

宁夏干旱区石灰岩矿山废弃地土壤改良及修复植物优选

郭源上¹, 何明珠², 韩国君^{1,①}, 龚晨琛¹, 侯国文¹, 杨晓兵¹, 臧龙飞¹

(1. 甘肃农业大学资源环境学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 为探索干旱区石灰岩矿山废弃地的生态修复方式, 设置砂-土-有机肥(体积比 2:1:1)、砂-土-复合肥(体积比 2:1:1)、砂-土(体积比 2:1)、土-有机肥(体积比 9:1) 4 种土壤基质及柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii* Kom.)、细枝羊柴[*Corethroedendron scoparium* (Fisch. et C. A. Mey.) Fisch. et Basiner]、四翼滨藜[*Atriplex canescens* (Pursh) Nutt.]、沙拐枣(*Calligonum mongolicum* Turcz.)、蒙古莠(*Caryopteris mongholica* Bunge)、白刺(*Nitraria tangutorum* Bobrov)、短穗柽柳(*Tamarix laxa* Willd.) 7 种修复植物, 对土壤理化性质及植物生长指标、叶片光合和叶绿素荧光指标进行比较, 并利用主成分分析筛选最佳生态修复模式。结果显示: 不同土壤基质方面, 砂-土-有机肥的 pH 值、有机质含量和有效磷含量最高, 土-有机肥的含水量、电导率和速效钾含量最高; 砂-土-有机肥中四翼滨藜的新生枝月相对生长速率最高, 砂-土-复合肥中四翼滨藜的株高和树冠面积最大; 土-有机肥中四翼滨藜叶片的光补偿点最高但光饱和点和最大光合速率最低, 砂-土-有机肥中四翼滨藜叶片的净光合速率、非光化学淬灭系数和最大光量子产量基本上显著($P<0.05$)高于其他土壤基质; 主成分分析筛选出的最优土壤基质为砂-土-有机肥。不同修复植物方面, 短穗柽柳根际土壤的 pH 值、有机质含量、碱解氮含量和有效磷含量最高, 柠条锦鸡儿根际土壤的电导率和速效钾含量最高; 四翼滨藜的新生枝月相对生长速率显著高于其他植物; 沙拐枣叶片的暗呼吸速率、光补偿点和最大光量子产量基本上显著高于其他植物, 白刺叶片的表观量子效率显著高于其他植物, 柠条锦鸡儿叶片的光饱和点最高且实际光量子产量和表观电子传递速率整体上显著高于其他植物, 四翼滨藜叶片的最大光合速率和净光合速率基本上显著高于其他植物, 细枝羊柴叶片的蒸腾速率和胞间 CO_2 浓度整体上显著高于其他植物, 短穗柽柳叶片的气孔导度显著高于其他植物, 蒙古莠叶片的非光化学淬灭系数整体上显著高于其他植物; 主成分分析筛选出的最优修复植物为短穗柽柳。综合分析得出, 在砂-土-有机肥中种植短穗柽柳可对宁夏干旱区石灰岩矿山废弃地进行有效生态修复。

关键词: 干旱区; 石灰岩矿山; 生态修复; 土壤改良; 修复植物

中图分类号: Q945.79; Q948.113; X53 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2024)06-0044-12
DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2024.06.05

Soil amelioration and restorative plant optimization for wasteland of limestone mine sites in arid region of Ningxia GUO Yuanshang¹, HE Mingzhu², HAN Guojun^{1,①}, GONG Chenchen¹, HOU Guowen¹, YANG Xiaobing¹, ZANG Longfei¹ (1. College of Resources and Environment, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2024, 33(6): 44-55

Abstract: To explore ecological restoration methods for wasteland of limestone mine sites in arid region, four soil substrates viz. sand-soil-organic fertilizer (volume ratio of 2:1:1), sand-soil-compound fertilizer (volume ratio of 2:1:1), sand-soil (volume ratio of 2:1), and soil-organic fertilizer

收稿日期: 2024-06-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(31960631); 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, 甘肃两当人, 硕士研究生, 研究方向为矿山生态修复。

①通信作者 E-mail: hangj@gsau.edu.cn

引用格式: 郭源上, 何明珠, 韩国君, 等. 宁夏干旱区石灰岩矿山废弃地土壤改良及修复植物优选[J]. 植物资源与环境学报, 2024, 33(6): 44-55.

(volume ratio of 9 : 1) and seven restorative plants viz. *Caragana korshinskii* Kom., *Corethrodedron scoparium* (Fisch. et C. A. Mey.) Fisch. et Basiner, *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt., *Calligonum mongolicum* Turcz., *Caryopteris mongholica* Bunge, *Nitraria tangutorum* Bobrov, and *Tamarix laxa* Willd. were established. The soil physicochemical properties and plant growth indexes, leaf photosynthesis and chlorophyll fluorescence indexes were compared. Moreover, principal component analysis was employed to screen the optimal ecological restoration model. The results indicate that, among different soil substrates, the sand-soil-organic fertilizer exhibits the highest pH value, organic matter content, and available phosphorus content, and the soil-organic fertilizer exhibits the highest water content, electric conductivity, and available potassium content; the monthly relative growth rate of new shoots of *A. canescens* is the highest in the sand-soil-organic fertilizer, while the height and canopy area of *A. canescens* are the highest in the sand-soil-compound fertilizer; the light compensation point is the highest, while the light saturation point and maximum photosynthetic rate are the lowest of *A. canescens* leaves in the soil-organic fertilizer; the net photosynthetic rate, non-photochemical quenching coefficient, and maximum light quantum yield of *A. canescens* leaves in the sand-soil-organic fertilizer are significantly ($P < 0.05$) higher than those in the other soil substrates; the principal component analysis result indicates that the sand-soil-organic fertilizer is the optimal soil substrate. Among different restorative plants, the pH value, organic matter content, alkali-hydrolyzable nitrogen content, and available phosphorus content are the highest in the rhizosphere soil of *T. laxa*, and the electric conductivity and available potassium content are the highest in the rhizosphere soil of *C. korshinskii*; the monthly relative growth rate of new shoots of *A. canescens* is significantly higher than that of the other plants; the dark respiration rate, light compensation point, and maximum light quantum yield of *C. mongolicum* leaves are significantly higher than those of the other plants in general, and the apparent quantum efficiency of *N. tangutorum* leaves is significantly higher than that of the other plants; *C. korshinskii* leaves have the highest light saturation point, and their actual light quantum yield and apparent electron transport rate are significantly higher than those of the other plants in general; the maximum photosynthetic rate and net photosynthetic rate of *A. canescens* leaves are significantly higher than those of the other plants in general; the transpiration rate and intercellular CO_2 concentration of *C. scoparium* leaves are significantly higher than those of the other plants in general, the stomatal conductance of *T. laxa* leaves is significantly higher than that of the other plants, and the non-photochemical quenching coefficient of *C. mongholica* leaves is significantly higher than that of the other plants in general; the principal component analysis indicates that *T. laxa* is the optimal restorative plant. A comprehensive analysis suggests that planting *T. laxa* in sand-soil-organic fertilizer can effectively facilitate ecological restoration of wasteland of limestone mine sites in arid region of Ningxia.

Key words: arid region; limestone mine site; ecological restoration; soil amelioration; restorative plant

石灰岩矿产资源的开发与利用在促进经济发展的同时造成了严重的生态问题^[1]。干旱区石灰岩矿山废弃地砂砾含量高、土壤养分含量低,矿山活动会破坏表土和地表植被^[2],造成本土植物种子遗失、幼苗出苗率下降、微生物组成和活性改变,使得植物难以生长^[3-5]。土壤基质改良能够促进土地质量恢复,改善植物生长条件,进而恢复生态系统功能和生物多样性^[6-8]。此外,土壤基质改良对植物的光合特性改善具有重要作用,例如通过改变土壤水、盐含量影响植物的形态结构和光合特性。适当施肥可以缓解土壤含水量匮乏对植物生长发育的抑制作用^[9],还能够通过增加光合色素含量和提高光合效率来提升植物的光合能力^[10]。然而,目前矿山废弃地土壤基质改良多采用完全客土和施肥的措施,未能将矿山废渣

再利用。因此,研究在矿山废渣和客土的基础上施肥的经济可行性和技术可行性具有重要意义^[11-12]。

干旱区石灰岩矿山废弃地生态修复植物的光合作用受水资源匮乏和气候条件恶劣等影响^[13]。首先,水资源匮乏会使植物的光合性能因细胞的水势变化和气孔限制而受到抑制(如降低光合色素含量、光合酶活性、光合效率和净光合速率)^[9,14],还会造成植物叶肉细胞和光合系统的不可逆损伤^[15]。其次,极端高温和干旱会导致叶片气孔关闭和蒸腾速率降低,植物正常光合生理代谢受到更强烈的气孔限制^[13]。并且,不同植物对环境的适应性有所不同^[16]。因此,筛选适宜的生态修复植物是干旱区石灰岩废弃地生态修复的重中之重。柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii* Kom.)、细枝羊柴[*Corethrodedron*

scoparium (Fisch. et C. A. Mey.) Fisch. et Basiner]、四翼滨藜 [*Atriplex canescens* (Pursh) Nutt.]、沙拐枣 (*Calligonum mongolicum* Turcz.)、蒙古莠 (*Caryopteris mongholica* Bunge)、白刺 (*Nitraria tangutorum* Bobrov) 和短穗柽柳 (*Tamarix laxa* Willd.) 是较为常见的荒漠植物^[17], 具有较强的抗旱性和耐盐碱性, 能够较好地适应干旱区恶劣环境。植物在长期进化过程中具备了适应环境的生存策略, 例如优化光合器官功能^[18], 保持相对较高的净光合速率和水分利用效率及较低的蒸腾速率^[19-20]。

前人已对土壤基质改良下植物的光合和叶绿素荧光特性做了大量研究^[8,12], 但很少有研究关注干旱区石灰岩矿山废弃地的土壤基质改良措施对生态修复植物叶片光合和叶绿素荧光特性的影响, 不利于该地区的土壤修复和生态保护。鉴于此, 本研究设置4种土壤基质改良配方, 并以上述7种荒漠植物为生态修复植物, 分别比较了不同土壤基质改良配方下和种植不同植物后的土壤理化特性及植物生长特性、叶片光合和叶绿素荧光特性, 从而筛选出最佳生态修复模式, 为矿山生态修复土壤基质改良和修复植物的筛选提供数据支撑。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

研究地位于宁夏回族自治区中卫市南部的露天开采石灰岩矿山废弃地 (东经 105°16'56"、北纬 37°10'59")。该地区属大陆性干旱气候, 土壤肥力和生产水平低, 土壤瘠薄, 年降水量约 200 mm, 年蒸发量 1 500~2 000 mm。夏季气温可达 37℃以上, 日照时间长、辐射强, 干旱多风; 冬季最低气温-30℃, 昼夜温差大 (一般在 10℃以上)。

1.2 研究方法

1.2.1 实验设计 对矿山废弃地进行机械平整处理后划分出 10 个面积 12 m×10 m 的试验小区, 每个试验小区为 1 个处理。于 2022 年 4 月 3 日, 在试验小区种植 1 年生树苗, 每个试验小区 120 株, 株距和行距均为 1 m。

实验分为 2 部分: 1) 设置 4 种土壤基质改良配方, 即砂-土-有机肥 (体积比 2:1:1)、砂-土-复合肥 (体积比 2:1:1)、砂-土 (体积比 2:1)、土-有机肥 (体积比 9:1)^[21], 在 4 种土壤基质中种植四翼滨

藜; 砂为矿山废弃地原有土壤基质, 土为黄绵土, 有机肥中有机质含量不少于 50%, 复合肥为 N-P₂O₅-K₂O (N、P、K 质量分数分别为 14%、16%、15%); 砂-土为对照 1, 通过比较可知施肥的作用, 土-有机肥为对照 2, 通过比较可知矿山废渣再利用的可行性。鉴于经济可行性原则及矿山废渣相较于黄绵土养分含量低, 土-有机肥处理中有机肥比例较低^[11]。因植物在只有砂的基质中无法生长, 因而未设置只有砂及在砂的基础上施肥的处理。2) 在砂-土-有机肥中种植 7 种抗逆性灌木, 即柠条锦鸡儿、细枝羊柴、四翼滨藜、沙拐枣、蒙古莠、白刺、短穗柽柳。

由于在砂-土-有机肥中种植四翼滨藜为 2 部分实验的共有处理, 因此共用 1 个试验小区。

1.2.2 土壤理化指标测定 于 2023 年 10 月初, 采用“S”取样法在试验小区采集土壤样品。在每个试验小区选取 3 株植株, 在根部四周采集 0~20 cm 土层土壤, 每株 1 kg; 除去碎屑后, 自然风干后研磨成粉并过孔径 2 mm 筛, 参照文献^[22]中的方法测定土壤的含水量、pH 值、电导率、有机质含量、碱解氮含量、有效磷含量、速效钾含量。

1.2.3 叶片光合参数和叶绿素荧光参数测定 于 2023 年 8 月晴朗日的 9:30—11:30, 在每个试验小区选取生长状况基本一致且长势良好的 3 株植株, 选择植株南面中上部长势良好且完全展开的 3 枚叶进行光合参数和叶绿素荧光参数测定。

1.2.3.1 光合参数测定 使用 GFS-3000 便携式光合测定仪 (德国 WALZ 公司) 测定气体交换参数和净光合速率的光响应曲线。设定气体流速为 700 $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$, 控制叶室温度为 30℃, 选择红蓝光源。在光合有效辐射 800 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 下测定净光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度和蒸腾速率。光响应曲线的测定方法为: 先用光合有效辐射 700 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 进行诱导, 再在光合有效辐射 2 000、1 800、1 600、1 400、1 200、1 000、800、600、400、200、150、100、50、30、0 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 下依次测定净光合速率, 每个光合有效辐射下稳定 120 s, 系统自动记录并保存相关数据。采用光合模型拟合软件 (<http://photosynthetic.sinaapp.com/calc.html>) 的直角双曲线修正模型对净光合速率的光响应曲线进行拟合^[23-24], 并计算暗呼吸速率、表观量子效率、光补偿点、光饱和点和最大光合速率^[25]。

1.2.3.2 叶绿素荧光参数测定 使用 MINI-PAM

荧光仪(德国 WALZ 公司)测定实际光量子产量 $[Y(II)]$ 、表观电子传递速率(ETR)、光化学猝灭系数(qP)、非光化学猝灭系数(NPQ)和最大光量子产量(F_v/F_m)。测量前,使用黑色塑料布包裹植物叶片,充分暗适应 25 min。

1.2.4 植株长势测定 在每个试验小区随机选取生长状况基本一致且长势良好的 10 株植株,于 2023 年 8 月和 10 月,使用卷尺(精度 1 mm)测量当年生枝条从基部至顶部生长点的长度,并计算相对生长速率,即新生枝月相对生长速率(RGR_s),计算公式为 $RGR_s = (\ln L_2 - \ln L_1) / (t_2 - t_1)$,式中, L_1 和 L_2 分别为第 1 次和第 2 次记录的长度, t_1 和 t_2 分别为第 1 次和第 2 次记录的月份;于 2023 年 10 月初,采用卷尺测量株高及树冠的南北方向轴长(a)和东西方向轴长(b),利用椭圆面积计算公式“ $A = \pi ab/4$ ”计算树冠面积(A)^[26]。

1.3 数据处理与分析

利用 EXCEL 2019 软件进行数据整理,利用 IBM SPSS Statistics 26.0 软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA)及 Turkey 事后检验分析不同处理间的差异,利用 R Studio 4.4.0 软件进行主成分分析,并对

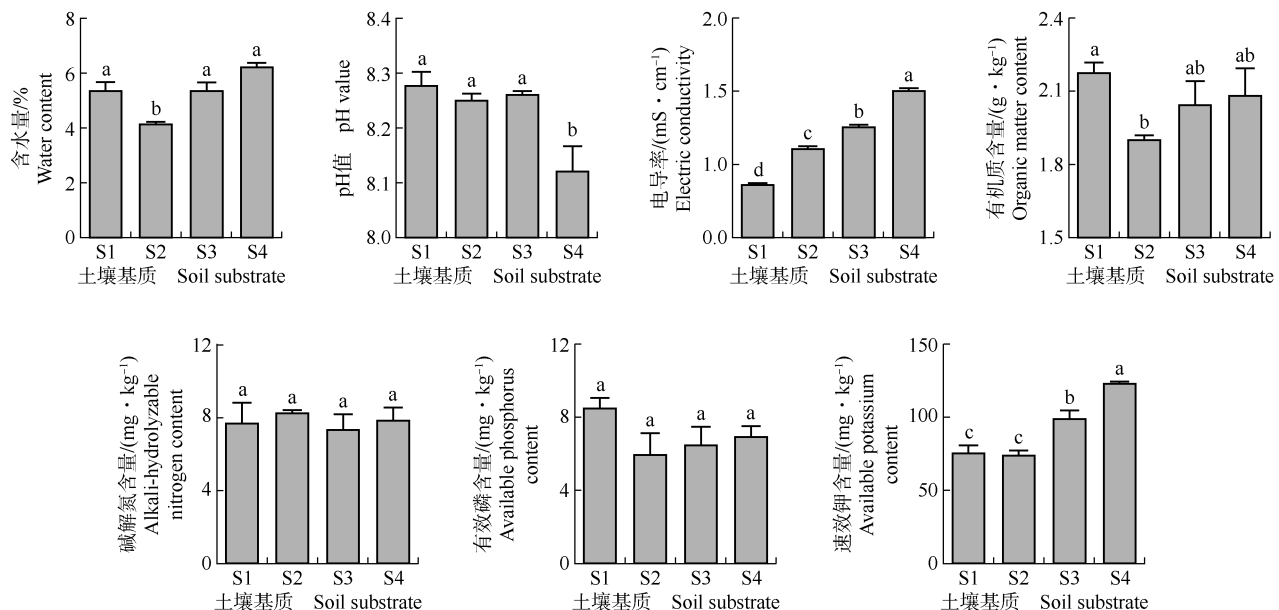
不同土壤基质和不同植物进行排序,利用 GraphPad Prism 9.0 软件绘图。

2 结果和分析

2.1 不同土壤基质分析

2.1.1 不同土壤基质的理化性质 结果(图 1)显示:不同土壤基质的理化性质存在明显差异。砂-土-复合肥(体积比 2:1:1)的含水量显著($P < 0.05$)低于另 3 种土壤基质。土-有机肥(体积比 9:1)的 pH 值显著低于另 3 种土壤基质。4 种土壤基质的电导率由高到低依次为土-有机肥、砂-土(体积比 2:1)、砂-土-复合肥、砂-土-有机肥(体积比 2:1:1),两两之间差异显著。砂-土-复合肥的有机质含量最低,且显著低于砂-土-有机肥。4 种土壤基质的碱解氮含量和有效磷含量差异均不显著。砂-土-有机肥和砂-土-复合肥的速效钾含量相近,且显著低于砂-土和土-有机肥。

与砂-土相比,砂-土-有机肥和砂-土-复合肥的电导率分别降低了 31.19% 和 12.06%,速效钾含量分别降低了 23.17% 和 24.49%。与土-有机肥相比,砂-



S1: 砂-土-有机肥(体积比 2:1:1) Sand-soil-organic fertilizer (volume ratio of 2:1:1); S2: 砂-土-复合肥(体积比 2:1:1) Sand-soil-compound fertilizer (volume ratio of 2:1:1); S3: 砂-土(体积比 2:1) Sand-soil (volume ratio of 2:1); S4: 土-有机肥(体积比 9:1) Soil-organic fertilizer (volume ratio of 9:1). 同一柱形图中不同小写字母表示在不同土壤基质间差异显著($P < 0.05$) Different lowercases in the same histogram indicate the significant differences ($P < 0.05$) between different soil substrates.

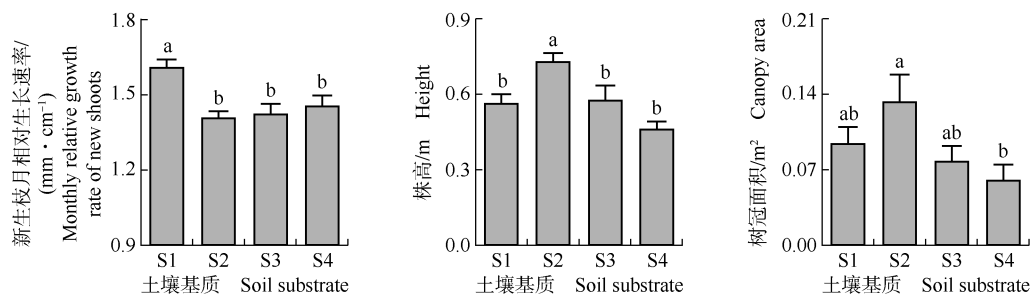
图 1 不同土壤基质的理化性质
Fig. 1 Physicochemical properties of different soil substrates

土-有机肥和砂-土-复合肥的 pH 值分别升高了 1.96% 和 1.60%, 电导率分别降低了 42.35% 和 26.33%, 速效钾含量分别降低了 38.45% 和 39.51%。

2.1.2 不同土壤基质中四翼滨藜的生长情况 结果(图2)显示:四翼滨藜在不同土壤基质中的生长情况存在明显差异。四翼滨藜的新生枝月相对生长速率在砂-土-有机肥中最高,且显著高于另3种土壤基

质。株高和树冠面积均在砂-土-复合肥中最大,且显著大于土-有机肥。

与砂-土相比,砂-土-有机肥中四翼滨藜的新生枝月相对生长速率增加了 13.11%,砂-土-复合肥中的株高增加了 26.32%。与土-有机肥相比,砂-土-复合肥中四翼滨藜的株高和树冠面积分别增加了 27.93% 和 115.79%。



S1: 砂-土-有机肥(体积比 2:1:1) Sand-soil-organic fertilizer (volume ratio of 2:1:1); S2: 砂-土-复合肥(体积比 2:1:1) Sand-soil-compound fertilizer (volume ratio of 2:1:1); S3: 砂-土(体积比 2:1) Sand-soil (volume ratio of 2:1); S4: 土-有机肥(体积比 9:1) Soil-organic fertilizer (volume ratio of 9:1). 同一柱形图中不同小写字母表示在不同土壤基质间差异显著 ($P<0.05$) Different lowercases in the same histogram indicate the significant differences ($P<0.05$) between different soil substrates.

图2 不同土壤基质中四翼滨藜的生长情况

Fig. 2 Growth status of *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt. in different soil substrates

2.1.3 不同土壤基质中四翼滨藜叶片的光合特性

2.1.3.1 净光合速率光响应曲线特征参数 不同土壤基质中四翼滨藜叶片净光合速率的光响应曲线变化规律相近,净光合速率均在光合有效辐射 1 600 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时达到最大值。对净光合速率光响应曲线特征参数进行分析,结果见表1。结果显示:4种土壤基质中四翼滨藜叶片的暗呼吸速率和表观量子效率相近。土-有机肥中叶片的光补偿点显著高于另3种土壤基质,而最大光合速率显著低于另

3种土壤基质。砂-土-复合肥和土-有机肥中叶片的光饱和点显著低于另2种土壤基质。

与砂-土相比,砂-土-复合肥中四翼滨藜叶片光饱和点降低了 8.24%。与土-有机肥相比,砂-土-有机肥和砂-土-复合肥中叶片的光补偿点分别降低了 27.30% 和 32.14%,最大光合速率分别升高了 49.73% 和 33.37%。

2.1.3.2 气体交换参数 结果(表2)显示:4种土壤基质中四翼滨藜叶片的蒸腾速率不存在显著差异。

表1 不同土壤基质中四翼滨藜叶片净光合速率的光响应曲线特征参数 ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

Table 1 Characteristic parameters of light response curve of net photosynthetic rate of *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt. leaves in different soil substrates ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

土壤基质 Soil substrate	暗呼吸速率/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) Dark respiration rate	表观量子效率/ ($\mu\text{mol} \cdot \mu\text{mol}^{-1}$) Apparent quantum efficiency	光补偿点/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) Light compensation point	光饱和点/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) Light saturation point	最大光合速率/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) Maximum photosynthetic rate
S1	4.976±0.255a	0.032±0.006a	144.497±3.071b	1 655.578±18.263a	21.970±0.854a
S2	4.290±0.785a	0.026±0.003a	134.874±6.042b	1 569.947±38.751b	19.569±1.469a
S3	4.145±0.164a	0.025±0.003a	145.280±12.262b	1 710.947±21.483a	21.426±1.672a
S4	4.640±0.044a	0.030±0.005a	198.752±6.210a	1 463.193±65.637b	14.673±1.237b

¹⁾ S1: 砂-土-有机肥(体积比 2:1:1) Sand-soil-organic fertilizer (volume ratio of 2:1:1); S2: 砂-土-复合肥(体积比 2:1:1) Sand-soil-compound fertilizer (volume ratio of 2:1:1); S3: 砂-土(体积比 2:1) Sand-soil (volume ratio of 2:1); S4: 土-有机肥(体积比 9:1) Soil-organic fertilizer (volume ratio of 9:1). 同列中不同小写字母表示在不同土壤基质间差异显著 ($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ($P<0.05$) between different soil substrates.

砂-土-有机肥中叶片的气孔导度最小,且显著低于另 3 种土壤基质。4 种土壤基质中叶片的净光合速率由高到低依次为砂-土-有机肥、砂-土-复合肥、土-有机肥,两两之间(除砂-土-复合肥与砂-土-土-有机肥外)存在显著差异。砂-土中叶片的胞间 CO₂ 浓度最低,且显著低于另 3 种土壤基质。

与砂-土相比,砂-土-有机肥中四翼滨藜叶片的净光合速率升高了 23.90%,胞间 CO₂ 浓度升高了 34.17%,但气孔导度降低了 44.64%;砂-土-复合肥中叶片的胞间 CO₂ 浓度升高了 40.86%。与土-有机肥相比,砂-土-有机肥中叶片的气孔导度降低了 34.04%,但净光合速率升高了 55.03%。

表 2 不同土壤基质中四翼滨藜叶片的气体交换参数($\bar{X} \pm SE$)¹⁾
Table 2 Gas exchange parameters of *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt. leaves in different soil substrates ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

土壤基质 Soil substrate	蒸腾速率/(mmol · m ⁻² · s ⁻¹) Transpiration rate	气孔导度/(mmol · m ⁻² · s ⁻¹) Stomatal conductance	净光合速率/(μmol · m ⁻² · s ⁻¹) Net photosynthetic rate	胞间 CO ₂ 浓度/(μmol · mol ⁻¹) Intercellular CO ₂ concentration
S1	3.14±0.24a	0.031±0.002c	18.51±1.64a	289.22±11.77a
S2	3.70±0.09a	0.049±0.003ab	14.63±0.35bc	303.65±6.29a
S3	3.22±0.16a	0.056±0.002a	14.94±0.17b	215.57±8.18b
S4	3.10±0.28a	0.047±0.003b	11.94±0.48c	309.86±5.03a

¹⁾ S1: 砂-土-有机肥(体积比 2 : 1 : 1) Sand-soil-organic fertilizer (volume ratio of 2 : 1 : 1); S2: 砂-土-复合肥(体积比 2 : 1 : 1) Sand-soil-compound fertilizer (volume ratio of 2 : 1 : 1); S3: 砂-土(体积比 2 : 1) Sand-soil (volume ratio of 2 : 1); S4: 土-有机肥(体积比 9 : 1) Soil-organic fertilizer (volume ratio of 9 : 1). 同列中不同小写字母表示在不同土壤基质间差异显著($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ($P < 0.05$) between different soil substrates.

2.1.4 不同土壤基质中四翼滨藜叶片的叶绿素荧光参数 结果(表 3)显示:4 种土壤基质中四翼滨藜叶片的实际光量子产量、表观电子传递速率和光化学猝灭系数均无显著差异。砂-土-复合肥和土-有机肥中叶片的最大光量子产量(F_v/F_m)显著低于砂-土-有机肥和砂-土。砂-土-有机肥中叶片的非光化学猝灭系数(NPQ)显著高于另 3 种土壤基质。

与砂-土相比,砂-土-有机肥中四翼滨藜叶片的 NPQ 升高了 34.32%;砂-土-复合肥中叶片的 F_v/F_m 降低了 7.44%。与土-有机肥相比,砂-土-有机肥中叶片的 NPQ 升高了 50.24%, F_v/F_m 升高了 16.99%。
2.1.5 土壤基质改良配方优选 主成分分析结果(表 4)显示:第 1 和第 2 主成分的特征值分别为

8.832 和 7.532,累计贡献率 86.128%。第 1 主成分中,土壤有机质含量、土壤有效磷含量、新生枝月相对生长速率、实际光量子产量、表观电子传递速率和非光化学猝灭系数的特征向量绝对值较高(均大于 0.90);第 2 主成分中,土壤电导率、土壤速效钾含量和冠幅的特征向量绝对值较高(均大于 0.89)。综合得分分析结果(表 5)显示:砂-土-有机肥排名第 1,为最优的土壤基质改良配方。

2.2 不同修复植物分析

2.2.1 不同修复植物根际土壤的理化性质 结果(图 3)显示:不同植物对土壤理化性质的影响各异。细枝羊柴、四翼滨藜和蒙古荜根际土壤含水量显著($P < 0.05$)高于另 4 种植物;沙拐枣根际土壤 pH 值最

表 3 不同土壤基质中四翼滨藜叶片的叶绿素荧光参数($\bar{X} \pm SE$)¹⁾
Table 3 Chlorophyll fluorescence parameters of *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt. leaves in different soil substrates ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

土壤基质 Soil substrate	实际光量子产量 Actual light quantum yield	表观电子传递速率 Apparent electron transport rate	光化学猝灭系数 Photochemical quenching coefficient	非光化学猝灭系数 Non-photochemical quenching coefficient	最大光量子产量 Maximum light quantum yield
S1	0.696±0.007a	12.860±0.213a	0.950±0.006a	0.317±0.008a	0.716±0.006a
S2	0.666±0.005a	12.310±0.164a	0.967±0.002a	0.214±0.006b	0.647±0.005b
S3	0.676±0.009a	12.506±0.214a	0.954±0.005a	0.236±0.007b	0.699±0.004a
S4	0.672±0.009a	12.609±0.332a	0.941±0.001a	0.211±0.009b	0.612±0.006c

¹⁾ S1: 砂-土-有机肥(体积比 2 : 1 : 1) Sand-soil-organic fertilizer (volume ratio of 2 : 1 : 1); S2: 砂-土-复合肥(体积比 2 : 1 : 1) Sand-soil-compound fertilizer (volume ratio of 2 : 1 : 1); S3: 砂-土(体积比 2 : 1) Sand-soil (volume ratio of 2 : 1); S4: 土-有机肥(体积比 9 : 1) Soil-organic fertilizer (volume ratio of 9 : 1). 同列中不同小写字母表示在不同土壤基质间差异显著($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ($P < 0.05$) between different soil substrates.

表 4 土壤基质评价指标的主成分分析
Table 4 Principal component analysis of evaluation indexes for soil substrates

主成分 Principal component	各指标的特征向量 ¹⁾ Eigenvector of each index ¹⁾											
	WC	pH	EC	OM	AN	AP	AK	R	h	A	Tr	Gs
1	-0.298	0.510	0.443	0.941	-0.548	0.959	-0.135	0.926	-0.478	-0.366	-0.723	-0.721
2	-0.850	0.858	-0.896	-0.332	0.381	0.009	-0.991	0.183	0.876	0.912	0.684	-0.355

主成分 Principal component	各指标的特征向量 ¹⁾ Eigenvector of each index ¹⁾							特征值 Eigenvalue	贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Cumulative contribution rate
	Pn	Ci	Y(Ⅱ)	ETR	qP	NPQ	F _v /F _m			
1	0.705	-0.123	0.932	0.968	-0.521	0.933	0.665	8.832	46.483	46.483
2	0.701	0.014	0.352	-0.180	0.853	0.360	0.550	7.532	39.645	86.128

¹⁾ WC: 土壤含水量 Soil water content; pH: 土壤 pH 值 Soil pH value; EC: 土壤电导率 Soil electric conductivity; OM: 土壤有机质含量 Soil organic matter content; AN: 土壤碱解氮含量 Soil alkali-hydrolyzable nitrogen content; AP: 土壤有效磷含量 Soil available phosphorus content; AK: 土壤速效钾含量 Soil available potassium content; R: 新生枝月相对生长速率 Monthly relative growth rate of new shoots; h: 株高 Height; A: 树冠面积 Canopy area; Tr: 蒸腾速率 Transpiration rate; Gs: 气孔导度 Stomatal conductance; Pn: 净光合速率 Net photosynthetic rate; Ci: 胞间 CO₂ 浓度 Inter-cellular CO₂ concentration; Y(Ⅱ): 实际光量子产量 Actual light quantum yield; ETR: 表观电子传递速率 Apparent electron transport rate; qP: 光化学猝灭系数 Photochemical quenching coefficient; NPQ: 非光化学猝灭系数 Non-photochemical quenching coefficient; F_v/F_m: 最大光量子产量 Maximum light quantum yield.

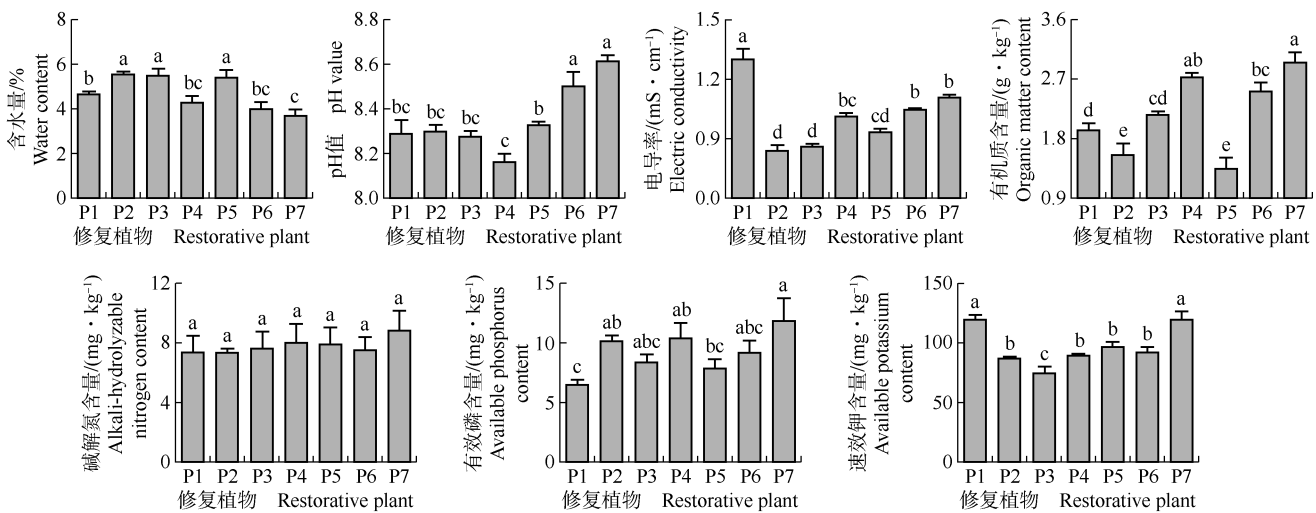
表 5 不同土壤基质的综合评价
Table 5 Comprehensive evaluation of different soil substrates

土壤基质 ¹⁾ Soil substrate ¹⁾	主成分得分 Score of principal component		综合得分 Comprehensive score	排名 Ranking
	1	2		
S1	3.999 0	0.943 3	2.592 5	1
S2	1.316 3	0.903 1	1.126 1	3
S3	1.048 4	0.521 9	0.806 1	4
S4	0.919 8	3.251 7	1.993 2	2

¹⁾ S1: 砂-土-有机肥 (体积比 2 : 1 : 1) Sand-soil-organic fertilizer (volume ratio of 2 : 1 : 1); S2: 砂-土-复合肥 (体积比 2 : 1 : 1) Sand-soil-compound fertilizer (volume ratio of 2 : 1 : 1); S3: 砂-土 (体积比 2 : 1) Sand-soil (volume ratio of 2 : 1); S4: 土-有机肥 (体积比 9 : 1) Soil-organic fertilizer (volume ratio of 9 : 1).

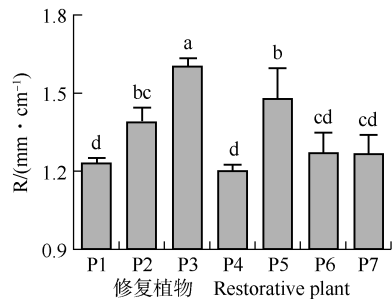
低,且与其他植物差异显著;柠条锦鸡儿根际土壤电导率最高,且与其他植物差异显著;短穗柽柳根际土壤的有机质含量、碱解氮含量和有效磷含量均最高,但各植物根际土壤碱解氮含量差异不显著;柠条锦鸡儿和短穗柽柳根际土壤速效钾含量显著高于另 5 种植物。

2.2.2 不同修复植物的新生枝月相对生长速率 结果(图 4)显示:7 种修复植物的新生枝月相对生长速率差异明显,其中,四翼滨藜的新生枝月相对生长速率最高,且与其他植物存在显著差异,沙拐枣的新生



P1: 柠条锦鸡儿 *Caragana korshinskii* Kom.; P2: 细枝羊柴 *Corethroedendron scoparium* (Fisch. et C. A. Mey.) Fisch. et Basiner; P3: 四翼滨藜 *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt.; P4: 沙拐枣 *Calligonum mongolicum* Turcz.; P5: 蒙古莢 *Caryopteris mongholica* Bunge; P6: 白刺 *Nitraria tangutorum* Bobrov; P7: 短穗柽柳 *Tamarix laxa* Willd. 同一柱形图中不同小写字母表示在不同植物间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same histogram indicate the significant differences ($P < 0.05$) between different plants.

图 3 不同修复植物根际土壤理化性质
Fig. 3 Physicochemical properties of rhizosphere soil of different restorative plants



P1: 柠条锦鸡儿 *Caragana korshinskii* Kom.; P2: 细枝羊柴 *Corethrodedron scoparium* (Fisch. et C. A. Mey.) Fisch. et Basiner; P3: 四翼滨藜 *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt.; P4: 沙拐枣 *Calligonum mongolicum* Turcz.; P5: 蒙古莠 *Caryopteris mongholica* Bunge; P6: 白刺 *Nitraria tangutorum* Bobrov; P7: 短穗柽柳 *Tamarix laxa* Willd. 不同小写字母表示在不同植物间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases indicate the significant differences ($P < 0.05$) between different plants.

图 4 不同修复植物的新生枝月相对生长速率 (R)
Fig. 4 Monthly relative growth rate of new shoots (R) of different restorative plants

表 6 不同修复植物叶片净光合速率的光响应曲线特征参数 ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾
Table 6 Characteristic parameters of light response curve of net photosynthetic rate of different restorative plant leaves ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

植物 Plant	暗呼吸速率/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) Dark respiration rate	表观量子效率/ ($\mu\text{mol} \cdot \mu\text{mol}^{-1}$) Apparent quantum efficiency	光补偿点/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) Light compensation point	光饱和点/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) Light saturation point	最大光合速率/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) Maximum photosynthetic rate
P1	1.262±0.342d	0.022±0.001b	43.308±3.516e	1 813.387±94.478a	20.557±1.235a
P2	5.126±0.231c	0.025±0.001b	211.734±20.586b	1 211.017±52.180b	5.095±0.543d
P3	4.976±0.254c	0.032±0.003b	144.497±3.071c	1 655.578±10.824a	21.970±0.854a
P4	8.864±0.292a	0.031±0.001b	311.782±38.051a	1 609.187±233.904a	7.597±0.610c
P5	1.796±0.120d	0.023±0.003b	53.175±2.615d	1 169.007±75.261b	6.985±0.063cd
P6	7.244±0.279b	0.059±0.005a	69.674±1.218e	1 761.500±31.554a	12.446±0.244b
P7	5.148±0.329c	0.032±0.003b	176.486±5.664bc	1 562.923±52.899a	13.660±0.648b

¹⁾ P1: 柠条锦鸡儿 *Caragana korshinskii* Kom.; P2: 细枝羊柴 *Corethrodedron scoparium* (Fisch. et C. A. Mey.) Fisch. et Basiner; P3: 四翼滨藜 *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt.; P4: 沙拐枣 *Calligonum mongolicum* Turcz.; P5: 蒙古莠 *Caryopteris mongholica* Bunge; P6: 白刺 *Nitraria tangutorum* Bobrov; P7: 短穗柽柳 *Tamarix laxa* Willd. 同列中不同小写字母表示在不同植物间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ($P < 0.05$) between different plants.

表 7 不同修复植物叶片的气体交换参数 ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾
Table 7 Gas exchange parameters of different restorative plant leaves ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

植物 Plant	蒸腾速率/($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) Transpiration rate	气孔导度/($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) Stomatal conductance	净光合速率/($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) Net photosynthetic rate	胞间 CO ₂ 浓度/($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$) Intercellular CO ₂ concentration
P1	2.88±0.13b	0.060±0.003b	18.13±1.26a	258.50±10.32cd
P2	3.69±0.10a	0.046±0.003c	8.12±0.21d	346.08±5.81a
P3	3.14±0.24b	0.031±0.002de	18.51±1.63a	289.22±11.77bc
P4	1.70±0.10d	0.026±0.002e	15.26±0.39b	224.32±25.92d
P5	2.18±0.12c	0.030±0.001de	7.98±0.34d	284.78±9.59bc
P6	1.71±0.10d	0.036±0.001d	10.97±0.51c	226.89±7.15d
P7	2.86±0.06b	0.070±0.002a	10.01±0.21cd	315.80±21.56ab

¹⁾ P1: 柠条锦鸡儿 *Caragana korshinskii* Kom.; P2: 细枝羊柴 *Corethrodedron scoparium* (Fisch. et C. A. Mey.) Fisch. et Basiner; P3: 四翼滨藜 *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt.; P4: 沙拐枣 *Calligonum mongolicum* Turcz.; P5: 蒙古莠 *Caryopteris mongholica* Bunge; P6: 白刺 *Nitraria tangutorum* Bobrov; P7: 短穗柽柳 *Tamarix laxa* Willd. 同列中不同小写字母表示在不同植物间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ($P < 0.05$) between different plants.

枝月相对生长速率最低。

2.2.3 不同修复植物叶片的光合特性

2.2.3.1 净光合速率的光响应曲线特征参数 结果(表 6)显示:沙拐枣叶片的暗呼吸速率和光补偿点显著高于另 6 种植物;白刺叶片的表现量子效率显著高于另 6 种植物;细枝羊柴和蒙古莠叶片的光饱和点显著低于另 5 种植物;柠条锦鸡儿和四翼滨藜叶片的最大光合速率显著高于另 5 种植物。

2.2.3.2 气体交换参数 结果(表 7)显示:沙拐枣和白刺叶片的蒸腾速率和胞间 CO₂ 浓度整体上显著低于另 5 种植物;短穗柽柳叶片的气孔导度显著高于另 6 种植物;柠条锦鸡儿和四翼滨藜叶片的净光合速率显著高于另 5 种植物。

2.2.4 不同修复植物的叶绿素荧光参数 结果(表 8)显示:柠条锦鸡儿叶片的实际光量子产量和表观

电子传递速率整体上显著高于另 6 种植物;柠条锦鸡儿、细枝羊柴和沙拐枣叶片的光化学猝灭系数显著高于白刺和短穗柽柳;蒙古莠的非光化学猝灭系数显著高于柠条锦鸡儿、细枝羊柴、沙拐枣、白刺和短穗柽柳;蒙古莠、四翼滨藜和沙拐枣的最大光量子产量显著高于另 4 种植物。

表 8 不同修复植物叶片的叶绿素荧光参数 ($\bar{X}\pm SE$)¹⁾
Table 8 Chlorophyll fluorescence parameters of different restorative plant leaves ($\bar{X}\pm SE$)¹⁾

植物 Plant	实际光量子产量 Actual light quantum yield	表观电子传递速率 Apparent electron transport rate	光化学猝灭系数 Photochemical quenching coefficient	非光化学猝灭系数 Non-photochemical quenching coefficient	最大光量子产量 Maximum light quantum yield
P1	0.721±0.002a	13.935±0.056a	0.938±0.002ab	0.256±0.006cd	0.628±0.002b
P2	0.709±0.005ab	13.213±0.163b	0.963±0.003a	0.217±0.025de	0.639±0.007b
P3	0.686±0.006b	12.674±0.189bc	0.932±0.007abc	0.341±0.002ab	0.707±0.005a
P4	0.695±0.002ab	12.852±0.084b	0.942±0.005ab	0.308±0.008bc	0.713±0.005a
P5	0.658±0.008c	12.990±0.272b	0.927±0.016bc	0.398±0.021a	0.683±0.006a
P6	0.633±0.005cd	12.234±0.109c	0.902±0.002cd	0.157±0.005e	0.556±0.005c
P7	0.620±0.005d	12.250±0.120c	0.894±0.003d	0.172±0.021e	0.607±0.002b

¹⁾ P1: 柠条锦鸡儿 *Caragana korshinskii* Kom.; P2: 细枝羊柴 *Corethrodedron scoparium* (Fisch. et C. A. Mey.) Fisch. et Basiner; P3: 四翼滨藜 *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt.; P4: 沙拐枣 *Calligonum mongolicum* Turcz.; P5: 蒙古莠 *Caryopteris mongholica* Bunge; P6: 白刺 *Nitraria tangutorum* Bobrov; P7: 短穗柽柳 *Tamarix laxa* Willd. 同列中不同小写字母表示在不同植物间差异显著 ($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ($P<0.05$) between different plants.

2.2.5 修复植物优选 主成分分析结果(表 9)显示:第 1 至第 5 主成分的特征值分别为 7.031、3.372、2.934、1.506 和 1.173,累计贡献率 94.212%。第 1 主成分中,土壤含水量、实际光量子产量和光化学猝灭系数的特征向量绝对值较高;第 2 主成分中,土壤 pH 值和土壤速效钾含量的特征向量绝对值较高;第 3 主成分中,土壤有机质含量和土壤有效磷含量的特征向量绝对值较高;第 4 主成分中,蒸腾速率和胞间 CO₂ 浓度的特征向量绝对值较高;第 5 主成分中,非光化学猝灭系数和最大光量子产量的特征向量绝对值较高。综合评价分析结果(表 10)显示:短穗柽柳为最优修复植物,白刺次之。

表 9 修复植物评价指标的主成分分析
Table 9 Principal component analysis of evaluation indicators for restorative plants

主成分 Principal component	各指标的特征向量 ¹⁾ Eigenvector of each index ¹⁾										
	WC	pH	EC	OM	AN	AP	AK	R	Tr	Gs	Pn
1	-0.836	0.066	0.331	-0.156	-0.490	-0.248	-0.179	-0.144	0.249	-0.131	0.581
2	0.299	0.922	-0.493	0.220	0.278	-0.202	0.952	-0.549	0.042	0.744	0.237
3	0.190	-0.038	-0.560	0.824	0.730	0.853	0.029	-0.325	-0.083	0.203	0.053
4	0.161	-0.334	0.449	-0.396	0.107	0.250	0.074	0.379	0.906	0.463	-0.372
5	-0.350	-0.176	0.363	-0.181	0.312	-0.252	-0.119	0.532	-0.039	-0.410	0.267

主成分 Principal component	各指标的特征向量 ¹⁾ Eigenvector of each index ¹⁾						特征值 Eigenvalue	贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Cumulative contribution rate
	Ci	Y(Ⅱ)	ETR	qP	NPQ	F _v /F _m			
1	-0.109	0.947	0.707	0.816	0.242	0.500	7.031	41.357	41.357
2	-0.075	-0.033	0.380	-0.277	-0.248	-0.319	3.372	19.837	61.194
3	0.021	-0.264	-0.536	-0.334	-0.319	0.135	2.934	17.258	78.452
4	0.990	0.147	0.187	0.279	-0.089	0.034	1.506	8.859	87.311
5	0.031	0.098	0.085	0.082	0.860	0.790	1.173	6.901	94.212

¹⁾ WC: 土壤含水量 Soil water content; pH: 土壤 pH 值 Soil pH value; EC: 土壤电导率 Soil electric conductivity; OM: 土壤有机质含量 Soil organic matter content; AN: 土壤碱解氮含量 Soil alkali-hydrolyzable nitrogen content; AP: 土壤有效磷含量 Soil available phosphorus content; AK: 土壤速效钾含量 Soil available potassium content; R: 新生枝月相对生长速率 Monthly relative growth rate of new shoots; Tr: 蒸腾速率 Transpiration rate; Gs: 气孔导度 Stomatal conductance; Pn: 净光合速率 Net photosynthetic rate; Ci: 胞间 CO₂ 浓度 Intercellular CO₂ concentration; Y(Ⅱ): 实际光量子产量 Actual light quantum yield; ETR: 表观电子传递速率 Apparent electron transport rate; qP: 光化学猝灭系数 Photochemical quenching coefficient; NPQ: 非光化学猝灭系数 Non-photochemical quenching coefficient; F_v/F_m: 最大光量子产量 Maximum light quantum yield.

表 10 不同修复植物的综合评价
Table 10 Comprehensive evaluations of different restorative plants

植物 ¹⁾ Plant ¹⁾	主成分得分 Score of each principal component					综合得分 Comprehensive score	排名 Ranking
	1	2	3	4	5		
P1	-0.761 9	-0.554 2	1.493 5	2.021 4	1.223 0	0.102 1	7
P2	-0.084 0	2.361 3	1.347 3	-0.227 7	0.967 9	0.756 6	5
P3	-0.250 7	3.047 3	1.140 1	1.404 2	-0.591 7	0.829 1	4
P4	-0.039 7	1.601 2	-0.228 5	3.197 5	0.403 0	0.608 1	6
P5	0.751 7	2.420 2	1.517 9	1.485 0	-0.256 2	1.238 0	3
P6	2.726 5	0.749 9	-0.487 6	3.156 3	2.362 9	1.735 3	2
P7	3.806 1	0.742 7	-2.178 3	1.501 9	2.555 7	1.756 6	1

¹⁾ P1: 柠条锦鸡儿 *Caragana korshinskii* Kom.; P2: 细枝羊柴 *Corethroedendron scoparium* (Fisch. et C. A. Mey.) Fisch. et Basiner; P3: 四翼滨藜 *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt.; P4: 沙拐枣 *Calligonum mongolicum* Turcz.; P5: 蒙古莠 *Caryopteris mongholica* Bunge; P6: 白刺 *Nitraria tangutorum* Bobrov; P7: 短穗柽柳 *Tamarix laxa* Willd.

3 讨论和结论

本研究中,不同土壤基质改良配方对四翼滨藜叶片的光合特性和叶绿素荧光特性有较大影响。光合作用是影响植物生长发育的关键因子^[27],气体交换参数和叶绿素荧光参数是表征植物光合作用的重要指标,气体交换参数能够反映叶片特性与叶片光合生理特性之间的协同适应机制^[28],叶绿素荧光参数可有效反映植物叶片光合系统对光能的吸收、传递、耗散及分配情况^[29]。首先,在砂-土(体积比 2:1)的基础上施加有机肥,四翼滨藜叶片的净光合速率增加了 23.90%,这可能与土壤理化性质的变化有关^[30-32],与砂-土相比,施加有机肥的土壤基质电导率降低了 31.19%,有机质含量和有效磷含量小幅提高。其次,在砂-土的基础上施加有机肥,四翼滨藜叶片的胞间 CO₂ 浓度升高了 34.17%,气孔导度降低了 44.64%,但蒸腾速率无显著性变化,这与其他学者研究结果^[30]相同,即施加有机肥能显著提高胞间 CO₂ 浓度,降低气孔导度,但蒸腾作用的变化在时间尺度上存在差异。最后,在砂-土的基础上施加有机肥,四翼滨藜叶片的非光化学猝灭系数升高了 34.32%,表明施加有机肥后四翼滨藜叶片的光保护能力增强,植物通过提高非光化学猝灭以耗散过剩光能来保护光合器官,使其对环境胁迫的适应能力增强,在干旱和高温的逆境条件下维持一定的光合作用^[33-34],此外,与土-有机肥(体积比 9:1)相比,砂-土-有机肥(体积比 2:1:1)中四翼滨藜叶片的非光化学猝灭系数显著升高也体现了这一点。

本研究中,不同抗逆植物叶片的光合特性和叶绿

素荧光特性具有较大差异。干旱区石灰岩矿山废弃地土壤养分含量低、水资源匮乏、气候条件恶劣,土壤立地条件差,严重影响植物生长。干旱区植物往往具有独特的生长策略以应对极端恶劣环境(例如感知缺水信号并启动应对策略)^[35]。一般来说,这些植物的叶片净光合速率、光饱和点和光补偿点相对较高^[18,36-37]。Guan 等^[38]提出在干旱区干热环境中植物电子传递速率和光合速率较高,最大羧化速率较低。王方琳等^[39]比较了 3 种常见荒漠植物的光合和叶绿素荧光参数,认为耐旱能力由强到弱依次为白刺、梭梭[*Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge]、沙蒿(*Artemisia desertorum* Spreng.)。本研究中,细枝羊柴的蒸腾速率和胞间 CO₂ 浓度显著高于其他植物,短穗柽柳的气孔导度显著高于其他植物,柠条锦鸡儿的实际光量子产量和表观电子传递速率整体上显著高于其他植物,蒙古莠、沙拐枣和四翼滨藜的最大光量子产量显著高于其他植物,蒙古莠和四翼滨藜的非光化学猝灭系数显著高于其他植物,柠条锦鸡儿和四翼滨藜的净光合速率显著高于其他植物。首先,不同植物在长期干旱环境中进化出不同的结构,例如,细枝羊柴和沙拐枣具有同化茎,能够更好地适应干旱环境^[18]。其次,在面对干旱区石灰岩矿山废弃地土壤养分含量低、高温和干旱等极端环境时,不同抗逆性灌木的生理可塑性机制(水分利用效率、渗透调节等)使其能够调整自身的生理特性和功能以应对环境变化^[40]。有研究表明玉牛角属(*Duvalia* Haw.)植物在长期干旱条件下水资源利用率得到改善,非光化学猝灭系数升高,反映了其光保护能力在长期干旱条件下有所提升^[41]。最后,不同植物的光保护机制能够在减少植物受到光损伤的同时,维持光

合作用的正常进行^[33]。例如,细枝羊柴和沙拐枣叶片相对较小,有助于降低强光对叶片的伤害,但叶片仍能进行正常的光合作用;还有一些植物在胁迫条件下既能调节其净光合速率以避免光抑制,又能使光合作用维持在相对稳定的状态^[42]。

水资源匮乏是干旱区石灰岩矿山废弃地植物生长过程中的主要限制因子之一,水资源匮乏不利于植物的光合作用、呼吸作用和气孔运动,影响植物生理代谢,进而影响植物生长发育,而植物地上生物量的减少又会直接影响植物的光合产物^[32,43]。干旱区植物通常会采取一些策略来实现光合产物与水资源消耗关系的平衡。有学者研究了植物在干旱环境中光合产物积累及光合产物分配格局,发现植物特定器官的生长通常通过牺牲其他器官的生长来实现^[44]。本研究中所有植物叶片的最大光量子产量为0.556~0.713,低于0.8,这是因为7种植物吸收和转化光能均受到叶片缺水的限制,然而这些植物能够正常存活和生长说明他们已经适应了这种恶劣的环境。主成分分析得到的最优生态修复模式为在砂-土-有机肥中种植短穗柽柳。然而,本研究仅分析了植物在特定环境下叶片光合特性和叶绿素荧光特性,后续研究还应该关注干旱区修复植物的水资源消耗与光合产物产量之间的定量关系,以期在不同环境中使用适宜的修复植物,从而达到最优的修复效果。

参考文献:

- [1] LARONDELLE N, HAASE D. Valuing post-mining landscapes using an ecosystem services approach-an example from Germany[J]. *Ecological Indicators*, 2012, 18: 567-574.
- [2] DIXON K, MACDONALD V, D'AGUI H. Advances in mining restoration[J]. *Restoration Ecology*, 2022, 30(Suppl. 1): e13776.
- [3] GOLOS P J, DIXON K W. Waterproofing topsoil stockpiles minimizes viability decline in the soil seed bank in an arid environment[J]. *Restoration Ecology*, 2014, 22(4): 495-501.
- [4] D'AGUI H M, VAN DER HEYDE M E, NEVILL P G, et al. Evaluating biological properties of topsoil for post-mining ecological restoration: different assessment methods give different results[J]. *Restoration Ecology*, 2022, 30(Suppl. 1): e13738.
- [5] MAO P L, LIN Q Z, PANG Y X, et al. Eco-physiological response mechanism of *Tamarix chinensis* to soil water changes in coastal wetlands of the Yellow River Delta[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2023, 10: 1231928.
- [6] HERRICK J E, SCHUMAN G E, RANGO A. Monitoring ecological processes for restoration projects [J]. *Journal for Nature Conservation*, 2006, 14: 161-171.
- [7] KALIN M, WHEELER W N. Ecological perspectives in restoring mine waste management areas [J]. *Precedia Environmental Sciences*, 2011, 9: 90-95.
- [8] 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*, 2022, 14: 427.
- [9] 张悦, 张会慧, 周琳, 等. 控水灌溉对蓝莓园土壤养分和植株生长与叶绿素荧光及果实品质的影响[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2015, 41(5): 503-507.
- [10] ZHANG H H, XU N, SUI X, et al. Photosystem II function response to drought stress in leaves of two alfalfa (*Medicago sativa*) varieties[J]. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2018, 20: 1012-1020.
- [11] 曹思源, 袁颖, 张森, 等. 典型干旱区石灰岩矿山生态地质环境评价及修复治理[J/OL]. *矿业研究与开发*, (2024-08-20) [2024-09-15]. <https://doi.org/10.13827/j.cnki.kyyk.20240819.001>.
- [12] 孙熠. 江仓矿区不同土壤基质和坡向下三种植物适应性研究[D]. 西宁: 青海大学, 2022: 7-38.
- [13] GAO G L, FENG Q, LIU X D, et al. The photosynthesis of *Populus euphratica* Oliv. is not limited by drought stress in the hyper-arid zone of Northwest China[J]. *Forests*, 2022, 13: 2096.
- [14] 施梦娇, 李斌, 伊力塔, 等. 美洲黑杨幼苗生长和生理生态指标对干旱-复水响应的性别差异[J]. *植物生态学报*, 2023, 47(8): 1159-1170.
- [15] 谢丰璞, 王楠, 高静, 等. 干旱及复水循环对苗期药用大黄的叶片光合碳同化功能和光化学活性的影响[J]. *西北植物学报*, 2023, 43(11): 1872-1887.
- [16] WASAYA A, MANZOOR S, YASIR T A, et al. Evaluation of fourteen bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes by observing gas exchange parameters, relative water and chlorophyll content, and yield attributes under drought stress [J]. *Sustainability*, 2021, 13: 4799.
- [17] 程平, 汤东, 王凯, 等. 天山北坡前山带12种植物对干旱胁迫和复水的生理响应及抗旱性评价[J]. *西北植物学报*, 2024, 44(5): 691-705.
- [18] ZHOU Z J, SU P X, WU X K, et al. Leaf and canopy photosynthesis of four desert plants: considering different photosynthetic organs[J]. *Photosynthesis Research*, 2022, 151: 265-277.
- [19] 方宇辉, 华夏, 韩留鹏, 等. 非生物胁迫因素对小麦光合作用的影响研究进展[J]. *河南农业科学*, 2023, 52(10): 1-13.
- [20] 尹豪杰, 王荣荣, 蒋桂英, 等. 春小麦光合生理和产量对干旱-复水的响应[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(6): 134-144.
- [21] 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.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 14-109.
- [23] 李雪琴, 卢艺苗, 黄爱梅, 等. 亚热带10种蕨类植物光响应模型拟合及光合特性研究[J]. *生态学报*, 2022, 42(8):

- 3333-3344.
- [24] 叶子飘. 光合作用对光和 CO₂ 响应模型的研究进展[J]. 植物生态学报, 2010, 34(6): 727-740.
- [25] YE Z P, YU Q. A coupled model of stomatal conductance and photosynthesis for winter wheat [J]. *Photosynthetica*, 2008, 46(4): 637-640.
- [26] 刘世增, 李昌龙, 纪永福, 等. 甘肃省民勤连古城自然保护区沙木蓼种群的结构与动态[J]. 生态学报, 2017, 37(8): 2763-2769.
- [27] KANG H X, TOMIMATSU H, ZHU T, et al. Contributions of species shade tolerance and individual light environment to photosynthetic induction in tropical tree seedlings [J]. *Tree Physiology*, 2022, 42: 1975-1987.
- [28] 方海富, 冯为迅, 罗来聪, 等. 氮沉降背景下土壤微生物对入侵植物乌柏叶绿素荧光特征的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(23): 9377-9387.
- [29] 李英浩, 刘景辉, 赵宝平, 等. 干旱胁迫下腐植酸对燕麦叶绿素荧光特性的调控效应[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(4): 26-33.
- [30] VIENCZ T, SANTANA K, AYUB R A, et al. Development, photosynthesis and yield of blueberry cultivar 'Climax' growth with different substrates and nitrogen fertilization under protected cultivation[J]. *Ciência Rural*, 2021, 51(6): e20190367.
- [31] MUÑOZ-VEGA P, PAILLÁN H, SERRI H, et al. Effects of organic fertilizers on the vegetative, nutritional, and productive parameters of blueberries 'Corona', 'Legacy', and 'Liberty' [J]. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 2016, 76(2): 201-212.
- [32] NGUYEN T T N, WALLACE H M, XU C Y, et al. Short-term effects of organo-mineral biochar and organic fertilisers on nitrogen cycling, plant photosynthesis, and nitrogen use efficiency [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17: 2763-2774.
- [33] 杨文强, 林荣呈, 端木德强, 等. 近 10 年光合作用领域若干重要研究进展[J]. 植物生理学报, 2024, 60(2): 211-247.
- [34] 石聪聪. 等水势下芒颖大麦草响应盐碱与干旱胁迫的生理基础及转录组学分析[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2023: 19-29.
- [35] ASPINWALL M J, BLACKMAN C J, MAIER C, et al. Aridity drives clinal patterns in leaf traits and responsiveness to precipitation in a broadly distributed Australian tree species [J]. *Plant-Environment Interactions*, 2023, 4: 70-85.
- [36] 党晓宏, 蒙仲举, 高永, 等. 西鄂尔多斯地区 5 种荒漠灌木光合固碳能力研究[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(11): 128-135.
- [37] 王会提, 曾凡江, 张波, 等. 不同种植方式下柽柳光合生理参数光响应特性研究[J]. 干旱区地理, 2015, 38(4): 753-762.
- [38] GUAN T Y, ZHOU J H, ZHANG X L, et al. The effect of photosynthetic parameters on species acclimation in an arid mountainous region of China[J]. *Turkish Journal of Botany*, 2018, 42: 423-439.
- [39] 王方琳, 柴成武, 赵鹏, 等. 3 种荒漠植物光合及叶绿素荧光对干旱胁迫的响应及抗旱性评价[J]. 西北植物学报, 2021, 41(10): 1755-1765.
- [40] 彭兰, 周晓兵, 陶冶, 等. 干旱对梭梭水力性状及生理生化特性的影响[J]. 生态学杂志, 2023, 42(2): 257-265.
- [41] MASRAHI Y S, AL-TURKI T A, SAYED O H. Photosynthetic adaptation and survival strategy of *Duvalia velutina* in an extremely arid environment[J]. *Photosynthetica*, 2015, 53(4): 555-561.
- [42] XU C, HE C G, WANG Y J, et al. Effect of drought and heat stresses on photosynthesis, pigments, and xanthophyll cycle in alfalfa (*Medicago sativa* L.) [J]. *Photosynthetica*, 2020, 58(5): 1226-1236.
- [43] 韩睿婷, 韩丽霞, 张鸽香. 干旱胁迫对美国流苏树幼苗光合特性和叶片结构的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2023, 32(3): 61-70.
- [44] 谷艳芳, 丁圣彦, 高志英, 等. 干旱胁迫下冬小麦光合产物分配格局及其与产量的关系[J]. 生态学报, 2010, 30(5): 1167-1173.

(责任编辑: 吴芯夷)