of Botany*, 2019, **42**(1): 43-51.

[27] REDONDO-VEGA J M, MELÓN-NAVA A, PEÑA-PÉREZ S A, *et al.* Coal pit lakes in abandoned mining areas in León (NW Spain): Characteristics and geocological significance[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021, **80**(24): 1-14.

[28] O, BRUNEEL. Role of microorganisms in rehabilitation of mining sites, focus on Sub Saharan African countries[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2019, **205**: 106 327.

[29] RAJ D, KUMAR A, MAITI S K. Evaluation of toxic metal(loid)s concentration in soils around an open-cast coal mine (Eastern India)[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, **78**(22): 1-19.

[30] 王双明,杜华栋,王生全. 神木北部采煤塌陷区土壤与植被损害过程及机理分析[J]. 煤炭学报, 2017, **42**(1): 17-26.
WANG S M, DU H D, WANG S Q. Analysis of damage process and mechanism for plant community and soil properties at northern Shenmu subsidence mining area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, **42**(1): 17-26.

[31] 石攀基,刘冬志,田燕菲,等. 新疆卡山自然保护区典型水源植物群落特征及其与土壤因子的关系[J]. 西北植物学报, 2021, **41**(7): 1 221-1 228.
SHI P J, LIU D Z, TIAN Y F, *et al.* Characteristics of plant communities and correlation with soil factors in mountain kal-maili ungulate nature reserve[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2021, **41**(7): 1 221-1 228.

[32] YELENIK S, ROSE E, CORDELL S, *et al.* The role of microtopography and resident species in post-disturbance recovery of arid habitats in Hawai'i[J]. *Ecological Applications*, 2022, **32**(8): e2690.

[33] 白中科,周 伟,王金满,等. 再论矿区生态系统恢复重建[J]. 中国土地科学, 2018, **32**(11): 1-9.
BAI Z K, ZHOU W, WANG J M, *et al.* Rethink on ecosystem restoration and rehabilitation of mining areas[J]. *China Land Science*, 2018, **32**(11): 1-9.

[34] 李国旗,王雅芳,刘 星,等. 贺兰山低山区土壤种子库空间分布特征[J]. 西北植物学报, 2022, **42**(2): 301-311.
LI G Q, WANG Y F, LIU X, *et al.* Spatial distribution characteristics of soil seed bank in the low mountainous area of Helan Mountain[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2022, **42**(2): 301-311.