

郭源上,何明珠,刘建兵,等.干旱区石灰岩矿山遗迹地生态修复模式对比研究[J].中国沙漠,2024,44(2):35-47.

干旱区石灰岩矿山遗迹地生态修复模式对比研究

郭源上^{1,2},何明珠³,刘建兵²,张 汐²,谷守江²,武文进²,
高立博²,冯晓莉²,韩国君¹

(1.甘肃农业大学 资源与环境学院,甘肃 兰州 730070; 2.宁夏回族自治区地质资料馆,宁夏 银川 750021; 3.中国科学院西北生态环境资源研究院,甘肃 兰州 730000)

摘要: 矿山遗迹地的生态修复是促进人与自然和谐共生、实现绿色低碳发展的重要举措。干旱区矿山遗迹地立地条件差,植被覆盖率低,采矿活动造成的土壤侵蚀强烈,确定科学合理的恢复模式是生态修复成功与否的关键。以宁夏中卫市的典型石灰岩矿山遗迹地为研究对象,通过对比7种生态修复植物在不同土壤基质重构措施下的土壤温、湿度和有机质,以及植物的存活率和新生枝相对生长速率(Relative growth rate of new shoots, RGRs)等指标,筛选出适宜干旱区石灰岩矿山遗迹地生态修复的最优模式,构建了土壤改良-植被重建联合的生态恢复方案。结果表明:(1)土壤基质重构措施是石灰岩矿山生态修复的前提条件,有效地改善了植物定植环境,不同土壤基质重构模式的植物存活率表现为:土+有机肥>砂+土+有机肥>砂+土+复合肥;(2)土壤有机质的范围为0.56~2.84 g·kg⁻¹,植物种和土壤基质及二者的交互作用对土壤有机质含量具有极显著影响($P<0.001$);(3)RGRs的范围为1.51~1.87 mm·cm⁻¹·month⁻¹,不同植物种的RGRs存在显著性差异;(4)通过系统聚类分析得到本研究区最适宜的生态修复模式为砂+土+有机肥(沙拐枣或短穗怪柳)。本研究从土壤改良-植被重建角度提出的联合生态修复方案可为干旱区矿山生态修复提供理论依据和实践参考。

关键词: 土壤基质重构; 植物存活率; 新生枝相对生长速率; 聚类分析

文章编号: 1000-694X(2024)02-035-13

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2023.00100

中图分类号: Q146

文献标志码: A

0 引言

石灰岩是冶金、建筑、化工、轻工、农业等行业的重要原料^[1]。石灰岩矿山开采活动会引发诸多生态环境问题,如地貌景观的破坏、土壤质量下降、水土流失,以及大气、水体和土壤污染等^[2-4]。石灰岩矿山大多为露天开采,开采后植被完全破坏、土壤几乎丧失、石砾含量高、土壤压实等^[5]。矿山生态修复是重建一个自我维持生态平衡系统的重要途径^[6],可有效提升土壤健康状况、固碳能力、生物多样性、微生物群落的丰度和多样性^[7]、植被覆盖度,并可加速退化矿区生态系统功能的恢复^[8]。如广东省大宝山南岭露天金属矿山废弃地经生态修复后,土壤肥力提高(土壤有机物含量增加了5.35~11.21倍),生物多样性显著改善^[9]。生态修复植物种筛选是退化矿山生态

修复的重要前提^[10]。植物物种的筛选须从景观层面出发,以地形地貌重建和生态修复为目标,综合考虑植物的抗逆性、生长特性、微生境、地表重塑性和资源可用性等方面^[11]。干旱区矿山遗迹地土壤养分匮乏,植物受到水、土资源等多种胁迫因子的限制,在生态恢复期间很难建立群落^[12]。因而在选定了适宜矿区环境生长的植物物种后,还需要进行土壤基质改良为植物提供适宜的生境^[13],如施加复合肥、有机肥和表层换土是较为常用的方法^[14]。施加有机肥可以改善土壤的物理和化学特性(如pH值、土壤养分^[15]和细菌多样性^[16]),以促进植物的生长^[17]和减少潜在有毒元素的生态风险^[18]。表层土壤重构是生态修复的重要途径,可有效改善土壤保水性、土壤基质和养分状况^[19],减少土壤蒸发量,增加微生物多样性,

收稿日期:2023-05-29; 改回日期:2023-07-13

资助项目:宁夏回族自治区重点研发计划项目(2021BEG02008)

作者简介:郭源上(2000—),男,甘肃陇南人,硕士研究生,主要研究方向为矿山生态修复。E-mail:2824446098@qq.com

通信作者:韩国君(E-mail:hangj@gsau.edu.cn)

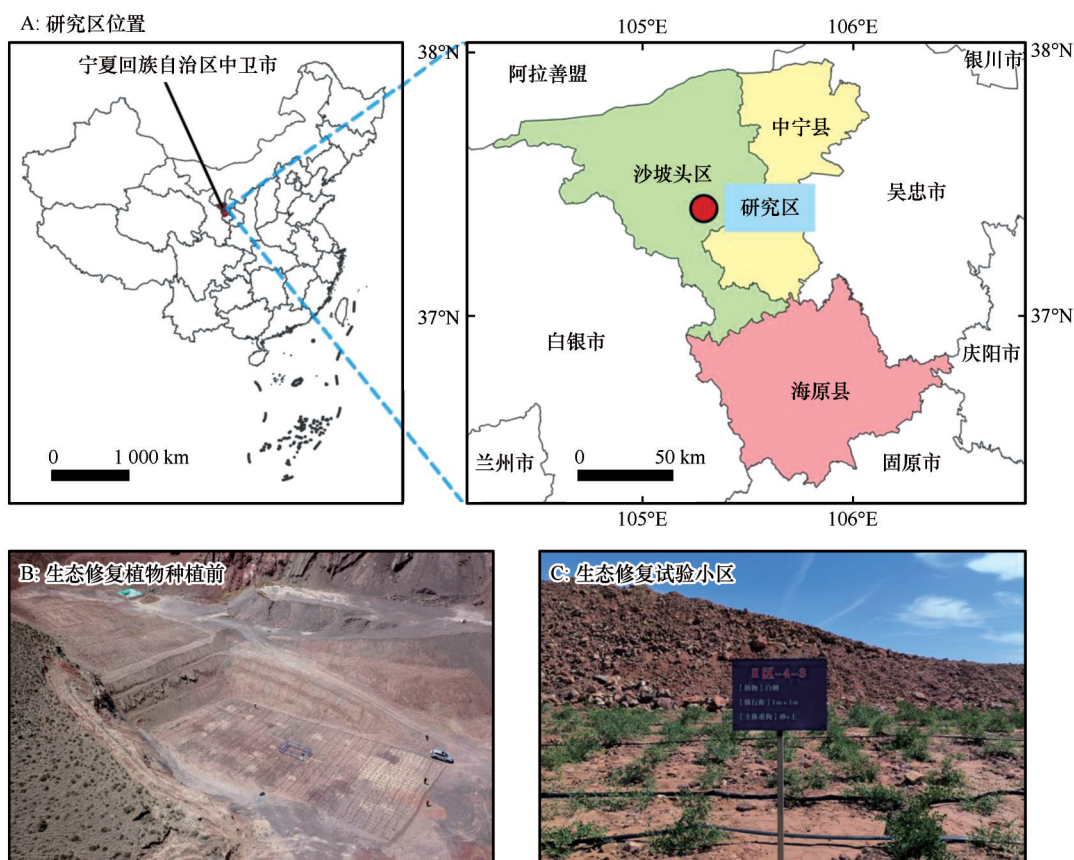
进而促进植物生长^[20]。

前人针对矿山生态修复已开展了大量理论与实践,如为进一步提高修复成功率,使用添加剂如生物炭(Biochar)改善土壤条件^[21]。但是关于干旱区矿山生态修复植物物种筛选的研究较少^[22-23],尤其是对于露天开采石灰岩矿山遗迹地从土壤基质重构模式和植物种筛选的综合角度开展的研究相对匮乏^[5]。因此,本研究根据矿区环境特征和植物生长所需的条件,对比7种抗旱/寒、耐盐碱、耐贫瘠的灌木物种在不同土壤基质重构模式下的发芽率、新生枝相对生长速率(Relative growth rate of new shoots, RGRs)等指标,筛选出干旱区石灰岩矿山遗迹地最优的生态修复模式,以为同类矿山或其他矿山的生态修复提供参考和借鉴。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于宁夏回族自治区中卫市南部天景山-米钵山地区(37°10'59"N, 105°16'56"E),开采方式为露天开采。中卫市近10年的气象资料表明,试验区属典型的大陆性干旱型气候,年降水量约200 mm,年蒸发量1 500~2 000 mm,降水量少,蒸发量大,6—9月为主要降水期,占全年降水量的60%~70%,且多暴雨,有时会形成山洪。10月至次年5月为风季,风速一般为3~5 m·s⁻¹,最大风速可达30 m·s⁻¹,往往形成沙尘暴天气^[24-25]。试验地矿山已进行了以工程治理为主的恢复治理,但生态修复治理工程尚未开展(图1)。



注:基于自然资源部标准地图服务网站标准地图(审图号GS(2019)1822号)制作,底图边界无修改

图1 研究区位置及生态修复试验区

Fig.1 The location of the study area and the ecological restoration test area

1.2 试验设计

试验区为两个平台栽植区,其中每个平台栽植区又划分为4×4个栽植小区,小区面积为20 m×10 m(图2)。试验设计栽植植物有沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)、短穗

怪柳(*Tamarix laxa*)、蒙古莢(*Caryopteris mongholica*)、柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、花棒(*Corethroedendron scoparium*)、四翅滨藜(*Atriplex canescens*)。

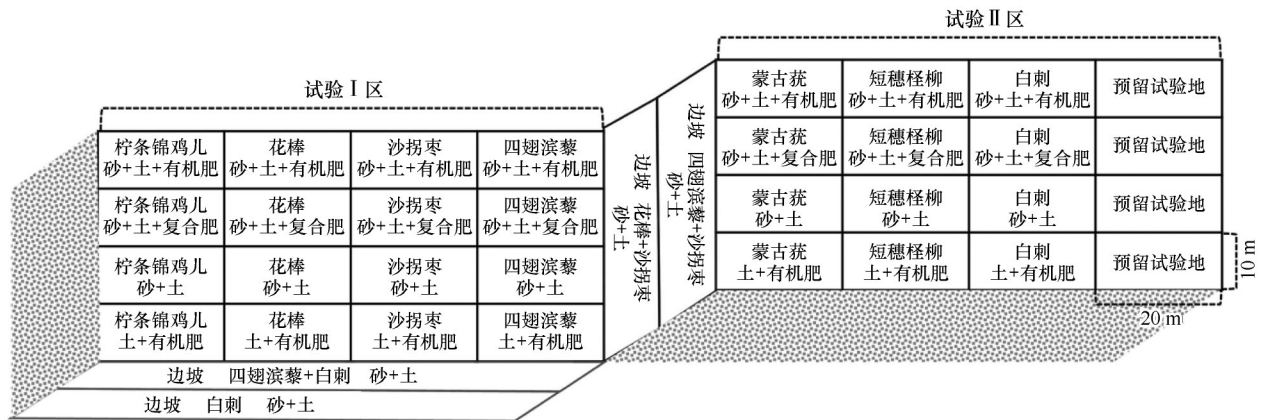


图2 生态修复试验小区平面布置图
Fig.2 Plan layout of ecological restoration test area

scens)7种抗逆性灌木;土体重构模式包括砂+土+有机肥(2:1:1)、砂+土+复合肥(2:1:1)、砂+土(2:1)、土+有机肥(9:1)4种土壤基质模式分区栽种(矿山遗迹地土壤有机质等养分的本底值为砂+土处理下的值)。于2022年4月3日移栽,每穴1棵树苗,株间距1 m×1 m,栽种后及时浇水以保证植物的成活率,补水量折合降水量约为86.9 mm。栽植后按照1天1次的频次持续浇水10天,之后按4天1次的频次浇水20天,最后按照12天1次的频次浇水36天,共计浇水18次,单次补水量约为4.8 mm。待灌木生长稳定后(6月9日),停止浇水以促进灌木扎根,增强灌木的自适应能力;为实现土壤培肥,加速复垦地的生土熟化,给对应处理模式的灌木施有机肥(有机质≥50%)、复合肥(N-P₂O₅-K₂O:14-16-15,总养分≥45%)2次。

1.3 土壤样品采集和植物生长指标的测定

1.3.1 土壤样品采集

每个小区随机采集5株植物根区0~20 cm深度新鲜土样,剔除其中掺杂的石砾和植物残渣等杂物,混匀后装入自封袋,用于测量土壤含水量、有机质(土壤有机质采用重铬酸钾容量法——外加热法测定^[26])等指标。

1.3.2 植物存活率

植物的存活率以栽种的灌木是否发育新芽为标准,于种植后的第2年(2023年4月8日)调查试验区所有灌木的存活率。

1.3.3 植物新生枝相对生长速率

每个小区随机选取10株植物为监测调查对象,悬挂标识牌,采用卷尺(最小刻度1.0 cm)测量当年生枝条从基部至顶部生长点的长度;于2022年6月

28日、7月25日、8月29日共调查3次。
新生枝相对生长速率(RGRs)计算公式为:
$$RGRs=(\ln L_2-\ln L_1)/(t_2-t_1) \quad (1)$$

式中: L_1 为第一次测量时的新生枝长度(单位:cm); L_2 为最后一次测量时的新生枝长度(单位:mm); t_2-t_1 为两次测量时间间隔(单位:month)。

1.4 气象要素监测

安装自动气象观测站1套,用于连续监测降水量、气温、风速、风向,并且在花棒和四翅滨藜种植区的10 cm和40 cm土层处各埋设1个土壤三参数测定传感器,连续采集土壤含水量、温度和电导率数据。

1.5 岩性

采用顺序式波长色散型X射线荧光光谱仪(生产商:帕纳科公司;型号:Axios;产地:荷兰)分析研究区岩性(表1)。SiO₂和CaO含量最高,约占总体的20%~30%;其次为Al₂O₃和MgO,约占总体的5%~10%;之后为TF₂O₃、K₂O和Na₂O,含量均低于5%。

1.6 土壤粒级

采用Mastersizer 3000激光衍射粒度分布仪测得研究区土壤粒径(表2),采用国际制土壤粒级分级制分级:黏粒(<0.002 mm)1.8%~5.5%、粉砂(0.002~0.02 mm)6%~19%、细砂(0.02~0.2 mm)11%~33%、粗砂(0.2~2 mm)11%~30%、石砾(>2 mm)28%~61%。土壤基质为土+有机肥和砂+土的黏粒含量显著高于砂+土+复合肥($P<0.05$),土壤基质为砂+土的粉砂含量显著高于砂+土+复合肥,其他土壤基质改良模式下的土壤粒级均无显著性差异。

表 1 研究区岩性
Table 1 Lithology of the study area

处理	SiO ₂ /%	Al ₂ O ₃ /%	TF ₂ O ₃ /%	CaO/%	MgO/%	K ₂ O/%	Na ₂ O/%	其他/%
砂+土(南边坡)	29.94	6.94	3.25	22.05	7.46	1.66	0.21	28.49
砂+土(西边坡)	31.94	6.71	2.79	23.93	5.07	1.41	0.27	27.88
砂+土(短穗柽柳)	26.39	6.37	2.73	24.26	7.94	1.48	0.23	30.60
砂+土(蒙古莜)	33.99	8.77	3.60	19.53	6.57	1.95	0.29	25.30
砂+土(四翅滨藜)	15.75	3.03	1.74	30.42	10.54	0.64	0.15	37.73
砂+土(柠条)	23.83	4.21	2.07	27.29	7.95	0.91	0.26	33.48

表 2 研究区土壤粒级分布
Table 2 Soil separate of the study area

土壤基质	粒级	平均值±标准差/%	土壤基质	粒级	平均值±标准差/%
砂+土	石砾	42.60±7.98 ^a	砂+土+有机肥	石砾	45.51±7.89 ^a
	粗砂	21.60±4.42 ^a		粗砂	21.32±6.23 ^a
	细砂	20.00±5.44 ^a		细砂	17.96±6.08 ^a
	粉砂	15.17±2.53 ^a		粉砂	14.09±4.03 ^{ab}
	黏粒	4.66±0.58 ^a		黏粒	4.34±1.07 ^{ab}
砂+土+复合肥	石砾	48.25±8.51 ^a	土+有机肥	石砾	42.83±6.70 ^a
	粗砂	19.19±2.92 ^a		粗砂	20.86±3.64 ^a
	细砂	20.52±7.39 ^a		细砂	20.02±3.52 ^a
	粉砂	11.14±0.24 ^b		粉砂	15.16±2.27 ^{ab}
	黏粒	3.06±0.93 ^b		黏粒	4.78±0.75 ^a

注:表中不同字母表示土壤粒级在不同土壤基质间差异显著(P<0.05)。

1.7 数据分析与处理

采用 IBM SPASS Statistics 26.0 和 Excel 2019 软件对数据进行统计分析,研究区位置及生态修复试验区图采用 ArcGIS 10.8 进行绘制,其余图采用 GraphPad Prism 9.0 进行制图;采用单因素方差分析(One-way ANOVA)检验土体重构模式对土壤粒级的差异显著性和植物种对 RGRs 影响的差异显著性;采用双因素方差分析(Two-way ANOVA)检验土体重构模式与植物种对土壤有机质影响的差异显著性;综合各生态修复模式的土壤有机质、植物存活率和 RGRs,对 28 个模式进行系统聚类分析(Hierarchical cluster method)。

2 结果与分析

2.1 2022 年 5—10 月降水量、相对湿度和空气温度

2022 年 5—10 月的降水量、相对湿度和空气温

度变化规律相似,均呈现先上升后下降的趋势(图 3)。降水量为 9.0~46.6 mm,月际降水分布不均。8 月降水量是 5 个月中的最大值(46.6 mm),占 5 个月总降水量的 36%;10 月降水量是 5 个月中的最小值(9.0 mm),占 5 个月总降水量的 7%。相对湿度的变化范围为 30%~58%。最小值出现在 5 月和 6 月,为 30%;8 月达到最大值,为 58%。原因在于 6—8 月降水量不断增加,空气中水汽含量升高,相对湿度呈现上升趋势;8 月之后降水量下降,空气中水汽含量降低,相对湿度呈现下降趋势。空气温度为 11.5~25.0 ℃,7 月达到最大值(25.0 ℃),10 月达到最小值(11.5 ℃)。5—10 月的日温差大,均大于 20 ℃,最大日温差出现在 5 月(29.0 ℃),最小日温差出现在 9 月(21.0 ℃)。

2.2 土壤温度变化

土壤温度在不同植物(花棒和四翅滨藜)、土壤深度和土壤基质重构模式下的变化规律与空气温

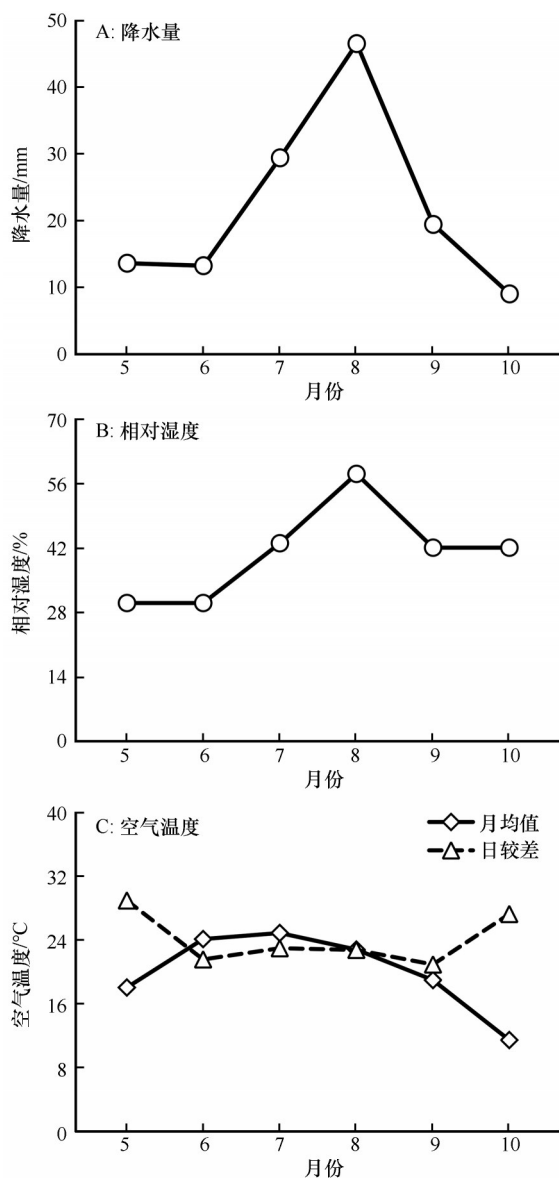


图3 试验区2022年5—10月降水量、相对湿度和空气温度
Fig.3 Precipitation, relative humidity, and air temperature in the test area (May–October 2022)

度的变化规律相似,即先上升再下降的变化趋势,极大值出现在7月(图4)。土层深度为10 cm的土壤温度略高于40 cm处,浅层土壤(10 cm)比深层土壤(40 cm)的温差更大。与土壤基质为砂+土相比,花棒土壤基质为换土在不同土层深度下的土壤温度均有所升高(土壤深度10 cm:23.45~24.32 °C;土壤深度40 cm:23.36~23.44 °C);但四翅滨藜与此相反(土壤深度10 cm:24.62~23.47 °C;土壤深度40 cm:23.44~23.00 °C)。因此,不同土壤基质重构模式对土壤温度的影响因不同植物种而出现差异性。

2.3 土壤含水量变化

土壤基质重构模式对土壤含水量的影响因不同植物种而出现差异性。如图5所示,花棒在土壤基质为换土时比砂+土波动强烈,但四翅滨藜在土壤基质为砂+土时比换土波动更强烈。与土壤基质为砂+土相比,花棒土壤基质为换土时土壤含水量有所增加(土壤深度10 cm:17.51%~19.10%;土壤深度40 cm:9.10%~22.21%);但四翅滨藜与之相反(土壤深度10 cm:22.67%~15.93%;土壤深度40 cm:17.22%~12.55%)。四翅滨藜在土层深度为10 cm处的土壤含水量均大于40 cm处;花棒在土壤基质为砂+土时,土层深度为10 cm处的土壤含水量大于40 cm处,但在土壤基质为换土时,10 cm处的土壤含水量小于40 cm处。

2.4 土壤有机质

植物根区土壤有机质的范围为0.56~2.84 g·kg⁻¹,土壤有机质在不同植物种、不同土壤基质及其交互作用下均存在极显著差异($P<0.001$,表3)。如图6所示:土壤基质为砂+土、砂+土+复合肥和土+有机肥时,短穗柽柳栽植区土壤有机质显著高于其他6种植物;土壤基质为砂+土+有机肥时,短穗柽柳栽植区的土壤有机质显著低于沙拐枣,但显著高于其他5种植物。短穗柽柳、四翅滨藜和沙拐枣在砂+土+有机肥处理时土壤有机质显著高于其他3种土壤基质;柠条锦鸡儿在砂+土处理时根区土壤有机质显著高于其他3种土壤基质;蒙古莜在土+有机肥和砂+土+复合肥处理时根区土壤有机质显著高于其他两种土壤基质;花棒在土+有机肥和砂+土处理时根区土壤有机质显著高于其他两种土壤基质;白刺在砂+土+复合肥处理时土壤有机质高于其他3种土壤基质。

2.5 植物存活率

7种植物于2023年4月8日调查时存活率范围为63.39%~100%(表4)。其中,白刺在土+有机肥处理下最优(100%);短穗柽柳在砂+土+有机肥处理下次之(99.40%);之后为沙拐枣在土+有机肥(99.11%)、白刺在砂+土+有机肥(98.77%)、短穗柽柳在砂+土(98.57%)和短穗柽柳在土+有机肥(98.30%),这6种模式下的植物存活率均达98%以上。四翅滨藜、沙拐枣、柠条锦鸡儿、白刺、短穗柽柳和蒙古莜在土壤基质为土+有机肥时存活率均大于砂+土+有机肥,说明换土有利于植物的存活。四

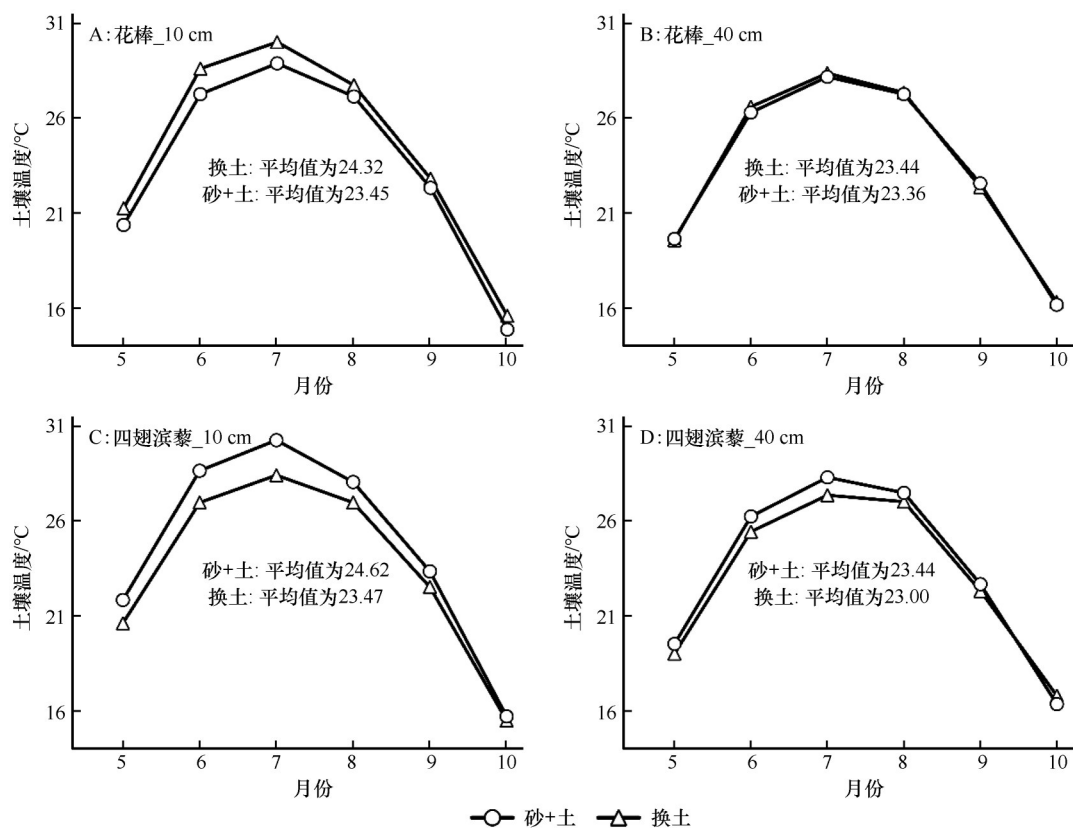


图4 花棒和四翅滨藜试验区2022年5—10月土壤温度

Fig.4 Soil temperature in the test area of *Hedysarum scoparium* and *Atriplex canescens* (May–October 2022)

翅滨藜、沙拐枣、柠条锦鸡儿、白刺、短穗柽柳和花棒在土壤基质为砂+土+有机肥时存活率均大于砂+土+复合肥,说明施加有机肥比复合肥更有利于植物的存活。因此,对于植物存活,土+有机肥优于砂+土+有机肥,砂+土+有机肥优于砂+土+复合肥。

土壤基质为砂+土时,存活率由大到小排序为:短穗柽柳>白刺>沙拐枣>花棒>四翅滨藜;土壤基质为砂+土+复合肥时,存活率由大到小排序:白刺>短穗柽柳>柠条锦鸡儿>蒙古莠>花棒>四翅滨藜。即白刺和短穗柽柳存活率最优,其次为沙拐枣,四翅滨藜存活率最差。

2.6 生态修复植物新生枝相对生长速率

调查7种植物从6月28日(种植后第58天)到8月29日(种植后第120天)的新生枝生长量,RGRs为 $1.51\sim 1.87\text{ mm}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{month}^{-1}$,不同植物种和土壤基质RGRs存在显著性差异(图7)。土壤基质为砂+土时,蒙古莠的RGRs显著高于其他6种植物,花棒和四翅滨藜的RGRs显著高于沙拐枣、柠条、白刺和短穗柽柳;土壤基质为砂+土+复合肥时,蒙古莠和花棒的RGRs显著高于其他5种植物,四翅滨藜的RGRs

显著高于沙拐枣、短穗柽柳、柠条和白刺;土壤基质为砂+土+有机肥时,四翅滨藜的RGRs显著高于其他6种植物,蒙古莠和花棒的RGRs显著高于白刺、短穗柽柳、柠条和沙拐枣;土壤基质为土+有机肥时,花棒、四翅滨藜和白刺的RGRs显著高于柠条、短穗柽柳和沙拐枣。蒙古莠、四翅滨藜和花棒在不同的土壤基质中RGRs均显著高于其他植物种。

2.7 生态修复模式的筛选

不同植物种和土壤基质重构的有机质、存活率和RGRs有较大差异,对28个模式进行系统聚类分析,在平方欧式距离为4处分为四大类(图8、表5)。第I类的土壤有机质显著高于第III类($P<0.05$),存活率显著高于第II类,但RGRs显著低于第II类和第III类;第II类土壤有机质显著低于第IV类,存活率显著低于其他3类,但RGRs高于第I类和第IV类;第III类土壤有机质显著低于第IV类,RGRs显著高于第I类和第IV类,但存活率显著高于第II类;第IV类土壤有机质显著高于其他3类,存活率显著高于第II类,但RGRs显著低于第II类和第III类。综上,第IV类土壤有机质含量最高且植物存活率较高,因此最适宜本

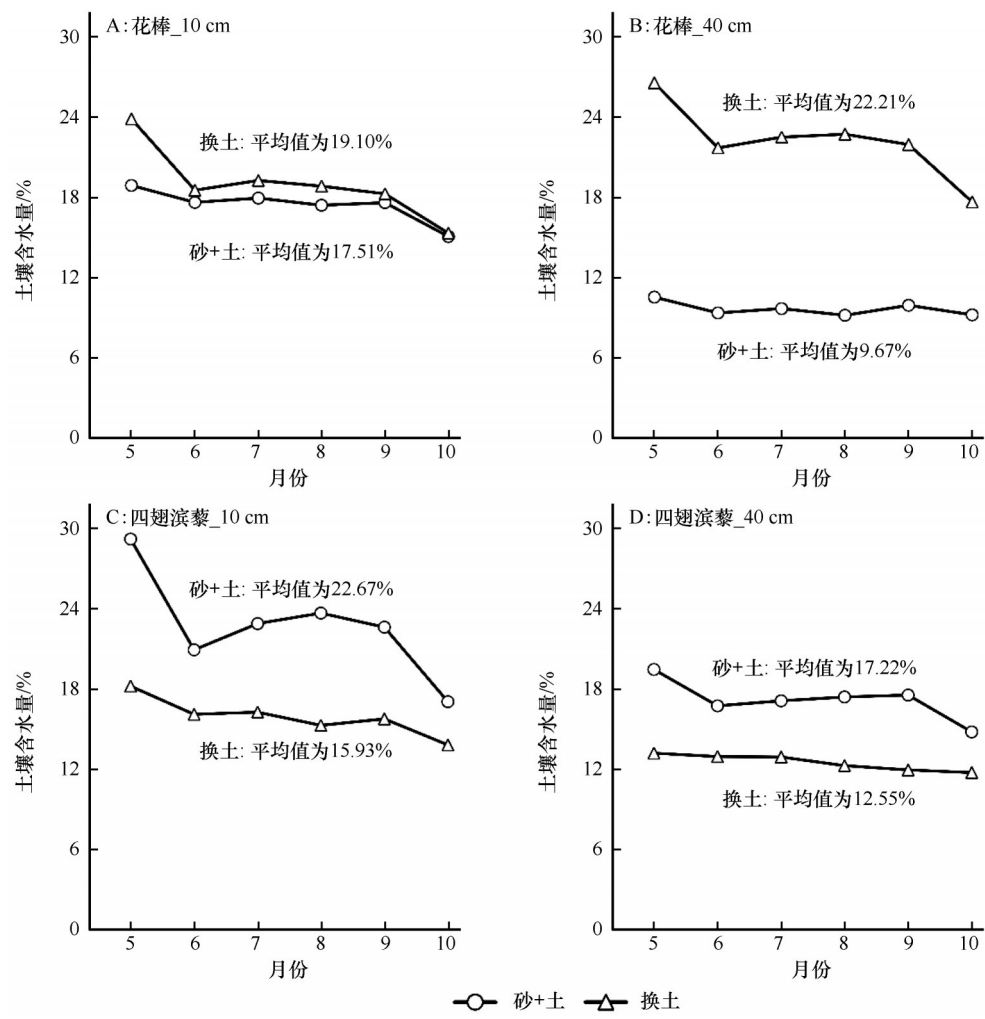


图5 花棒和四翅滨藜试验区土壤含水量(2022年5—10月)

Fig.5 Soil moisture content in *Hedysarum scoparium* and *Atriplex canescens* experimental areas (May–October 2022)

表3 植物和土壤基质对土壤有机质影响的双因素方差分析结果

Table 3 Two-way analysis of variance results of the effects of plant and soil matrix on soil organic matter

差异源	平方和	df	均方	F	P
植物	8.45	6	1.41	31.00	<0.001
土壤基质改良	2.99	3	1.00	21.93	<0.001
植物×土壤基质改良	6.83	15	0.46	10.02	<0.001

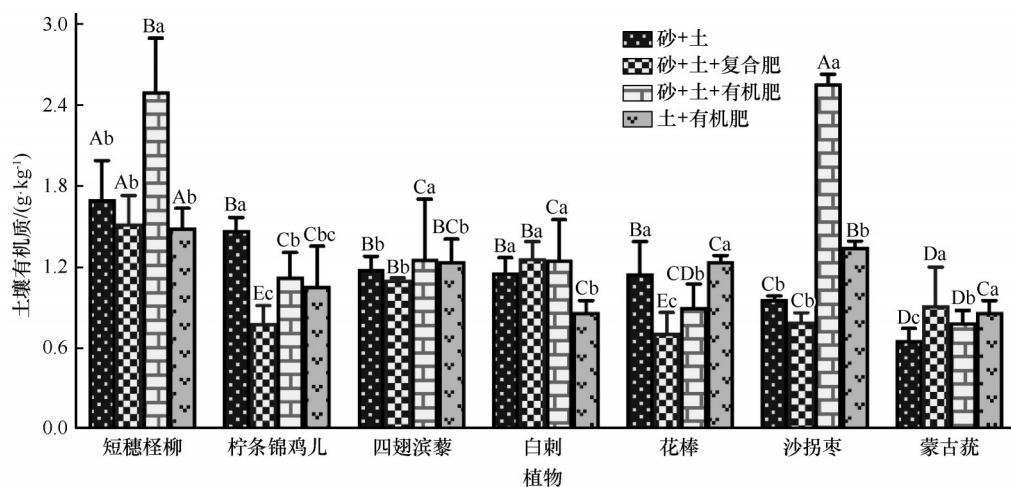
试验区的生态修复模式为砂+土+有机肥(沙拐枣或短穗柽柳)。

3 讨论

3.1 土壤基质重构对土壤温、湿度的影响

砂土经改良后土壤含水量和土壤温度会得到改善^[27]。新疆盐碱土壤经改良后(生物炭、脱硫石

膏、稻草覆盖),0~20 cm和20~40 cm深土壤层土壤含水量显著增加,增加土壤对环境温度变化的缓冲性能^[28]。有学者研究新疆非金属矿山重建土壤中的水分布规律发现表土覆盖有助于提高土壤含水量^[29]。但是本研究发现土壤基质重构对土壤含水量和土壤温度的影响因不同植物而出现差异性:花棒在换土后土壤含水量和土壤温度升高,但四翅滨藜却与此相反。这与某些学者的研究结果相同:一方面,生长速率大的植物可能消耗更多水资源,有研究表明植物的生长速率与其用水量呈正相关关系^[30],这表明水需求是由植物的增长率驱动的。另一方面,不同植物种的水分利用效率的差异导致不同植物根区土壤含水量不同,如有学者研究临泽绿洲(巴丹吉林沙漠西南)的梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、沙拐枣、泡泡刺(*Nitraria sphaerocarpa*),发现3种植物根区的土壤持水性与土壤容重和孔隙



注:不同大写字母表示同一土壤基质不同植物根区土壤有机质差异显著($P < 0.05$),不同小写字母表示同一植物不同土壤基质土壤有机质差异显著($P < 0.05$)

图6 不同植物和土壤基质的土壤有机质

Fig.6 Soil organic matter of different plants and soil substrates

表4 植物存活率

Table 4 Plant survival rate

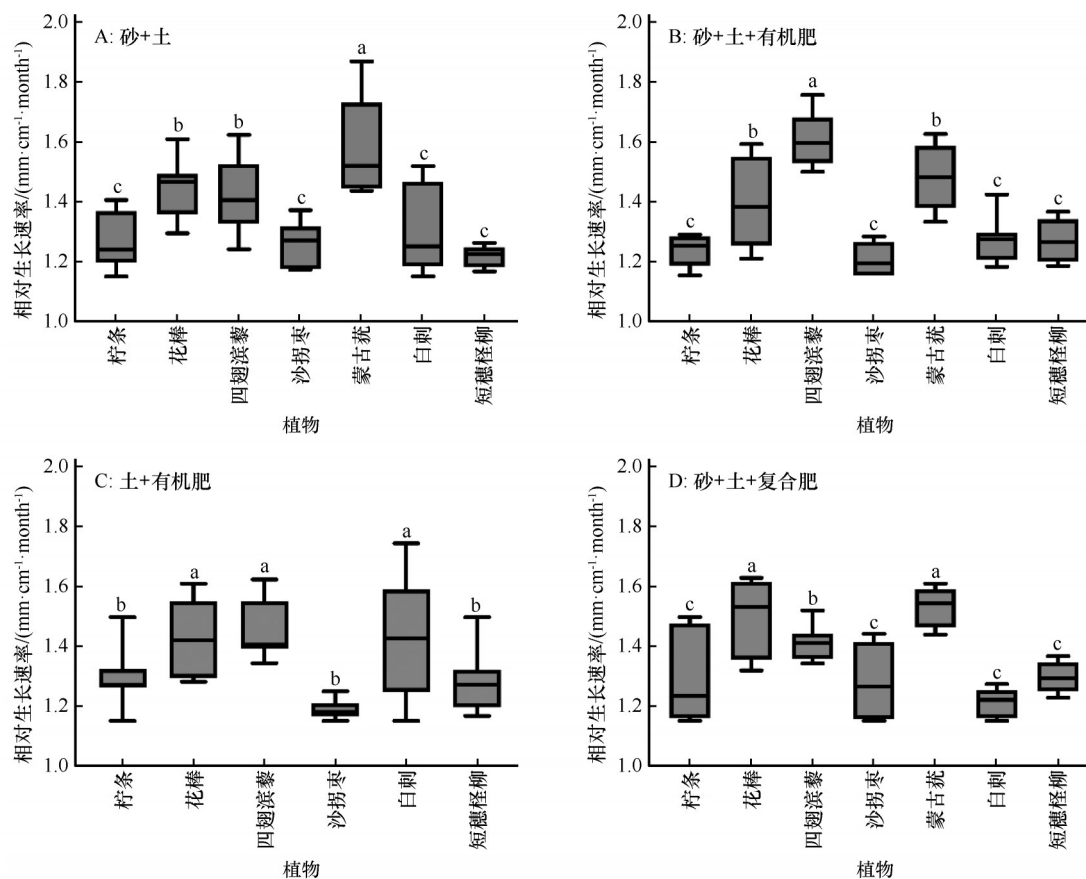
土壤 基质	植物	存活 率/%	土壤 基质	植物	存活 率/%
砂+土	短穗柽柳	98.57	砂+土+ 有机肥	短穗柽柳	99.40
	白刺	97.69		白刺	98.77
	沙拐枣	96.09		沙拐枣	96.03
	蒙古莠	93.98		柠条锦鸡 儿	92.73
	花棒	84.82		花棒	87.78
	柠条锦鸡 儿	84.35		蒙古莠	82.01
	四翅滨藜	63.39		四翅滨藜	71.43
砂+土+ 复合肥	白刺	97.73	土+ 有机肥	白刺	100.00
	短穗柽柳	96.46		沙拐枣	99.11
	沙拐枣	95.81		短穗柽柳	98.30
	柠条锦鸡 儿	92.52		柠条锦鸡 儿	94.62
	蒙古莠	86.55		蒙古莠	89.23
	花棒	84.62		花棒	79.52
	四翅滨藜	68.37		四翅滨藜	75.68

度呈显著相关关系,0~120 cm 土层土壤持水特性表现为梭梭>泡泡刺>沙拐枣^[31]。还有学者通过森林中进行的双踪实验发现0~20 cm 土壤中根诱导土壤水分积累,而且在较低的降水量下根系特征对土壤水分的影响更明显,因此不同植物种的根系特征会影响土壤水分^[32]。本试验因受场地和实验仪器

的限制,仅对花棒和四翅滨藜种植区的土壤温、湿度进行了监测,后续研究还应尽可能监测其他物种的土壤温、湿度数据进行分析对比,进一步增加结论的可靠性。

3.2 土壤基质重构对植物成活率和生长的影响

土壤基质改良和植被重建是生态脆弱区矿山生态修复的重要研究方向^[33],土壤质量恶化是生态修复面临的一项重要挑战,土壤基质重构可以提高土壤质量和植物生产力^[34-35]。本研究发现植物存活率在施加有机肥后比未施肥更优,土壤基质重构措施有利于植物的存活和生长,这与前人研究结果一致。在土壤沙砾化程度较高的矿山遗迹地和中国北部干旱半干旱的生境脆弱地区,对土壤进行掺黏改良能改善种子发芽和幼苗生长条件^[36]。前人通过研究贵州毕节石漠化地区土壤经黄壤客土改良后耐瘠薄灌木——沙棘(*Hippophae rhamnoides*)的生长适应性,发现客土改良石漠化时,并非客土越多越好,当黄壤与砾石的比例在1/2~2/3时,沙棘细根的根重密度与土壤含水量均显著增加,有利于基岩裸露的石漠化地区恢复植被^[37]。干旱区石灰岩矿山遗迹地植物受到干旱胁迫和盐胁迫影响,环境因子的改变使植物的抗胁迫能力发生变化,进而影响植物的生存和生长^[38],如土壤基质重构可能影响土壤微生物,进而影响植物生长,有学者发现枯草芽孢杆菌可以通过影响柠条和沙冬青(*Ammopiptanthus mongolicus*)生理生化活动间接影响种子萌发



注：不同大写字母表示相同土壤基质不同植物RGRs差异显著($P < 0.05$)，不同小写字母表示相同植物不同土壤基质RGRs差异显著($P < 0.05$)

图7 植物新生枝相对生长速率

Fig.7 Relative growth rate of new shoots in plants

和幼苗生长,提高植物抗逆性^[39]。

本研究中白刺和短穗柽柳的RGRs在不同土壤基质改良模式下存在显著性差异,但其他5种植物的RGRs在不同土壤基质改良模式下则无显著性差异。结合前人研究,这可能与不同植物种的生物学特性及其生长所需的营养物质有关。石灰石采石场固体废物中可能含有某些植物物种所需的矿物质,使用这些植物不需要改善土壤基质,因为采石场废物就能够促进它们的生长^[40]。还有学者通过温室盆栽实验发现白车轴草(*Trifolium repens*)和梯牧草(*Phleum pratense*)在纯尾矿土壤中生长不良,但在尾矿土壤中添加5%的堆肥促进它们的生长^[41]。此外,矿山遗迹地土壤中的重金属离子对植物生长也有影响,有学者研究发现高浓度重金属离子会影响盐生草(*Halogeton glomeratus*)^[42]和骆驼蓬(*Peganum harmala*)^[43]幼苗生长及地上部生物量积累。

3.3 石灰岩矿山生态修复模式的筛选

本研究筛选得到本研究区最适宜的生态修复模式为砂+土+有机肥(沙拐枣或短穗柽柳)。首先,矿山遗迹地土壤有机质含量偏低,如有学者研究发现陕西省神木市大柳塔矿区不仅土壤有机物含量非常低,而且有效氮、有效磷含量极低^[44]。还有学者利用meta分析法定量分析了有机肥对土壤性质的影响,发现施用有机肥能够明显提升土壤有机质、有效磷、有效氮,增幅为11.7%~38.4%^[45]。因此,施用有机肥是改善矿区土壤条件以促进植物生存和生长的一个主要原因。其次,植物自身的生物学特性也是生态修复植物筛选的重要指标,柽柳和沙拐枣都具有较好的耐盐碱性,能够广泛生长在盐碱化土壤中^[46-47],且柽柳和沙拐枣都具有较大的持水力^[48]。干旱环境中植物的生存机制至关重要,例如,有研究对中国西北部沙漠地区的沙拐枣使用 $H_2^{18}O$ 同位素追踪,发现沙拐枣能够通过叶面吸收水

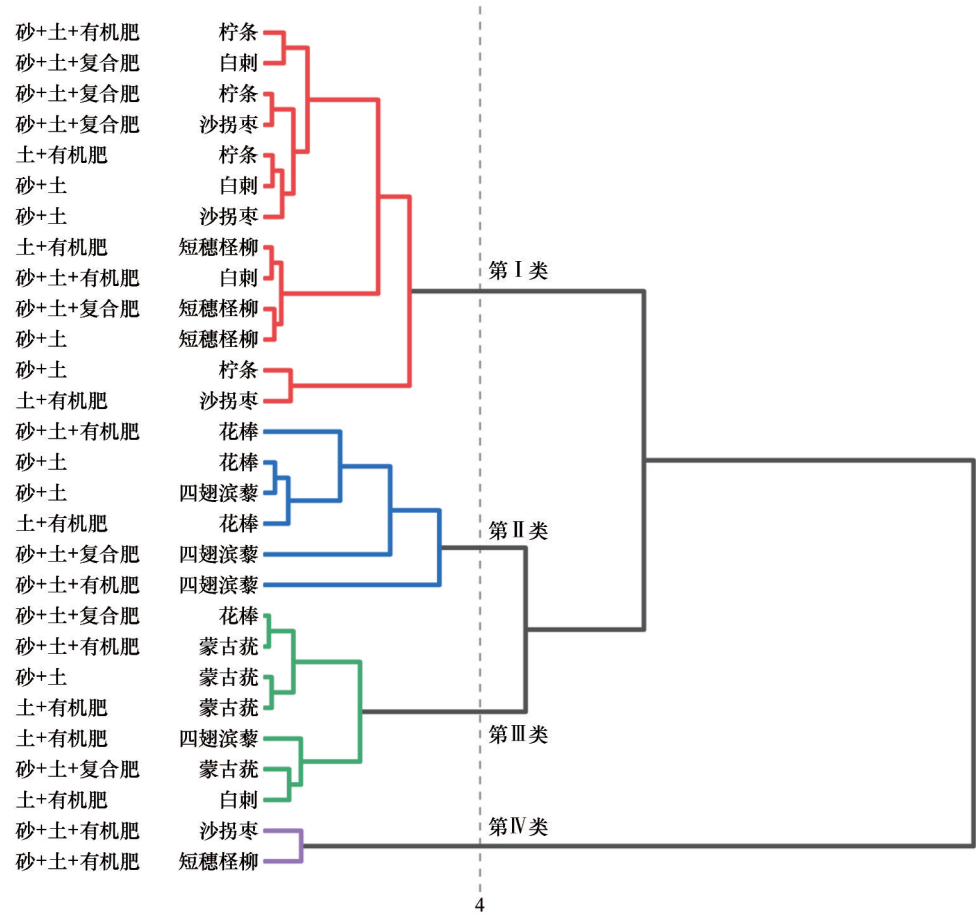


图 8 28 个试验处理的系统聚类分析树状图

Fig.8 Cluster analysis dendrogram of the 28 experimental treatments

表 5 各类群指标

Table 5 Indicators of different groups

序号	土壤有机质 /(g·kg ⁻¹)	存活率 /%	RGRs /(mm·cm ⁻¹ ·month ⁻¹)
第I类	1.27±0.33 ^b	95±6 ^a	1.26±0.04 ^b
第II类	1.14±0.13 ^{bc}	74±8 ^b	1.45±0.08 ^a
第III类	0.88±0.21 ^c	91±6 ^a	1.51±0.04 ^a
第IV类	2.53±0.04 ^a	98±2 ^a	1.25±0.07 ^b

注:不同字母表示不同类别间差异显著(P<0.05)。

分,吸收的水分可以通过木质部向下输送,并改善分支水状态和光合能力^[49]。此外,不同植物种用水策略的差异性可能是影响其适应性的主要原因,有研究发现胡杨(*Populus euphratica*)在补偿植物的蒸腾性水分损失方面不如多枝怪柳(*Tamarix ramosissima*)有效,多枝怪柳更有能力使用深层地下水^[50]。此外,还有研究发现降雨后柠条锦鸡儿和多枝怪柳对 0~40 cm 深度土壤水分的利用比例都有所增加,但是这两种植物对降雨的反应机制不同,柠条锦鸡

儿吸收了各种潜在的水源,而多枝怪柳只使用深层水^[29]。不同植物种的用水策略差异也导致了它们的适生性有所不同,有学者研究发现,白刺主要使用深层土壤水分(40~200 cm),多枝怪柳主要利用更深层的土壤水分(>200 cm)^[33],不同的物种表现出显著不同的土壤水利用率,如柠条锦鸡儿为 14%;此外,蒸发会导致浅层土壤的盐浓度增加,多枝怪柳在承受更多的盐质压力时,可以利用更深层的土壤水分^[51]。因此,本试验涉及的植物多具抗旱、耐盐碱特性,对于不同植物的用水策略差异性,亟须后期开展深入研究。

本试验在矿山生态修复模式的筛选过程中,涉及到了土壤温度、含水量、有机质及植物生长量等方面的影响因素。事实上,矿山生态修复模式的筛选还应该考虑到土壤微生物等因素的影响,因此评价因子尚需进一步完善,加之评价周期较短,后期需要长期监测研究来加以完善。

4 结论

通过调查研究区土壤粒级和岩性,对比干旱区石灰岩矿山遗迹地不同生态修复模式的土壤温度、湿度和有机质以及生态修复植物的存活率和RGRs等指标得到以下结论:①土壤基质重构对土壤温、湿度的影响因不同植物种表现出差异性。②白刺存活率在土+有机肥处理下最优(100%),短穗柽柳存活率在砂+土+有机肥处理下达到99.40%,有6种修复模式下植物存活率>98%;不同土壤基质重构下植物存活率的表现:土+有机肥>砂+土+有机肥>砂+土+复合肥。③不同生态修复模式植物根区土壤有机质的范围为0.56~2.84 g·kg⁻¹,植物种和土壤基质及二者的交互作用对土壤有机质含量具有极显著影响($P<0.001$)。④不同生态修复模式植物RGRs的范围为1.51~1.87 mm·cm⁻¹·month⁻¹;不同植物种的RGRs存在显著性差异;蒙古莠、四翅滨藜和花棒在不同的土壤基质中RGRs均显著高于其他植物种。⑤使用系统聚类分析得到第IV类土壤有机质含量最高且植物存活率较高,因此本研究区最适宜的生态修复模式为砂+土+有机肥(沙拐枣或短穗柽柳)。

综上,干旱区石灰岩矿山遗迹地不同植物种的土壤温、湿度、存活率、有机质、生长状况等都有所差异,并且施加有机肥等土壤基质重构措施能够提高土壤养分和改善植物生长条件。因此,从土壤改良-植被重建的角度开展联合生态修复是干旱区矿山生态修复理论和实践的主导方向。

参考文献:

- [1] 农仕华,韦佳伟,蒙颖森.石灰岩矿床不同资源储量估算方法对比分析[J].西部探矿工程,2022,34(9):120-122.
- [2] Li J G, Li Z X, Brandis K J, et al. Tracing geochemical pollutants in stream water and soil from mining activity in an alpine catchment[J]. Chemosphere, 2020, 242: 125167.
- [3] Shi J, Du P, Luo H L, et al. Soil contamination with cadmium and potential risk around various mines in China during 2000-2020 [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 310: 114509.
- [4] Nguyen T H, Won S, Ha M G, et al. Bioleaching for environmental remediation of toxic metals and metalloids: a review on soils, sediments, and mine tailings [J]. Chemosphere, 2021, 282: 131108.
- [5] Xu Q, Xia G Z, Wei Y, et al. Responses of vegetation and soil to artificial restoration measures in abandoned gold mining areas in altai mountain, northwest China [J]. Diversity-Basel, 2022, 14 (6): 427.
- [6] Wang C X, Liu X, Wu J C, et al. Planning a water-constrained ecological restoration pattern to enhance sustainable landscape management in drylands [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 335: 117514.
- [7] Bai D S, Yang X, Lai J L, et al. In situ restoration of soil ecological function in a coal gangue reclamation area after 10 years of elm/poplar phytoremediation [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 305: 114400.
- [8] Shi Y F, Zang Y F, Yang H H, et al. Biochar enhanced phytostabilization of heavy metal contaminated mine tailings: a review [J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 1044921.
- [9] Liu J, Zhang S W, Li E W, et al. Effects of cubic ecological restoration of mining wasteland and the preferred restoration scheme [J]. Science of the Total Environment, 2022, 851 (1): 158155.
- [10] Gairola S U, Bahuguna R, Bhatt S S. Native plant species: a tool for restoration of mined lands [J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2023, 23 (2): 1438-1448.
- [11] Laffont-Schwob I, Rabier J, Masotti V, et al. Functional Trait-Based screening of Zn-Pb tolerant wild plant species at an abandoned mine site in Gard (France) for rehabilitation of mediterranean Metal-Contaminated soils [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17 (15): 5506.
- [12] 何明珠,胡天光,程斌让,等.干旱区尾矿污染环境的植物修复技术研究进展[J].中国沙漠,2014,34(5):1329-1336.
- [13] Konig L A, Medina-Vega J A, Longo R M, et al. Restoration success in former Amazonian mines is driven by soil amendment and forest proximity [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences, 2023, 378 (1867): 20210086.
- [14] Bateman A M, Erickson T E, Merritt D J, et al. Native plant diversity is a stronger driver for soil quality than inorganic amendments in semi-arid post-mining rehabilitation [J]. Geoderma, 2021, 394: 115001.
- [15] Qian L, Lin H, Li B, et al. Physicochemical characteristics and microbial communities of rhizosphere in complex amendment-assisted soilless revegetation of gold mine tailings [J]. Chemosphere, 2023, 320: 138052.
- [16] Wang X Y, Li Y, Wei Y, et al. Effects of fertilization and reclamation time on soil bacterial communities in coal mining subsidence areas [J]. Science of the Total Environment, 2020, 739: 139882.
- [17] Ginocchio R, de la Fuente L M, Orrego F, et al. A novel fast-vegetative propagation technique of the pioneer shrub Baccharis linearis on mine tailings by adding compost [J]. International Journal of Phytoremediation, 2021, 23 (11): 1169-1174.
- [18] Hussain Z, Alam M, Khan M A, et al. Bioaccumulation of potentially toxic elements in spinach grown on contaminated soils amended with organic fertilizers and their subsequent human

- health risk [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, 13 (18):945.
- [19] Wang L L, Wang F, Wang S F, et al. Analysis of differences in chemical properties of reconstructed soil under different proportions of topsoil substitute materials [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(24):31230–31245.
- [20] Zhu Q, Hu Z Q, Liu X R, et al. Topsoil alternatives selection for surface coal-mined land reclamation in Inner Mongolia, China: an experimental study [J]. *International Journal of Mining Reclamation and Environment*, 2021, 35(6):421–434.
- [21] Lebrun M, Nandillon R, Miard F S, et al. Application of amendments for the phytoremediation of a former mine technosol by endemic pioneer species: alder and birch seedlings [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2021, 43(1):77–89.
- [22] Pérez R, Tapia Y, Antilén M, et al. Interactive effect of compost application and inoculation with the fungus *Claroideoglomus claroideum* in *Oenothera picensis* plants growing in mine tailings [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 208: 111495.
- [23] Peco J D, Higuera P, Campos J A, et al. Abandoned mine lands reclamation by plant remediation technologies [J]. *Sustainability*, 2021, 13(12):6555.
- [24] 武万里, 程雅茹, 马宁. 宁夏高速公路横风分布特征及风险分析 [J/OL]. 宁夏大学学报(自然科学版):1–6[2023-05-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/64.1006.N.20210701.1142.016.html>.
- [25] 张泽瑾, 李晓攀, 杨苑, 等. 中卫市沙尘污染天气分型及气象条件特征分析 [J]. *农业科技与信息*, 2022(5):40–44.
- [26] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [27] Mau V, Arye G, Gross A. Poultry litter hydrochar as an amendment for sandy soils [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 271: 110959.
- [28] Shan Y Y, Li G, Bai Y G, et al. Effects of different improvement measures on hydrothermal carbon and cotton (*Gossypium hirsutum* L.) yield in saline-alkali soil [J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2022, 20(2):1821–1835.
- [29] Zhang Y, Zhang M J, Qu D Y, et al. Water use characteristics of different pioneer shrubs at different ages in western Chinese Loess Plateau: evidence from delta H-2 offset correction [J]. *Journal of Arid Land*, 2022, 14(6):653–672.
- [30] Ebmeyer H, Hoffmann C. Water use efficiency of sugar beet genotypes: a relationship between growth rates and water consumption [J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2022, 208 (1):28–39.
- [31] 付鹏程, 胡广录, 巩伟, 等. 河西走廊沙漠-绿洲过渡带固沙植物根区土壤物理性质及持水特性 [J]. *土壤通报*, 2021, 52(4): 811–820.
- [32] Luo Z T, Niu J Z, He S Q, et al. Linking roots, preferential flow, and soil moisture redistribution in deciduous and coniferous forest soils [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2023, 23 (3):1524–1538.
- [33] Ma X F, Zhu J T, Wang Y, et al. Variations in water use strategies of sand-binding vegetation along a precipitation gradient in sandy regions, northern China [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 600:126539.
- [34] Yakupoglu G, Saltali K, Rodrigo-Comino J, et al. Manure effect on Soil-Plant interactions in capia pepper crops under semiarid climate conditions [J]. *Sustainability*, 2022, 14(20):13695.
- [35] He M Z, Ji X B, Bu D S, et al. Cultivation effects on soil texture and fertility in an arid desert region of northwestern China [J]. *Journal of Arid Land*, 2020, 12(4):701–715.
- [36] 王玉珍, 黄晓, 蔡丽平, 等. 不同温度条件下土壤颗粒组成对宽叶雀稗种子发芽与幼苗生长的影响 [J]. *草业学报*, 2018, 27 (9):45–55.
- [37] 马赞花, 冯图, 李仰征, 等. 沙棘 (*Hippophae rhamnoides*) 对经客土改良石漠化土壤的适应性 [J]. *中国沙漠*, 2021, 41(1): 228–233.
- [38] 李端, 司建华, 李继彦, 等. 胡杨 (*Populus euphratica*) 对盐胁迫和干旱胁迫的生理响应特征 [J]. *中国沙漠*, 2023, 43(2): 205–215.
- [39] 王雨, 刘振婷, 高广磊, 等. 干旱胁迫下枯草芽孢杆菌 (*Bacillus subtilis*) 对柠条 (*Caragana korshinskii*) 和沙冬青 (*Ammopiptanthus mongolicus*) 种子萌发及幼苗生长的影响 [J]. *中国沙漠*, 2022, 42(5):73–81.
- [40] Hayyat M U, Siddiq Z, Mahmood R, et al. Limestone quarry waste promotes the growth of two native woody angiosperms [J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2021, 9:637833.
- [41] Heiskanen J, Ruhanen H, Hagner M. Effects of compost, biochar and ash mixed in till soil cover of mine tailings on plant growth and bioaccumulation of elements: a growing test in a greenhouse [J]. *Heliyon*, 2022, 8(2):e08838.
- [42] 鲁艳, 李新荣, 何明珠, 等. 重金属对盐生草光合生理生长特性的影响 [J]. *西北植物学报*, 2011, 31(2):370–376.
- [43] 徐慧全, 王立, 冯宜明, 等. 重金属在不同温度和光照下对骆驼蓬种子萌发特征的影响 [J]. *水土保持通报*, 2012, 32(1): 33–37.
- [44] Long L L, Liu Y, Chen X Y, et al. Analysis of spatial variability and influencing factors of soil nutrients in western China: a case study of the Daliuta mining area [J]. *Sustainability*, 2022, 14(5):2793.
- [45] 李圆宾, 李鹏, 王舒华, 等. 稻麦轮作体系下有机肥施用对作物产量和土壤性质影响的整合分析 [J]. *应用生态学报*, 2021, 32(9):3231–3239.
- [46] Chen Y H, Zhang S Y, Du S F, et al. Analysis of amino acids in the roots of *Tamarix ramosissima* by application of exogenous potassium (K^+) under NaCl stress [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 23(16):9331.
- [47] Hu J, Hu X K, Duan H R, et al. Na^+ and K^+ homeostasis is important for salinity and drought tolerance of calligonum mongolicum [J]. *Pakistan Journal of Botany*, 2021, 53(6):1927–1934.
- [48] 何明珠, 王辉, 陈智平. 荒漠植物持水力研究 [J]. *中国沙漠*, 2006, 26(3):403–408.
- [49] Li Z K, Gong X W, Wang J L, et al. Foliar water uptake im-

- proves branch water potential and photosynthetic capacity in *Calligonum mongolicum* [J]. Ecological Indicators, 2023, 146: 109825.
- [50] Li J, Hu S J, Sheng Y, et al. Whole-plant water use and hydraulics of *Populus euphratica* and *Tamarix ramosissima* seedlings in adaption to groundwater variation [J]. Water, 2022, 14(12): 1869.
- [51] Cui Y Q, Niu L Q, Xiang J L, et al. Water uptake from different soil depths for desert plants in saline lands of Dunhuang, NW China [J]. Frontiers in Environmental Science, 2021, 8: 585464.

A comparative study of ecological remediation approaches in arid limestone mining remnants

Guo Yuanshang^{1,2}, He Mingzhu³, Liu Jianbing², Zhang Xi², Gu Shoujiang²,
Wu Wenjin², Gao Libo², Feng Xiaoli², Han Guojun¹

(1. College of Resources and Environment, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. Geological Archives of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750021, China; 3. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The ecological restoration of mine sites is an important measure to promote the harmonious coexistence between humans and nature, and achieve green and low-carbon development. Mining remnants in arid area are characterized by poor site conditions, low vegetation coverage, and strong soil erosion caused by mining activities. The determination of a scientifically rational restoration model is crucial for the success of ecological restoration. In this study, the typical arid limestone mining remnants in Zhongwei City, Ningxia, were selected as the research object. By comparing the soil temperature, humidity, organic matter, plant survival rate, and relative growth rate of new shoots (RGRs) of seven kinds of ecological restoration plants under different soil matrix reconstruction measures, it aims to screen out the optimal mode for ecological restoration of arid limestone mining wastelands and construct an eco-restoration plan combining soil improvement and vegetation reconstruction. The results show that: (1) Soil matrix reconstruction measures are the prerequisite for ecological restoration of limestone mines, which can effectively improve plant colonization environment. The plant survival rates of different soil matrix reconstruction measures are: soil + organic fertilizer > sand + soil + organic fertilizer > sand + soil + compound fertilizer. (2) The range of soil organic matter was 0.56–2.84 g·kg⁻¹. Plant species and soil matrix and their interaction had a significant effect on soil organic matter content ($P < 0.001$). (3) The range of RGRs was 1.51–1.87 mm·cm⁻¹·month⁻¹, and there were significant differences in RGRs among different plant species. (4) Through Hierarchical clustering analysis, the most suitable ecological restoration mode for the study area was found to be sand + soil + organic fertilizer (with *Calligonum mongolicum* or *Tamarix ramosissima* as the selected plants). This study proposes a joint ecological restoration scheme from the perspective of soil improvement-vegetation reconstruction, which can provide theoretical basis and practical reference for mine ecological restoration in arid areas.

Key words: soil matrix reconstruction; plant survival rate; relative growth rate of new shoots; cluster analysis