



干旱矿区利用夏季和上年秋季土壤种子库恢复植被研究

杨帆 郭小平 冯昶栋 林雅超

Using soil seed bank in summer and previous autumn to restore vegetation in arid mining area

Yang Fan, Guo Xiaoping, Feng Changdong, Lin Yachao

引用本文:

杨帆, 郭小平, 冯昶栋, 林雅超. 干旱矿区利用夏季和上年秋季土壤种子库恢复植被研究[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(5):93–102. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230228

Yang Fan, Guo Xiaoping, Feng Changdong, Lin Yachao. Using soil seed bank in summer and previous autumn to restore vegetation in arid mining area[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2024, 46(5):93–102. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230228

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230228>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

震后生态恢复初期植被土壤的耦合关系研究

Coupling relationship between vegetation and soil in the early stage of ecological restoration after earthquake: a case study of Weizhou Town in Wenchuan County and Hanwang Town in Mianzhu City of Sichuan Province, southwestern China

北京林业大学学报, 2021, 43(5): 53–63. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200289>

喀斯特森林植被自然恢复过程中土壤化学计量特征

Characteristics of soil stoichiometric in natural restoration process of Maolan karst forest vegetation, southwestern China

北京林业大学学报, 2019, 41(3): 80–92. <https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180136>

岩溶区不同恢复方式下土壤有机碳组分及酶活性研究

Soil organic carbon fraction and enzyme activities under different restoration methods in karst area

北京林业大学学报, 2019, 41(2): 1–11. <https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180184>

地震灾区2种气候生态治理区恢复初期土壤呼吸动态及其影响因子

Dynamics of soil respiration and its influencing factors at the early stage of ecological restoration of two kinds of climate in earthquake-affected area

北京林业大学学报, 2019, 41(3): 93–104. <https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180192>

基于可见光植被指数的乌海市矿山排土场坡面植被覆盖信息提取研究

Vegetation coverage information extraction of mine dump slope in Wuhai City of Inner Mongolia based on visible vegetation index

北京林业大学学报, 2020, 42(6): 102–112. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190252>

震区生态治理初期植物、土壤的营养含量及叶片化学计量特征

Characteristics of plants, soil nutrients and leaf stoichiometry at the early stage of ecological restoration in earthquake-affected area

北京林业大学学报, 2019, 41(2): 41–52. <https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180329>

DOI:10.12171/j.1000-1522.20230228

干旱矿区利用夏季和上年秋季土壤种子库恢复植被研究

杨 帆¹ 郭小平¹ 冯昶栋² 林雅超¹

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 水利部太湖流域管理局, 上海 200434)

摘要:【目的】针对西部干旱矿区实际情况, 探究该地区表土资源中土壤种子库的可利用性以及制约因素, 筛选出有效的利用模式, 为矿区植被恢复提供理论依据和技术参考。【方法】对内蒙古自治区乌海市新星矿区周边低扰动区域的表土在上年度 10 月(秋季)和当年 6 月(夏季)进行剥离, 采用覆土厚度、补种量和每日灌溉量 3 因素 3 水平的正交试验对不同季节表土中土壤种子库萌发效果影响进行研究, 并结合生态和经济效益, 评选出适宜干旱矿区植被恢复的技术组合。【结果】(1)10 月土壤种子库萌发植物数量为 (83.72 ± 10.88) 株/ m^2 , 物种共出现 20 种, 6 月土壤种子库萌发植物数量为 (44.83 ± 8.96) 株/ m^2 , 物种共出现 13 种。秋季土壤种子库密度和物种丰富度均高于夏季土壤种子库。(2)灌溉对秋季土壤种子库萌发影响最重要, 其次是覆土厚度, 最后是补种。3 种因素对夏季土壤种子库萌发影响程度基本相同。(3)覆土厚度因素对两组土壤种子库的植被覆盖度、群落高度物种丰富度的影响显著($P < 0.05$)。灌溉量对两组土壤种子库萌发植物数量、植被覆盖度和群落高度的影响显著($P < 0.05$)。补种因素未对两组任何相同指标产生显著影响。【结论】干旱矿区排土场植被恢复最优实施方案组合: 利用秋季剥离的表土, 覆土厚度 2 cm, 补种量 50 粒/ m^2 , 每日灌溉量 2 L/ m^2 。该结论可为今后矿区植被恢复提供技术参考。

关键词: 干旱矿区; 土壤种子库; 正交试验; 植被恢复

中图分类号: S722 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2024)05-0093-10

引文格式: 杨帆, 郭小平, 冯昶栋, 等. 干旱矿区利用夏季和上年秋季土壤种子库恢复植被研究 [J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(5): 93-102. Yang Fan, Guo Xiaoping, Feng Changdong, et al. Using soil seed bank in summer and previous autumn to restore vegetation in arid mining area[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(5): 93-102.

Using soil seed bank in summer and previous autumn to restore vegetation in arid mining area

Yang Fan¹ Guo Xiaoping¹ Feng Changdong² Lin Yachao¹

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Taihu Basin Administration of Ministry of Water Resources, Shanghai 200434, China)

Abstract: [Objective] Based on the actual situation of arid mining area in western China, this study explored the availability and constraints of soil seed bank in topsoil resources in the area, selected effective utilization models, and provided theoretical basis and technical reference for vegetation restoration in mining area. [Method] The topsoil in the low-disturbance area around the Xinxing Mining Area in Wuhai City, Inner Mongolia of northern China was stripped in October of the previous year (autumn) and June of the current year (summer), and three factors including soil thickness, reseeding amount and daily irrigation amount were used, three horizontal orthogonal experiments were conducted to study the effects of soil seed bank germination in topsoil in different seasons, and combined with ecological and economic benefits, a combination of technologies suitable for vegetation restoration in arid mining area was selected.

收稿日期: 2023-09-07 修回日期: 2023-12-13

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0504406), 内蒙古自治区科技重大专项(2020ZD0021)。

第一作者: 杨帆。主要研究方向: 矿区生态修复。Email: 13893327551@163.com 地址: 100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学水土保持学院。

责任作者: 郭小平, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 工程绿化。Email: guoxp@bjfu.edu.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

[Result] (1) The number of plants germinated in the soil seed bank in October was (83.72 ± 10.88) plant/m², and a total of 20 species appeared. The number of plants germinated in the soil seed bank in June was (44.83 ± 8.96) plant/m², and a total of 13 species appeared. The soil seed bank density and species richness in autumn were higher than those in summer soil seed bank. (2) Irrigation had the most important impact on soil seed bank germination in autumn, followed by soil covering thickness, and finally reseeded. The three factors had basically the same impact on soil seed bank germination in summer. (3) The soil thickness factor had a significant impact on vegetation coverage and community height species richness of the two groups of soil seed bank ($P < 0.05$). The amount of irrigation had a significant impact on the number of plants germinated in two groups of soil seed bank, vegetation coverage and community height ($P < 0.05$). In both sets of trials, the reseeded factors did not simultaneously produce significantly different indicators.

[Conclusion] The optimal combination of implementation plans for vegetation restoration in dumpsites in arid mining areas is: using topsoil stripped off in autumn, with a covering soil thickness of 2 cm, a reseeded amount of 50 grain/m², and a daily irrigation volume of 2 L/m². This conclusion can provide technical reference for future vegetation restoration in mining area.

Key words: arid mining area; soil seed bank; orthogonal test; vegetation restoration

我国西部地区煤炭资源丰富^[1],但长期的煤炭开采对生态环境造成扰动和破坏^[2-3],导致土地挖损、占压、植被破坏和水土流失等一系列生态问题^[4-6],加速该区域的生态环境退化^[7]。近年西部露天煤矿的产量在逐步扩大^[8],开采时产生的废石堆积形成排土场,大量土地资源被占压^[9],同时排土场边坡水土流失严重,植被生长困难,因此排土场边坡的修复问题一直是矿山生态修复的研究热点^[10-11]。在排土场实施有效的植被恢复,对矿区的生态恢复和生态稳定有着重要意义^[12]。

土壤种子库作为表土资源和植被群落的重要组成部分,是植被恢复演替的重要物质基础,具有十分重要的生态作用^[13-14]。种子库按照种子存活年限可分为短暂种子库和持久种子库。短暂种子库是指在土壤中存活时间不超过一年的种子;而在土壤里存活时间超过一年的种子形成持久种子库^[15]。学者们通过研究植物生长周期总结出9—10月是种子成熟散落的高峰期,土壤种子库含量最大,若研究总体种子库,需要在该时间段进行采样;5—6月是种子大量萌发的季节,土壤种子库含量最低,此时的土壤种子库为持久种子库;总体土壤种子库和持久种子库二者差值可近似认为是短暂种子库^[16]。利用土壤种子库进行生态修复在最大程度上保证了遗传多样性,有利于生态环境稳定^[17]。近年来,土壤种子库在生态修复领域已得到广泛应用^[18-20]。而土壤种子库的有效利用取决于水分、温度、光照、土壤环境和种子物种组成等多重因素的影响^[21]。在干旱地区,水分作为影响植物生长的重要因素,对激活土壤种子库意义重大^[22]。不同的水分处理对土壤种子库种子的萌发具有显著影响^[23],徐海量等^[24]的研究表明适

宜的水分梯度才能保证种子的充分萌发,水分过多或过少都会影响幼苗数量以及物种的丰富度。利用表土资源进行土壤回覆是矿山生态修复过程中非常重要的环节,覆土厚度对土壤的持水性、植物生长以及经济成本都有重要影响^[25]。研究表明覆土厚度对幼苗的数量和物种起直接作用^[18]。覆土太薄土壤所含的种子较少,并且会影响植物根系的生长^[26-27]。覆土太厚则会导致种子的拱土能力不足,影响出苗,同时增加经济成本。补种作为植被恢复过程中主要的人工措施之一^[28],选择适宜的植物种进行播种,可以有效加快植被恢复进程^[29],提高植物群落的密度、盖度以及物种丰富度,对生态恢复有着积极影响^[30]。

先前研究集中在矿区土壤种子库基本特征、与地上植被的关系或者单一因素对土壤种子库的影响,表土利用的研究方向也主要针对生产建设中占用的耕地或林地。为系统探究土壤种子库应用于矿区植被恢复效果,结合西部干旱矿区自然情况,设计三因素三水平的正交试验。选取覆土厚度、补种量以及每日灌溉量3种因素,研究3种因素在不同水平下对土壤种子库萌发效果的影响。结合生态和经济效益考量,寻求最优配比组合,为干旱矿区排土场的植被生态恢复提供有益的实践参考。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区乌海市($106^{\circ}52'50'' \sim 106^{\circ}54'17''\text{E}$, $39^{\circ}42'03'' \sim 39^{\circ}42'36''\text{N}$)。研究区平均气温 $7.8 \sim 8.2^{\circ}\text{C}$ 。年均降水量为 160 mm,降水主要集中在夏季,属于暖温带大陆性气候。地形北高南低,东高西低,平均海拔 1 345 m。土壤类型以沙漠

土、棕钙土、灰漠土为主。主要植被类型为旱生植被、沙生植被和盐生植被,主要植物物种有红砂(*Reaumuria songarica*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)、霸王(*Sarcosygium xanthoxylon*)等灌木以及珍珠猪毛菜(*Salsola passerina*)、芨芨草(*Achnatherum splendens*)、雾冰藜(*Bassia dasyphylla*)等草本植物^[31]。研究区主要群落结构是“半日花(*Helianthemum songaricum*) + 猫头刺(*Oxytropis aciphylla*) + 沙生针茅(*Stipa caucasica* subsp. *glareosa*)群丛”和“红砂 + 猫头刺 + 沙生针茅群丛”。试验小区位于乌海市新星矿区联合排土场,排土场整体呈南北走向,共有 6 级台阶,每级台阶坡度在 36°~38°之间。排土场植被恢复工程是采用了一般种植土覆盖,并采用人工撒播种子的方式进行坡面建植。

1.2 取样方法

对矿区表土资源调查后本研究选择矿区周边生产扰动较少的区域进行表土剥离取样。分别于 2019 年 10 月和 2020 年 6 月进行两次表土剥离,在样地内随机选择 36 个样方(样方大小 2 m × 2 m),样方间至少间隔 3 m,以保证取样尽可能均匀。取样前清除地上植被,以便采集表土,在选定样方内按照“五点法”进行取样,利用环刀剥离 0~10 cm 表土。剔除杂质后将土样混合、装袋,10 月剥离的表土储存在集装袋中,放置在阴凉通风区域并保持干燥,尽可能减少储存过程中的种子损耗,堆存至第 2 年等待采集 6 月表土后同时开展试验。

1.3 正交试验设计

本研究采用 L9 正交表设置三因素三水平试验,由表 1 所示,选取覆土厚度(A)、补种量(B)和每日灌溉量(C) 3 种因素,因素 A 设置 3 个水平分别为 2、3 和 5 cm;因素 B 设置 3 个水平分别为 50、25 和 0 粒/m²;因素 C 设置水平为 2、1.5 和 1 L/m²。试验

开始阶段覆土后补种,补充的种子是灌木沙冬青(*Ammopiptanthus mongolicus*)和多年生草本直立黄耆(*Astragalus membranaceus*),每组试验补种沙冬青 90 粒,直立黄耆 360 粒,二者配比为 1:4,具体设计见表 1。评价指标有萌发植物数量、植被覆盖度、群落平均高度、萌发灌木种类比例、物种丰富度和 Pielou 均匀度指数。经济成本有表土剥离和储存费用、种子费用和灌溉费用。

1.4 布置萌发试验

本试验布设在内蒙古自治区乌海市新星矿区联合排土场砌石拱形护坡中。将前一年 10 月剥离的表土(M 组)和 6 月剥离的表土(N 组)进行两组土壤种子库正交试验,每组 9 个处理,分别计为 M1~M9 和 N1~N9 并以此划分样地,每个处理重复 3 次,每个处理试验面积约为 2 m²,试验时间从 2020 年 7 月 1 日开始,至 2020 年 10 月 1 日结束,总计 3 个月。按照表 1 设计组别开展萌发试验,具体为:(1)试验前清除样地中植物和杂质,将土样充分混合均匀后进行覆土;(2)用撒播方式补种至覆土后的样地表面并与土壤进行适当混合;(3)按照每日灌溉量进行人工喷灌,同时备有防水覆盖物,控制降雨对试验的影响。幼苗出土后开始观察并记录,待植物生长稳定后调查群落高度。在 9 月底使用无人机对恢复区域进行图像采集,计算植被覆盖度。

1.5 数据处理与分析

土壤种子库与地上植被物种多样性采用 Shannon-Wiener 多样性指数(*H*)、Simpson 优势度指数(*D*)和 Pielou 均匀度指数(*E*)计算,土壤种子库与地上植被的物种相似性采用 Sorensen 相似系数(*Sc*)计算^[31-32]。数据采用 SPSS 24.0 进行极差分析、方差分析和主成分分析。植物生长参数以及群落多样性

表 1 正交试验因素与水平

Tab. 1 Orthogonal test factors and levels

试验组序 Sequence of experimental group	覆土厚度 Covering soil thickness (A)/cm	补种量/(粒·m ⁻²) Reseeding amount (B)/(grain·m ⁻²)	每日灌溉量 Daily irrigation (C)/(L·m ⁻²)
1	2 (A ₁)	50 (B ₁)	2.0 (C ₁)
2	2 (A ₁)	25 (B ₂)	1.5 (C ₂)
3	2 (A ₁)	0 (B ₃)	1.0 (C ₃)
4	3 (A ₂)	50 (B ₁)	1.5 (C ₂)
5	3 (A ₂)	25 (B ₂)	1.0 (C ₃)
6	3 (A ₂)	0 (B ₃)	2.0 (C ₁)
7	5 (A ₃)	50 (B ₁)	1.0 (C ₃)
8	5 (A ₃)	25 (B ₂)	2.0 (C ₁)
9	5 (A ₃)	0 (B ₃)	1.5 (C ₂)

指标数据采用 Excel 2019 统计,用 origin 软件制图。

Shannon-Wiener多样性指数: $H = - \sum (P_i \ln P_i)$ (1)

Simpson优势度指数: $D = 1 - \sum P_i^2$ (2)

Pielou均匀度指数: $E = H / \ln S$ (3)

Sorensen相似系数: $Sc = 2a / (b + c)$ (4)

式中: P_i 为物种 i 的相对丰度,即 i 个物种个体数占所有个体总数的比例; S 为土壤种子库或地上植被物种总数。 b 和 c 分别为土壤种子库或地上植被中出现的物种数; a 为土壤种子库之间或与其地上植被的共有物种数。

2 结果与分析

2.1 恢复植被与原生植被特征的比较

前期试验结果显示 10 月总体种子库 0 ~ 10 cm 密度为(846.68 ± 79.25)粒/m², 6 月持久种子库 0 ~ 10 cm 密度为(178.35 ± 49.97)粒/m²。正交试验中 M 组萌发植物数量为(83.72 ± 10.88)株/m², 共萌发 20 种植物。N 组萌发植物数量平均为(44.83 ± 8.96)株/m², 共萌发植物 13 种。排土场原生植被植物数量平均 38 株/m², 共有 8 种植物。M 组萌发的植物主要有沙蒿(*Artemisia desertorum*)、直立黄耆和小画眉草(*Eragrostis minor*); N 组萌发的主要植物有直立黄耆、小画眉草和冷蒿(*Artemisia frigida*); 矿区原生植被主要有狗尾草(*Setaria viridis*)、直立黄耆和紫苜蓿(*Medicago sativa*)。恢复植被与原生植被 Sorensen 相似性在 0.35 ~ 0.48。两组恢复植被的植物数量和物种数均高于矿区排土场原生植被。

M 组试验中多年生草本植物占萌发植物总数的

77.11%; 其次是一年生草本植物, 占总数的 19.71%; 灌木植物占萌发总数的 3.19%。植物种类占比依次为菊科、禾本科和豆科。补种的直立黄耆萌发率为 57.77%, 补种的沙冬青萌发率为 50.01%。N 组试验中多年生草本植物占幼苗萌发总数的 67.53%; 一年生草本植物占幼苗萌发总数的 26.77%; 灌木植物占萌发总数的 5.20%。植物种类占比依次为禾本科、菊科和豆科。补种的直立黄耆萌发率为 55.00%, 补种的沙冬青萌发率为 44.44%。

两组试验对比显示, M 组植物株数平均比 N 组多 39 株/m², M 组植被覆盖度平均比 N 组高 6.9%, M 组群落高度平均比 N 组高 1.2 cm, M 组物种数比 N 组多 7 种, M 组 Shannon-Wiener 多样性指数范围在 1.42 ~ 1.96, N 组 Shannon-Wiener 多样性指数范围在 1.15 ~ 1.78。

2.2 极差分析法评估试验结果

由表 2 所示, M 组试验中以萌发植物数量和萌发灌木种类比例为参考指标时, 因素主次顺序为灌溉量、补种量和覆土厚度; 以植被覆盖度和群落平均高度为参考指标时, 因素主次顺序为灌溉量、覆土厚度和补种量; 以种丰富度和 Pielou 均匀度为参考指标时, 因素主次顺序为覆土厚度、补种量和灌溉量; 以 Shannon-Wiener 多样性指数为参考指标时, 因素主次顺序为覆土厚度、灌溉量和补种量; 以优势度指数为参考指标时, 因素主次顺序为补种量、覆土厚度和灌溉量。在 4 个指标中, 灌溉量的极差值均为最大, 覆土厚度在 3 个指标中极差值最大, 而补种量仅在一个指标中极差值最大。据此可判断 3 因素重要程度为灌溉量 > 覆土厚度 > 补种量。

N 组试验中以萌发植物数量为参考指标时, 因

表 2 正交试验极差结果
Tab. 2 Orthogonal test range results

指标 Index	M组 Group M		N组 Group N	
	极差 Range	最优组合 Optimal combination	极差 Range	最优组合 Optimal combination
萌发植物数量 Number of germination plant	$R_C > R_B > R_A$	$A_3B_1C_1$	$R_C > R_B > R_A$	$A_3B_1C_1$
植被覆盖度 Vegetation coverage	$R_C > R_A > R_B$	$A_3B_1C_1$	$R_A > R_C > R_B$	$A_3B_3C_1$
群落平均高度 Average community height	$R_C > R_A > R_B$	$A_3B_3C_1$	$R_C > R_A > R_B$	$A_3B_3C_1$
萌发灌木种类比例 Proportion of budding shrub species	$R_C > R_B > R_A$	$A_3B_2C_1$	$R_B > R_C > R_A$	$A_3B_2C_1$
物种丰富度 Species richness	$R_A > R_B > R_C$	$A_3B_1C_1$	$R_A > R_B > R_C$	$A_3B_1C_1$
多样性指数 Shannon-Wiener diversity index	$R_A > R_C > R_B$	$A_1B_3C_1$	$R_B > R_C > R_A$	$A_2B_2C_3$
优势度指数 Dominance index	$R_B > R_A > R_C$	$A_1B_2C_2$	$R_A > R_B > R_C$	$A_2B_2C_1$
Pielou均匀度指数 Pielou evenness index	$R_A > R_B > R_C$	$A_1B_3C_1$	$R_B > R_C > R_A$	$A_2B_3C_3$

注: M表示10月土壤种子库的试验, N表示6月土壤种子库的试验, R_A 表示因素A的极差, 其他符号同理。Notes: M represents soil seed bank test in October and N represents soil seed bank test in June, R_A denotes the extreme variance of factor A, the same applies to other symbols.

素主次顺序为灌溉量、补种量和覆土厚度;以植被覆盖度为参考指标时,因素主次顺序为覆土厚度、灌溉量和补种量;以群落平均高度为考察指标时,因素主次顺序为灌溉量、覆土厚度和补种量;以萌发灌木种类比例、Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数为考察指标时,因素主次顺序为补种量、灌溉量和覆土厚度;以种丰富度和优势度指数为考察指标时,因素主次顺序为覆土厚度、补种量和灌溉量。N 组试验中,补种量在 3 个指标中极差值均为最大,覆土厚度也在 3 个指标中极差值均为最大,灌水量在 2 个指标中极差值均为最大。

2.3 方差分析法评估试验结果

由表 3 所示, M 组试验中覆土厚度和植被覆盖度、群落平均高度以及 Shannon-Wiener 多样性 3 个指标呈显著相关($P < 0.05$), 和物种丰富度呈极显著相关($P < 0.01$)。萌发植物数量、植被覆盖度以及灌木萌发比例 3 个指标与灌溉因素呈显著相关($P <$

0.05), 群落平均高度与灌溉极显著相关($P < 0.01$)。而补种只对物种丰富度有显著影响($P < 0.05$)。N 组试验中覆土厚度对群落平均高度和物种丰富度有显著影响($P < 0.05$), 对植被覆盖度有极显著影响($P < 0.01$)。萌发植物数量、植被覆盖度和群落平均高度 3 个指标与灌溉因素显著相关($P < 0.05$)。3 因素对两组的优势度指标和 Pielou 均匀度指标无显著影响($P > 0.05$)。

由表 4 所示, M 组试验中不同水平的覆土厚度对群落高度和物种丰富度均有显著影响, 不同水平的灌溉量对植被覆盖度和群落高度均有显著影响。N 组试验中不同水平的覆土厚度对植被覆盖度和物种丰富度均存在显著影响, 不同水平的灌溉量对植被覆盖度均显著影响。

2.4 主成分分析法评估试验结果

主成分分析结果显示前 4 个特征值分别为 2.104、1.719、1.362 和 1.210, 累计贡献率达到 89.22%, 提

表 3 正交试验方差结果
Tab. 3 Variance results of orthogonal experiment

指标 Index	因素 Factor	M组 Group M		N组 Group N	
		F	P	F	P
萌发植物数量 Number of germination plant	A	3.300	0.233	3.019	0.249
	B	4.746	0.174	12.383	0.075
	C	20.908	0.046	31.044	0.031
植被覆盖度 Vegetation coverage	A	24.180	0.040	188.357	0.005
	B	0.664	0.601	5.847	0.146
	C	53.478	0.018	96.204	0.010
群落平均高度 Average community height	A	89.721	0.011	23.596	0.041
	B	9.923	0.092	0.793	0.558
	C	144.891	0.007	38.118	0.026
萌发灌木种类比例 Proportion of budding shrub species	A	11.199	0.082	0.719	0.582
	B	18.716	0.051	7.092	0.124
	C	23.958	0.040	3.327	0.231
物种丰富度 Species richness	A	127	0.008	76	0.013
	B	43	0.023	13	0.071
	C	7	0.125	4	0.200
多样性指数 Shannon-Wiener diversity index	A	28.289	0.034	0.549	0.646
	B	0.923	0.520	0.718	0.582
	C	3.733	0.211	0.614	0.619
优势度指数 Dominance index	A	1.797	0.358	5.914	0.145
	B	2.810	0.262	2.639	0.275
	C	1.046	0.489	0.390	0.720
Pielou均匀度指数 Pielou evenness index	A	5.074	0.165	1.135	0.468
	B	0.337	0.748	3.197	0.238
	C	0.200	0.833	2.418	0.293

表 4 各因素不同水平之间的多重比较分析结果

Tab. 4 Multiple comparison analysis results between different levels of each factor

因素水平 Factor level		萌发植物数量 Number of germination plant	植被覆盖度 Vegetation coverage	群落平均高度 Average community height	萌发灌木 种类比例 Proportion of budding shrub species	物种丰 富度 Species richness	多样性 指数 Diversity index	优势度 指数 Dominance index	均匀度 指数 Evenness index	
M组(秋季)土壤种子库 Group M (autumn) soil seed bank	覆土厚度 Covering soil thickness	1	149.67 a	23.36 b	10.39 c	4.31 b	14.67 c	1.90 a	0.77 a	0.67 a
		2	181.67 b	34.48 a	12.15 b	6.00 ab	16.67 b	1.46 b	0.78 a	0.51 a
		3	197.67 b	38.83 a	14.37 a	6.96 a	19.00 a	1.59 b	0.80 a	0.55 a
	补种量 Amount of replanting	1	209.33 a	33.51 a	12.76 a	7.52 a	17.67 a	1.64 a	0.80 a	0.60 a
		2	166.33 a	32.29 a	12.60 a	5.71 ab	17.33 a	1.69 a	0.79 a	0.58 a
		3	153.33 a	30.87 a	11.54 a	4.04 a	15.33 b	1.66 a	0.76 a	0.55 a
	每日灌溉量 Daily irrigation	1	238.67 a	44.02 a	14.95 a	7.50 a	17.33 a	1.72 a	0.79 a	0.58 a
		2	174.67 ab	32.34 b	12.07 b	6.14 a	16.67 a	1.66 b	0.80 a	0.60 a
		3	115.67 b	20.31 c	9.89 c	3.62 b	16.33 a	1.56 b	0.77 a	0.56 a
N组(夏季)土壤种子库 Group N (summer) soil seed bank	覆土厚度 Covering soil thickness	1	80.00 a	15.44 c	9.05 a	6.73 a	8.33 c	1.30 a	0.76 a	0.60 a
		2	102.00 a	25.14 b	11.25 ab	9.70 a	10.33 b	1.48 a	0.83 a	0.63 a
		3	102.00 a	30.05 a	13.10 b	8.33 a	11.67 a	1.36 a	0.82 a	0.55 a
	补种量 Amount of replanting	1	121.33 a	22.29 a	11.17 a	8.84 a	10.67 a	1.26 a	0.80 a	0.52 a
		2	92.67 ab	23.44 a	10.74 a	12.59 a	10.33 ab	1.46 a	0.82 a	0.63 a
		3	70.00 b	24.91 a	11.49 a	3.33 a	9.33 b	1.43 a	0.78 a	0.65 a
	每日灌溉量 Daily irrigation	1	136.67 a	29.15 a	13.58 a	11.92 a	10.33 a	1.36 a	0.82 a	0.57 a
		2	92.00 b	22.90 b	11.37 a	6.73 a	10.33 a	1.30 a	0.80 a	0.56 a
		3	55.33 b	18.58 c	8.45 b	6.11 a	9.67 a	1.49 a	0.79 a	0.67 a

注: 不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。Note: different lowercase letters denote statistically significant differences among the processes ($P < 0.05$).

取前 4 个因素进行分析统计。由图 1 所示, 相同的处理措施下 M 组得分大部分高于 N 组, 且从分数可以看出, 两类表土对措施的响应保持着较高一致性。M 组中 M1 的分数最高, 组合是覆土厚度为 2 cm, 补种量 50 粒/m², 每日灌溉量为 2 L/m²; N 组中 N8 的分数最高, 组合是覆土厚度为 5 cm, 补种量 25 粒/m², 每日灌溉量为 2 L/m²。两组中分数最低的

组合都是覆土厚度为 2 cm, 补种量 0 粒/m², 每日灌溉量为 1 L/m²。该组合的 3 种因素皆处于最低水平。

3 讨 论

3.1 两类表土土壤种子库基本特征

两组恢复植被的植株萌发数量和物种数均高于矿区排土场原生植被物种数, 证明利用表土中土壤种子库进行植被恢复有着良好效果^[33]。上年度秋季剥离的表土在堆放过程中虽然会造成部分种子丧失活力, 但秋季土壤种子库的植株萌发数量、植被覆盖度、群落平均高、物种丰富度和多样性指数等指标均高于夏季土壤种子库, 种子库动态呈现明显的季节性变化^[34]。秋季是许多植物种子的成熟期, 种子雨散落至土壤中, 促进土壤种子库的密度显著上升^[35]。总体种子库与持久种子库相比, 前者含有更多的种子数量和物种。这一特性使得秋季剥离的表土生态修复成效更加显著, 具有更高的生态修复价值。

两组土壤种子库萌发植物均以菊科、禾本科和豆科为主, 与以往的露天煤矿土壤种子库研究一致^[36], 季节变化并没有明显改变土壤种子库的科属特征, 菊科、禾本科和豆科植物在生态环境恶劣的矿区适

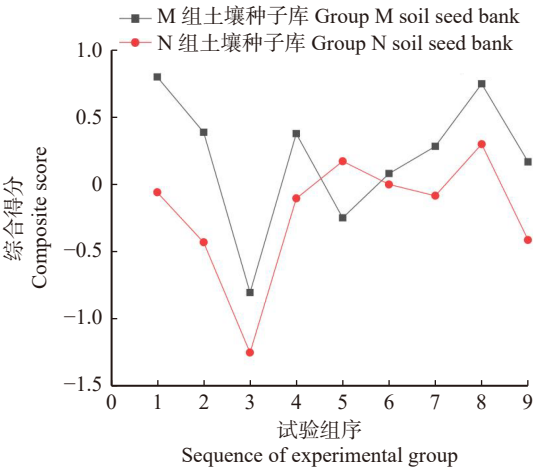


图 1 主成分分析得分

Fig. 1 Principal component analysis score

应度更高^[37],因此在矿区进行植被修复时应优选以上物种植物。试验中萌发的多年生草本和一年生草本在数量和物种数上占据绝对优势,草本植物种子产量大,传播能力强且易出苗,在环境恶劣的地区能更快适应^[38]。试验中补种的草本种子萌发率高于灌木种子,一部分种子没有萌发可能是受到灌溉量和覆土厚度因素的影响,水分太少以及覆土厚度薄导致播撒的种子不能全部萌发亦或者是种子与土壤混合过程中埋藏太深,导致萌发阻力加大未出现萌发情况。两组试验中萌发的灌木仅有红砂和沙冬青,灌木物种的缺少可能与植物种的繁殖策略有关,造成土壤种子库中灌木种子含量较低^[39]。

3.2 3种因素对土壤种子库萌发的影响

3种因素对土壤种子库萌发效果有着显著影响,同时对不同季节的土壤种子库影响程度存在差异。结果显示灌溉量是影响秋季土壤种子库萌发最重要的因素,其次是覆土厚度,最后是补种。这可能因为在降雨稀少的西部干旱地区水分是限制植物生长的主要因素,水分对土壤种子库的激活效应远比其他环境因子的作用力强^[40],因此充足的灌溉对土壤种子库萌发和植物生长有着重要作用^[41]。补种对秋季土壤种子库萌发的影响因素最小,但试验中萌发的灌木基本都是依靠补种,补种可以促进土壤种子库的丰富度和多样性,提升植物群落的稳定性。

灌溉对夏季土壤种子库的影响较秋季低,而覆土和补种对夏季土壤种子库的影响比秋季高。春夏季作为植物生长期,大量种子萌发以至于土壤中种子含量减少,因此即使在水分条件充足,也无法增加幼苗数量。覆土因素重要性提升,其原因是覆土厚度的增加会使土壤中含有更多种子,覆土厚度直接影响着土壤种子密度和植物物种,土层越厚所含有的土壤种子数量就有可能越多^[42-43]。但覆土厚度并不是越厚越好,过高的覆土厚度不仅增加大量成本,而且会增加种子萌发阻力,尤其是当种子埋藏深度超过5 cm时,会导致种子萌发和出土困难^[44],出苗率可能随着覆土厚度增加而下降^[45],因此选择适宜的厚度,才能帮助种子顺利萌发,促进植物生长。补种作为直接补充种子数量的措施,在土壤种子库密度较低的情况下,其对于植被恢复的重要性愈发凸显,所以对夏季土壤种子库产生了更大影响。以此为鉴补种措施在自然条件恶劣,植被稀疏的地区实施植被恢复效果会更显著^[46]。

方差分析结果显示两组在萌发植物数量和多样性指数指标上存在显著差异,在物种丰富度上两组存在极显著差异,先前的研究中有相同的结果^[33]。物种数的差异是土壤种子库时间异质性最直接的体

现,同时因为物种和种子数量的变化,对多样性指数也产生了影响。在植被覆盖度方面没有造成差异的原因可能是本研究在干旱矿区,在采集盖度数据时,由于植被幼苗生长缓慢且个头较小,导致植被覆盖度普遍较低,没有形成显著差异。

主成分分析结果显示,M组分数大部分高于N组,证明秋季剥离的表土利用价值更高,也证明表土剥离时间的重要性比添加辅助措施更加重要。但在第5个措施中夏季土壤种子库得分超过秋季土壤种子库,该组措施为覆土厚度3 cm,补种量25粒/m²,每日灌溉量1 L/m²。此现象进一步证实了秋季土壤种子库对灌溉条件的依赖性。即便具备适宜的覆土厚度和补种量,在一定程度上增加种子库的数量,但如果灌溉量不足,将无法有效激活充足数量的种子。夏季土壤种子库在该措施下得分更高,可能是因为持久种子库中部分种子在春夏季降水过后短暂解除休眠,但并未萌发,随后在持续干旱中再次进入休眠^[47],这些经历了2次休眠但未失去活性的种子,对萌发需水量的要求低于短暂种子库^[48]。M组试验中M1的分数最高,其组合是覆土厚度为2 cm,补种量50粒/m²,每日灌溉量为2 L/m²;N组试验中N8的分数最高,其组合是覆土厚度为5 cm,补种量25粒/m²,每日灌溉量为2 L/m²。由此可见,两组土壤种子库的关键需求是充足的水分。然而,夏季土壤种子库含量相对较低,因此需要更厚的覆土以弥补土壤中种子含量不足的问题。

3.3 今后的研究方向

本研究为解决合理利用干旱矿区表土资源的科学问题,采用正交试验的方法探究覆土厚度、每日灌溉量和补种量因素对不同季节土壤种子库的影响程度。采用“实地恢复试验”,真实还原植被恢复环境,使研究结果更加准确可靠。并且在生态恢复效果的基础上考虑经济可行性,探究恢复效果好且经济可行的最优方案,为今后的植被恢复提供借鉴。不同灌溉梯度和覆土厚度对土壤种子库物种组成和群落结构差异显著^[49],在本次研究中,尚未对灌溉及覆土对土壤种子库中各类种子所导致的差异性进行探讨。在未来的研究中,可针对土壤种子库中主导种子的生态特性,设定适宜的灌溉梯度和覆土厚度。

4 结 论

秋季剥离的表土比夏季剥离的表土可利用性更高,植被恢复效果更好。灌溉是影响秋季土壤种子库萌发的最重要因素;灌溉对夏季土壤种子库萌发影响减少,覆土和补种因素的影响显著提升。结合生态效益和经济成本考虑,矿区排土场生态修复利

用秋季剥离的表土,覆土厚度 2 cm,补种量 50 粒/m²,每日灌溉量 2 L/m² 的组合是最优的实施方案,为今后矿区植被恢复提供理论参考。

参 考 文 献

- [1] 卞正富, 于昊辰, 雷少刚, 等. 黄河流域煤炭资源开发战略研判与生态修复策略思考 [J]. 煤炭学报, 2021, 46(5): 1378–1391.
Bian Z F, Yu H C, Lei S G, et al. Strategic consideration of exploitation on coal resources and its ecological restoration in the Yellow River Basin, China[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(5): 1378–1391.
- [2] 刘英, 雷少刚, 陈孝杨, 等. 神东矿区植被覆盖度时序变化与驱动因素分析及引导恢复策略 [J]. 煤炭学报, 2021, 46(10): 3319–3331.
Liu Y, Lei S G, Chen X Y, et al. Temporal variation and driving factors of vegetation coverage in Shendong central mining area based on the perspective of guided restoration[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(10): 3319–3331.
- [3] 肖武, 张文凯, 吕雪娇, 等. 西部生态脆弱区矿山不同开采强度下生态系统服务时空变化: 以神府矿区为例 [J]. 自然资源学报, 2020, 35(1): 68–81.
Xiao W, Zhang W K, Lü X J, et al. Spatio-temporal patterns of ecological capital under different mining intensities in an ecologically fragile mining area in Western China: a case study of Shenfu mining area[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(1): 68–81.
- [4] 卞正富, 于昊辰, 侯竟, 等. 西部重点煤矿区土地退化的影响因素及其评估 [J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 338–350.
Bian Z F, Yu H C, Hou J, et al. Influencing factors and evaluation of land degradation of 12 coal mine areas in western China[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 338–350.
- [5] 王佟, 刘峰, 赵欣, 等. 生态地质层理论及其在矿山环境治理修复中的应用 [J]. 煤炭学报, 2022, 47(10): 3759–3773.
Wang T, Liu F, Zhao X, et al. Theory of ecological geological layer and its application in mine environment remediation[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(10): 3759–3773.
- [6] 范立民, 马雄德, 李永红, 等. 西部高强度采煤区矿山地质灾害现状与防控技术 [J]. 煤炭学报, 2017, 42(2): 276–285.
Fan L M, Ma X D, Li Y H, et al. Geological disasters and control technology in high intensity mining area of western China[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(2): 276–285.
- [7] 王隽雄, 金美君, 刘琼海, 等. 西部矿区土地退化因素评价与分析 [J]. 中国水土保持, 2021, 42(5): 26–29.
Wang J X, Jin M J, Liu Q H, et al. Western mining area land degradation factor evaluation and analysis[J]. Soil and Water Conservation in China, 2021, 42(5): 26–29.
- [8] 毕银丽, 彭苏萍, 杜善周. 西部干旱半干旱露天煤矿生态重构技术难点及发展方向 [J]. 煤炭学报, 2021, 46(5): 1355–1364.
Bi Y L, Peng S P, Du S Z. Technological difficulties and future directions of ecological reconstruction in open pit coal mine of the arid and semi-arid areas of western China[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(5): 1355–1364.
- [9] 薛东明, 郭小平, 张晓霞. 干旱矿区排土场不同边坡生态修复模式下减流减沙效益 [J]. 水土保持学报, 2021, 35(6): 15–21, 30.
Xue D M, Guo X P, Zhang X X. Runoff and sediment reduction under differ slope ecological restoration modes of waste dump in arid mining area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(6): 15–21, 30.
- [10] 郭建英, 何京丽, 李锦荣, 等. 典型草原大型露天煤矿排土场边坡水蚀控制效果 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 296–303.
Guo J Y, He J L, Li J R, et al. Effects of different measures on water erosion control of dump slope at opencast coal mine in typical steppe[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(3): 296–303.
- [11] 杨勤学, 赵冰清, 郭东昱. 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): 1152–1157.
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): 1152–1157.
- [12] 刘泽蒙. 乌海市隆昌煤矿排土场植物群落特征和土壤种子库及其理化性质研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022.
Liu Z M. Study on the characteristics of plant community, soil seed bank and physicochemical properties of Longchang Coal Mine Dump in Wuhai City[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022.
- [13] Valkó O, Tóthmérész B, Kelemen A, et al. Environmental factors driving seed bank diversity in alkali grasslands[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, 182(1): 80–87.
- [14] Plue J, Van Calster H, Auestad I, et al. Buffering effects of soil seed banks on plant community composition in response to land use and climate[J]. Global Ecology and Biogeography, 2021, 30(1): 128–139.
- [15] Thompson K, Band B S R S R, Hodgson J D. Seed size and shape predict persistence in soil[J]. Functional Ecology, 1993, 7(2): 236–241.
- [16] 于顺利, 陈宏伟, 郎南军. 土壤种子库的分类系统和种子在土壤中的持久性 [J]. 生态学报, 2007, 27(5): 2099–2108.
Yu S L, Chen H W, Lang N J. The classification systems of soil seed banks and seed persistence in soil[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(5): 2099–2108.
- [17] Uesugi R, Nishihiro J, Tsumura Y, et al. Restoration of genetic diversity from soil seed banks in a threatened aquatic plant, *Nymphoides peltata*[J]. Conservation Genetics, 2007, 8(1): 111–121.
- [18] 赵娜, 贺梦璇, 李洪远, 等. 基于正交试验设计的土壤种子库萌发影响因素优化研究 [J]. 生态环境学报, 2016, 25(5): 783–789.
Zhao N, He M X, Li H Y, et al. Research on the optimization in the influence factors on the germination of soil seed bank based on orthogonal test[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(5): 783–789.
- [19] Nakamura K, Honda K, Taniguchi S. A case study on the revegetation method using topsoil seed bank in Amamishima[J]. Journal of the Japanese Society of Revegetation Technology, 2007, 33(1): 183–186.

- [20] 蹇复海. 种子库技术在工程边坡恢复中的研究 [D]. 成都: 四川农业大学, 2020.
- Jian F H. Study on seed bank technology in engineering slope restoration[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2020.
- [21] 占玉芳, 马力, 滕玉凤, 等. 河西走廊沙漠人工植被区土壤种子库特征 [J]. 生态学报, 2022, 42(3): 922-934.
- Zhan Y F, Ma L, Teng Y F, et al. Analysis of soil seed bank characteristics of artificial revegetated desert area in Hexi Corridor[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(3): 922-934.
- [22] 李淑君, 李国旗, 王磊, 等. 不同水分梯度对激发土壤种子库的效应研究 [J]. 北方园艺, 2014, 38(18): 181-185.
- Li S J, Li G Q, Wang L, et al. Effects of different water gradients on stimulating soil seed banks[J]. Northern Horticulture, 2014, 38(18): 181-185.
- [23] 王增如, 徐海量, 尹林克, 等. 不同水分处理对激活土壤种子库的影响: 以塔里木河下游为例 [J]. 自然科学进展, 2008, 18(4): 389-396.
- Wang Z R, Xu H L, Yin L K, et al. Effects of different water treatments on activated soil seed bank: a case study of lower Tarim River[J]. Progress in Natural Science, 2008, 18(4): 389-396.
- [24] 徐海量, 叶茂, 李吉枚, 等. 不同水分供应对塔里木河下游土壤种子库种子萌发的影响 [J]. 干旱区地理, 2008, 31(5): 650-658.
- Xu H L, Ye M, Li J M, et al. Effects of different water supply on seed germination in soil seed bank in lower reaches of Tarim River[J]. Arid Land Geography, 2008, 31(5): 650-658.
- [25] 张雅楠, 吕刚. 露天煤矿排土场覆土厚度对土壤水分入渗及植物水分利用的影响 [J]. 水土保持学报, 2023, 37(5): 345-351, 362.
- Zhang Y N, Lü G. Effect of soil cover thickness on soil water infiltration and plant water utilization in the dump of open pit coal mine[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(5): 345-351, 362.
- [26] 李洪远, 佐藤治雄, 朱琳, 等. 土壤种子库植物种类组成与土壤采集地植被的关系 [J]. 生态环境, 2006, 15(4): 791-795.
- Li H Y, Toshio S, Zhu L, et al. The relationship analysis of plant species of soil seed bank and the soil vegetation in the collecting field[J]. Ecological Environment, 2006, 15(4): 791-795.
- [27] 郭利娜, 姬鹏, 孙宏彦, 等. 覆土厚度对城市园林植物生长的影响分析 [J]. 中国园林, 2022, 38(3): 112-117.
- Guo L N, Ji P, Sun H Y, et al. On the influence of soil thickness on the growth of urban garden plants[J]. Chinese Landscape Architecture, 2022, 38(3): 112-117.
- [28] 周昊翔. 引种乡土物种对天然灌草群落特征的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- Zhou H X. Impact of introducing local species on the characteristics of natural shrub and grass communities[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018.
- [29] Valkó O, Balázs D, Török P, et al. Dynamics in vegetation and seed bank composition highlight the importance of post-restoration management in sown grasslands[J/OL]. Restoration Ecology, 2020, 29(Suppl.1): e13192[2024-01-12], <https://doi.org/10.1111/rec.13192>.
- [30] 张加涛, 张雅荣, 刘亚玲, 等. 不同恢复措施对内蒙古乌拉特中旗荒漠草原植物群落的影响 [J]. 生态学杂志, 2023, 42(4): 828-837.
- Zhang J T, Zhang Y R, Liu Y L, et al. Effects of different restoration measures on plant communities in desert steppe of Wulat Middle Banner, Inner Mongolia[J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(4): 828-837.
- [31] 罗超, 郭小平, 冯昶栋, 等. 乌海周边土壤种子库特征及其与地上植被和土壤因子的关系 [J]. 草业学报, 2021, 30(11): 13-28.
- Luo C, Guo X P, Feng C D, et al. The characteristics of the soil seed bank in Wuhai and surrounding areas and the relationship with vegetation and soil factors[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(11): 13-28.
- [32] 薛雅文, 赵丁洁, 孙明琦, 等. 北京市城市公园绿地土壤种子库特征及其更新潜力 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(10): 1-15.
- Xue Y W, Zhao D J, Sun M Q, et al. Characteristics and regeneration potential of soil seed banks in green space of urban parks in Beijing[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(10): 1-15.
- [33] 高东, 何霞红. 生物多样性与生态系统稳定性研究进展 [J]. 生态学杂志, 2010, 29(12): 2507-2513.
- Gao D, He X H. Research advances on biodiversity and ecosystem stability[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(12): 2507-2513.
- [34] 谈笑, 陈莉, 龙玲, 等. 天祝地区高寒草甸珠芽蓼草地土壤种子库季节动态与空间分布特征 [J]. 草业科学, 2019, 36(10): 2485-2491.
- Tan X, Chen L, Long L, et al. Seasonal dynamics and characteristics of the spatial distribution of a soil seed bank of a *Polygonum viviparum* meadow in an alpine area in the Tianzhu Region[J]. Pratacultural Science, 2019, 36(10): 2485-2491.
- [35] de Souza J D, de Souza Aguiar B A, dos Santos D M, et al. Dynamics in the emergence of dormant and non-dormant herbaceous species from the soil seed bank from a Brazilian dry forest[J]. Journal of Plant Ecology, 2020, 13(3): 256-265.
- [36] 韩丽君, 白中科, 李晋川, 等. 安太堡露天煤矿排土场土壤种子库 [J]. 生态学杂志, 2007, 26(6): 817-821.
- Han L J, Bai Z K, Li J C, et al. Soil seed bank of Antaibao Opencast Coal Mine Dump[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(6): 817-821.
- [37] 刘莹, 许丽, 丰菲, 等. 乌海矿区矸石山边坡植被重建初期物种多样性及群落稳定性 [J]. 水土保持通报, 2021, 41(1): 190-196.
- Liu Y, Xu L, Feng F, et al. Species diversity and community stability at early stage of vegetation reclamation in gangue hill slope of Wuhai Mining Area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(1): 190-196.
- [38] 马原, 郭小平, 罗超, 等. 不同降水条件对干旱矿区土壤表层种子库的激活效应 [J]. 草业科学, 2022, 39(5): 876-887.
- Ma Y, Guo X P, Luo C, et al. Activating effect of different precipitation conditions on a soil seed bank in an arid mining area[J]. Pratacultural Science, 2022, 39(5): 876-887.

- [39] 邵文山. 荒漠草原区 4 种植物群落土壤特性和种子库的研究 [D]. 银川: 宁夏大学, 2017.
Shao W S. Study on soil characteristics and seed bank of 4 plant communities in desert grassland area [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2017.
- [40] Wang N, He X Y, Zhao F W, et al. Soil seed bank in different vegetation types in the Loess Plateau region and its role in vegetation restoration[J]. *Restoration Ecology*, 2020, 28(Suppl.1): A5–A12.
- [41] 于露, 周玉蓉, 赵亚楠, 等. 荒漠草原土壤种子库对灌丛引入和降水梯度的响应特征 [J]. *草业学报*, 2020, 29(4): 41–50.
Yu L, Zhou Y R, Zhao Y N, et al. Responses of the soil seed bank to simulated rainfall levels and anthropogenically introduced shrub encroachment in the desert steppe[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(4): 41–50.
- [42] 莫训强. 土壤种子库应用于滨海地区植被恢复的研究 [D]. 天津: 南开大学, 2013.
Mo X Q. Soil seed bank and its application in vegetation restoration in coastal area[D]. Tianjin: Nankai University, 2013.
- [43] Junting L, Suhui L, Haiyan S, et al. Seed and fruiting phenology plasticity and offspring seed germination rate in two Asteraceae herbs growing in karst soils with varying thickness and water availability[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2022, 13(2): 319–327.
- [44] Grant C D, Bell D T, Koch J M, et al. Implications of seedling emergence to site restoration following bauxite mining in Western Australia[J]. *Restoration Ecology*, 1996, 4(2): 146–154.
- [45] 曹子林, 王挺, 王晓丽, 等. 覆土厚度对中国沙棘幼苗出土及生长的影响 [J]. *山东农业大学学报 (自然科学版)*, 2018, 49(5): 738–743.
Cao Z L, Wang T, Wang X L, et al. Effects of covering soil thickness on seedling emergence and growth of *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis*[J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2018, 49(5): 738–743.
- [46] 张涛, 陈智平, 车克钧, 等. 干旱区矿区不同立地类型土壤种子库特征 [J]. *干旱区研究*, 2017, 34(1): 51–58.
Zhang T, Chen Z P, Che K J, et al. Characteristics of soil seed banks of different site types in arid mining area[J]. *Arid Zone Research*, 2017, 34(1): 51–58.
- [47] Kildisheva, Olga Alexandrovna, et al. Seed germination and dormancy traits of forbs and shrubs important for restoration of North American dryland ecosystems[J]. *Plant Biology*, 2019, 21(3): 458–469.
- [48] Chen S C, Hu X W, Baskin C C, et al. A long-term experiment reveals no trade-off between seed persistence and seedling emergence[J]. *New Phytologist*, 2023, 241(2): 623–631.
- [49] 单立山, 李毅, 张正中, 等. 人工模拟降雨格局变化对红砂种子萌发的影响 [J]. *生态学报*, 2017, 37(16): 5382–5390.
Shan L S, Li Y, Zhang Z Z, et al. Effects of simulated precipitation change on seed germination of *Reaumuria soongorica*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(16): 5382–5390.

(责任编辑 孟 瑶
责任编辑 臧润国)