浙 江 农 林 大 学 学 报, 2026, **43**(1): 54−65 https://zlxb.zafu.edu.cn
Journal of Zhejiang A&F University DOI: 10.11833/j.issn.2095-0756.20250163

引用格式: 翟雪倩, 赵廷宁, 杨建英, 等. 华北土石山区林地表土 2 种利用方式的植被恢复效果[J]. 浙江农林大学学报, 2026, **43**(1): 54−65. ZHAI Xueqian, ZHAO Tingning, YANG Jianying, *et al*. Vegetation restoration effects of 2 utilization modes of woodland topsoil in rocky mountainous areas of North China[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2026, **43**(1): 54−65.

华北土石山区林地表土 2 种利用方式的植被恢复效果

翟雪倩[1]，赵廷宁[1]，杨建英[1]，史常青[1,2]，侯　克[3]，孙慧杰[1,4]，辛诚澍[1,5]，
宋　杰[6]，李　莉[6]，赵俪茗[6]

（1. 北京林业大学 水土保持学院，北京 100083；2. 北京林业大学 林木资源高效生产全国重点实验室，北京 100083；3. 河北省水土保持工作总站，河北 石家庄 050011；4. 河北省张家口市怀来县瑞云观乡人民政府，河北 张家口 075421；5. 大连大学 生命健康学院，辽宁 大连 116622；6. 河北省大海陀国家级自然保护区管理处，河北 张家口 075545）

摘要：【目的】研究 2 种表土利用方式下植被恢复效果，进一步明确表土用量少且植被恢复效果好的表土利用方式和配置。**【方法】**以河北省赤城县大海陀国家级自然保护区内核心区为研究区，采用种植槽布设 11 组喷播利用试验和 7 组覆土利用试验，测定植物萌发量、萌发趋势、存活率、植物群落特征、植物群落多样性指数等指标，并结合熵权-TOPSIS 法综合分析 2 种表土利用方式下植被恢复效果。**【结果】**①覆土利用的整体植被恢复效果优于喷播利用，群落组成以草本植物为主，覆土利用在植物萌发量、植物种数量、覆盖度和生物多样性指数等方面普遍表现较好。②覆土利用表层 5 cm 林地表土+底层 8 cm 生土、表层 4 cm 林地表土+底层 8 cm 生土和喷播利用表层 5 cm 试验表土+底层 8 cm 试验生土、表层 4 cm 试验表土+底层 8 cm 试验生土均能实现良好的植被恢复效果，建立适宜的乡土植被。③熵权-TOPSIS 法评价发现：植被恢复效果最优的为覆土利用表层 5 cm 林地表土 +底层 8 cm 林地表土，喷播利用表层 5 cm 试验表土+底层 8 cm 试验表土。**【结论】**为达到良好的植被恢复效果的同时减少表土用量，在实际生产建设项目中，推荐覆土利用表层 5 cm 林地表土+底层 8 cm 生土 和喷播利用表层 5 cm 试验表土+底层 8 cm 试验生土 。图 5 表 6 参 31

关键词：林地表土；喷播利用；覆土利用；熵权-TOPSIS；植被恢复
中图分类号：Q948.1　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**2095-0756(2026)01-0054-12

Vegetation restoration effects of 2 utilization modes of woodland topsoil in rocky mountainous areas of North China

ZHAI Xueqian[1]，ZHAO Tingning[1]，YANG Jianying[1]，SHI Changqing[1,2]，HOU Ke[3]，SUN Huijie[1,4]，
XIN Chengshu[1,5]，SONG Jie[6]，LI Li[6]，ZHAO Liming[6]

（1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Efficient Production of Forestry Resources, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. Hebei Provincial General Bureau of Soil and Water Conservation, Shijiazhuang 050011, Hebei, China; 4. The People's Government of Ruiyunguan Township, Huailai County, Zhangjiakou 075421, Hebei, China; 5. College of Life and Health, Dalian University, Dalian 116622, Liaoning, China; 6. Management Office of Dahaituo National Nature Reserve, Zhangjiakou 075545, Hebei, China）

Abstract: [**Objective**] The objective is to study the vegetation restoration effects under 2 different topsoil utilization modes, and further clarify the topsoil utilization mode and configuration that requires less topsoil but

收稿日期：2025-02-27；修回日期：2025-09-21
基金项目：北京市科技计划项目 (BK7A2019017)；河北省张家口市企事业单位委托科技项目 (2021HXFWSBXY007)
作者简介：翟雪倩 (ORCID: 0009-0005-1179-308X)，从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: zhai2325784188@163.com。通信作者：赵廷宁 (ORCID: 0000-0003-1302-2500)，教授，博士，从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: zhtning@bjfu.edu.cn

achieves better vegetation restoration effects. [**Method**] Taking the core area of Dahaituo National Nature Reserve in Chicheng County, Hebei Province as the research area, 11 groups of spray seeding experiments and 7 groups of soil covering experiments were set up using planting troughs to study the indicators such as plant germination quantity, germination trend, survival rate, plant community characteristics, and plant community diversity. The entropy weight-TOPSIS method was employed to comprehensively analyze the vegetation restoration effects under the two topsoil utilization modes. [**Result**] (1) The overall vegetation restoration effect of soil covering was better than that of spray seeding, and the community composition was mainly herbaceous plants. Soil covering generally performed better in terms of plant germination quantity, species diversity, coverage and biodiversity index. (2) Soil covering mode (5 cm topsoil+8 cm bottom soil, and 4 cm topsoil+8 cm bottom soil) and seed spraying mode (5 cm test topsoil+8 cm test bottom soil, and 4 cm test topsoil+8 cm test bottom soil) can achieve good vegetation restoration effects and establish suitable native vegetation. (3) The entropy weight-TOPSIS method evaluation showed that the optimal vegetation restoration effects were achieved with the following soil treatments: surface layer 5 cm+ bottom layer 8 cm under soil covering utilization mode, and surface layer 5 cm+ bottom layer 8 cm under seed spraying utilization mode. [**Conclusion**] In order to achieve good vegetation restoration effect and reduce the amount of topsoil, it is recommended to cover the soil with 5 cm topsoil+8 cm bottom soil and spray seeding with 5 cm test topsoil+8 cm test bottom soil. [Ch, 5 fig. 6 tab. 31 ref.]

Key words: woodland topsoil; spray seeding utilization; covering soil utilization; entropy weight-TOPSIS; vegetation restoration

城市建设、矿山开采、交通道路等涉及农地、林草地的生产建设项目，开工前需要剥离表土。由于相关技术与标准尚不完善，在许多工程施工中大量地表扰动和土石开挖回填对表土层造成破坏，被剥离的表土没有得到有效利用，造成珍贵的表土资源及土壤种子库严重流失[1]。北方土石山区环境条件恶劣，属于典型的生态脆弱区。不合理的生产活动严重破坏了区域内植被，导致一系列生态与环境问题，部分地区出现裸露地[2]。林地表土包括自然土壤中的腐殖质和枯枝落叶层，蕴含丰富的有机质、微生物和土壤种子库，是难以再生的宝贵自然资源。利用表土及其土壤种子库开展植被恢复研究，可以维持植物群落物种多样性，并发挥植被恢复潜能[3−4]。针对华北山区林地[5−7]、受损植被及退化山体[8]、次生林群落[9−10] 和半干旱林地[11] 等的研究发现：表土种源丰富，可以为生态系统的修复和植被重建提供重要的种质资源。目前，针对表土利用恢复植被的研究涉及农田[12]、湿地[13] 和沙地[14] 等领域，对于林地表土利用展开的研究仅有北京松山地区采集表土后在昌平地区开展喷播利用[6]。

北京 2022 年冬季奥林匹克运动会延庆赛区位于北京小海陀山，该地自然环境复杂，山地森林生态系统较好，植被恢复和生态建设在京津冀地区具有典型代表性。冬季奥林匹克运动会工程建设前需人工剥离大量林地表土。为不影响工程建设，本研究选择临近小海陀山且气候条件、林分特征与之基本相同的大海陀国家级自然保护区作为研究地点，自 2020 年夏季开始试验，研究喷播和覆盖 2 种表土利用方式下的植被恢复效果，最大程度减少表土用量，以期为华北土石山区林地表土的有效利用提供技术支撑。

1　研究区与研究方法

1.1　研究区概况

研究点位于河北省张家口市赤城县西南部的大海陀国家级自然保护区大东沟检查站内核心区(40°32′14″~40°41′40″N，115°42′57″~115°57′18″E)，海拔为 1 501 m。该区域属于典型的华北土石山区，土壤类型以褐土、棕壤土、山地草甸土等为主[15]。气候属于暖温带至温带的过渡带，大陆性季风气候，年平均气温为 3.0~4.0 ℃，年平均降水量为 500.0~600.0 mm，降水集中在夏季。该区域的地带性植被为暖温带落叶阔叶林，从山顶到山麓依次为山地草甸、针叶林、针阔叶混交林和落叶阔叶林，是典型北温

带的山地森林生态系统。

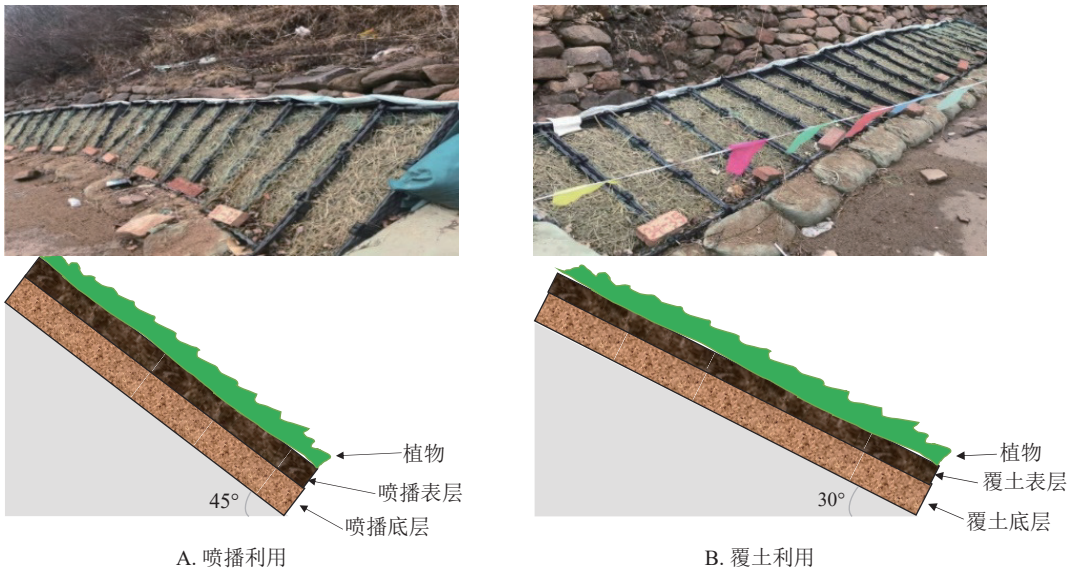
1.2 试验材料的获取及处理

林地表土：在踏查的基础上，于试验布设前随机选取周边无人为扰动、灌草丰富的华北落叶松 *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* 与白桦 *Betula platyphylla* 林地，清除表层凋落物后，挖取上层 10 cm 表土样品，去除体积较大的石块与杂物，装袋并运至试验地点。生土：从土料场购买地表 50 cm 以下的不含种子的壤土。草炭土、草纤维、保水剂、黏结剂、草炭、蛭石、珍珠、缓释复合肥等从市场购买。将林地表土、生土、草炭土、草纤维等平铺于防雨布上晾晒 2 d，以降低土壤水分。林地表土、生土、草炭土、草纤维经人工碾碎后用孔径 2 cm 网筛筛分，筛去表土中的植物根系、残体及碎石块等杂物，防止喷播利用堵塞管头。

试验所用种植槽单个尺寸为 120 cm×40 cm×20 cm (长×宽×高)，每 3 个种植槽为 1 组重复。种植槽材质为高强度塑料，侧壁和底部有小孔，便于排水。

1.3 试验设计

1.3.1 喷播利用设计 将种植槽倚靠在东西向挡墙上，通过在种植槽底部堆积生态袋构造 45°的喷播坡面 (图 1A)，坡向向南，模拟工程边坡，喷播利用设置 11 组共 33 个种植槽，喷播后表面铺设薄层纤维毯 (200 g·m^{-3}) 覆盖保墒。



A. 喷播利用 B. 覆土利用

图 1 喷播利用和覆土利用设计及剖面图

Figure 1 Design and profile of spray seeding

喷播利用的土层分为表层与底层，均采用北方土石山区常用的成熟喷播基质配方。为探究表土喷播对植被恢复的效果，设置纯试验表土喷播、纯试验生土喷播；探究不同厚度试验表土喷播下植被恢复效果，将喷播表层试验表土厚度设置为 1、2、3、4 和 5 cm 等 5 个梯度。此外，为节省表土资源，采用不同比例的试验表土与试验生土混合喷播，以探究在被稀释后的表土的植被恢复潜力。喷播利用试验设计如表 1 所示，试验表土由林地表土、保水剂、黏结剂按照体积比 100∶300∶150 均匀混合；试验生土由生土、草炭、蛭石、珍珠岩、保水剂、黏结剂按照体积比 70∶20∶5∶5∶300∶150 比例均匀混合。

1.3.2 覆土利用设计 将种植槽倚靠在东西向挡墙上，通过在种植槽底部堆积生态袋构造 30°的覆土坡面 (图 1B)，坡向为南。在种植槽内均匀覆盖土层。覆土利用设置 7 组共 21 个种植槽。在种植槽内分层充填底层和表层，之后表面铺设薄层纤维毯 (200 g·m^{-3}) 覆盖保墒。覆土利用试验设计如表 1 所示，与喷播利用试验部分相同，设置纯林地表土覆土和纯生土覆土，并将表土厚度设置为 5 个梯度，探究不同厚度表土覆盖下植被恢复效果。

2020 年 9 月完成布设，次年 4 月返青后开始对植物幼苗进行观测。每日早上浇水 1 次，维持土壤湿润，降水较充足的日期不进行浇灌。1 个月后植被生长基本稳定，群落成型，停止维护，并设围栏、警

表 1　喷播利用和覆土利用的试验设计

Table 1　Experimental design of spray seeding utilization and soil covering

喷播利用						覆土利用					
配置组	配置编号	表层		底层		配置组	配置编号	表层		底层	
		成分	厚度/cm	成分	厚度/cm			成分	厚度/cm	成分	厚度/cm
对照组	ck1	试验生土	5	试验生土	8	对照组	ck2	生土	5	生土	8
表土组	A	试验表土	5	试验表土	8	表土组	D	林地表土	5	林地表土	8
混合组	B1	试验表土	1	试验生土	8	混合组	E1	林地表土	1	生土	8
	B2	试验表土	2	试验生土	8		E2	林地表土	2	生土	8
	B3	试验表土	3	试验生土	8		E3	林地表土	3	生土	8
	B4	试验表土	4	试验生土	8		E4	林地表土	4	生土	8
	B5	试验表土	5	试验生土	8		E5	林地表土	5	生土	8
稀释组	C1	试验表土∶试验生土(2∶1)	5	试验生土	8						
	C2	试验表土∶试验生土(1∶1)	5	试验生土	8						
	C3	试验表土∶试验生土(1∶2)	5	试验生土	8						
	C4	试验表土∶试验生土(1∶3)	5	试验生土	8						

说明：括号中比例为体积比。

戒线加以保护，防止人为破坏和扰动。

1.4　指标测定

土壤硬度采用土壤硬度计测定，土壤容重采用环刀法与浸水置沙法测定，土壤 pH 采用 pH 测定计测定，土壤有机质采用重铬酸钾氧化法测定。植物幼苗萌发数量测定：自 2021 年 4 月初返青后，利用插旗法隔 4 d 调查 1 次，观测植物萌发趋势并记录幼苗萌发的数量，待植物幼苗萌发稳定后，记录不同配置植物幼苗萌发最终数量。幼苗存活率测定：在植物幼苗萌发数量稳定 1 个月后，调查幼苗的存活数量并记录。存活率=(存活幼苗数量/萌发幼苗数量)× 100%。样方植被调查：待 2021 年 6 月植物幼苗萌发数量稳定后，对喷播利用和覆土利用的不同配置分别调查植物种类、数量、平均高度和群落覆盖度。Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数数、Simpson 优势度指数、Margalef 丰富度指数参照文献 [16] 计算。

1.5　植被恢复评价体系

1.5.1　*评价体系构建*　采用土壤种子库利用效果、植物种多样性特征和植物生长效果作为评价指标，构建评价体系。植物生长特征包括植物存活率和植物萌发量 2 个指标，植物种多样性特征包含 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 优势度指数、Margalef 丰富度指数、Pielou 均匀度指数 4 个指标。植物群落生长效果包含植被覆盖度、植物平均高度 2 个指标。

1.5.2　*熵权-TOPSIS 分析*　熵权-TOPSIS 分析[17] 是利用熵权法确定各评价指标的权重，然后将权重乘以评价指标数据，运用 TOPSIS 法进行方案优劣的评价。熵权法通过各评价指标提供的信息客观确定权重，真实反映指标信息；TOPSIS 法基于度量对象与最优解、最劣解的距离进行结果评价，可以充分提取信息，不仅直观简洁，对样本数据要求少，而且可操作性强。第 1 步熵权法确定指标权重。第 2 步建立 TOPSIS 模型：①选取各指标值的最优值和最劣值，分别确定最优方案 (X^+) 和最劣方案 (X^-)；②计算各指标值与最优方案、最劣方案的欧氏距离 (T^+和 T^-)；③计算欧氏贴合度 [$S=T^-/(T^++T^-)$]，并得到评价排序结果。S 越大，说明植被恢复效果越好，反之则说明越差。

1.6　数据处理与分析

用 Excel 2017 进行数据统计，用 SPSS 27.0 对数据进行单因素方差分析 (one-way ANOVA)，最小显著差异法 (LSD) 和沃勒-邓肯检验法进行显著性检验 ($P<0.05$)。利用 Python 对构建的评价指标体系中的各指标进行综合评分，通过 Origin 2022 绘图。

2 结果与分析

2.1 2 种表土利用方式下植物生长特征

2.1.1 2 种表土利用方式下植物萌发趋势分析 图 2 显示：在喷播利用时，A 配置植物萌发量趋势稳中有升，返青后第 34、48 天出现最大值 (7 株)，B1、B2 配置萌发量先增后降，B3~B5 配置萌发趋势前高后低，至第 28 天萌发量达到高峰，C1 配置在返青后第 28 、38 天达到高峰后随时间逐步递减，C2~C4 配置均在萌发中期萌发量较多。在覆土利用时，D 配置的植物萌发趋势相对平稳且萌发量较多，E1 配置萌发趋势较为平稳；E2 和 E3 配置的植物萌发量均在返青后第 6、28 天出现了 2 次高峰；E4 和 E5 配置萌发趋势先增后降。

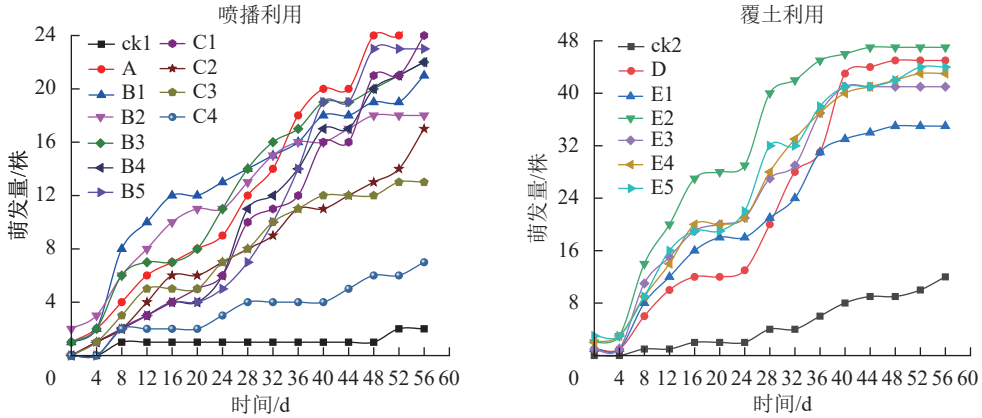


图 2 喷播利用与覆土利用下植物萌发趋势分析

Figure 2 Analysis of emergence trend of spray sowing and soil covering

2.1.2 2 种表土利用方式下植物萌发总量与存活率分析 植物萌发总量是表土利用中植被恢复潜力的表现之一。如表 2 所示：喷播利用中 A 配置萌发总量最高，为 26.7 株，ck1 萌发总量最少，为 2.0 株，且这 2 种配置的萌发总量差异显著 ($P<0.05$)，C4 配置萌发总量较少，为 10.7 株，与其他配置的萌发总量差异显著 ($P<0.05$)。在覆土利用中 E2 配置萌发总量最多，为 47.3 株，其次为 D 配置 (45.3 株)、E5 配置 (43.6 株) 和 E4 配置 (43.0 株)，ck2 配置萌发总量最小，为 12.2 株，其中 E2 配置、ck2 配置的萌发总量存在显著差异 ($P<0.05$)。植物的存活率是植物幼苗生长的重要指标之一。喷播利用中 A 配置存活率最高，达 83.8%，其次为 B4 配置 (74.7%) 和 B5 配置 (76.9%)，A 配置的存活率显著高于其他配置 ($P<0.05$)。C4 配置存活率较少 (61.2%)，ck1 配置最少 (8.2%)，且这 2 种配置的存活率与其他配置存在显著差异 ($P<0.05$)。覆土利用中 E5 配置存活率最高，为 90.2%，其次为 D 配置 (89.1%) 和 E4 配置 (85.2%)，ck2 配置存活率最少，为 53.0%，ck2 配置的存活率与其他配置存在显著差异 ($P<0.05$)。

表 2 喷播利用与覆土利用下萌发总量及存活率

Table 2 Analysis of seedling emergence in spray sowing and soil covering

利用方式	配置	萌发总量/株	存活率/%	利用方式	配置	萌发总量/株	存活率/%
喷播利用	ck1	2.0±1.7 c	48.3±1.0 c	喷播利用	C3	15.0±5.3 ab	66.8±1.4 ab
	A	26.7±3.2 a	83.8±2.3 a		C4	10.7±4.2 c	61.2±0.9 c
	B1	21.0±5.2 ab	68.8±1.1 ab	覆土利用	ck2	12.2±6.4 b	53.0±1.2 c
	B2	18.0±5.0 ab	69.1±0.4 ab		D	45.3±3.5 ab	89.1±0.4 ab
	B3	21.7±1.5 ab	69.8±0.5 ab		E1	35.3±4.2 ab	82.4±1.1 ab
	B4	21.7±4.2 ab	76.9±1.3 ab		E2	47.3±4.0 a	82.7±2.1 ab
	B5	24.7±3.5 ab	74.7±1.5 a		E3	41.3±1.2 ab	81.7±0.4 ab
	C1	23.7±1.5 ab	65.5±2.2 ab		E4	43.0±10.2 ab	85.2±0.8 ab
	C2	17.0±3.0 ab	63.9±3.3 ab		E5	43.7±7.0 ab	90.2±0.2 a

说明：不同小写字母表示不同配置方式间差异显著($P<0.05$)。

2.2　2 种表土利用方式下植物群落特征分析

在表土的土壤种子库中，共记录到植物 15 科 21 属 34 种 (图 3)，其中以菊科 Asteraceae (26.5%)、蓼科 Polygonaceae (11.7%)、禾本科 Poaceae (8.8%) 和蔷薇科 Rosaceae (8.8%) 为主。喷播利用植物集中分布在藜科 Chenopodiaceae、菊科和十字花科 Brassicaceae，B3 配置植物科数最多 (11 科)，其次为 A 配置 (10 科)、B5 配置 (9 科) 和 C1 配置 (9 科)，ck1 配置最少，仅有 3 科；覆土利用的各配置中，ck2 配置有 6 科，主要为菊科植物，D 配置为 12 科，主要分布在藜科和十字花科， E1~E5 配置分别为 8、13、12、10 和 12 科，其中除 E2 配置主要分布在十字花科、蔷薇科和石竹科 Caryophyllaceae 外，其余配置主要分布在十字花科、藜科和石竹科。

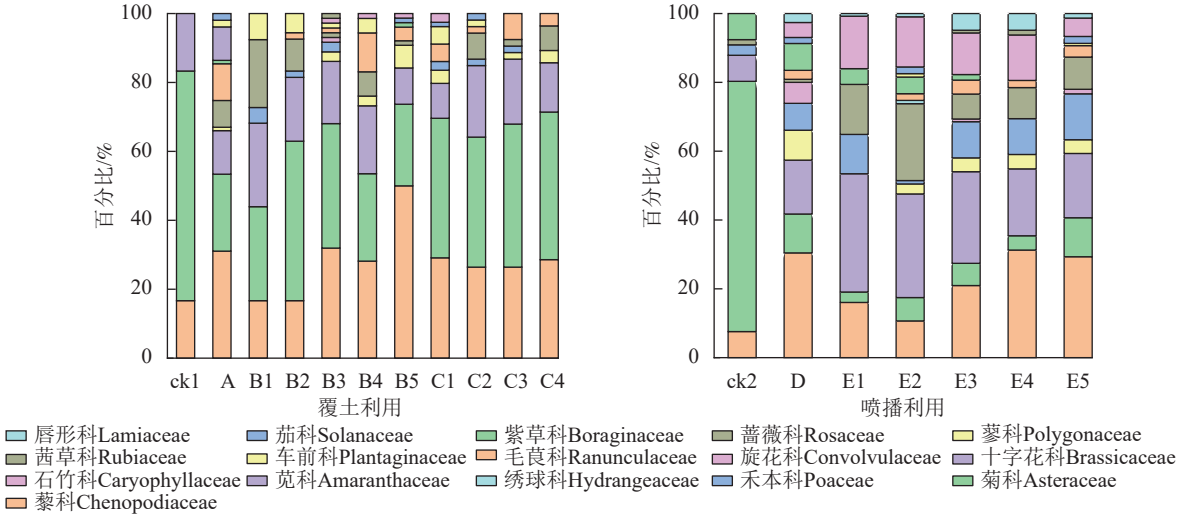
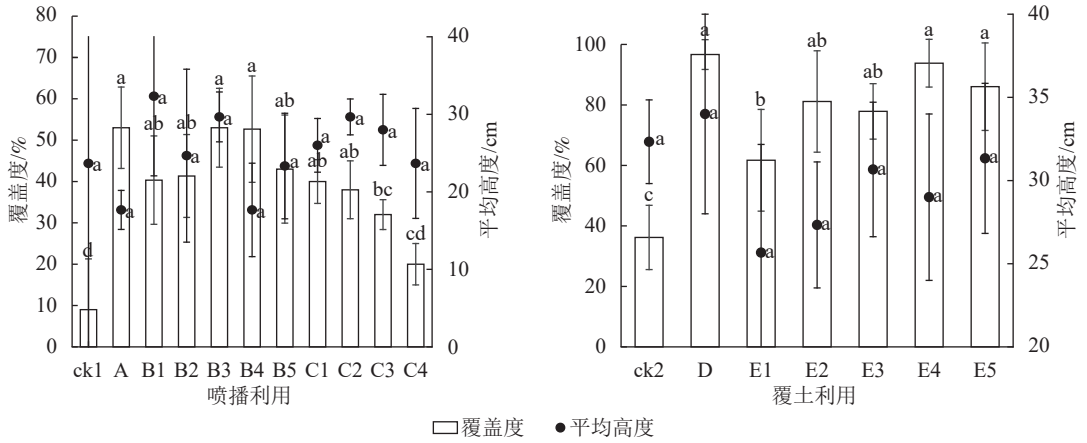


图 3　喷播利用与覆土利用下植物科类分布特征

Figure 3　Distribution characteristics of families in spray sowing and soil covering

在植物群落覆盖度方面 (图 4)，喷播利用 A 配置和 B3 配置覆盖度最大，为 53.0%，其次为 B4 配置 (52.7%)，C4 配置覆盖度较低，为 20.0%。在植物群落平均高度特征方面， B1 配置最大，为 32.3 cm，其次 B3 配置和 C2 配置，为 29.7 cm，A 配置和 B4 配置最低，为 17.7 cm。覆土利用 D 配置覆盖度最大，为 96.7%，其次为 E4 配置 (93.8%) 和 E5 配置 (86.0%)，ck2 配置最小，为 36.2%，其中 D 配置与 ck2 配置差异显著 ($P<0.05$)。覆土利用不同配置的群落平均高度，D 配置最大，为 34.0 cm，其次为 ck2 配置 (32.3 cm) 和 E5 配置 (30.7 cm)，E1 配置最低，为 25.7 cm，且各配置间群落平均高度差异不显著。

2 种表土利用方式中不同配置的群落覆盖度差异明显，这是因为不同配置下表土用量不同影响到植物生长发育；但是群落平均高度变化较小，这可能是种植槽倚靠的挡土墙上方存在许多高大乔灌木，由于庇荫效应导致光照不充分，进而导致植物高度较低。



不同小写字母表示不同配置方式间差异显著($P<0.05$)。

图 4　喷播利用与覆土利用下群落覆盖度、平均高度特征

Figure 4　Characteristics of community coverage and average height of spray sowing and soil covering

从表 3 可以看出：藜 *Chenopodium album* 在喷播利用和覆土利用均为优势种，但在覆土利用中的重要值和占比更高，分别为 9.75 和 24.92%，而在喷播利用中分别为 5.83 和 29.89%。这表明藜在覆土利用中可能具有更强的竞争力或适应性。乌苏里风毛菊 *Saussurea ussuriensis* 和葶苈 *Draba nemorosa* 在喷播利用中也是优势种，但在覆土利用中的重要值和占比有所变化。这可能是喷播利用下，这些植物能够更好地生长。卷耳 *Cerastium arvense* subsp. *strictum* 重要值在覆土利用中居第 3 位，可能与覆土利用的土壤环境更适合卷耳生长有关。

表 3 喷播利用与覆土利用下优势种及其占比

Table 3 Dominant species and their proportion of spray sowing and soil covering

利用方式	优势种	重要值	占比/%	利用方式	优势种	重要值	占比/%
喷播利用	藜	5.83	29.89	覆土利用	藜	9.75	24.92
	乌苏里风毛菊	3.28	15.48		葶苈	7.62	19.50
	葶苈	2.79	13.96		卷耳	4.00	8.57

2.3 2 种表土利用方式下植物物种多样性分析

群落的生物多样性特征能够反映群落的丰富程度和分布情况，可衡量植物群落的稳定性。从图 5 可知：Shannon-Wienner 多样性指数在喷播利用中以 C3 配置最高，为 2.93，其次为 C1 和 C2 配置，分别为 2.84 和 2.79，ck1 最低，为 0.83，且 ck1 与其他配置存在显著差异 ($P<0.05$)；覆土利用中 E5 配置最高，为 3.36， D 和 E1 配置其次，均为 3.03，ck2 最低，为 2.09，E5 与 ck2 存在显著差异 ($P<0.05$)，且均高于其他配置。

Simpson 优势度指数在喷播利用中 B5 配置最高，为 0.25，其次为 A、B4 和 B3 配置， C4 配置最小，为 0.08，C4 与其他配置不存在显著差异；覆土利用中 ck2 最高，为 0.30，其次为 E3、E1 和 ck2，其中 ck2 与其他配置无显著差异。

Margalef 丰富度指数在喷播利用中 C3 配置最高，为 2.08，其次为 C2、C1 和 B2 配置，ck1 最小，为 0.63，B1、C4 与 ck1 配置存在显著差异 ($P<0.05$)；覆土利用中 E5 配置最高，为 2.64，其次 D 配置，为 2.39，E1 和 E3 配置分别为 2.37 和 1.89，ck2 最小，为 1.43，D 与 E2、E4 配置存在显著差异 ($P<0.05$)。

Pielou 均匀度指数在喷播利用中 C4 配置最高，为 0.96， B2 配置其次，为 0.92，B1 和 C3 配置均为 0.90，ck2 最低，为 0.64，B2、C4 配置与 ck1 配置存在显著差异 ($P<0.05$)；覆土利用中 E4 配置最高，为 0.85， E2 和 E5 配置其次，为 0.84，ck2 最低，为 0.74，覆土利用的各配置不存在显著差异。

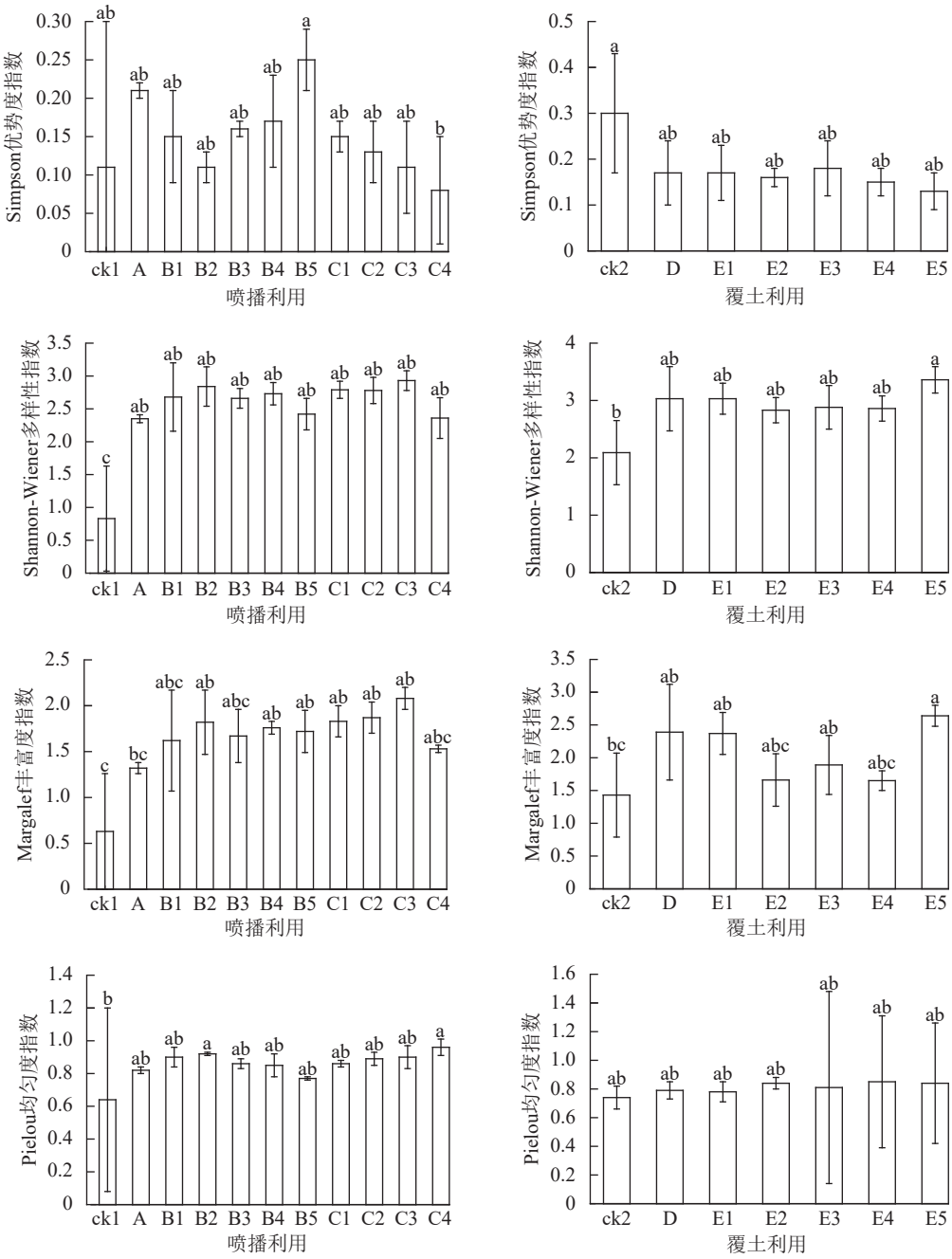
2.4 2 种表土利用方式下土壤改良效果

从表 4 可以看出：喷播利用的 B5 配置在土壤硬度和容重方面表现较好，土壤硬度为 1.02 MPa，容重为 0.92 g·cm^{-3}。这表明该配置下的土壤结构较为疏松，有利于植物根系的生长和扩展，同时 B5 配置有机质质量分数也较高，为 19.48%，适合大多数植物生长。覆土利用的 D 配置在有机质质量分数方面表现突出 (22.64%)，其次为 E5 配置较高，为 20.56%。这表明表土中可能包含了更多养分，从而显著提高了土壤的肥力。D 配置的土壤硬度为 0.83 MPa，较 E5 配置更高，D 配置容重比 E5 配置小，较为疏松的土壤结构有利于植物根系的生长。2 种表土利用方式下 pH 均接近中性适合植物生长。

2.5 2 种表土利用方式下植被恢复效果评价

2.5.1 评价指标综合权重 由表 5 可知：植物生长特征和植物群落生长效果的指标权重明显高于植物种多样性特征。各指标中存活率权重 (0.307 6) 最大，Simpson 优势度指数 (0.144 3)、萌发总量 (0.120 5)、覆盖度 (0.123 2) 和平均高度 (0.120 3) 等指标权重相对较大。2 种表土利用方式下植被恢复效果的这些指标变化明显。权重相对较小的指标有：Pielou 均匀度指数 (0.067 6)、Margalef 丰富度指数 (0.067 7) 以及 Shannon-Wiener 多样性指数 (0.049 3)。

2.5.2 熵权-TOPSISI 法评价结果分析 通过熵权-TOPSIS 法对 2 种表土利用方式的植被恢复效果的评价结果如表 6 所示。各配置植被恢复效果从好到差依次表现为 D、A、E5、E4、E3、B5、E2、B2、B3、E2、E1、B1、C1、C2、C3、C4、ck2、ck1。植被恢复效果较优的前 3 位分别为 D、A 和 E5 配置，欧氏



不同小写字母表示不同配置方式间差异显著(P<0.05)。

图 5　喷播利用与覆土利用下物种多样性指数

Figure 5　Species diversity index of spray sowing and soil covering

贴合度分别为 0.798 6、0.684 0 和 0.660 2；除对照 (ck1、ck2) 外，植被恢复效果较劣的后 3 位为 C4、C3 和 C2 配置，欧氏贴合度为 0.313 5、0.313 0 和 0.311 2；ck1 和 ck2 植被恢复效果最劣。由于表土不同用量影响植被恢复效果，以及喷播利用导致土壤硬度高于覆土利用，进而导致喷播利用的混合组普遍低于覆土利用。

3　讨论

研究区冬季气温较低，表土中的种子处于休眠状态，春季随着气温的升高，部分种子开始萌发，夏季温度最高且由于雨期较长，土壤湿度升高，土壤微生物活动加强。本研究结果发现：植物返青后快速生长，在较短时间内群落平均高度和覆盖度明显增加，物种丰富度明显提高。前人的研究也发现：温度与水分是影响植物生长与更新的 2 个主要限制性生态环境因子[18−21]。光照也是植物种子萌发及生长过程

表 4 喷播利用与覆土利用的土壤理化性质

Table 4 Physical and chemical properties of soil by spraying and covering soil

利用方式	配置	土壤硬度/MPa	土壤容重/(g·cm^{-3})	pH	有机质/%	利用方式	配置	土壤硬度/MPa	土壤容重/(g·cm^{-3})	pH	有机质/%
喷播利用	ck1	1.22±0.05 a	1.25±0.08 a	7.35±0.02 b	20.66±0.27 ab	喷播利用	C3	1.61±0.07 a	1.11±0.10 a	7.64±0.04 a	16.83±0.42 ab
	A	1.33±0.24 ab	0.96±0.02 ab	7.56±0.03 ab	5.87±0.52 a		C4	1.47±0.15 ab	1.01±0.10 a	7.61±0.03 ab	14.97±0.13 bc
	B1	1.59±0.13 ab	1.02±0.03 a	7.51±0.05 ab	14.53±0.12 c	覆土利用	ck2	0.89±0.08 ab	0.87±0.01 ab	7.25±0.03 b	6.26±1.12 bc
	B2	1.27±0.20 ab	1.02±0.11 a	7.65±0.12 a	16.15±0.43 c		D	0.83±0.26 b	0.72±0.02 a	7.57±0.05 ab	22.64±1.16 a
	B3	1.46±0.06 ab	0.97±0.10 a	7.52±0.07 ab	18.35±0.51 abc		E1	0.78±0.04 b	0.81±0.07 a	7.53±0.01 ab	16.47±0.39 c
	B4	1.02±0.28 ab	0.93±0.06 a	7.28±0.13 b	19.33±0.26 ab		E2	0.79±0.02 b	0.78±0.03 ab	7.47±0.11 ab	17.31±0.19 ab
	B5	1.02±0.25 a	0.92±0.13 b	7.53±0.01 ab	19.48±0.04 bc		E3	0.88±0.33 b	0.83±0.02 ab	7.62±0.03 a	17.62±0.76 abc
	C1	1.18±0.08 ab	0.90±0.07 ab	7.45±0.04 b	18.26±0.23 ab		E4	0.85±0.01 a	0.78±0.04 a	7.50±0.10 ab	19.80±0.22 ab
	C2	1.63±0.12 ab	0.91±0.02 a	7.57±0.17 ab	17.72±0.17 bc		E5	0.94±0.19 ab	0.75±0.06 a	7.45±0.04 b	20.56±1.07 a

表 5 评价指标熵值与权重

Table 5 Entropy and weight of evaluation indicators

准则层	指标层	熵值	权重	准则层	指标层	熵值	权重
植物生长特征	植物存活率	0.850 2	0.307 6	物种多样性特性	Shannon-Wiener 多样性指数	0.976 0	0.049 3
	植物萌发总量	0.941 6	0.120 5		Simpson优势度指数	0.929 7	0.144 3
植物群落生长效果	群落覆盖度	0.940 1	0.123 2		Pielou 均匀度指数	0.967 1	0.067 6
	植物平均高度	0.941 4	0.120 3		Margalef丰富度指数	0.967 0	0.067 7

表 6 植被恢复效果综合评价

Table 6 Comprehensive evaluation of vegetation restoration effect

利用方式	配置	T^+	T^-	S	排名	利用方式	配置	T^+	T^-	S	排名
喷播利用	ck1	0.396 4	0.250 4	0.108 7	18	喷播利用	C3	0.306 3	0.180 3	0.313 0	15
	A	0.167 3	0.171 9	0.684 0	2		C4	0.349 6	0.218 6	0.311 2	16
	B1	0.152 7	0.149 6	0.305 9	12	覆土利用	ck2	0.332 6	0.141 5	0.236 2	17
	B2	0.223 4	0.181 6	0.412 2	8		D	0.093 3	0.088 3	0.798 6	1
	B3	0.259 9	0.141 5	0.408 1	9		E1	0.172 7	0.130 2	0.351 0	11
	B4	0.302 0	0.179 8	0.423 7	7		E2	0.266 4	0.112 3	0.401 8	10
	B5	0.297 0	0.139 1	0.424 9	6		E3	0.280 9	0.095 5	0.512 6	5
	C1	0.301 9	0.158 6	0.314 6	13		E4	0.290 6	0.113 4	0.591 4	4
	C2	0.311 8	0.171 9	0.313 5	14		E5	0.306 3	0.122 0	0.660 2	3

中的重要生态环境影响因子。綦远才等[22]研究发现：光照条件能明显改善种子的萌发率并有效促进幼苗的生长。但是本研究种植槽上方的挡土墙上有大量乔灌木，造成一定郁闭度，减少了种植槽的光照，导致不同配置的群落平均高度差距较小且不存在显著差异。2 种利用方式下对照组萌发趋势一直较低，喷播利用植物萌发数量前期较少，后期有大幅增长。这可能是进入 4 月中下旬后，气温回暖和降水增多促进了植物的萌发和生长。覆土利用萌发趋势增长较快且萌发量高于喷播利用，可能与土壤理化性质较好，土壤养分、水分和温度等因素均处于良好的水平有关。

对植物群落多样性特征的研究可以更好地认识群落的变化和发展。本研究中，覆土利用 D 配置 Simpson 优势度指数最高，说明该配置物种优势度最好。从 Pielou 均匀度指数可见，B2 配置的物种均匀性更好，而 Shannon-Wiener 多样性指数和 Margalef 丰富度指数在不同配置中表现一致，而覆土利用 E5 配置多样性指数整体表现较好，物种多样性最好。覆土利用植物萌发总量比喷播利用多，植物的存活率也明显高于喷播利用，其中喷播利用的混合组存活率高于稀释组，这与表土用量有关。覆土利用中 E2 配置表土用量相对较少，但萌发数量最多。由此可知，增加表土施用的厚度不仅不会显著增加植物群落的种类、数量以及多样性特征，反而会导致表土的浪费。这与已有研究[23−24]结果一致，适当的表土

厚度既能满足群落的正常生长和结构稳定，也能达到资源的合理及可持续利用。

2 种表土利用方式中，2 组对照均为不含土壤种子库的生土，但仍然有出苗。这可能由于种植槽倚靠的挡土墙上方的乔灌木自然落种所致。另外，ck1 和 ck2 中还发现了藜、茵陈蒿 *Artemisia capillaris* 和乌苏里风毛菊等物种，可能由于周边植物的凋落物掉落所致。贾东延[6] 研究也发现：凋落物覆盖会影响植被恢复效果。卜庆国等[25] 对比了不同植被恢复方式对公路建设中的工程创面生态修复的影响，发现表土利用方式下植被恢复效果强于生土利用方式。本研究 2 种表土利用方式的不同配置中，喷播利用的 A、B5、B4 配置和覆土利用的 D、E5、E4 配置的植被恢复效果普遍高于表土同种利用方式下的其他配置。表土中养分质量分数和微生物数量等指标均优于生土，且表土中存在的大量乡土土壤种子库可能是导致这种现象的主要原因。

表土的保护和综合利用对于维持生态系统物种多样性，恢复植被具有重要意义[1, 26−27] 。本研究共统计到喷播利用和覆土利用的植物 34 种，其中喷播利用的植物种以藜科、菊科和十字花科植物居多，尤其是喷播利用 A 配置和覆土利用 E5 配置的植物种类、群落高度以及覆盖度 (除 B1 配置外) 呈现良好的状态。从不同配置的结果可知：喷播利用以一定的表土用量进行表层喷播能够形成稳定的植物群落，发挥表土的生态潜力。前人研究[28] 也表明：表土的喷播利用可取得较好的植被恢复效果。覆土利用的植物则以藜科、十字花科和石竹科居多，较喷播利用增加了绣球科 Hydrangeaceae 和唇形科 Lamiaceae 的植物。本研究发现：通过覆土利用土壤种子库恢复的植物群落在植物种类、群落高度、群落物种多样性和群落丰富度等指标上普遍优于喷播利用，尤其对于群落覆盖度，D 配置接近于 100%，显著高于喷播利用 A 配置的群落覆盖度。

覆土利用更能够发挥土壤种子库的植被恢复潜力，可能是喷播利用中添加的保水剂等物质对表土的土壤结构产生影响，造成土壤质地较硬进而影响植物生长与群落建成。本研究发现：喷播利用土壤硬度普遍比覆土利用要高。这与 XIN 等[5] 对表土土壤种子库植被恢复试验的研究结果一致。BORŮVKA 等 [29] 研究也证实了表土覆盖可改善发育土壤的质量，进一步促进的植物发育。土壤肥力和理化性质代表着土壤能够为植物生长提供营养条件的能力，表层土壤酶活性较高，能为植物提供丰富的营养元素[30]。土壤有机质和容重等表现较好的配置，植物幼苗生长状况以及植物群落稳定恢复的效果更好。从物种多样性指数可知：表土用量多的配置土壤理化性质相对更好，植物生长特征也明显更好。LIU 等[31] 研究发现：物种多样性指数与土壤质量存在显著相关性，植被恢复与土壤恢复是相辅相成的关系。

4　结论

为了实现表土用量少且实现好的植被恢复效果，推荐覆土利用林地表层 5 cm 表土+底层 8 cm 生土、覆土利用表层 4 cm 林地表土+底层 8 cm 生土 (E4) 和喷播利用表层 5 cm 试验表土+底层 8 cm 试验生土 (B5)、喷播利用表层 4 cm 试验表土+底层 8 cm 试验生土 (B4) 配置。在对实际建设项目进行植被恢复前，应根据当地的立地条件选择合适的表土利用方式。考虑到后期植物生长过程中会消耗土壤养分，可在之后植物生长过程中适量施肥。

5　参考文献

[1] 陈瑾. 清云高速公路生态敏感路段表土资源收集与利用技术研究[J]. 交通世界, 2023(13): 78−80. CHEN Jin. Study on technology of surface soil resources collection and utilization in eco-sensitive section of Qingyun Expressway[J]. *Traffic World*, 2023(13): 78−80. DOI: 10.16248/j.cnki.11-3723/u.2023.13.024.

[2] 王志印, 曹建生. 中国北方土石山区植被恢复及其生态效应研究进展[J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2019(9): 1319−1331. WANG Zhiyin, CAO Jiansheng. Research advances in vegetation restoration and its ecological effects in earth-rock mountain areas of North China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019(9): 1319−1331. DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190108.

[3] BASTO S, THOMPSON K, GRIME J P, *et al*. Severe effects of long-term drought on calcareous grassland seed banks[J]. *npj Climate and Atmospheric Science*, 2018, **1**: 1−7. DOI: 38/s41612-017-0007-3.

[4] 秦廷松, 李登武, 吕振江, 等. 黄土高原地区黄龙山白皮松林地土壤种子库研究[J]. 浙江农林大学学报, 2011, **28**(5): 694−700. QIN Tingsong, LI Dengwu, LÜ Zhenjiang, *et al*. Soil seed banks in the *Pinus bungeana* forestland of the

Huanglong Mountains on the Loess Plateau[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2011, **28**(5): 694−700. DOI: 10.3969/j.issn.2095-0756.2011.05.002.

[5] XIN Chengshu, WANG Jianyong, YANG Jianying, *et al*. Seasonal dynamics in forest soil seed banks along an elevational gradient in the rocky mountainous area of North China[J]. *Forests*, 2021, **12**(10): 1318. DOI: 10.3390/f12101318.

[6] 贾东延. 北京松山地区白桦林地表土喷播利用研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020. JIA Dongyan. *Study on Spraying and Utilization of Surface Soil of Birch Forest in Songshan District of Beijing*[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020. DOI: 10.26949/d.cnki.gblyu.2020.000901.

[7] 辛诚澍. 典型北方土石山区土壤种子库特征及植被恢复应用潜力[D]. 北京: 北京林业大学, 2022. XIN Chengshu. *Study on Characteristics of Soil Seed Bank and Its Vegetation Restoration Potential in Typical Rocky Mountainous Area of North China*[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2022. DOI: 10.26949/d.cnki.gblyu.2022.000053.

[8] 黄睿. 重庆市主城区山地公园自然林土壤种子库特征与优势种幼苗更新能力研究[D]. 重庆: 西南大学, 2022. HUANG Rui. *Study on the Characteristics of Soil Seed Bank and the Regeneration Ability of Dominant Plant Seedlings in Mountain Park Natural Forest in the Main Urban Area of Chongqing*[D]. Chongqing: Southwest University, 2022. DOI: 10.27684/d.cnki.gxndx.2022.004441.

[9] 张凌宇, 董灵波, 陈莹, 等. 大兴安岭中部天然次生林种子雨动态[J]. 应用生态学报, 2020, **31**(12): 4035−4041. ZHANG Lingyu, DONG Lingbo, CHEN Ying, *et al*. Seed rain dynamics of natural secondary forest in the central part of Greater Xing'an Mountains, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(12): 4035−4041. DOI: 10.13287/j.1001-9332.202012.007.

[10] SINGH A, NITSCHKE C R, HUI F K C, *et al*. Soil seed banks provide a storage effect in post-logging regrowth forests of Southeastern Australia[J]. *Forest Ecology and Management*, 2023, **548**: 121389. DOI: 10.1016/j.foreco.2023.121389.

[11] OMIDI M, HEYDARI M, ABEDI M, *et al*. Evaluating the restoration potential of soil seed banks in degraded semi-arid oak forests: influence of canopy cover types and fire-related cues on seed germination[J]. *Forest Ecology and Management*, 2022, **524**: 120534. DOI: 10.1016/j.foreco.2022.120534.

[12] 赵延彤. 农田开垦和盐碱胁迫对松嫩平原西部沼泽湿地土壤种子库的影响[D]. 北京: 中国科学院大学, 2022. ZHAO Yantong. *Effect of Agricultural Reclamation and Saline-alkaline Stress on Soil Seed Banks in Wetlands of the Western Songnen Plain*[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2022. DOI: 10.27536/d.cnki.gccdy.2022.000046.

[13] 俞飞, 宋琦, 刘美华. 湿地种子库研究中的几个问题探讨[J]. 浙江农林大学学报, 2014, **31**(1): 145−150. YU Fei, SONG Qi, LIU Meihua. Several topics on wetland seeds bank research[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2014, **31**(1): 145−150. DOI: 10.11833/j.issn.2095-0756.2014.01.022.

[14] 李儒海, 强胜. 杂草种子传播研究进展[J]. 生态学报, 2007, **27**(12): 5361−5370. LI Ruhai, QIANG Sheng. Progresses and prospects in research of weed seed dispersal[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, **27**(12): 5361−5370. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2007.12.049.

[15] 余琦殷, 于梦凡, 宋超, 等. 河北大海陀自然保护区植物区系及其与相邻保护区的关系[J]. 西北植物学报, 2014, **34**(6): 1269−1275. YU Qiyin, YU Mengfan, SONG Chao, *et al*. Flora in Dahaituo Nature Reserve and its relationship with surrounding reserves[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2014, **34**(6): 1269−1275. DOI: 10.7606/j.issn.1000-4025.2014.06.1269.

[16] 戴欢, 徐梦蕾, 何浩. 武汉东湖落雁景区南部木本植物多样性研究[J]. 宁夏农林科技, 2015, **56**(10): 68−69. DAI Huan, XU Menglei, HE Hao. Plant diversity of woody plants in southern part of Luoyan Scenic Spot of East Lake in Wuhan[J]. *Journal of Ningxia Agriculture and Forestry Science and Technology*, 2015, **56**(10): 68−69. DOI: 10.3969/j.issn.1002-204X.2015.10.029.

[17] 魏广阔, 闫升, 赵廷宁, 等. 不同植被类型对河北张宣矿区铁尾矿土壤物理性质影响及评价[J]. 中国水土保持科学, 2025, **23**(1): 159−167. WEI Guangkuo, YAN Sheng, ZHAO Tingning, *et al*. Effect and evaluation of different vegetation types on soil physical properties of iron tailings in Zhangxuan mining area, Hebei Province[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2025, **23**(1): 159−167. DOI: 10.16843/j.sswc.2022177.

[18] BOTEY H M, OCHUODHO J O, NGODE L, *et al*. Temperature and light effects on germination behaviour of african eggplant (*Solanum aethiopicum* L.) seeds[J]. *Indian Journal of Agricultural Research*, 2022, **56**(2): 122. DOI: 10.18805/IJARe.A-623. DOI: 10.18805/IJARe.A-623.

[19] HATZILAZAROU S, PIPINIS E, KOSTAS S, *et al*. Influence of temperature on seed germination of five wild-growing *Tulipa* species of Greece associated with their ecological profiles: implications for conservation and cultivation[J]. *Plants*,

2023, **12**(7): 1574. DOI: 10.3390/plants12071574.

[20] 孙丽萍, 宋利娜, 衣彩洁, 等. 温度和光照对 4 种委陵菜种子萌发的影响[J]. 安徽农业科学, 2024, **52**(9): 96−98. SUN Liping, SONG Lina, YI Caijie, *et al*. Effects of temperature and light on seed germination of four *Potentilla* species[J]. *Anhui Agricultural Sciences*, 2024, **52**(9): 96−98. DOI: 10.3969/j.issn.0517-6611.2024.09.021.

[21] 张松林, 王晓宇, 郭俊霞, 等. 不同温度和水分组合对川黄芪种子萌发和生理活性的影响[J]. 分子植物育种, 2023, **21**(3): 966−977. ZHANG Songlin, WANG Xiaoyu, GUO Junxia, *et al*. Effect of different temperature and moisture combinations on seed germination and physiological activity of Chuanhuangqi[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2023, **21**(3): 966−977. DOI: 10.13271/j.mpb.021.000966.

[22] 綦远才, 董智, 李文杉, 等. 不同光照条件对漆树种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 农业与技术, 2023, **43**(11): 76−81. QI Yuancai, DONG Zhi, LI Wenshan, *et al*. Effects of different light conditions on seed germination and seedling growth of *Rhus verniciflua*[J]. *Agriculture and Technology*, 2023, **43**(11): 76−81. DOI: 10.19754/j.nyyjs.20230615019.

[23] 王倜, 陶双成, 孔亚平. 表土在彭湖高速公路低缓边坡生态恢复中的应用[J]. 生态学杂志, 2012, **31**(1): 172−179. WANG Yi, TAO Shuangcheng, KONG Yaping. Application of topsoil in ecological restoration of low and gentle slope of Penghu Expressway[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, **31**(1): 172−179. DOI: 10.13292/j.1000-4890.2012.0017.

[24] 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 Na, HE Mengxuan, LI Hongyuan, *et al*. Study on optimization of influencing factors of soil seed bank germination based on orthogonal design[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, **25**(5): 783−789. DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2016.05.008.

[25] 卜庆国, 栗学铭, 张姣, 等. 公路建设表土资源保护与利用对工程创面生态修复的重要性: 以京新高速公路 TJSTFH-1 段为例[J]. 交通建设与管理, 2014(22): 13−17. BU Qingguo, LI Xueming, ZHANG Jiao, *et al*. Importance of the protection and utilization of topsoil resources in highway construction to the ecological restoration of engineering wounds: taking TJSTFH-1 section of Beijing-Xinjiang Expressway as an example[J]. *Traffic Construction and Management*, 2014(22): 13−17.

[26] EMSENS W, AGGENBACH C J S, SMOLDERS A J P, *et al*. Topsoil removal in degraded rich fens: can we force an ecosystem reset?[J]. *Ecological Engineering*, 2015, **77**: 225−232. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2015.01.029.

[27] 赵晓娟. 输变电工程表土保护利用与植被恢复技术研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023. ZHAO Xiaojuan. *Research on Topsoil Protection and Utilization and Vegetation Restoration Technology of Power Transmission and Transformation Project*[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2023. DOI: 10.27409/d.cnki.gxbnu.2023.001754.

[28] FU Dongqing, YANG Hang, WANG Li, *et al*. Vegetation and soil nutrient restoration of cut slopes using outside soil spray seeding in the plateau region of Southwestern China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, **228**: 47−54. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.08.108.

[29] BORŮVKA L, KOZÁK J, MÜHLHANSELOVÁ M, *et al*. Effect of covering with natural topsoil as a reclamation measure on brown-coal mining dumpsites[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2012, **113**: 118−123. DOI: 10.1016/j.gexplo.2011.11.004.

[30] 王润柳, 刘欣艺, 徐其静, 等. 滇中坡林地土壤养分与酶活性对等高反坡阶整地的响应[J]. 浙江农林大学学报, 2024, **41**(4): 769−777. WANG Runliu, LIU Xinyi, XU Qijing, *et al*. Response of soil nutrients and enzyme activities to contour reverse-slope land preparation in slope forest land of central Yunnan Province[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2024, **41**(4): 769−777. DOI: 10.11833/j.issn.2095-0756.20230545.

[31] LIU Jinrong, ZHAO Changxing, LI Chaonan, *et al*. Mixed planting mode is the best measure to restore soil quality in alpine mines[J]. *Soil and Tillage Research*, 2024, **244**: 106209. DOI: 10.1016/j.still.2024.106209.