



西北干旱半干旱地区节水增汇植物种类筛选

马沈轲 王春梅 赵春林 豆小敏

Screening of water-saving and sink-enhancing plant species in arid and semi-arid regions of Northwest China

Ma Shenke, Wang Chunmei, Zhao Chunlin, Dou Xiaomin

引用本文:

马沈轲, 王春梅, 赵春林, 豆小敏. 西北干旱半干旱地区节水增汇植物种类筛选[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(8):122–131. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240041

Ma Shenke, Wang Chunmei, Zhao Chunlin, Dou Xiaomin. Screening of water-saving and sink-enhancing plant species in arid and semi-arid regions of Northwest China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(8):122–131. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240041

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240041>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

全球森林碳汇功能评估研究进展

Review on the evaluation of global forest carbon sink function

北京林业大学学报, 2022, 44(10): 1–10. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220242>

北京市森林碳汇能力评价

Evaluation of forest carbon sequestration capacity in Beijing

北京林业大学学报, 2023, 45(12): 108–119. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220436>

中国森林碳汇与林业经济发展耦合及长期变化特征分析

Coupling and long-term change characteristics analysis of forest carbon sequestration and forestry economic development in China

北京林业大学学报, 2022, 44(10): 129–141. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220257>

采伐对大兴安岭非连续冻土区毛赤杨沼泽碳源/汇的影响

Impact of harvesting on carbon source/sink of *Alnus sibirica* var. *hirsuta* swamps in Daxing'anling Mountains discontinuous permafrost region of northeastern China

北京林业大学学报, 2020, 42(3): 1–13. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190074>

基于改进CASA模型的晋北地区植被NPP时空动态及气候影响研究

Spatiotemporal dynamics and climate impact of vegetation NPP in the northern Shanxi Province region based on the improved CASA model

北京林业大学学报, 2023, 45(7): 47–60. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220236>

极端干旱区绿洲植物叶功能性状及其对土壤水盐因子的响应

Leaf functional traits of oasis plants in extremely arid areas and its response to soil water and salt factors

北京林业大学学报, 2019, 41(10): 20–29. <https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20190128>

DOI:10.12171/j.1000-1522.20240041

西北干旱半干旱地区节水增汇植物种类筛选

马沈轲 王春梅 赵春林 豆小敏

(北京林业大学环境科学与工程学院, 北京 100083)

摘要:【目的】为改善西北地区的生态环境, 践行可持续发展理念, 促进地区生态修复与节水增汇, 有必要开展西北干旱半干旱地区生存的灌木植物适宜性研究。【方法】以现场勘察和文献调研当地优势植物为基础, 选择 10 种草本植物和 7 种灌木为研究对象, 进行田间试验, 测定它们的生长性状指标、光合生理指标、生物量和碳储量指标, 运用层次分析法分别对草本植物和灌木进行节水增汇的综合评价, 以此筛选适生植物种类。【结果】(1)草本植物中, 高冰草、沙打旺和早熟禾的水分利用效率较高, 灌木中沙地柏、柠条锦鸡儿和紫穗槐的水分利用效率较高; (2)草本植物中总碳储量较高的是紫花苜蓿、草木樨和沙打旺, 灌木总碳储量较高的是紫穗槐、柠条锦鸡儿和沙棘; (3)节水增汇草本植物排序从高到低依次为紫花苜蓿、草木樨、沙打旺、蜀葵、披碱草、沙蒿、高冰草、高羊茅、黑麦草、早熟禾, 节水增汇灌木排序从高到低依次为紫穗槐、柠条锦鸡儿、沙棘、沙地柏、胡枝子、沙柳、花棒。【结论】本研究筛选出了适宜在西北干旱半干旱地区生存的节水增汇植物种类, 为该地区植物配置提供参考, 为推动生态环境改善、地区生态重建和碳汇增加提供科技支撑。

关键词: 节水; 增加碳汇; 层次分析法; 综合评价; 西北地区

中图分类号: S727.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2024)08-0122-10

引文格式: 马沈轲, 王春梅, 赵春林, 等. 西北干旱半干旱地区节水增汇植物种类筛选 [J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(8): 122-131. Ma Shenke, Wang Chunmei, Zhao Chunlin, et al. Screening of water-saving and sink-enhancing plant species in arid and semi-arid regions of Northwest China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(8): 122-131.

Screening of water-saving and sink-enhancing plant species in arid and semi-arid regions of Northwest China

Ma Shenke Wang Chunmei Zhao Chunlin Dou Xiaomin

(School of Environmental Science & Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] The study of shrub and grass plants suitable for survival in the arid and semi-arid regions of Northwest China can not only improve the ecological environment of Northwest China, but also conform to the concept of sustainable development, which is of far-reaching significance for the ecological restoration and the water-saving and carbon-sink-enhancing work in the region. [Method] Based on the field survey and literature research of local dominant plants, this study selected ten herbaceous plants and seven shrubs as research objects. Field experiments were conducted, then their growth trait indexes, photosynthesis physiological indexes, biomass and carbon storage indexes were tested. The hierarchical analysis method was applied to comprehensively evaluate the water-saving and carbon-sink-enhancing performance of herbaceous plants and shrubs, respectively, so as to screen out the suitable plant species. [Result] (1) In herbaceous plants, water-use efficiencies of *Agropyron elongatum*, *Astragalus laxmannii* and *Poa annua* were high. In shrubs, water-use efficiencies of *Juniperus sabina*, *Caragana korshinskii*, and *Amorpha fruticosa* were high. (2) In herbaceous plants, total carbon stocks of *Medicago sativa*, *Melilotus officinalis*, and *Astragalus laxmannii* were high. In shrubs, total carbon stocks of *Amorpha fruticosa*, *Caragana korshinskii*, and *Hippophae rhamnoides* were high. (3) Water-saving and carbon-sink-enhancing

收稿日期: 2024-02-22 修回日期: 2024-06-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971024), 北京市自然科学基金项目(8232039)。

第一作者: 马沈轲。主要研究方向: 植物生态修复。Email: 15537222830@163.com 地址: 100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学环境科学与工程学院。

责任作者: 豆小敏, 博士, 教授。主要研究方向: 流域生态修复。Email: doudxiaomin@bjfu.edu.cn 地址: 同上。

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

herbs ranked in descending order of *Medicago sativa* > *Melilotus officinalis* > *Astragalus laxmannii* > *Alcea rosea* > *Elymus dahuricus* > *Artemisia desertorum* > *Agropyron elongatum* > *Festuca elata* > *Lolium perenne* > *Poa annua*. Water-saving and arbon-sink-enhancing shrubs ranked in descending order of *Amorpha fruticosa* > *Caragana korshinskii* > *Hippophae rhamnoides* > *Juniperus sabina* > *Lespedeza bicolor* > *Salix cheilophila* > *Corethroedendron scoparium*. [Conclusion] The study has screened out water-saving and carbon-sink-enhancing plant species suitable for survival in the arid and semi-arid regions of Northwest China. It can not only provide a basis for the plant configuration in the region, and improve ecological environment, but also provide scientific and technological support for ecological reconstruction and increase of carbon sinks in the region.

Key words: water-saving; carbon sink enhancing; hierarchical analysis method; comprehensive assessment; northwest region

在全球气候变化及人类活动的影响下,我国西北干旱半干旱地区正面临着水资源短缺、植被退化、土壤侵蚀等严峻的生态问题^[1-2]。因此,针对西北矿区的生态问题,筛选该地区节水增汇植物种类,对提高植物覆盖率、改善生态环境和增强碳汇能力等具有重要意义,符合可持续发展理念。

通常情况下,植物修复所能实现的理想状况是植物和生态环境互相促进、共同演化,而影响这种协同演化的主要因子是复绿性植物的物种,因此,对植物种类的合理选择非常重要^[3]。由于西北干旱半干旱地区水资源极为有限,水分成为植物生长的重要限制因子。因此,在对植物进行筛选时,应首先考虑植物的耐干旱能力,选用抗逆性强、耗水少、水分利用率高的植物^[4]。研究表明,植物可通过调节气孔等生理特征来影响植物的水分利用效率^[5-6]。深根系植物可以吸收深层土壤中的水分,以维持其生长和蒸腾作用,帮助植物抵御干旱环境^[7]。因此,通过考虑植物与水分利用有关的生理特征,以及在缺水地区深根系植物的优势,进行植物的筛选。

在西北地区,植物的增汇潜力是一个有待深入挖掘的方向。通过筛选具有较大生物量和含碳率的植物种类,可以增加区域内植物的固碳潜力。草本植物因其再生能力强、年生物量大、可持续种植、对环境要求不高等优点^[8],使其生物量和碳储量高于灌木,因此种植草本植物能更迅速地实现生态复绿。草原土壤较高的固碳速率与地上和地下生物量之间存在着较强的相关性^[9]。研究表明,植物的根长与植物的生长发育有着密切的关系^[10],且发达的根系可以进一步影响植物的生物量^[6,11]。豆科植物的根瘤

菌可以固氮,改良土壤瘠薄的营养状况,提高生产力,进而提高碳固持能力^[12];而禾本科植物早期生长较快,快速覆盖地表减少水分蒸发,依靠与根系菌的共生关系,可以促进自身生长发育,进而提高其固碳能力^[13]。

节水与增碳汇在一定程度上是对立的两个方面,减少水分供应对许多植物的生物量是有负面影响的。因此,在水分缺乏、土壤瘠薄的西北地区,综合考虑植物节水和碳增汇的双重需求,基于文献调研和现场踏勘,对自然生长分布较广、人工重建使用较多的 17 种灌草植物进行试验,监测其生长和生理状况,通过层次分析法对灌草植物进行综合评价,为西北干旱半干旱矿区植被重建、节水增汇提供重要的技术支撑。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

试验区位于陕西北部榆林矿区,冬季寒冷,夏季炎热,四季多风,降水量少而蒸发量大。该地区年均气温 7.8 ~ 8.6 ℃,年平均降水量 365.7 ~ 440.8 mm,蒸发量约为降水量的 3 倍。降水季节分配不均,7—9 月份降水量占全年降水的 60% 以上,最高降水量出现在 8 月。研究区土壤类型主要为风沙土和黄绵土。矿区土壤 pH 值 8.12,为碱性土壤,有机质和全氮含量分别为 3.25 g/kg 和 0.60 g/kg,速效钾和全钾含量分别为 116 mg/kg 和 4.36 g/kg,速效磷和全磷含量分别为 3.99 mg/kg 和 0.19 g/kg,氮、磷、钾含量都偏低,土壤比较瘠薄(表 1)。

基于文献调研和现场踏勘,榆林地区常见的

表 1 矿区土壤理化性质

Tab. 1 Physical and chemical properties of soil in mining area

pH值 pH value	土壤密度 Soil density/ (g·cm ⁻³)	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen/ (g·kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus/ (mg·kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus/ (g·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium/ (mg·kg ⁻¹)	全钾 Total potassium/ (g·kg ⁻¹)
8.12 ± 0.02	1.39 ± 0.27	3.25 ± 0.30	0.60 ± 0.06	3.99 ± 0.16	0.19 ± 0.04	116 ± 12.48	4.36 ± 0.22

灌木有紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)、柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、沙地柏(*Juniperus sabina*)和沙柳(*Salix cheilophila*)等^[14], 草本植物有紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、沙打旺(*Astragalus laxmannii*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)、黑麦草(*Lolium perenne*)和草木樨(*Melilotus officinalis*)等^[15-16]。研究区自然状况下灌木林盖度约20%, 草本植物盖度约36%^[14]。

1.2 试验设计

西北干旱半干旱矿区环境条件恶劣, 所选植物应具有先锋植物的特点, 即抗逆性强、生长速度快、生物量大, 从而迅速改善西北地区的生态环境, 达到节水增汇的目的。此外, 应考虑以乡土植物为主的原则, 使其与当地原有的生物群落结构相协调^[17-18]。

因此, 本试验选择10种草本植物和7种灌木在5—8月进行田间试验(表2), 其中草本植物样方为1.5 m × 1.5 m, 灌木样方为3 m × 3 m, 草本植物采用撒播, 灌木采用条播, 每种处理3个重复。生长过程中测定生长性状指标、光合生理指标, 在8月份测定生物量和碳储量指标, 采用层次分析法从节水和增汇两个角度进行适生植物种类的筛选。

1.3 现场监测和室内分析

1.3.1 植物生长性状测定

在试验末期用卷尺测定植物株高和根长, 每个植物样方测定5次, 结果取平均值。

在试验中每月用方格网法测定植物盖度并进行统计整理。

1.3.2 灌草植物光合生理指标测定

在阳光充足的10:00—11:00, 选取植物上部没有遮挡、朝向尽量相同的成熟叶片, 测量光合生理指标。用LI-6400 XT便携式光合仪(LI-COR, Lincoln,

USA)测定叶片的净光合速率(net photosynthetic rate, P_n)、气孔导度(stomatal conductance, G_s)和蒸腾速率(transpiration rate, T_r)。利用净光合速率和蒸腾速率计算不同灌草植物的水分利用效率(water use efficiency, WUE)^[19]。

$$WUE = \frac{P_n}{T_r} \quad (1)$$

1.3.3 植物和土壤样品采集与分析

在每个样方内, 首先将地上生物量齐根收获, 放入事先标记的样袋中; 同时, 根据梅花五点采样法, 用土钻(直径约为50 mm)采集地下0~30 cm的土壤, 然后仔细分离出植物的根, 将植物根系和土壤做好标记带回实验室。

将收集好的地上、地下植物样品测量鲜质量, 然后用水清洗干净, 120 ℃下杀青30 min后, 65 ℃烘干至恒质量后粉碎, 过100目筛; 土壤样品带回实验室后风干、研磨, 过100目筛。用元素分析仪分别测定土壤和植物组织碳含量。

$$Q_D = BS \quad (2)$$

式中: Q_D 为灌草层碳储量(g/m^2), B 为灌草单位面积地上和地下生物量(g/m^2), S 为灌草植物碳含量(%)^[20-21]。

$$D_{\text{soc}} = CDE/100 \quad (3)$$

式中: D_{soc} 为土壤碳储量(kg/m^2), C 为土壤有机碳含量(g/kg), D 为土壤密度(g/cm^3), E 为土层厚度(cm)^[22]。

1.3.4 节水增汇植物筛选方法

层次分析法(analytical hierarchy process, AHP)是运用多因素分级处理来确定权重的方法, 是一种

表2 试验材料基本情况

Tab. 2 General situation of experimental materials

植物种 Plant species	科名 Family name	生活型 Life form	植物种 Plant species	科名 Family name	生活型 Life form
柠条锦鸡儿 <i>Caragana korshinskii</i>	豆科 Leguminosae	灌木 Shrub	沙打旺 <i>Astragalus laxmannii</i>	豆科 Leguminosae	多年生草本 Perennial herb
紫穗槐 <i>Amorpha fruticosa</i>	豆科 Leguminosae	落叶灌木 Deciduous shrub	早熟禾 <i>Poa annua</i>	禾本科 Gramineae	一年生草本 Annual herb
胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i>	豆科 Leguminosae	直立灌木 Upright shrub	高羊茅 <i>Festuca elata</i>	禾本科 Gramineae	多年生草本 Perennial herb
花棒 <i>Corethroedron scoparium</i>	豆科 Leguminosae	半灌木 Shrubbery	黑麦草 <i>Lolium perenne</i>	禾本科 Gramineae	多年生草本 Perennial herb
沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i>	胡颓子科 Elaeagnaceae	落叶灌木 Deciduous shrub	披碱草 <i>Elymus dahuricus</i>	禾本科 Gramineae	多年生草本 Perennial herb
沙柳 <i>Salix cheilophila</i>	杨柳科 Salicaceae	灌木 Shrub	高冰草 <i>Agropyron elongatum</i>	禾本科 Gramineae	多年生草本 Perennial herb
沙地柏 <i>Juniperus sabina</i>	柏科 Cupressaceae	匍匐灌木 Creeping shrub	蜀葵 <i>Alcea rosea</i>	锦葵科 Malvaceae	两年生草本 Biennial herb
草木樨 <i>Melilotus officinalis</i>	豆科 Leguminosae	一年生或二年生草本 Annual or biennial herb	沙蒿 <i>Artemisia desertorum</i>	菊科 Compositae	多年生草本 Perennial herb
紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	豆科 Leguminosae	多年生草本 Perennial herb			

定性、定量相结合,系统化、层次化的分析方法^[23]。通过建立综合评价体系,依据各评价指标的特性,计算相应的权重,并对参评的灌草植物各项指标进行打分,得出综合分值,从而对灌草植物的节水增汇特性进行排序^[24]。层次分析法综合评价的步骤是:明确问题并建立层次结构,建立判断矩阵,层次单排序,层次总排序和一致性检验^[25]。

确立综合评价体系和评价标准。节水增汇植物综合评价体系分为目标层、准则层、指标层和方案层。节水增汇灌草植物综合评价为目标层,生长状况指标、光合生理指标、生物量指标和碳储量指标构成准则层,蒸腾速率、净光合速率、气孔导度、水分利用效率、株高、根长、盖度、地上生物量、地下生物量、地上碳储量、地下碳储量、土壤碳储量共 12 个评价指标构成指标层。方案层是 10 种草本植物和

7 种灌木。对评价标准和专家打分法进行权重计算,最后对 12 个评价指标进行综合分析。

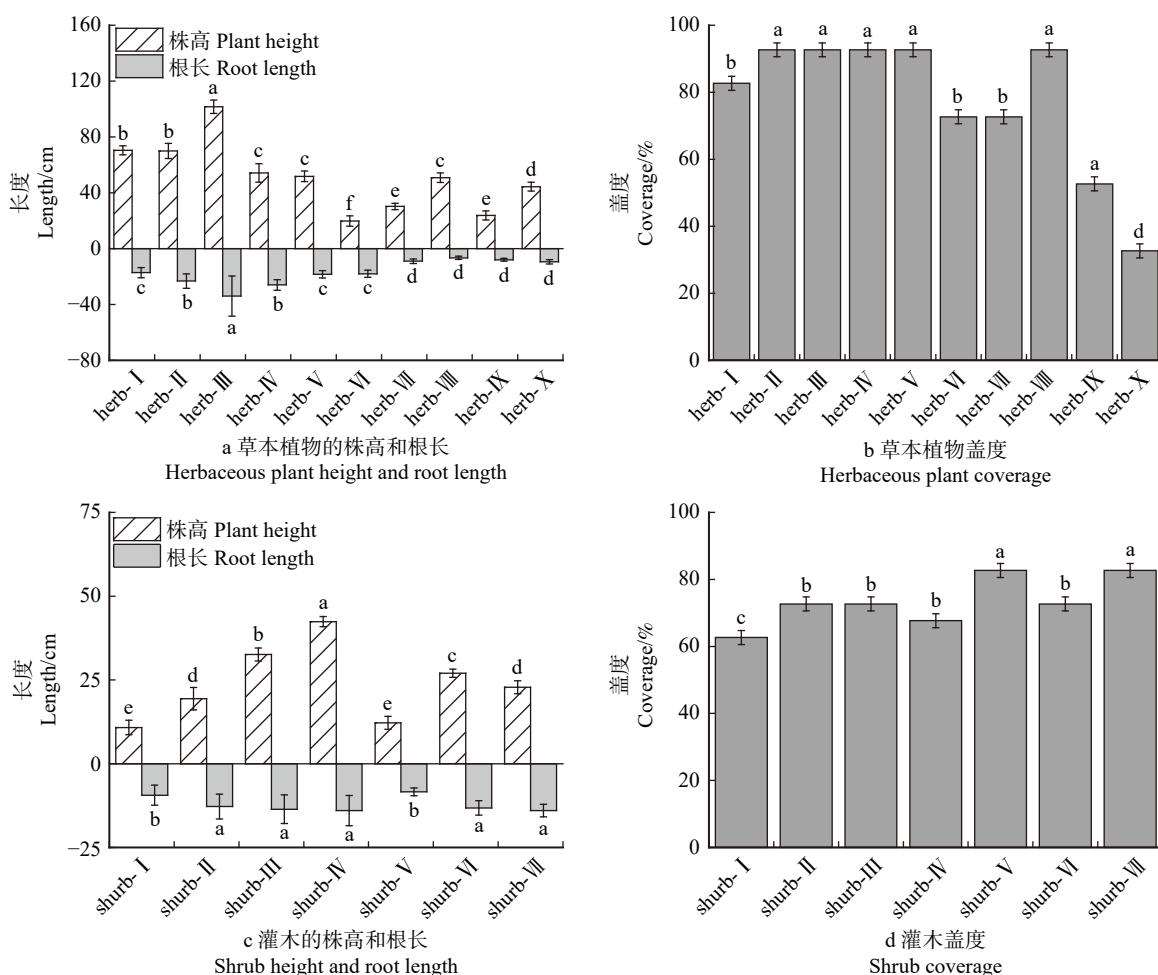
1.4 数据处理

将各测定数据进行整合,以不同植物种类的高度、根长、盖度、生物量和碳储量等数据为依据,通过 Origin 软件和 SPSS 软件对测定数据进行制图和显著性分析。研究不同植物的生长状况、光合生理特性、生物量和碳储量,然后利用 Yaahp 软件进行层次分析,对 17 种灌草植物进行节水增汇综合排序。

2 结果与分析

2.1 植物生长性状的差异性

草本植物中,株高较高的是草木樨(101.6 cm)、披碱草(70.4 cm)和紫花苜蓿(70 cm);草木樨、蜀葵和紫花苜蓿具有较长的根(图 1a)。灌木中,紫穗槐



herb-I 披碱草, herb-II 紫花苜蓿, herb-III 草木樨, herb-IV 蜀葵, herb-V 沙打旺, herb-VI 高冰草, herb-VII 高羊茅, herb-VIII 黑麦草, herb-IX 早熟禾, herb-X 沙蒿; shurb-I 花棒, shurb-II 柠条锦鸡儿, shurb-III 沙地柏, shurb-IV 紫穗槐, shurb-V 胡枝子, shurb-VI 沙棘, shurb-VII 沙柳。柱子上方不同小写字母表示不同植物间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。herb-I is *Elymus dahuricus*, herb-II is *Medicago sativa*, herb-III is *Melilotus officinalis*, herb-IV is *Alcea rosea*, herb-V is *Astragalus laxmannii*, herb-VI is *Agropyron elongatum*, herb-VII is *Festuca elata*, herb-VIII is *Lolium perenne*, herb-IX is *Poa annua*, herb-X is *Artemisia desertorum*; shurb-I is *Corethroedendron scoparium*, shurb-II is *Caragana korshinskii*, shurb-III is *Juniperus sabina*, shurb-IV is *Morpha fruticosa*, shurb-V is *Lepedeza bicolor*, shurb-VI is *Hippophae rhamnoides*, shurb-VII is *Salix cheilophila*. Different lowercase letters above the columns indicate significant differences between plants ($P < 0.05$). Same as below.

图 1 不同灌草植物的生理性状指标

Fig. 1 Physiological trait indicators of different shrub and herbaceous plants

的株高(42.4 cm)最高,花棒的株高最低;灌木根长差别不大(图1c)。对比草本植物和灌木的株高,发现初期草本植物比灌木生长得快。草本植物种植两个月的时候盖度基本能达到80%~90%(图1b、1d)。所以,在水资源缺乏的情况下,深层根系能较好地吸收到较深位置的水分,从而降低了因与浅部根系争水而导致植株死亡的可能性。这说明,不同的植物在其生长发育过程中,会对外界环境产生差异性反应,并在一定程度上进行调节和平衡。

2.2 植物光合参数和水分利用效率

不同物种间的光合速率、蒸腾速率、水分利用效率等生理生态特征均有较大差异(图2、3)。净光合速率直观反映植物光合系统的功能,是衡量植物生长的重要指标;水分利用效率是反映植物对碳固持和耗水量的一种综合指标。草本植物中沙打旺和高冰草,以及灌木中沙地柏和柠条锦鸡儿的水分利用效率较高。这些植物具有高光合速率和低蒸腾速率,以此应对逆境(图2、3)。同时,具有固氮作用的豆科和禾本科植物表现出了很高的水分利用效率,它们对土壤环境有一定的改善作用。

2.3 植物和土壤碳储量

植物生物量和不同组织的碳含量影响植物碳储量。在相同处理条件下,草本植物中紫花苜蓿、草木樨和沙打旺,以及灌木中柠条锦鸡儿和紫穗槐的生

物量高于其他同类植物(图4)。草本植物中紫花苜蓿(地上196.11 g/m²,地下450.51 g/m²)、草木樨(地上195.65 g/m²,地下352.84 g/m²)和沙打旺(地上186.66 g/m²,地下387.29 g/m²),以及灌木中柠条锦鸡儿(地上222.48 g/m²,地下475.35 g/m²)和紫穗槐(地上220.22 g/m²,地下473.89 g/m²)对应的碳储量也高于其他植物(图5a、b)。灌草植物的土壤碳储量差别不大,均在8 kg/m²左右(图5c、d)。这表明紫花苜蓿、草木樨、沙打旺、柠条锦鸡儿和紫穗槐可以在西北干旱半干旱矿区提高碳固持。

2.4 节水增汇植物综合评价

根据评价结构体系计算各指标层对方案层(草本植物和灌木)的最终权重。其中,节水增汇草本植物排序是紫花苜蓿(0.203 8)>草木樨(0.175 0)>沙打旺(0.173 1)>蜀葵(0.089 3)>披碱草(0.080 0)>沙蒿(0.067 2)>高冰草(0.061 4)>高羊茅(0.055 7)>黑麦草(0.050 3)>早熟禾(0.044 2)(表3);节水增汇灌木排序是紫穗槐(0.261 3)>柠条锦鸡儿(0.240 5)>沙棘(0.146 4)>沙地柏(0.112 2)>胡枝子(0.087 6)>沙柳(0.084 4)>花棒(0.067 6)(表4)。

3 讨 论

为了解决西北干旱半干旱矿区的生态环境问题,诸多学者提出采用植物修复改善该地区生态环

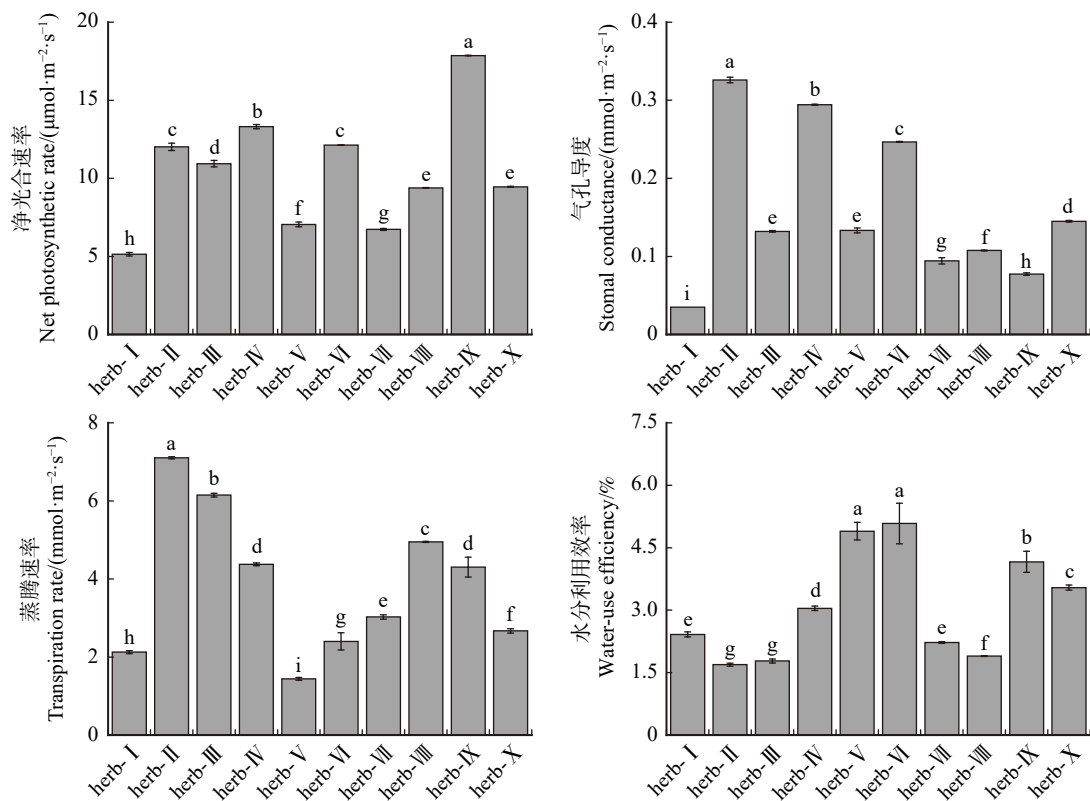


图2 不同草本植物的光合生理指标

Fig. 2 Photosynthetic physiological indicators of different herbaceous plants

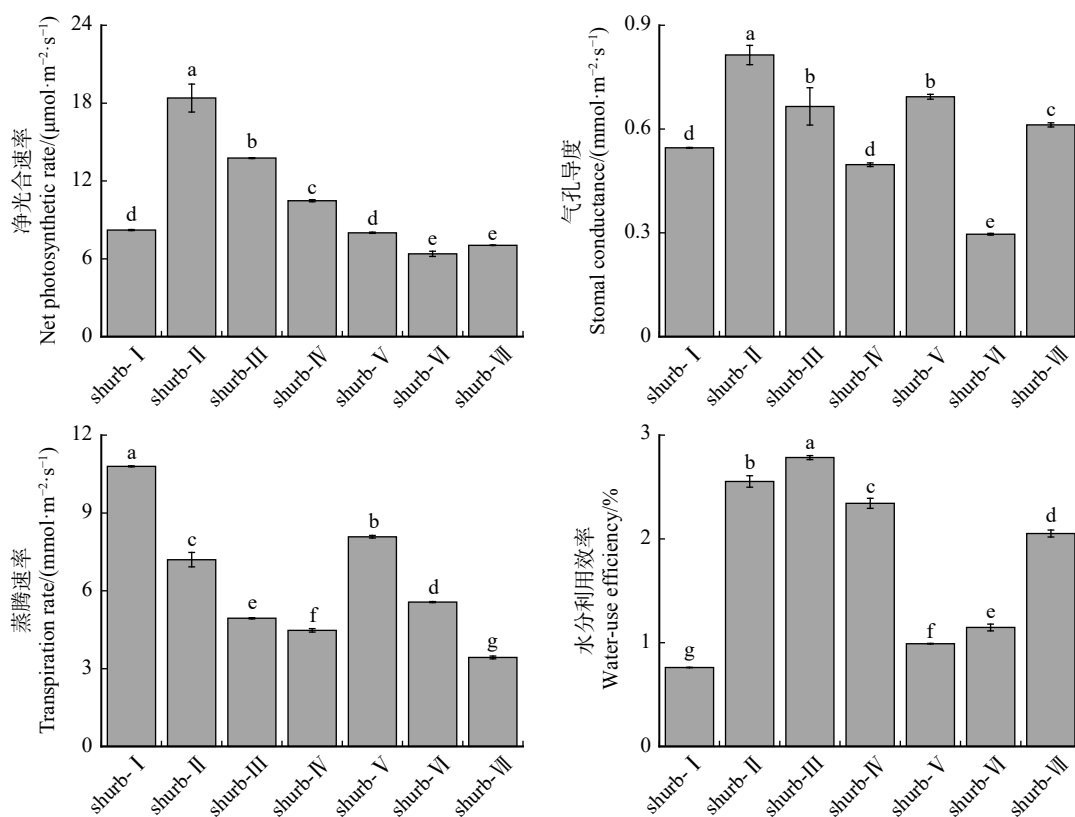


图 3 不同灌木的光合生理指标

Fig. 3 Photosynthetic physiological indicators of different shrubs

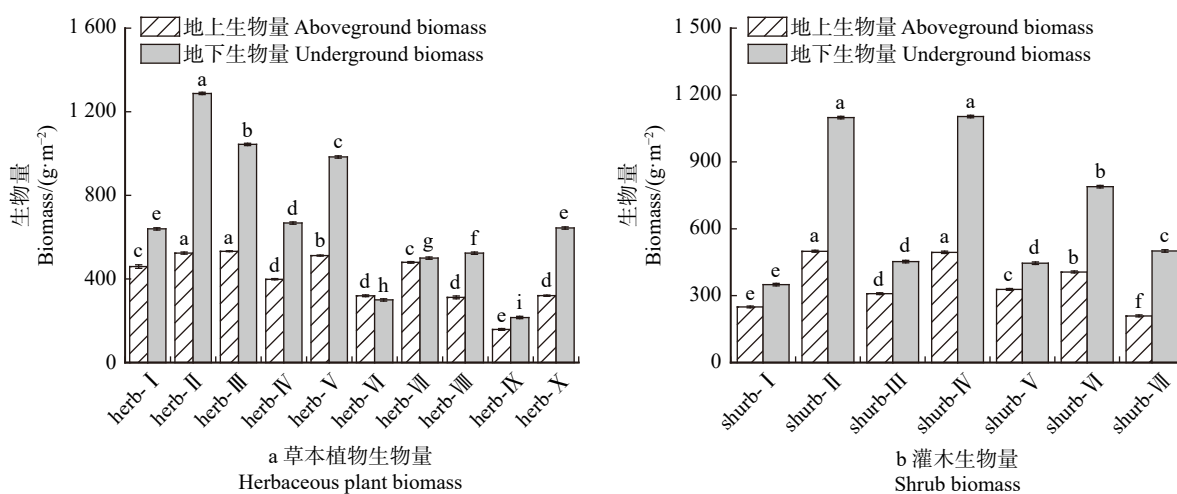


图 4 不同灌草植物的生物量

Fig. 4 Biomass of different shrub and herbaceous plants

境^[26]。在植物修复技术中,植物种类对环境的适应性至关重要,因此选择具有强适应性的乡土植物作为备选项。本研究用生长性状指标反映植物对环境的适应性,特别是在干旱区,深根系植物能有效感知深部土壤水分^[27],而株高和盖度生长特性越好,说明植物对环境的适应性越好。在本研究中,草木樨、披碱草、紫花苜蓿和紫穗槐等植物表现出较强的环境适应性。由于西北矿区水分稀缺,筛选植物时还需考虑与水分相关的指标。水分利用效率是衡量植物碳固定与水分消耗效率的重要指标^[28],植物通过生理

发育机制调节异常环境下的水分利用效率^[5],因此它受到植物气孔控制的光合作用和蒸腾作用的耦合影响^[29]。光合速率则反映植物固碳能力的强弱^[30-31]。此外,根系通过感知土壤含水量并将水分经木质部分传递到地上,从而控制气孔和植物生长^[32-33]。需要特地强调的是,在干旱条件下,植物会产生脱落酸和细胞分裂素等影响正常生长性状和生理特性^[7]。因此,本研究将生长性状和生理特性指标纳入筛选模型。

同时,随着“双碳战略”的提出,生物量和碳储量也成为植物筛选的重要指标,生态系统碳储量越高,

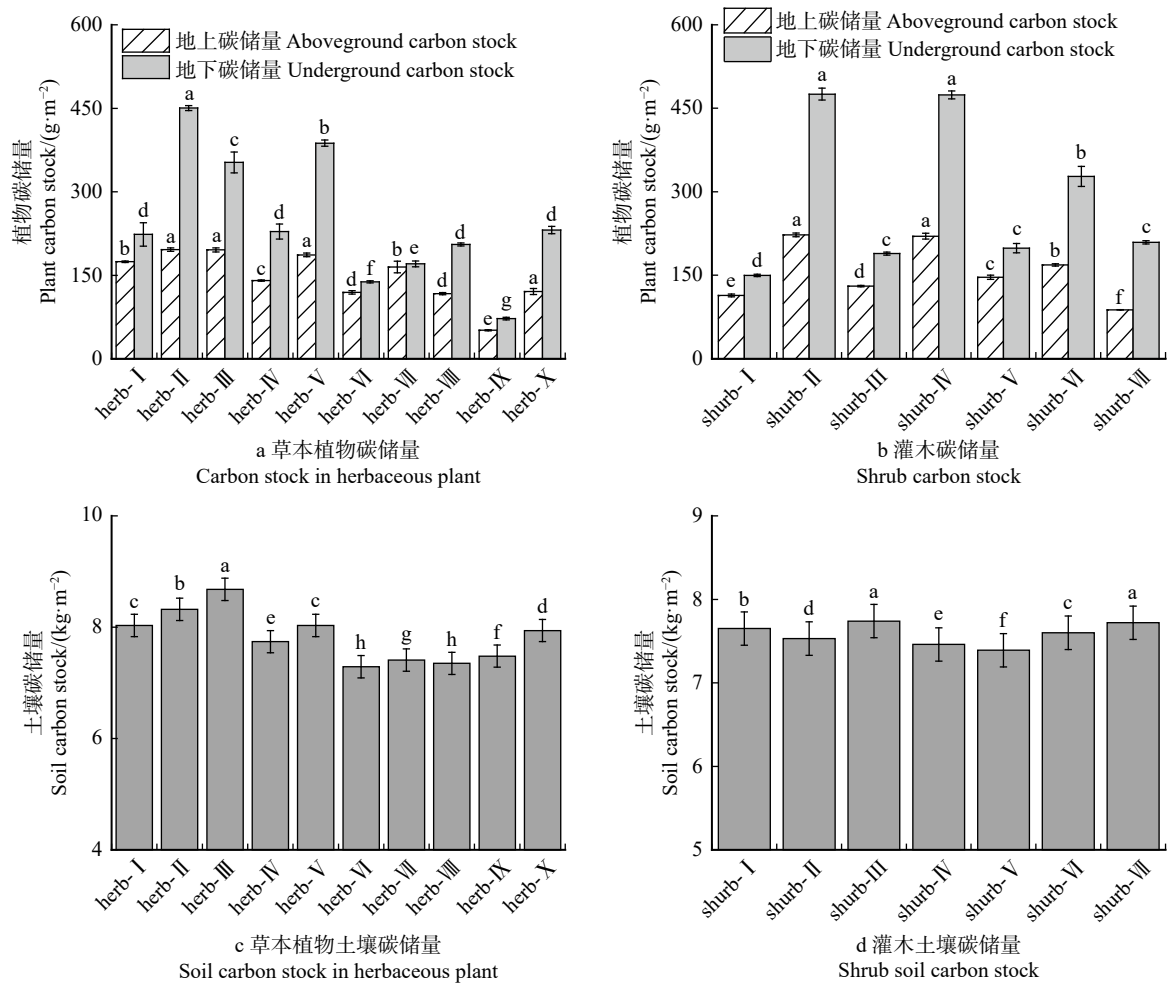


图 5 不同灌草植物的碳储量
Fig. 5 Carbon stocks in different shrub and herbaceous plants

表 3 草本植物层次分析法筛选表

Tab. 3 Hierarchical analysis screening table for herbaceous plants

目标层 Target level	准则层 Standardized layer	指标层 Indicator layer	方案层 Programme level
节水增汇植物筛选 Water-saving and sink-enhancing plant screening	生长状况 Growth condition (0.109 1)	株高 Plant height (0.020 6)	
		根长 Root length (0.008 8)	
		盖度 Coverage (0.079 7)	
	碳储量 Carbon stock (0.350 9)	地上碳储量 Aboveground carbon stock (0.117 0)	
		地下碳储量 Underground carbon stock (0.117 0)	蜀葵 <i>Alcea rosea</i> (0.089 3)
		土壤碳储量 Soil carbon stock (0.117 0)	黑麦草 <i>Lolium perenne</i> (0.050 3)
	蒸腾速率 Transpiration rate (0.034 4)	气孔导度 Stomatal conductance (0.013 5)	披碱草 <i>Elymus dahuricus</i> (0.080 0)
		净光合速率 Net photosynthetic rate (0.044 7)	沙蒿 <i>Artemisia desertorum</i> (0.067 2)
		水分利用效率 Water use efficiency (0.096 4)	沙打旺 <i>Astragalus laxmannii</i> (0.173 1)
	生物量 Biomass (0.350 9)	地上生物量 Aboveground biomass (0.175 5)	紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i> (0.203 8)
		地下生物量 Underground biomass (0.175 5)	草木樨 <i>Melilotus officinalis</i> (0.175 0)
			高羊茅 <i>Festuca elata</i> (0.055 7)
			高冰草 <i>Agropyron elongatum</i> (0.061 4)
			早熟禾 <i>Poa annua</i> (0.044 2)

注: 括号内数据为指标得分。下同。Notes: data in parentheses represent the scores of indicators. Same as below.

表 4 灌木层次分析法筛选表
Tab. 4 Hierarchical analysis screening table for shrubs

目标层 Target level	准则层 Standardized layer	指标层 Indicator layer	方案层 Programme level
节水增汇植物筛选 Water-saving and sink-enhancing plant screening	生长状况 Growth condition (0.109 1)	株高 Plant height (0.020 6)	
		根长 Root length (0.008 8)	
		盖度 Coverage (0.079 7)	
	碳储量 Carbon stock (0.350 9)	地上碳储量 Aboveground carbon stock (0.117 0)	
		地下碳储量 Underground carbon stock (0.117 0)	
		土壤碳储量 Soil carbon stock (0.117 0)	沙地柏 <i>Juniperus sabina</i> (0.112 2)
		蒸腾速率 Transpiration rate (0.034 4)	胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i> (0.087 6)
	光合生理 Photosynthetic physiology (0.189 1)	气孔导度 Stomal conductance (0.013 5)	花棒 <i>Corethroedendron scoparium</i> (0.067 6)
		净光合速率 Net photosynthetic rate (0.044 7)	柠条锦鸡儿 <i>Caragana korshinskii</i> (0.240 5)
		水分利用效率 Water use efficiency (0.096 4)	紫穗槐 <i>Amorpha fruticose</i> (0.261 3)
		地上生物量 Aboveground biomass (0.175 5)	沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i> 0.146 4)
	生物量 Biomass (0.350 9)	地下生物量 Underground biomass (0.175 5)	沙柳 <i>Salix cheilophila</i> (0.084 4)

表明碳汇效果越显著。植物通过控制植物激素的合成,减小气孔导度,提高水分有效利用,从而使植物的生物量和碳储量得到提升^[34]。本研究利用层次分析法构建生长性状、光合生理、生物量和碳储量的层次模型,筛选出适宜在西北矿区存活的灌草植物种类。这不仅能促进矿区的复绿工程,还能增强生态系统的碳固持能力。未来,在构建西北矿区节水增汇植物筛选模型时,建议综合考虑植物的生长特性、光合生理特性和碳增汇能力,以实现复绿与碳固持的双重目标。

根据构建的层次结构模型,灌木中综合权重较高的植物是紫穗槐、柠条锦鸡儿和沙棘,这 3 类植物具有生长态势良好以及碳储量大的特点,是此次备选灌木的首选项;草本植物中综合权重较高的是紫花苜蓿、草木樨和沙打旺,草本植物相对生命周期短,能够迅速复绿,并弥补灌木早期生长速度较慢的不足,提高植物覆盖度和改善土壤环境^[35]。此外,豆科植物比如沙打旺、紫穗槐、草木樨和柠条锦鸡儿等可以改善土壤肥力,提高植物生物量,适合做先锋植物^[36],而且这几种植物既是当地的乡土植物,也是生态修复中常用的植物,环境适应性好,碳储量大。有学者对山西安太堡和霍林河露天煤矿研究发现,柠条锦鸡儿和沙棘的长势都很好,可用于西北露天煤矿区的植被修复^[36-37]。也有研究得出沙蒿、沙打旺和草木樨等适宜生存于西北地区,可作为煤炭基地植被恢复建设的优选植物^[38]。另外,此次筛选出的紫穗槐和紫花苜蓿在其他的生态修复中也有较多的

应用,被当作生态修复的优选植物^[39]。

4 结 论

基于 17 种灌草植物开展的田间节水增汇试验,通过测定其生长指标、光合生理指标、生物量和碳储量指标,运用层次分析法对灌草植物进行综合评价。结论如下:(1)草本植物中,高冰草、沙打旺和早熟禾的水分利用效率较高;灌木中沙地柏、柠条锦鸡儿和紫穗槐的水分利用效率较高;(2)草本植物总碳储量较高的是紫花苜蓿、草木樨和沙打旺;灌木总碳储量较高的是紫穗槐、柠条锦鸡儿和沙棘;(3)节水增汇草本植物排序是紫花苜蓿>草木樨>沙打旺>蜀葵>披碱草>沙蒿>高冰草>高羊茅>黑麦草>早熟禾;节水增汇灌木排序是紫穗槐>柠条锦鸡儿>沙棘>沙地柏>胡枝子>沙柳>花棒。筛选本地常见的节水增汇植物,为后续西北干旱半干旱地区进行植物配置和生态修复提供技术支撑。

参 考 文 献

[1] 关中美, 郝成元. 我国干旱半干旱地区脆弱生态系统及其退化成因[J]. 生态经济, 2013(9): 158-162.
Guan Z M, Hao C Y. The fragile ecosystem types in arid and semi-arid region of China and their degradation causes[J]. Ecological Environment, 2013(9): 158-162.

[2] 吴秦豫, 姚喜军, 梁洁, 等. 鄂尔多斯市煤矿区植被覆盖改善和退化效应的时空强度[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(8): 101-109.
Wu Q Y, Yao X J, Liang J, et al. Spatial and temporal intensity of vegetation cover improvement and degradation in coal mining

- areas of Erdos City[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022, 36(8): 101–109.
- [3] 周航. 桂林石灰岩矿山采损生态脆弱区复绿植物筛选与配置[D]. 昆明: 桂林理工大学, 2023.
- Zhou H. Screening and allocation of reforestation plants in the ecologically fragile area of limestone mining damage in Guilin, China[D]. Kunming: Guilin University of Technology, 2023.
- [4] 吴金山, 张景欢, 李瑞杰, 等. 植物对于干旱胁迫的生理机制及适应性研究进展[J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2017, 37(6): 452–456.
- Wu J S, Zhang J H, Li R J, et al. The plant's physiological mechanism and adaptability to drought stress[J]. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2017, 37(6): 452–456.
- [5] Hetherington A M, Woodward F I. The role of stomata in sensing and driving environmental change[J]. *Nature*, 2003, 424: 901–908.
- [6] Lake J A, Woodward F I. Response of stomatal numbers to CO₂ and humidity: control by transpiration rate and abscisic acid[J]. *New Phytol*, 2008, 179: 397–404.
- [7] 余林辉, 蔡晓腾, 徐萍, 等. 植物抗旱节水: 从实验室到田间[J]. *中国科学: 生命科学*, 2017, 47(1): 145–154.
- Yu L H, Cai X T, Xu P, et al. Drought-resistant and water-saving plants: from laboratory to field[J]. *Scientia Sinica Vitae*, 2017, 47(1): 145–154.
- [8] Deng L F, Yuan H R, Xie J, et al. Herbaceous plants are better than woody plants for carbon sequestration[J/OL]. *Resources Conservation and Recycling*, 2022, 184[2023–09–28]. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106431>.
- [9] Yang Y, Tilman D, Furey G, et al. Soil carbon sequestration accelerated by restoration of grassland biodiversity[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 718.
- [10] Qu Y, Mu P, Zhang H, et al. Mapping QTLs of root morphological traits at different growth stages in rice[J]. *Genetica*, 2008, 133: 187–200.
- [11] Comas L H, Becker S R, Cruz V M V, et al. Root traits contributing to plant productivity under drought[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2013, 4: 442.
- [12] 尤云楠, 朱燕峰, 陈浮, 等. 植被类型对露天矿复垦土壤微生物固碳潜力及路径的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2023, 39(9): 1170–1179.
- You Y N, Zhu Y F, Chen F, et al. Effects of vegetation types on the potential and pathway of microbial carbon sequestration in reclaimed soil of open-pit mine[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2023, 39(9): 1170–1179.
- [13] 王新宇, 高英志. 禾本科/豆科间作促进豆科共生固氮机理研究进展[J]. *科学通报*, 2020, 65(专1): 142–149.
- Wang X Y, Gao Y Z. Advances in the mechanism of cereal/legume intercropping promotion of symbiotic nitrogen fixation[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(Spec.1): 142–149.
- [14] 郝新忠, 郜超, 张继平, 等. 煤矿开采对榆林毛乌素沙地植被与地下水的影响[J]. *陕西林业科技*, 2019, 47(4): 28–31.
- Hao X Z, Gao C, Zhang J P, et al. Effect of coal mining on vegetation and groundwater in Mu Us Sandy Land of Yulin[J]. *Shannxi Forest Science and Technology*, 2019, 47(4): 28–31.
- [15] 侯健. 西湾露天煤矿建设项目环境影响评价及生态保护策略研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- Hou J. The construction project study of environmental assessment and ecological protection strategy for Xiwan Opencast Coal Mine[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018.
- [16] 白晓霞, 郭志军, 李沛, 等. 陕北旱区榆林市公园绿地植物群落调查[J]. *贵州农业科学*, 2021, 49(5): 116–122.
- Bai X X, Guo Z J, Li P, et al. Investigation on park greenbelt plant community in Yulin City of arid area in northern Shanxi[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2021, 49(5): 116–122.
- [17] 项元和, 于晓杰, 魏勇明. 露天矿排土场生态修复与植被重建技术[J]. *中国水土保持科学*, 2013, 11(增刊1): 48–54.
- Xiang Y H, Yu X J, Wei Y M. Techniques ecological restoration and plant restoration on spoil dump of modern strip mine[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2013, 11(Suppl. 1): 48–54.
- [18] Ye S. Research progress on vegetation ecological restoration of abandoned land in coal mine area[J/OL]. *Iop Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 781(3): 032002[2023–09–28]. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/781/3/032002>.
- [19] 张永娥, 余新晓, 陈丽华, 等. 北京西山侧柏林冠层不同高度处叶片水分利用效率[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(7): 2143–2148.
- Zhang Y E, Yu X X, Chen L H, et al. Foliar water use efficiency of platycladus orientalis of different canopy heights in Beijing Western Mountains area, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, Jul, 2017, 28(7): 2143–2148.
- [20] Deng L, Han Q S, Zhang C, et al. Above-ground and below-ground ecosystem biomass accumulation and carbon sequestration with *Karagana korshinskii* Kom. plantation development[J]. *Land Degradation & Development*, 2017, 28(3): 906–917.
- [21] 舒洋. 大兴安岭落叶松林碳储量监测及碳层分配特征研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017.
- Shu Y. Study on the distribution characteristics of carbon layer and carbon storage monitoring in *Larix gmelini* forest in Daxing'anling[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2017.
- [22] 于欢, 魏天兴, 陈宇轩, 等. 黄土丘陵区典型人工林土壤有机碳储量的分布特征[J]. *北京林业大学学报*, 2023, 45(12): 100–107.
- Yu H, Wei T X, Chen Y X, et al. Distribution characteristics of soil organic carbon stocks in typical plantations in loess hilly region of northwestern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2023, 45(12): 100–107.
- [23] 严慧玲, 刘东明, 李作恒, 等. 层次分析法在河北省太行山区植被恢复植物种类筛选中的运用[J]. *植物研究*, 2015, 35(5): 751–758.
- Yan H L, Liu D M, Li Z H, et al. Analytic hierarchy process in plant species selection of revegetation in the Taihang Mountains in Hebei Province[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2015, 35(5): 751–758.
- [24] 赵楠, 梁倩雨, 郭丽丽, 等. 基于 AHP 的榆林市木本彩叶植物综合评价[J]. *陕西农业科学*, 2023, 69(3): 110–116.
- Zhao N, Liang Q Y, Guo L L, et al. Comprehensive evaluation of

- woody color-leafed plants in Yulin based on AHP[J]. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 2023, 69(3): 110–116.
- [25] 于晓燕, 宋宇辰, 魏光普, 等. 基于层次分析和模糊综合评判的尾矿库植物群落评价[J]. *稀土*, 2020, 41(5): 70–79.
- Xu X Y, Song Y C, Wei G P, et al. Assessment of plant community around Baotou Lree Tailings Reservoir based on AHP and fuzzy comprehensive evaluation method[J]. *Chinese Rare Earths*, 2020, 41(5): 70–79.
- [26] 廖立国, 谭正洪, 蒋龙, 等. 基于过程模型的泰国热带森林碳通量动态模拟解析[J]. *热带生物学报*, 2021, 12(3): 279–288.
- Liao L G, Tan Z H, Jiang L, et al. Dynamic analysis of carbon flux of tropical forest in Thailand based on process model[J]. *Journal of Tropical Biology*, 2021, 12(3): 279–288.
- [27] 渠春梅, 韩兴国, 苏波, 等. 云南西双版纳片断化热带雨林植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的特点及其对水分利用效率的指示[J]. *植物学报*, 2001, 43(2): 186–192.
- Qu C M, Han X G, Su B, et al. The characteristics of foliar $\delta^{13}\text{C}$ values of plants and plant water use efficiency indicated by $\delta^{13}\text{C}$ values in two fragmented rainforests in Xishuangbanna, Yunnan[J]. *Acta Botanica Sinica*, 2001, 43(2): 186–192.
- [28] 王芳, 汪左, 黄静, 等. 安徽省农田水分利用效率时空特征及其与气候因子的关系[J]. *生态学报*, 2018, 38(17): 6268–6279.
- Wang F, Wang Z, Huang J, et al. Spatio-temporal distribution characteristics of cropland water use efficiency and its relationship with climate in Anhui Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(17): 6268–6279.
- [29] 李机密, 黄儒珠, 王健, 等. 陆生植物水分利用效率[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(8): 1655–1663.
- Li J M, Huang R Z, Wang J, et al. Water use efficiency of terrestrial plants[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(8): 1655–1663.
- [30] 张琳婷, 姜德刚, 刘建辉, 等. 基于光合特性的海岛植被修复适生植物的筛选[J]. *应用海洋学学报*, 2021, 40(3): 428–436.
- Zhang L T, Jiang D G, Liu J H, et al. Screening of adaptable plants for island vegetation restoration based on photosynthetic characteristics[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2021, 40(3): 428–436.
- [31] 张娜, 张巍, 陈玮, 等. 大连市6种园林树种的光合固碳释氧特性[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(10): 2742–2748.
- Zhang N, Zhang W, Chen W, et al. Carbon sequestration and oxygen release capabilities of six garden tree species in Dalian[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(10): 2742–2748.
- [32] Comstock J P. Hydraulic and chemical signalling in the control of stomatal conductance and transpiration[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2002, 53: 195–200.
- [33] Schachtman D P, Goodger J Q D. Chemical root to shoot signaling under drought[J]. *Trends in Plant Science*, 2008, 13(6): 281–287.
- [34] Sah S K, Reddy K R, Li J. Absciscic acid and abiotic stress tolerance in crop plants[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7: 571.
- [35] 符亚儒, 张继平, 董强, 等. 陕北沙区煤矸石废弃地的植被恢复技术研究[J]. *西北林学院学报*, 2012, 27(5): 178–183.
- Fu Y R, Zhang J P, Dong Q, et al. Vegetation restoration technologies in the coal gangue waste lands in sandy areas of northern Shaanxi[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2012, 27(5): 178–183.
- [36] 李晋川, 王翔, 岳建英, 等. 安太堡露天矿植被恢复过程中土壤生态肥力评价[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(1): 66–71, 79.
- Li J C, Wang X, Yue J Y, et al. Evaluation on soil ecologic fertility during vegetation succession in Antaibao Open Pit[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(1): 66–71, 79.
- [37] 陈来红, 马万里. 霍林河露天煤矿排土场植被恢复与重建技术探讨[J]. *中国水土保持科学*, 2011, 9(4): 117–120.
- Chen L H, Ma W L. Discussion on vegetation restoration and reconstruction in dumping site of open coal mine in Huolinhe[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9(4): 117–120.
- [38] 许爱云, 曹兵, 谢云. 干旱风沙区煤炭基地12种草本植物对干旱胁迫的生理生态响应及抗旱性评价[J]. *草业学报*, 2020, 29(10): 22–34.
- Xu A Y, Cao B, Xie Y. Physiological-ecological responses of twelve herbaceous plant species under drought stress and evaluation of their drought resistance when planted in coal producing basis in arid windy and sandy areas[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(10): 22–34.
- [39] 宋曦, 王金成, 井明博, 等. 紫花苜蓿对陇东黄土高原油污土壤场地生态修复的综合响应[J]. *草业科学*, 2019, 36(7): 1754–1764.
- Song X, Wang J C, Jing M B, et al. Comprehensive response of *Medicago sativa* when used to ecologically remediate a site in the eastern region of the Loess Plateau contaminated with different concentrations of oil[J]. *Pratacultural Science*, 2019, 36(7): 1754–1764.

(责任编辑 孟瑶
责任编委 臧润国)