



内蒙古高寒露天煤矿排土场植被恢复研究

于爽¹, 朱月¹, 徐长友², 刘永杰², 曾利学², 曲来叶³

(1 牡丹江师范学院 生命科学与技术学院, 黑龙江牡丹江 157011; 2 国家电投集团内蒙古能源有限公司, 内蒙古通辽 028000; 3 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要: 探究不同恢复年限对于露天煤矿植被群落变化和植物个体生长的影响, 进一步加强生态环境保护与生态修复治理措施。以内蒙古高寒露天煤矿排土场恢复 4 年(2018—2021 年)的植物群落为研究对象, 采用样方调查方法, 对样地内植物群落进行调查, 设置草本样方(1 m×1 m)和灌木样方(5 m×5 m), 记录植物物种组成、高度及盖度等指标, 计算 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpon 指数、Pielou 均匀度指数和物种重要值。探讨不同的恢复年限植物群落变化特征和优势植物的养分吸收, 为矿区人工植被恢复提供科学依据。结果表明: (1) 矿区排土场植物群落物种数、生物量和群落多样性均随着恢复年限的增加而显著增加。总物种数从恢复第 1 年的 16 种增加到恢复第 4 年的 31 种, 主要是由于非人工种植植物从 6 种增加到 19 种导致, 特别是在恢复第 2 年增加显著, 然后趋于平稳, 这说明恢复第 2 年是物种增加关键的时期; (2) 随着恢复年限的增加, 生物量和多样性指数显著增加; 矿区植被优势物种多以禾本科披碱草(*Elymus dahuricus*)、无芒雀麦(*Bromus inermis*); 豆科植物苜蓿(*Medicago sativa*)、草木樨(*Melilotus officinalis*)、沙打旺(*Astragalus adsurgens*)、锦鸡儿(*Caragana sinica*); 菊科植物大籽蒿(*Artemisia sieversiana*); 十字花科油菜(*Brassica napus*)和胡颓子科沙棘(*Hippophae rhamnoides*)为主。 (3) 比较不同优势植物叶片、茎和根的氮(N)、磷(P)和钾(K)含量发现, 草本优势种中菊科和豆科植物显著高于禾本科植物。灌木优势种中沙棘茎的 N 含量和 P 含量显著高于锦鸡儿。研究认为, 在排土场植被恢复初期(4 年)的物种选择上, 豆科植物和菊科植物是草本植物首选的先锋物种, 另外, 沙棘是灌木首选的物种。

关键词: 露天煤矿; 植被恢复; 恢复年限; 生物多样性

中图分类号: Q948 **文献标志码:** A

Study on Plant Rehabilitation at Dump Sites of Open-pit Mine in Inner Mongolia

YU Shuang¹, ZHU Yue¹, XU Changyou², LIU Yongjie², ZENG Lixue², QU Laiye³

(1 College of Life Science and Technology, Mudanjiang Normal University, Mudanjiang, Heilongjiang 157011, China; 2 Inner Mongolia Energy Limited, The State Power Investment Corporation, Tongliao, Inner Mongolia 028000, China; 3 Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: To explore the effects of different restoration years on vegetation community changes and individual plant growth in open-pit coal mines, and further strengthen ecological environmental protection and ecological restoration measures. Taking the plant community of Inner Mongolia alpine open-pit coal mine during the four years of restoration (2018—2021) as the research object, we adopted the quadrat survey

method to investigate the plant community in the sample site. The herb quadrat (1 m×1 m) and shrub quadrat (5 m×5 m) were set to record the plant species composition, height and coverage. Shannon-Wiener diversity index, Simpon index, Pielou evenness index and species importance were calculated. The change characteristics of plant community and nutrient uptake of dominant plants in different restoration years were discussed to provide scientific basis for artificial vegetation restoration in mining areas. The results showed that: (1) With the increase of restoration years, the total species number, biomass and diversity index increased significantly. Total species number was increased from 16 to 31 which from the first year to the fourth year after rehabilitation. This due to the non-planted species increased from 6 to 19. Especially the species number was significantly increased on the second year, then steady on third and fourth year. It demonstrated that second year was key year for plant rehabilitation. (2) The dominant species were Gramineae plants *Elymus dahuricus*, *Bromus inermis*; Leguminosae plants *Medicago sativa*, *Melilotus officinalis*, *Astragalus adsurgens*, *Caragana sinica*; *Artemisia sieversiana* (Compositae); *Brassica napus* (Brassicaceae) and *Hippophae rhamnoides* (Elaeagnaceae) in study sites. (3) Compared the nutrient (N, P and K) uptake among dominated species, there were higher nutrient contents of Legumes and compositae than Gramineae plants in herbaceous plants. The N content and P contents in the stem of *H. rhamnoides* were significantly higher than that of *Caragana sinica* in shrub dominant species. According to the study, in the initial stage of vegetation restoration (4 years), legumes and compositae were the preferred pioneer species of herbaceous plants, while *H. rhamnoides* is the preferred species of shrubs.

Key words: open-pit coal mine; vegetation restoration; recovery year; biodiversity

露天煤矿具有安全高效、生产规模大、资源回收率高等特点,目前已经成为中国主要的煤炭开采方式。研究表明,中国露天煤矿的开采量从 2003 年开始不断上升,这对于稳定煤炭产能,保障国家能源安全发挥了重要作用^[1]。然而在露天开采规模逐年增加的情况下,也对生态系统造成了严重的破坏,地表层已经不利于植物的生长,减少了生物多样性^[2-5],因此植被恢复已经成为露天煤矿生态恢复的首要工作。

植被恢复是指运用生态学原理,保护现有的植被或者人工植被,利用植物自然的演替规律,去修复或重建已毁坏或破坏的森林和其他自然生态系统,恢复生物多样性及其生态系统功能^[6-7]。植被恢复可以快速改变区域的微环境和小气候,改良土壤结构,增加土壤抗蚀性,对于生态系统的可持续发展有着深远影响^[8-11]。陈璐等^[12]研究表明,不同的恢复模式对植物、土壤以及微生物群落结构都有不同影响。何旭东等^[13]研究表明,不同地形以及坡向、坡度对植物的丰富度和盖度有不同影响。韩军旺等^[14]研究表明,不同的配置模式结合,也会增加群落植被生物量。使用乔、灌、草多物种结合进行植被恢复,建立起来的植物群落稳定性和可持续性比单一物种效果好,因此进行植被恢复过程如何选择适宜的植物种类并进行合理配置,是露天煤矿排土场恢复的关键,也是重建稳定生物群落的一个重要环节。周涛等^[15]研究表明,恢复时间的不同是影响植被恢复的重要因素之一,随着恢复年限的增加,植物

的生物量、高度、盖度以及土壤理化性质都有显著增加和提高;随着恢复年限的增加,群落物种多样性也随之增加。在植被恢复过程中,物种多样性变化和群落特征变化是反映群落结构的一个重要指标,它不仅关系着生态系统生产力,同时也关系着生态系统的稳定性和复杂性^[16-17]。

一些学者开展矿区开采后土壤重金属污染的研究^[18-21],但氮(N)、磷(P)、钾(K)是植物营养的三大要素,是植物生理和生长的重要因子,对于植物恢复起着至关重要的作用^[22-24]。对已经在排土场上恢复的优势植物物种进行地上和地下养分含量比较分析,可评价植被恢复效果,为后续植被恢复的物种选择提供数据支持。目前,中国对于矿区植被恢复研究多数集中在温带以及亚热带地区,对于北方干旱、半干旱区研究比较少,排土场土壤水分和养分条件很差,加之这一地区寒冷,植被的恢复相对更为困难,成为制约当地矿业绿色发展的瓶颈^[25]。

本研究选择内蒙古高寒露天煤矿的排土场 2018 年至 2021 年恢复 4 年的植物群落为研究对象,探讨不同的恢复年限植物群落变化特征和优势植物的养分吸收,为矿区人工植被恢复提供科学依据和决策支持,对建设绿色矿山具有重要意义。

1 研究地区与研究方法

1.1 试验区概况

研究地位于内蒙古自治区通辽市的露天煤矿,

包括霍林河南矿、北矿、扎哈淖尔煤矿、白音华二号矿和三号矿共 5 个矿区。地理位置为 E118°15′56″—119°44′50″, N44°13′23″—45°58′46″, 矿区平均海拔大于 1 000 m。气候特点为降水量少, 平均年降水量约为 380 mm; 年际温度变化大, 最低气温达到 -35 ℃, 冬季严寒, 冻结期长, 土壤从 10 月上旬开始冻结至次年 5 月解冻, 仅能满足早熟喜凉作物生长的需要^[26]。

1.2 试验设计

分别选择 2018 年、2019 年、2020 年和 2021 年矿区人工恢复的样地, 调查取样时间为 2021 年 6—8 月。研究采用样方法进行随机试验, 根据样方选取的科学性和典型性原则, 在 5 个矿区分别设置 12 个样地, 每个样地面积大于 100 m², 且样地间距离大于 1 km。在每个样地内随机选取 3~5 个标准样点, 对样地内的草本(1 m×1 m)和灌木(5 m×5 m)分别进行调查, 记录不同恢复年限人工种植与非人工种植植物的物种组成、高度、盖度、冠幅和株数等, 同时记录样地的坐标、海拔和地形等基本信息。其中盖度采用实测法进行测算, 将 1 m×1 m 样方平均分成 100 份, 当垂直投影盖度布满 1 个格子时, 盖度为 1/100, 样地分别设置多个样点进行测试, 取平均值, 汇总后推算样地恢复的群落盖度。

1.3 指标测定

1.3.1 生物多样性 研究采用物种多样性来表征植被恢复区的生物多样性。多样性指数是指用简单的数值来表示群落内种类多样性的, 用来判断群落或生态系统的稳定性指标。采用 Shannon-Weiner 指数, Simpson 指数, Pielou 指数计算多样性指数^[27-28]。

Shannon-Wiener 指数(多样性指数):

$$H' = -\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \tag{1}$$

Simpson 指数(优势度指数):

$$P = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2 \tag{2}$$

Pielou 指数(均匀度指数):

$$E = H' / \ln S \tag{3}$$

式中: S 为出现在样方内的物种数; P_i 为群落内第 i 种物种的重要值。重要值是评估 1 个物种在 1 个群落中的重要性。

重要值=(相对盖度+相对多度+相对频度)/3; 其中, 相对盖度=某一个种的盖度/样方内所有种的盖度之和; 相对多度=某一个种的个体数/样方内所有种的个体数之和; 相对频度=某物种出现的样方数/样方总数。

1.3.2 生物量 灌木生物量采用标准枝法进行计算, 草本生物量为整株计算。分别采集样方内的灌木和草本的优势物种, 每种植物取 3 株以上作为重复, 将植株 4 ℃保存尽快带回实验室。将野外采回来的新鲜样品, 先称量鲜重, 然后将植物样品按根、茎、叶分别装入纸袋, 放入烘箱 60 ℃烘 48 h 至恒重, 再用电子天平称量干重^[29-30], 生物量测定均采用 2021 年的采集样品。

1.3.3 元素含量 植物全氮测定: 将 2021 年采集的植物样品, 烘干后的植物样品用球磨仪研磨粉碎, 将植物样品放入锡舟, 包好后用元素分析仪(Vario EL III, 德国 Elementar 公司)测定样品全氮含量。

植物全磷、全钾测定: 先称取 0.2 g 样品放入消解管底部, 然后加入 8 mL 硝酸, 放置通风橱过夜, 再放入微波消解仪(Mars6Xpress, 美国 GEM)中消解, 消解完全后将试管置于赶酸装置(温度 140 ℃), 至液体剩余约 1 mL, 赶酸。将试管里剩余液体用水洗定容至 50 mL。

然后用注射器吸取 10 mL, 过 45 μm 过滤器至 10 mL 离心管中得到消解液。用 P 和 K 标准样配好标准曲线, 用 ICP-OES(Prodigy7, 美国 Leeman 公司)测定样品 P 和 K 含量。

1.4 数据处理

通过 SPSS 26.0 和 R 3.4.3 对植物的根、茎、叶的 N、P、K 元素进行单因素方差分析, 设置 α=0.05; 数据处理采用 origin 作图。

2 结果与分析

2.1 群落物种组成和多样性变化

对 5 个矿区植物恢复群落调查发现, 人工种植的植物(表 1)和非人工种植植物(表 2)物种数随恢复时间变化而变化。在恢复第 1 年, 人工种植植物有 10 种, 非人工种植植物有 6 种, 总物种数为 16 种; 恢复第 2 年, 人工种植有 13 种, 非人工种植有 16 种, 总物种数为 29 种; 恢复第 3 年, 人工种植有 13 种, 非人工种植 18 种, 总物种数 31 种; 恢复第 4 年, 人工种植有 12 种, 非人工种植有 19 种, 总物种数 31 种。

如表 3 所示, 植物群落的多样性指数也呈现出随恢复时间增加而增加的趋势。植被恢复 1 年的盖度和多样性指数最低, 然后随着恢复年限增长, 盖度越高, 多样性逐渐增加。虽然恢复 4 年的多样性指数有微弱下降, 恢复 3 年的 Shannon-Weiner 指数, Simpson 指数, Pielou 指数和盖度均达到了最高值。

表 1 不同恢复年限人工种植的植物物种组成

Table 1 Species composition of artificially planted plants with different restoration years

科名 Family	属名 Genus	种名 Species	1 年 One year	2 年 Two years	3 年 Three years	4 年 Four years
禾本科 Gramineae	披碱草属 <i>Elymus</i>	披碱草 <i>Elymus dahuricus</i>	1	1	1	1
禾本科 Gramineae	雀麦属 <i>Bromus</i>	无芒雀麦 <i>Bromus inermis</i>	1	1	1	1
禾本科 Gramineae	拂子茅属 <i>Calamagrostis</i>	拂子茅 <i>Calamagrostis epigeios</i>	0	1	1	1
禾本科 Gramineae	芦苇属 <i>Phragmites</i>	芦苇 <i>Phragmites australis</i>	0	1	1	0
豆科 Leguminosae	锦鸡儿属 <i>Caragana</i>	锦鸡儿 <i>Caragana sinica</i>	1	1	1	1
豆科 Leguminosae	苜蓿属 <i>Medicago</i>	苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	1	1	1	1
豆科 Leguminosae	草木樨属 <i>Melilotus</i>	草木樨 <i>Melilotus officinalis</i>	1	1	1	1
豆科 Leguminosae	黄芪属 <i>Astragalus</i>	沙打旺 <i>Astragalus adsurgens</i>	1	1	1	1
菊科 Compositae	蒿属 <i>Artemisia</i>	大籽蒿 <i>Artemisia sieversiana</i>	1	1	1	1
胡颓子科 Elaeagnaceae	沙棘属 <i>Hippophae</i>	沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i>	1	1	1	1
十字花科 Brassicaceae	芸苔属 <i>Brassica</i>	油菜 <i>Brassica napus</i>	1	1	1	1
蔷薇科 Rosaceae	桃属 <i>Amygdalus</i>	扁桃 <i>Amygdalus communis</i>	0	0	0	1
蔷薇科 Rosaceae	地榆属 <i>Sanguisorba</i>	地榆 <i>Sanguisorba officinalis</i>	0	1	1	0
蔷薇科 Rosaceae	委陵菜属 <i>Potentilla</i>	委陵菜 <i>Potentilla chinensis</i>	1	1	1	1
总物种数 Total			10	13	13	12

表 2 不同恢复年限非人工种植的植物物种组成

Table 2 Species composition of non-planted plants with different restoration years

科名 Family	属名 Genus	种名 Species	1 年 One year	2 年 Two years	3 年 Three years	4 年 Four years
禾本科 Gramineae	冰草属 <i>Agropyron</i>	冰草 <i>Agropyron cristatum</i>	1	1	1	1
禾本科 Gramineae	赖草属 <i>Leymus</i>	羊草 <i>Leymus chinensis</i>	0	1	1	1
禾本科 Gramineae	隐子草属 <i>Cleistogenes</i>	糙隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i>	0	1	1	1
禾本科 Gramineae	针茅属 <i>Stipa</i>	针茅 <i>Stipa capillata</i>	0	1	1	1
禾本科 Gramineae	羊茅属 <i>Festuca</i>	羊茅 <i>Festuca ovina</i>	0	1	1	1
禾本科 Gramineae	黑麦草属 <i>Lolium</i>	黑麦草 <i>Lolium perenne</i>	0	1	1	1
豆科 Leguminosae	胡枝子属 <i>Lespedeza</i>	胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i>	1	1	1	1
豆科 Leguminosae	黄芪属 <i>Astragalus</i>	蒙古黄芪 <i>Astragalus membranaceus</i>	1	1	1	1
菊科 Compositae	麻花头属 <i>Serratula</i>	麻花头 <i>Serratula centauroides</i>	0	1	1	1
菊科 Compositae	蒿属 <i>Artemisia</i>	茵陈蒿 <i>Artemisia scoparia</i>	1	1	1	1
菊科 Compositae	蒿属 <i>Artemisia</i>	冷蒿 <i>Artemisia frigida</i>	1	1	1	1
菊科 Compositae	苦苣菜属 <i>Ixeris</i>	苦苣菜 <i>Ixeris polycephala</i>	0	0	0	1
菊科 Compositae	秋英属 <i>Cosmos</i>	秋英 <i>Cosmos bipinnata</i>	0	0	1	1
藜科 Chenopodiaceae	猪毛菜属 <i>Salsola</i>	猪毛菜 <i>Salsola collina</i>	0	1	1	1
藜科 Chenopodiaceae	地肤属 <i>Kochia</i>	扫帚菜 <i>Kochia scoparia</i>	0	1	1	1
藜科 Chenopodiaceae	藜属 <i>Chenopodium</i>	灰菜 <i>Chenopodium album</i>	0	1	1	1
伞形科 Umbelliferae	柴胡属 <i>Bupleurum</i>	北柴胡 <i>Bupleurum chinense</i>	0	0	1	1
车前科 Plantaginaceae	车前属 <i>Plantago</i>	平车前 <i>Plantago depressa</i>	1	1	1	1
茜草科 Rubiaceae	拉拉藤属 <i>Galium</i>	蓬子菜 <i>Galium verum</i>	0	1	1	1
总物种数 Total			6	16	18	19

表 3 植物群落多样性指数

Table 3 Indexes of plant community diversity

恢复年限 Restore year	Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index	Simpson 指数 Simpson index	Pielou 指数 Pielou index	盖度 Coverage/ %
1	1.82±0.02b	0.64±0.12b	0.65±0.04b	64.32±0.37b
2	2.13±0.05a	0.68±0.02b	0.66±0.01b	75.71±1.24a
3	2.48±0.21a	0.78±0.01a	0.75±0.01a	79.05±2.31a
4	2.21±0.07a	0.67±0.02b	0.67±0.03b	78.02±0.75a

注:数据为平均值±标准偏差,小写字母代表不同恢复年限间差异显著。下同。
Note: Data are mean±standard deviation. Lowercase letters represent the difference between different recovery years. The same as below.

2.2 群落优势种及生物量变化

在调查的恢复群落中,优势物种为披碱草(*E. dahuricus*)、无芒雀麦(*Bromus inermis*)、苜蓿(*Medicago sativa*)、草木樨(*Melilotus officinalis*)、沙打旺(*Astragalus adsurgens*)、大籽蒿(*Artemisia sieversiana*)、油菜(*Brassica napus*)、锦鸡儿(*Caragana sinica*)和沙棘(*Hippophae rhamnoides*)。草本的重要值高于灌木,草本重要值较高的物种分别

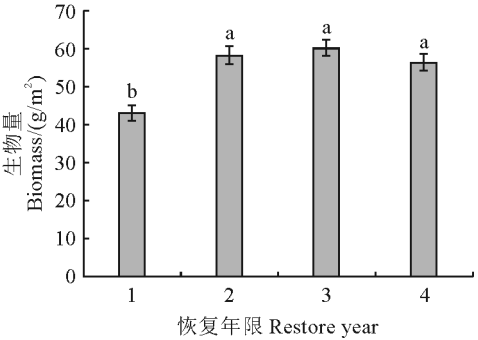
为披碱草、苜蓿和草木樨;灌木重要值较高的物种为沙棘(表 4)。相对于其他物种,恢复 1 年的披碱草重要值最高,恢复 2 年时,豆科植物草木樨重要值大于披碱草;恢复第 3 年豆科植物的草木樨和苜蓿的重要值均超过披碱草;恢复第 4 年时,沙棘重要值与前 3 年没有显著差异,但锦鸡儿重要值显著减小。随着恢复年限增加,优势物种的重要值越小,说明植物群落相比复杂。

表 4 植物群落优势物种的重要值

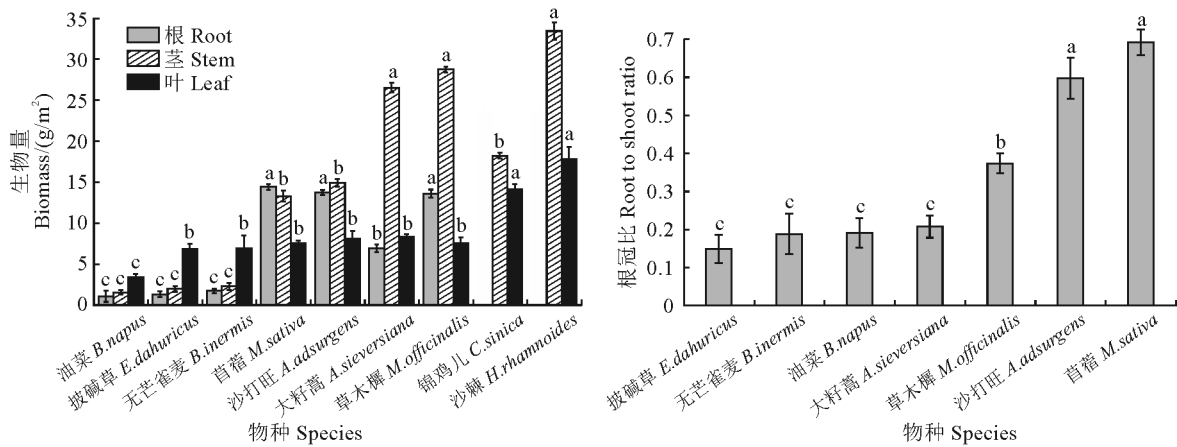
Table 4 Important values of dominant species in plant communities

植物群落优势物种 Dominant species in plant communities		恢复年限 Restore year			
		1	2	3	4
草本 Herb	披碱草 <i>Elymus dahuricus</i>	23.60±0.13a	21.25±0.03a	20.80±1.01a	20.04±1.03a
	无芒雀麦 <i>Bromus inermis</i>	3.33±0.03a	3.17±0.11a	3.04±0.16a	3.09±0.91a
	苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	21.50±0.13a	21.38±0.11a	21.06±0.29a	20.73±0.31a
	草木樨 <i>Melilotus officinalis</i>	23.52±0.16a	22.91±0.01a	22.03±0.03a	21.05±0.01a
	沙打旺 <i>Astragalus adsurgens</i>	8.50±0.12a	8.48±0.09a	8.62±0.20a	8.60±0.16a
	大籽蒿 <i>Artemisia sieversiana</i>	9.91±0.08a	9.02±0.13ab	8.51±0.01b	8.53±0.05b
	油菜 <i>Brassica napus</i>	1.42±0.04a	1.37±0.11a	1.05±0.01b	1.03±0.11b
灌木 Shrub	锦鸡儿 <i>Caragana sinica</i>	2.78±0.13a	2.65±0.17a	2.43±0.13a	1.94±0.03b
	沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i>	4.37±0.01a	4.12±0.01a	3.94±0.12a	4.01±0.61a

对优势物种进行植物特征分析,如图 1 所示,植物生物量随恢复年限的变化趋势是先上升再下降。恢复第 1 年,生物量最低,显著低于恢复 2 年、3 年和 4 年的生物量($P<0.05$),但恢复 2 年、3 年和 4 年的生物量没有显著差异。对优势物种的根、茎、叶生物量进一步分析发现,植物的茎大多高于根和叶,不同草本和灌木生物量差异显著。在草本植物中,豆科植物草木樨和菊科植物大籽蒿生物量较大;在灌木植物中,沙棘生物量较大。豆科植物根生物量显著高于非豆科植物($P<0.05$)。不同植物的根冠比差异显著,其中豆科植物苜蓿和沙打旺根冠比较高,显著高于其他草本植物($P<0.05$),是非豆科植物的 3 倍左右;其他科的物种根冠比没有显著差异(图 2)。



图中不同小写字母表示不同恢复年限间差异显著($P<0.05$)。
图 1 植物生物量随恢复年限的变化
Different normal letters indicate significant difference among restoration years ($P<0.05$).
Fig. 1 Changes of plant biomass with restoration years



图中不同小写字母表示不同物种间差异显著($P < 0.05$)。下同。
图 2 优势植物的生物量和根冠比
Different normal letters indicate significant difference among different species ($P < 0.05$). The same as below.
Fig. 2 Biomass and root-shoot ratio of dominant species

2.3 优势种 N、P、K 养分吸收差异

2.3.1 草本优势种 N、P、K 养分吸收差异 如图 3 所示,总体来说大多数植物的叶片元素含量高于根和茎,不同草本植物的各器官吸收 N、P、K 元素含量不同,大籽蒿茎和叶片的 N、P、K 含量最高,禾本科植物各器官的 N、P、K 含量低于豆科植物。

根中 N 含量依次为沙打旺>苜蓿>草木樨>大籽蒿>无芒雀麦>油菜>披碱草;茎和叶片 N 含量依次为大籽蒿>草木樨>苜蓿>沙打旺>油菜>披碱草>无芒雀麦。

沙打旺、苜蓿、草木樨等豆科植物和菊科的大籽蒿叶片的 N 含量高于禾本科的无芒雀麦和披碱草以及十字花科的油菜($P < 0.05$)。

沙打旺根的 P 含量显著高于其他植物,其他植物无显著差异;茎和叶片 P 含量依次为大籽蒿>沙打旺>草木樨>苜蓿>油菜>披碱草>无芒雀麦,其中菊科的大籽蒿和沙打旺、苜蓿、草木樨等豆科植物叶片的 P 含量显著高于十字花科的油菜和禾本科的无芒雀麦和披碱草($P < 0.05$)。

沙打旺、草木樨、苜蓿和大籽蒿根的 K 含量显著高于禾本科的无芒雀麦和披碱草,以及十字花科油菜($P < 0.05$);而大籽蒿茎和叶片的 K 含量最高,显著高于其他植物。

2.3.2 灌木优势种 N、P、K 养分吸收差异 如图 4 所示,不同灌木植物吸收元素含量不同。沙棘茎 N 含量和 P 含量显著高于锦鸡儿($P < 0.05$);沙棘茎 K 含量略高于锦鸡儿,但差异不显著($P > 0.05$)。沙棘叶片的 N、P、K 含量略高于锦鸡儿,但均不显著($P > 0.05$)。

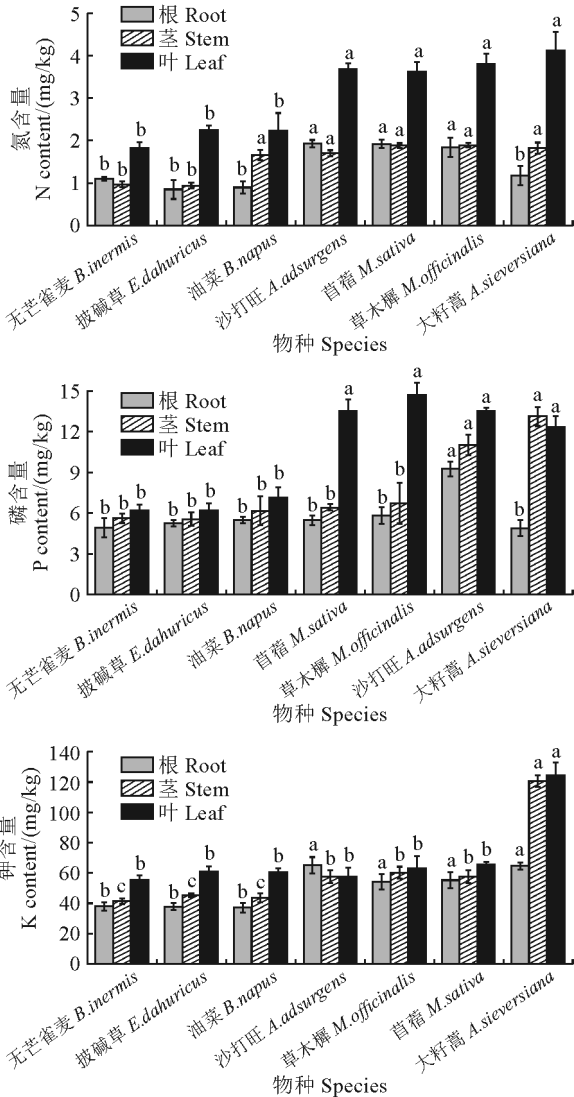


图 3 不同草本植物元素吸收的变化
Fig. 3 Changes of element uptake in different herbaceous plants

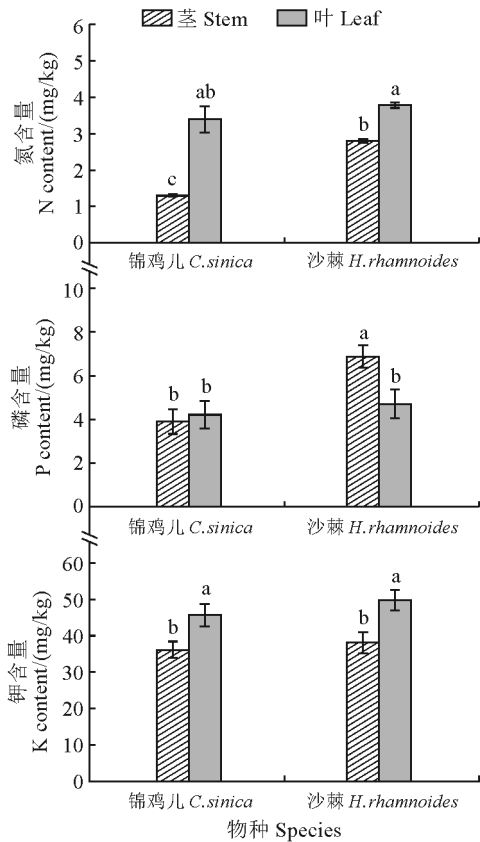


图 4 不同灌木植物元素吸收的变化
Fig. 4 Changes of element uptake in different shrub plants

3 讨论与结论

植被恢复和群落重建是矿区生态恢复的关键环节,植物通过根系分泌物和凋落物归还不断改善土壤质量^[31],土壤质量的提高进一步促进植被生长和恢复,植被更新逐渐达到稳定的演替阶段^[32-34]。根据群落演替规律,植被群落向着多样性更高、更复杂、更稳定的方向发展^[35-37]。

本研究发现矿区排土场植物群落物种数、生物量和群落多样性均随恢复年限增加而显著增加。总物种数从恢复 1 年的 16 种增加到恢复 4 年的 31 种,这主要是由于非人工种植增多,从 6 种增加到 19 种而导致,特别是在恢复第 2 年增加显著,然后逐年稳定,这说明恢复第 2 年是物种增加关键的时期。也说明人工种植方式在恢复初期具有重要意义,当有植被在排土场裸地成功定植之后,相邻自然草原的物种会迅速扩散到排土场,提高排土场植被群落的物种数;同样地,植被生产力和盖度也是恢复第 2 年显著高于第 1 年,这可能都与物种数第 2 年显著增加有关;而群落多样性只有香农维纳指数表现出相同的规律,生物多样性的恢复是区域生态健

康和实现可持续发展的重要指征^[38]。可见,排土场植被恢复在第 1 年实现了“零突破”,而在人工措施恢复 1 年的基础上,第 2 年开始进入迅速自我恢复的阶段。但植被恢复是一个长期的过程,金立群等^[39]研究表明,恢复年限越久,越能发现群落变化的趋势。根据复垦地时空异质性的特点,只有对其进行长期定位监测,才能反映出植被恢复过程的不同阶段的效果。由于本试验研究地植被恢复仅 4 年,随时间变化的规律仍需在更长的恢复进程去验证。

在恢复群落中禾本科、豆科和菊科植物是矿区植被恢复的优势类群,分别出现在不同的恢复时间,占据相对重要地位。在恢复初期,披碱草重要值最高,个体数量多,竞争力最强,适应性最好,因而在裸地开始恢复时占据了优势。随着恢复进程的发展,有些豆科植物如草木樨、苜蓿数量开始增多,通过根瘤菌固氮机制,促进植物在土壤相对贫瘠的排土场生存和生长,提高生物量。这与不同植物对干旱和贫瘠土壤的适应性不同密切相关,例如,本研究中的豆科优势植物苜蓿、沙打旺和草木樨,生物量和根冠比显著高于其他科物种,这表明整株豆科植物具有更高的生长速率、固碳能力以及养分吸收能力,虽然排土场土壤水分和养分受限,豆科植物分配更多的碳水化合物用于根生长,但地上生物量仍显著高于其他物种,因而占据优势地位。这种适应性使豆科植物在排土场初期具有很强的竞争力,成为先锋物种。有研究表明,豆科植物因 C/N 较低,分解后增加了土壤 N 素的积累,能够适应缺水和贫瘠的环境条件,在矿区植被恢复演替早期阶段,常常被选作先锋植物^[7,40]。比较不同植物 N、P 和 K 元素含量发现,豆科和菊科植物养分吸收能力较强,显著高于禾本科植物,特别是地上部分经和叶片的元素吸收更加显著。

豆科在元素含量吸收以及生物量方面高于禾本科,这可能与豆科植物能够通过根瘤菌固氮的方式,在恢复初期土壤养分相对贫瘠的情况下依然能够固定更多氮,将更多的碳固定在植物体内,因此在草本植物种,豆科可以作为首选植物。除此之外,选取的矿区种植灌木种类比较少,与锦鸡儿相比,沙棘更适应排土场的生境,为群落灌木优势物种。从生物量以及元素吸收看,沙棘可以在短时期内形成郁闭,并有效起到土壤培肥和水土保持作用,可优先用于露天煤矿排土场的植被恢复。多年生灌木比草本植物的生活史更长,根系更发达,在抗旱、水土保持以及

防风方面更有优势^[41],因此灌草混合的配置模式适合矿区排土场的人工恢复。但本研究恢复年限还相对较短,未来建议开展长期和深入的调查研究,探讨植物恢复规律,评估乔—灌—草配置结合的方式进行植被恢复,探索更适宜的恢复措施,加速矿区生态恢复,把人工植被和自然恢复有效结合起来,制定科学的植被恢复措施和生物多样性保护措施。

本研究表明,露天煤矿的植被恢复已经起到了一定的效果,特别是恢复的第2年,群落的物种数、

生产力、盖度和多样性均会显著升高,因此,人工恢复措施对于矿区排土场的生态恢复具有重要作用。而优势物种的选择也很重要,矿区生态修复需根据地域性、生态演替及生态位原理筛选适宜的先锋植物,营建种群和生态系统,为微生物、植被和动物提供一个适宜生境。从4年的恢复实践发现,基于植物生物量和元素吸收的比较,豆科植物占据优势地位,是矿区排土场干旱贫瘠土壤上植被恢复的优先选择。

致谢:感谢国电投内蒙古能源公司的白培龙、贺希格图、李苗苗、李念航、李云峰、李忠、王志超、吴云鹏,牡丹江师范学院杨漫以及云南大学俞琦在样品采集和分析测试过程中提供的帮助。

参考文献:

[1] 刘磊,郭二民,李忠华,等. 加强“十四五”露天煤矿开采环境管理的建议[J]. 中国煤炭, 2021, 47(10): 61-66.
LIU L, GUO E M, LI Z H, *et al.* Suggestions on strengthening the environmental management in open-pit coal mines during the 14th Five-Year Plan[J]. *China Coal*, 2021, 47(10): 61-66.

[2] LEI K, PAN H Y, LIN C Y. A landscape approach towards ecological restoration and sustainable development of mining areas[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 90: 320-325.

[3] ZHANG L J, HU Z Q, YANG D Z, *et al.* Land use dynamic evolution and driving factors of typical open-pit coal mines in Inner Mongolia[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(15): 9 723.

[4] ZHANG M, WANG J M, FENG Y. Temporal and spatial change of land use in a large-scale opencast coal mine area: A complex network approach[J]. *Land Use Policy*, 2019, 86: 375-386.

[5] LI S J. Characterizing and attributing the vegetation coverage changes in North Shanxi coal base of China from 1987 to 2020[J]. *Resources Policy*, 2021, 74: 102 331.

[6] 史鹏莉,刘艳萍,杨振奇,等. 矿区植被恢复研究进展与展望[J]. 绿色科技, 2022, 24(10): 189-194.
SHI P L, LIU Y P, YANG Z Q, *et al.* Research progress and prospect of vegetation restoration in mining areas[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2022, 24(10): 189-194.

[7] 杨勤学,赵冰清,郭东罡. 中国北方露天煤矿区植被恢复研究进展[J]. 生态学杂志, 2015, 34(4): 1 152-1 157.
YANG Q X, ZHAO B Q, GUO D G. A review on vegetation restoration of opencast coal mine areas in Northern China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(4): 1 152-1 157.

[8] ZHU H X, FU B J, WANG S, *et al.* Reducing soil erosion by

improving community functional diversity in semi-arid grasslands[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2015, 52(4): 1 063-1 072.

[9] LEI H. Vegetation and soil restoration in refuse dumps from open pit coal mines[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 94: 638-646.

[10] GONZÁLEZ-MORALES M, FERNÁNDEZ-POZO L, RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ M Á. Threats of metal mining on ecosystem services. Conservation proposals[J]. *Environmental Research*, 2022, 214: 114 036.

[11] 向瑶瑶,彭文甫,陶帅,等. 2000—2019年四川省植被恢复成效与影响因素[J]. 生态学报, 2023, 43(4): 1 596-1 609.
XIANG J Y, PENG W F, TAO S, *et al.* Analyzing the effect and influencing factors of vegetation restoration in Sichuan Province from 2000 to 2019[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(4): 1 596-1 609.

[12] 陈璐,海棠. 矿区排土场植被恢复方式对土壤非植物寄生线虫种类及数量的影响[J]. 草原与草业, 2020, 32(1): 51-57.
CHEN L, HAI T. Effects of vegetation restoration methods on soil non-plant parasitic nematodes in mining dump areas[J]. *Grassland and Prataculture*, 2020, 32(1): 51-57.

[13] 何旭东,韩宗珠,缪雄谊,等. 贵州岩溶山区岩质边坡草灌引种植被恢复试验研究[J]. 海洋湖沼通报, 2021, 43(6): 161-168.
HE X D, HAN Z Z, MIAO X Y, *et al.* Study on herbs and shrubs application in vegetation restoration of rocky side slope in Karst mountainous area of Guizhou[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2021, 43(6): 161-168.

[14] 韩军旺,姚冠忠,袁志良,等. 小秦岭矿区石渣坡植被恢复与植物配置模式研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(28):

12 243-12 244.

HAN J W, YAO G Z, YUAN Z L, *et al.* Preliminary study on vegetation restoration and plant allocation model in stone ballast slope in Xiaoqinling mining area[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, **36**(28): 12 243-12 244.

[15] 周 涛, 苏正安, 何周窈, 等. 不同恢复年限矿山排土场植物群落特征[J]. 草业科学, 2019, **36**(6): 1 508-1 517.

ZHOU T, SU Z A, HE Z Y, *et al.* Vegetation community characteristics of mine dumps under different recovery years [J]. *Pratacultural Science*, 2019, **36**(6): 1 508-1 517.

[16] 赵 洋, 张 鹏, 胡宜刚, 等. 露天煤矿排土场不同配置人工植被对草本植物物种多样性的影响[J]. 生态学杂志, 2015, **34**(2): 387-392.

ZHAO Y, ZHANG P, HU Y G, *et al.* Effect of re-vegetation on herbage plant species diversity of dumping site in an open pit coal mine[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, **34**(2): 387-392.

[17] 李 婷, 吕一河, 任艳姣, 等. 黄土高原植被恢复成效及影响因素[J]. 生态学报, 2020, **40**(23): 8 593-8 605.

LI T, LÜ Y H, REN Y J, *et al.* Gauging the effectiveness of vegetation restoration and the influence factors in the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(23): 8 593-8 605.

[18] 石文静, 周翰鹏, 孙 涛, 等. 矿区周边土壤重金属污染优先控制因子及健康风险评估研究[J]. 生态环境学报, 2022, **31**(8): 1 616-1 628.

SHI W J, ZHOU H P, SUN T, *et al.* Research on priority control factors and health risk assessment of heavy metal pollution in soil around mining areas[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2022, **31**(8): 1 616-1 628.

[19] 齐丹卉, 刘文胜, 李世友, 等. 兰坪铅锌矿区植被恢复初期土壤种子库与地上植被关系的研究[J]. 西北植物学报, 2013, **33**(11): 2 317-2 325.

QI D H, LIU W S, LI S Y, *et al.* Relationship between aboveground vegetation and soil seed banks from different communities of initial restoration stage in Lanping lead/zinc mining area[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2013, **33**(11): 2 317-2 325.

[20] 王海洋, 韩 玲, 谢丹妮, 等. 矿区周边农田土壤重金属分布特征及污染评价[J]. 环境科学, 2022, **43**(4): 2 104-2 114.

WANG H Y, HAN L, XIE D N, *et al.* Distribution characteristics of heavy metals in farmland soils around mining areas and pollution assessment [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(4): 2 104-2 114.

[21] HU B F. Current status, spatial features, health risks, and potential driving factors of soil heavy metal pollution in China at Province level [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **266**: 114 961.

[22] 秦晶晶, 杜 峰, 杨 路, 等. 砒砂岩区不同施氮水平下 5 种潜在适生植物氮素利用比较研究[J]. 西北植物学报, 2021, **41**(5): 828-837.

QIN J J, DU F, YANG L, *et al.* Comparative study on nitrogen utilization of five potentially suitable plants under different nitrogen application levels in pisha sandstone area[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2021, **41**(5): 828-837.

[23] 王 琪, 徐程扬. 氮磷对植物光合作用及碳分配的影响[J]. 山东林业科技, 2005, **35**(5): 59-62.

WANG Q, XU C Y. Affects of Nitrogen and phosphorus on plant leaf photosynthesis and carbon partitioning[J]. *Journal of Shandong Forestry Science and Technology*, 2005, **35**(5): 59-62.

[24] 陈 宁, 何佳昕, 孙晓莉, 等. 硝态氮与无机磷浓度及其比例对簇生舟形藻生长生理及细胞形态的影响[J]. 西北植物学报, 2021, **41**(4): 615-626.

CHEN N, HE J X, SUN X L, *et al.* Effects of nitrate nitrogen and inorganic phosphorus concentrations and their ratio on growth, physiology and cell morphology of *Navicula gre-garia donkin*[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2021, **41**(4): 615-626.

[25] 吴翊平, 周国驰, 杨 卓, 等. 高寒地区煤矿排土场植被恢复研究: 以内蒙古扎哈淖尔煤矿为例[J]. 生态学报, 2022, **42**(24): 10 088-10 097.

WU Y P, ZHOU G C, YANG Z, *et al.* Plant rehabilitation at dump sites of open-pit mine in alpine region: A case study of Inner Mongolia Zhahanaoer Mine[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(24): 10 088-10 097.

[26] 黄安华. 内蒙古霍林河高海拔高寒露天煤矿生态修复实践[J]. 露天采矿技术, 2020, **35**(6): 84-86.

HUANG A H. Practice of ecological restoration in high altitude open-pit coal mine of Huolinhe[J]. *Opencast Mining Technology*, 2020, **35**(6): 84-86.

[27] 李明美, 陈 莉, 兰国玉, 等. 越南橡胶林下植物物种组成与多样性研究[J]. 热带农业科学, 2021, **41**(10): 82-91.

LI M M, CHEN L, LAN G Y, *et al.* Undergrowth plant species composition and diversity in rubber plantations in Vietnam[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2021, **41**(10): 82-91.

[28] 叶万辉, 马克平, 马克明, 等. 北京东灵山地区植物群落多样性研究:Ⅸ. 尺度变化对 α 多样性的影响[J]. 生态学报, 1998, **18**(1): 10-14.

YE W H, MA K P, MA K M, *et al.* Studies on plant community diversity in donglingshan mountain, Beijing, China:Ⅸ. the influence of scale on α diversity[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, **18**(1): 10-14.

[29] 祁 瑜, 黄永梅, 王 艳, 等. 施氮对几种草地植物生物量及其分配的影响[J]. 生态学报, 2011, **31**(18): 5 121-5 129.

QI Y, HUANG Y M, WANG Y, *et al.* Biomass and its allocation of four grassland species under different nitrogen levels[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(18): 5 121-5 129.

[30] 刘佩佩, 白军红, 王婷婷, 等. 白洋淀优势植物群落生物量及其影响因子[J]. *湿地科学*, 2013, **11**(4): 482-487.

LIU P P, BAI J H, WANG T T, *et al.* Biomass of dominant plant communities and their influencing factors in Baiyangdian Lake[J]. *Wetland Science*, 2013, **11**(4): 482-487.

[31] 王佳, 田青, 王理德, 等. 青土湖不同年限退耕地植被物种多样性及土壤酶活性研究[J]. *西北植物学报*, 2021, **41**(11): 1 900-1 911.

WANG J, TIAN Q, WANG L D, *et al.* Study on vegetation succession and soil enzyme activities of abandoned land in different years in qingtu lake[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2021, **41**(11): 1 900-1 911.

[32] 黄元元, 曲来叶, 曲秀春, 等. 镜泊湖岩溶台地不同植被类型土壤微生物群落特征[J]. *生态学报*, 2012, **32**(9): 2 827-2 836.

HUANG Y Y, QU L Y, QU X C, *et al.* Soil microbial community characteristics under different vegetation types at the Holocene-basalt Platform, Jingpo Lake area, Northeast China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(9): 2 827-2 836.

[33] 薛建辉, 周之栋, 吴海波. 喀斯特石漠化山地退化土壤生态修复研究进展[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2022, **46**(6): 135-145.

XUE J H, ZHOU Z D, WU Y B. Research progresses on ecological remediation of the degraded soil in Karst rocky desertification mountainous areas[J]. *Journal of Nanjing Forestry University* (Natural Science Edition), 2022, **46**(6): 135-145.

[34] 姜丽娜, 马洁, 刘建康, 等. 毛乌素沙地不同植被恢复措施下土壤理化性质空间分布特征[J]. *水土保持通报*, 2022, **42**(5): 1-7.

JIANG L N, MA J, LIU J K, *et al.* Spatial distribution of soil physicochemical properties under different vegetation restoration measures in Mu us sand land[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, **42**(5): 1-7.

[35] 马克平, 郭庆华. 中国植被生态学研究的进展和趋势[J]. *中国科学(生命科学)*, 2021, **51**(3): 215-218.

MA K P, GUO Q H. Progress and trend of vegetation ecology research in China[J]. *Scientia Sinica (Vitae)*, 2021, **51**(3): 215-218.

[36] 杜忠毓, 王剑武, 邢文黎, 等. 喀斯特锑矿植被恢复区植物多样性及群落稳定性[J]. *环境科学研究*, 2023, **36**(1): 188-197.

DU Z Y, WANG J W, XING W L, *et al.* Plant species diversity and community stability in vegetation restoration area of Karst antimony mining sites in Guizhou, China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2023, **36**(1): 188-197.

[37] SAFWAN M, AZMAN. Stand structure, biomass and dynamics of naturally regenerated and restored mangroves in Malaysia[J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, **482**: 118 852.

[38] 李新荣, 肖洪浪, 刘立超, 等. 腾格里沙漠沙坡头地区固沙植被对生物多样性恢复的长期影响[J]. *中国沙漠*, 2005, **25**(2): 173-181.

LI X R, XIAO H L, LIU L C, *et al.* Long-term effects of sand-binding vegetation on the restoration of biodiversity in Shapotou region of tengger desert, Northern China[J]. *Journal of Desert Research*, 2005, **25**(2): 173-181.

[39] 金立群, 李希来, 孙华方, 等. 不同恢复年限对高寒露天煤矿区渣山植被和土壤特性的影响[J]. *生态学杂志*, 2019, **38**(1): 121-128.

JIN L Q, LI X L, SUN H F, *et al.* Effects of different years of recovery on vegetation and soil characteristics of open-pit coal mine dumps in alpine region[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, **38**(1): 121-128.

[40] 张志权, 束文圣, 廖文波, 等. 豆科植物与矿业废弃地植被恢复[J]. *生态学杂志*, 2002, **21**(2): 47-52.

ZHANG Z Q, SHU W S, LIAO W B, *et al.* Role of legume species in revegetation of mined wastelands[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2002, **21**(2): 47-52.

[41] 张永明, 高润宏, 金洪. 西鄂尔多斯荒漠四种灌木根系生态特性研究[J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2005, **26**(3): 39-43.

ZHANG Y M, GAO R H, JIN H. Studies on the ecological characteristics of four bushes roots in desert of west Erdos[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University* (Natural Science Edition), 2005, **26**(3): 39-43.

(编辑:潘新社)