



### 沙地柠条光合特性与水分利用效率对干旱胁迫的响应

韩阳瑞 单炜 许大为 张伟艳

#### Response of Photosynthetic Characteristics and Water Use Efficiency to Drought Stress of *Caragana korshinskii* in Desert

Han Yangrui, Shan Wei, Xu Dawei, Zhang Weiyan

引用本文:

韩阳瑞,单炜,许大为,张伟艳.沙地柠条光合特性与水分利用效率对干旱胁迫的响应[J].西南林业大学学报,2021,41(3):37-44. doi: 10.11929/j.swfu.202001031

Han Yangrui, Shan Wei, Xu Dawei, Zhang Weiyan. Response of Photosynthetic Characteristics and Water Use Efficiency to Drought Stress of *Caragana korshinskii* in Desert[J]. *Journal of Southwest Forestry University(Natural Science)*, 2021, 41(3):37-44. doi: 10.11929/j.swfu.202001031

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11929/j.swfu.202001031>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 柠条锦鸡儿多倍体诱导与鉴定

Ployploid Induction and Identification of *Caragana korshinskii*

西南林业大学学报. 2019, 39(5): 170 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.201811010>

#### 干旱处理对不同品种杜鹃光合特性的影响

Effect of Drought Stress on Photosynthesis Characteristics of Different Varieties of *Bougainvillea spectabilis*

西南林业大学学报. 2018, 38(4): 70 <https://doi.org/10.11929/j.issn.2095-1914.2018.04.011>

#### 基于GF-1遥感影像的宁夏盐池柠条人工林景观特征研究

Landscape Characteristics of *Caragana intermedia* Plantation Based on GF-1 Remote Sensing Image in Yanchi

西南林业大学学报. 2019, 39(1): 152 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.201808028>

#### 水肥调控对油橄榄光合特性的影响

Effect of Water and Fertilizer Regulation on Photosynthetic Characteristics of *Olea europaea*

西南林业大学学报. 2020, 40(2): 173 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.201904011>

#### 干旱胁迫对大花紫薇与毛萼紫薇生理生化特征的影响

The Influence of Drought Stress on Physiological and Biochemical Characteristics of *Lagerstroemia speciosa* and *Lagerstroemia balansae*

西南林业大学学报. 2018, 38(5): 205 <https://doi.org/10.11929/j.issn.2095-1914.2018.05.031>

#### 3种园林植物幼苗对旱涝胁迫的生理响应及综合评价

Physiological Response and Comprehensive Evaluated on 3 Species of Landscape Tree Seedlings Subjected to Soil Drought and Waterlogging

西南林业大学学报. 2020, 40(4): 68 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.201906036>

DOI: 10.11929/j.swfu.202001031

引文格式: 韩阳瑞, 单炜, 许大为, 等. 沙地柠条光合特性与水分利用效率对干旱胁迫的响应 [J]. 西南林业大学学报 (自然科学), 2021, 41(3): 37-44.

## 沙地柠条光合特性与水分利用效率对干旱胁迫的响应

韩阳瑞<sup>1,2</sup> 单炜<sup>1</sup> 许大为<sup>1</sup> 张伟艳<sup>2</sup>

(1. 东北林业大学工程咨询设计研究院有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 南通科技职业学院, 江苏 南通 226007)

**摘要:** 以库布齐沙漠柠条灌丛为研究对象, 人工控制土壤水分补给量和干旱程度, 利用 Li-6800 便携式光合测定系统连续监测叶片光合指标及水分利用效率, 探讨柠条叶片光合特性和水分利用效率在不同土壤含水量下的变化特征, 分析柠条灌丛对干旱胁迫的响应机制。结果表明: 柠条叶片净光合速率为 2.02~44.80  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ , 蒸腾速率为 0.94~23.41  $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ , 气孔导度为 0.02~1.09  $\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ , 胞间  $\text{CO}_2$  浓度为 238.12~323.05  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ , 4 种指标均表现为随干旱程度加深而降低, 光合作用明显被抑制。土壤含水量与柠条叶片净光合速率、蒸腾速率、气孔导度及胞间  $\text{CO}_2$  浓度均呈显著正相关。柠条叶片水分利用效率与太阳总辐射、光合有效辐射及蒸腾速率呈显著负相关, 在不同干旱程度下表现为重度干旱 (3.35  $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ ) > 中度干旱 (2.87  $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ ) > 轻度干旱 (2.08  $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ ) > 特重干旱 (2.15  $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ ), 在土壤含水量为 7%~9% 时具有最优水分利用效率。

**关键词:** 光合特性; 水分利用效率; 干旱胁迫; 柠条人工林; 荒漠生态系统

中图分类号: Q945.78

文献标志码: A

文章编号: 2095-1914(2021)03-0037-08

## Response of Photosynthetic Characteristics and Water Use Efficiency to Drought Stress of *Caragana korshinskii* in Desert

Han Yangrui<sup>1,2</sup>, Shan Wei<sup>1</sup>, Xu Dawei<sup>1</sup>, Zhang Weiyan<sup>2</sup>

(1. Engineering Consulting Design Research Institute Co., Ltd., Northeast Forestry University, Harbin Heilongjiang 150040, China;

2. Nantong Vocational College of Science and Technology, Nantong Jiangsu 226007, China)

**Abstract:** Taking the *Caragana korshinskii* shrub in Hobq desert as the study object, the water supply and drought degree of soil were controlled manually, the variation characteristics of photosynthetic characteristics and water use efficiency of *C. korshinskii* leaves under different soil water content were studied, and the response mechanism of *C. korshinskii* shrub to drought stress was analyzed with Li-6800 portable photosynthesis system. The results showed that the net photosynthetic rate of *C. korshinskii* leaves ranged from 2.02–44.80  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ , the transpiration rate ranged from 0.94–23.41  $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ , the stomatal conductance ranged from 0.02–1.09  $\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ , the intercellular  $\text{CO}_2$  concentration ranged from 238.12–323.05  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ , all the 4 indexes decreased obviously with the deepening of drought, and photosynthesis was restricted. Soil water content was signi-

收稿日期: 2020-01-14; 修回日期: 2020-03-17

基金项目: 黑龙江省教育厅科学技术研究项目 (12533017) 资助; 南通科技职业学院 2018 年度青年科技团队项目 (QNTD201803) 资助。

第 1 作者: 韩阳瑞 (1978—), 男, 博士, 副教授。研究方向: 园林植物生理生态、景观生态恢复与评价。

Email: hanyangrui1978@163.com。

通信作者: 单炜 (1965—), 男, 博士, 教授。研究方向: 林业生态工程及高寒区生态恢复。Email: cn486685161@163.com。

ificantly positively correlated with the net photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance and intercellular  $\text{CO}_2$  concentration of *C. korshinskii* leaves. The water use efficiency of *C. korshinskii* was negatively correlated with total solar radiation, photosynthetic effective radiation and transpiration rate, in different degrees of drought, it showed severe drought ( $3.35 \mu\text{mol}/\text{mmol}$ ) > moderate drought ( $2.87 \mu\text{mol}/\text{mmol}$ ) > mild drought ( $2.08 \mu\text{mol}/\text{mmol}$ ) > extreme drought ( $2.15 \mu\text{mol}/\text{mmol}$ ), and had the best water use efficiency when soil water content ranged from 7%–9%.

**Key words:** photosynthetic characteristics; water use efficiency; drought stress; *Caragana korshinskii* plantation; desert ecosystem

水分是限制荒漠生态系统中植被生长、发育、演替的主要环境因子, 并因此成为制约脆弱生态系统植被恢复和重建的短板<sup>[1]</sup>。区域降水量和土壤水分储量, 决定了局地环境所能承受的植被种类、数量和质量的阈值, 当降水来源不足或植物耗水增大时, 供不应求的水分平衡关系将导致植被死亡和生态系统退化<sup>[2]</sup>。因此, 研究植物与水分的供需特征, 尤其是在水分匮乏的荒漠区, 研究植物生长对于干旱胁迫的响应机制, 对于该地区生态系统的持续稳定性评价具有十分重要的意义。光合作用是植物生长的基础, 是全球碳循环以及其他物质循环的基础和重要的环节<sup>[3]</sup>。同时, 光合作用也是植物抗旱性能的主要指示指标之一<sup>[4]</sup>。光合进程不仅受植物本身生理特性的影响, 同时受环境因素的制约。在光合作用中水是重要的参与因素, 如果水分不足, 会导致叶片气孔闭合, 无法有效吸收二氧化碳, 降低反应速率<sup>[5]</sup>。柠条 (*Caragana korshinskii*) 是我国干旱、半干旱荒漠区、黄土区广泛分布的优良乡土植物, 具有广泛的适应性, 在防风固沙、水土保持等生态效益方面发挥重要作用<sup>[6]</sup>。长期以来对恶劣环境的适应与演替, 导致柠条在形态结构上具备了旱生特征, 其优良的抗旱性、抗热性和耐盐碱性, 以及对小气候和土壤质地、肥力的改良作用, 使得柠条对退化生境具有很强的改善功能<sup>[7]</sup>。目前, 对荒漠灌丛的研究多集中于生长生理特性<sup>[8]</sup>、林地水量平衡<sup>[9]</sup>等方面, 研究灌木光合特性和水分利用特征的试验也已较多开展<sup>[10-11]</sup>, 但对柠条光合生理指标对土壤含水量变化响应的连续观测研究较少。因此, 本研究以库布齐沙漠柠条灌丛为研究对象, 人工控制土壤水分补给量和干旱程度, 利用 Li-6800 便携式光合测定系统连续监测叶片光合指标及水分利用效率, 探讨柠条灌丛对干旱胁迫的生态适应性, 为干旱荒漠区柠条的人工栽培和管理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

研究区位于内蒙古自治区鄂尔多斯市准格尔旗布尔陶亥苏木 ( $110^{\circ}49'1''\text{E}$ ,  $40^{\circ}03'57''\text{N}$ , 海拔 1 100 ~ 1 300 m), 该地区年平均气温在  $6.1 \sim 7.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 年平均降水量 240 ~ 360 mm, 多集中于 7—9 月, 年平均日照时数 3 138 h, 年平均蒸发量 2 560 mm, 无霜期为 130 ~ 140 d, 年平均风速 3.3 m/s。该地区土壤主要类型为风沙土, 主要植物为柠条、沙柳 (*Salix psammophila*)、杨柴 (*Hedysarum mongolicum*)、油蒿 (*Artemisia arbuscula*)、狗尾草 (*Setaria viridis*)、沙竹 (*Psammodictyon sibiricum*)、沙蓬 (*Agriophyllum squarrosum*)、雾冰藜 (*Bassia dasyphylla*)、猪毛菜 (*Salsola collina*) 等。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 试验设置

试验于 2018 年 5—8 月进行。在试验区选择地势平坦、植物长势良好且形态指标基本均一的 3 年生柠条灌丛样地, 样地基本情况见表 1。样地中分别布设 10 块  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  的柠条灌丛样方, 并保证每个样方中至少有 1 株柠条生长, 最终确定标准株柠条 21 株 (株高:  $90 \pm 15 \text{ cm}$ , 冠幅:  $120 \pm 20 \text{ cm}$ , 基径:  $2 \pm 0.5 \text{ cm}$ , 分枝数:  $8 \pm 3$ )。本试验中, 利用土壤含水量降低的不同阶段来模拟不同程度的干旱胁迫, 依据 GB/T 20481—2017<sup>[12]</sup> 和参考文献 [13], 荒漠草原干旱程度可分为: 土壤含水量 12% ~ 15% 为轻度干旱, 8% ~ 12% 为中度干旱, 5% ~ 8% 为重度干旱, <5% 为特重干旱。试验步骤为: 1) 减雨, 在每个柠条样方设置遮雨棚, 高度为冠层上方 1.5 m 处, 遮雨量约为降雨量的 60% 左右, 并能够保证阳光的充足射入; 2) 隔水, 在每个柠条样方四周挖取 1 m 深隔水槽, 并铺设石棉瓦, 以隔绝地表及深层土

壤水分入渗补给；3）初始土壤水分设定，由于研究区降水稀少，土壤含水量在自然状态下很难达到轻度干旱水平，因此需人工补水。5月9日开始对各个样方进行灌水，为保证土壤水分均匀渗透及植物对水分的吸收适应过程，每5d灌水1次，共计灌水4次，每个样地每次灌水300L，

共计灌水1200L，确保试验前1m深土层土壤含水量稳定保持在>15%范围；4）土壤自然干旱过程，末次灌水后3d开始测定植物光合特性及土壤含水量，在隔绝外界降水补给后，通过植物的蒸腾和土壤的蒸散发作用，在较长一段时间内土壤含水量会逐渐降至特重干旱水平。

表1 样地基本情况

Table 1 Basic characteristics of the sampling plot

样地	海拔/m	坡度/(°)	植被盖度/%	灌木密度/(株·hm <sup>-2</sup> )	草本密度/(株·hm <sup>-2</sup> )	群落构成	结皮厚度/mm
柠条灌丛	1113	4.2	44.3±3.8	5300±780	20300±3100	柠条+油蒿+杨柴+狗尾草+沙竹+沙蓬+猪毛菜	2.5±0.6

### 1.2.2 环境因子测定

研究区空气温度、太阳辐射、光合有效辐射等气象资料由HOBO小型自动气象站记录(Onset, 美国)；使用TRIME PICO水分速测仪(IMKO, 德国)，分别测定各样方0~20、20~40、40~60、60~80、80~100cm深土层土壤体积分含水量。

### 1.2.3 光合参数测定

采用Li-6800便携式光合测定系统(Li-Cor, 美国)测定光合参数，使用2cm×3cm叶室，选择晴朗无云天气，于上午10:00—11:00对供试柠条标记叶片的净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间CO<sub>2</sub>浓度( $C_i$ )进行测定，每次测定重复5次，求得该指标平均值。叶片瞬时水分利用效率(WUE)按公式(1)<sup>[14]</sup>计算。每株柠条选取顶端健康生长的3片叶片进行光合测定。被测叶片面积使用LI-3000C便携式叶面积仪(Li-Cor, 美国)进行测定，得出有效光照面积后，带入测量结果并计算各项光合生理指标。

$$WUE = P_n / T_r \quad (1)$$

### 1.3 数据处理与分析

试验数据处理及作图采用Excel 2007及Sigma Plot 14.0软件完成，采用SPSS 20.0软件进行统计检验，采用Pearson检验对水分利用效率与环境因子进行相关性分析，采用回归分析判别叶片光合特性与土壤含水量的关系，选取最小显著极差法(LSD)对干旱胁迫下的叶片光合特性指标进行差异性检验( $\alpha=0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 柠条灌丛环境因子特征

如图1所示，柠条灌丛土壤含水量随干旱程度加深呈递减趋势，平均土壤含水量由16.15%降

至3.76%。根据干旱程度分级标准，柠条灌丛土壤在6月3日至6月22日为轻度干旱，6月24日至7月4日为中度干旱，7月11日至7月26日重度干旱，8月3日至8月16日为特重干旱。柠条灌丛不同深度土层土壤含水量有显著性差异( $P<0.05$ )，总体表现为随土层加深，土壤含水量呈先增大后减小的变化趋势。表层0~20cm土壤含水量最低，平均为8.37%，中间层40~60cm土壤含水量达到峰值，平均为9.92%。试验期间，柠条灌丛空气温度变化范围是17.90~29.05℃，整体呈双峰曲线变化特征，分别在6月15日和7月16日达到温度顶点，在6月7日、6月22日和7月26日为温度低谷。柠条灌丛光合有效辐射呈动态的波动变化，最高值出现在6月7日，达到1505.37uE，最低值出现在7月22日，仅为303.70uE。

### 2.2 干旱胁迫下柠条叶片光合特性的变化

如图2所示，试验期间柠条叶片光合特性指标均呈现出随监测时间的推移而逐渐降低的趋势，其中， $P_n$ 的变化范围是2.02~44.80 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ， $T_r$ 的变化范围是0.94~23.41 $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ， $G_s$ 的变化范围是0.02~1.09 $\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ， $C_i$ 的变化范围是238.12~323.05 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 。依据土壤干旱程度划分光合指标变化特征，不同土壤干旱程度下柠条叶片光合指标差异显著( $P<0.05$ )，其中， $P_n$ 表现为轻度干旱(37.06 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ )>中度干旱(28.23 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ )>重度干旱(22.66 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ )>特重干旱(4.77 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ )； $T_r$ 表现为轻度干旱(18.08 $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ )>中度干旱(9.98 $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ )>重度干旱(6.81 $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ )>特重干旱(2.21 $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ )； $G_s$ 表现为轻度干旱(0.88 $\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ )>中度干旱(0.47 $\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ )>重度干旱(0.39 $\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ )>特重干旱(0.08 $\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ )； $C_i$ 表现为轻度干旱(307.68 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ )>



中度干旱 (279.55  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ ) > 重度干旱 (268.11  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ ) > 特重干旱 (257.12  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ )。由上可知, 土壤干旱程度可以显著影响柠条叶片的光

合特性, 在特重干旱下,  $P_n$ 、 $T_r$ 、 $G_s$  和  $C_i$  大幅度下降, 植物的光合作用会受到严重制约。

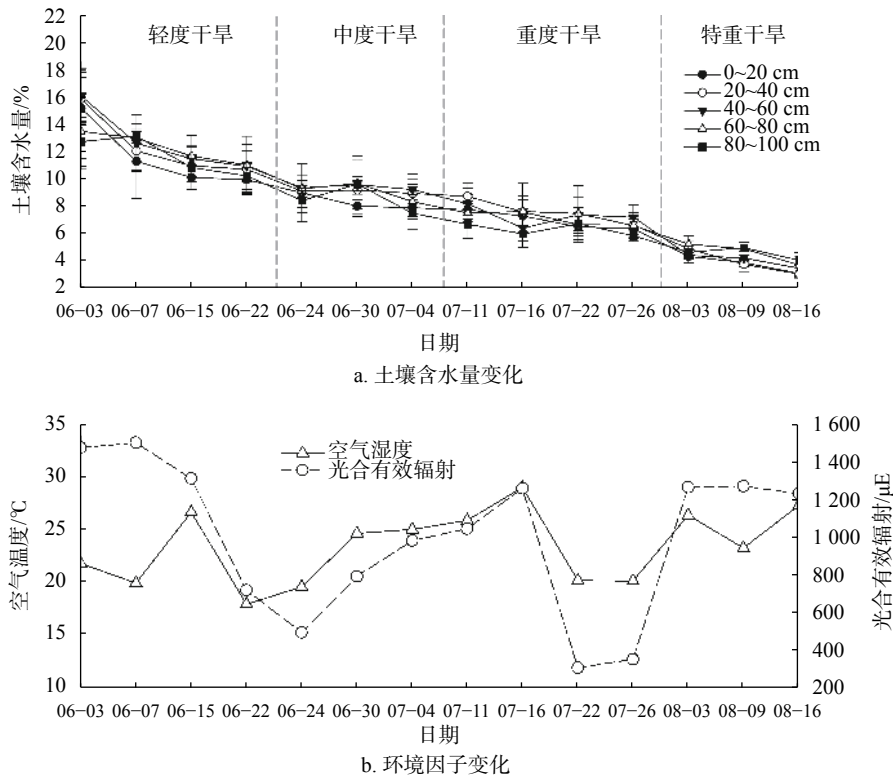


图1 柠条灌丛环境因子动态变化特征

Fig. 1 Dynamics of environment factors of *C. korshinskii* plantations

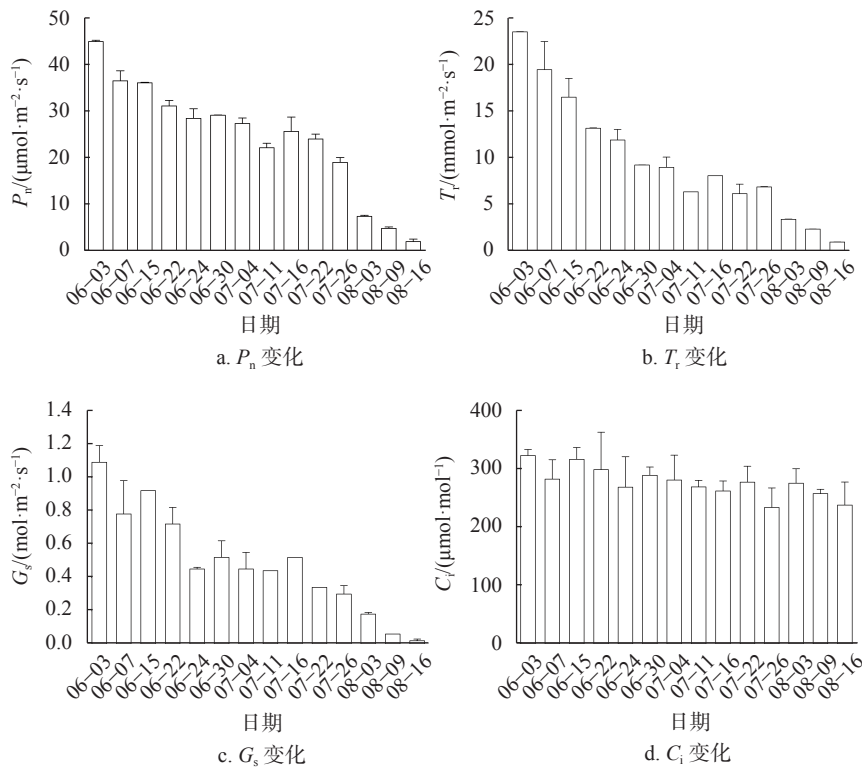


图2 柠条叶片光合特性动态变化特征

Fig. 2 Dynamics of physiological characteristics indexes of *C. korshinskii* leaves

### 2.3 柠条叶片光合特性对土壤水分的响应

通过建立回归方程，分别采用对数模型、指数模型和线性模型拟合土壤含水量对柠条叶片  $P_n$ 、 $T_r$ 、 $G_s$  和  $C_i$  的影响。如图 3 所示，当土壤含水量处于 3.76%~16.15% 范围内， $P_n$  随土壤含水量增大而增大，二者的拟合关系符合对数函数，且具有极显著的相关性 ( $P<0.01$ )，土壤含水量可解释  $P_n$  变化的 98.69%； $T_r$  随土壤含水量的增

大而增大，二者的拟合关系符合线性模型，且具有极显著的相关性 ( $P<0.01$ )，土壤含水量可解释  $T_r$  变化的 95.60%； $G_s$  随土壤含水量的增大而增大，二者的拟合关系符合线性模型，且具有极显著的相关性 ( $P<0.01$ )，土壤含水量可解释  $G_s$  变化的 94.57%； $C_i$  随土壤含水量的增大而增大，二者的拟合关系符合指数模型，且具有显著的相关性 ( $P<0.05$ )，土壤含水量可解释  $C_i$  变化的 62.54%。

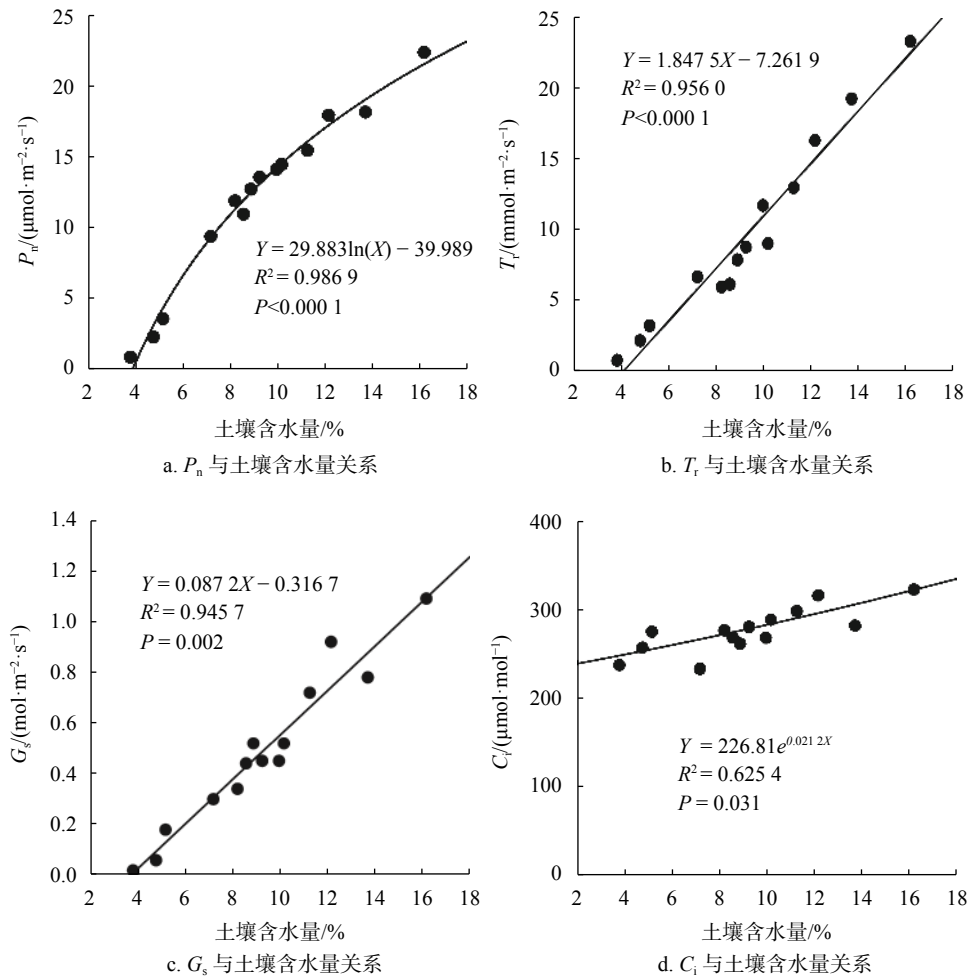


图 3 柠条叶片光合特性与土壤含水量的关系

Fig. 3 Relationship between physiological indexes and soil water content of *C. korshinskii* leaves

### 2.4 干旱胁迫下柠条叶片水分利用特征

如图 4a 所示，柠条叶片 WUE 的变化范围是 1.88~3.92  $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ ，在试验期间呈现单峰曲线变化趋势。依据土壤干旱程度划分 WUE 变化，不同土壤干旱程度下柠条叶片 WUE 差异显著 ( $P<0.05$ )，表现为重度干旱 (3.35  $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ ) > 中度干旱 (2.87  $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ ) > 轻度干旱 (2.08  $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ ) > 特重干旱 (2.15  $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ )。采用多项式回归模型拟合土壤含水量对柠条叶片

WUE 的影响，如图 4b 所示，WUE 随土壤含水量的增大呈先增大后减小的趋势，当土壤含水量为 7%~9% 时，WUE 达到最优化，在土壤含水量较为充盈或是极端干旱的条件下，WUE 均处于较低水平。WUE 和土壤含水量的拟合关系符合多项式函数，具有显著的相关性 ( $P<0.05$ )，土壤含水量可解释 WUE 变化的 48.73%。除土壤水分外，一般来说，植物 WUE 还受到植物生理因子和环境因子等多方面的影响。通过 Pearson 相关性检

验(表2), 柠条叶片 WUE 与太阳总辐射和光合有效辐射呈极显著负相关关系 ( $P < 0.01$ ), 与空

气温度和  $T_r$  呈显著负相关关系 ( $P < 0.05$ ), 而与  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $C_i$  相关性较弱。

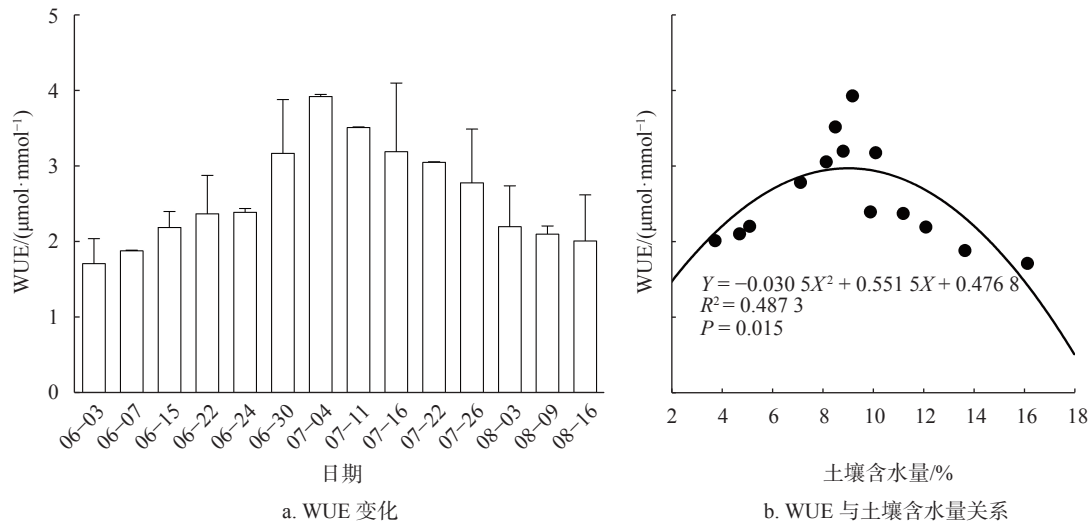


图4 柠条叶片水分利用效率与土壤含水量的关系

Fig. 4 Relationship between water use efficiency and soil water content of *C. korshinskii* leaves

表2 水分利用效率与植物、环境因子的相关系数

Table 2 Correlation coefficients of water use efficiency with vegetation and environment factors

指标	相关系数
空气温度	-0.426*
太阳总辐射	-0.582**
光合有效辐射	-0.593**
$P_n$	-0.022
$G_s$	-0.215
$C_i$	-0.258
$T_r$	-0.475*

### 3 结论与讨论

土壤水分是植物生长过程的主要决定要素之一, 会在不同程度上影响着植物的各种生理和生态过程, 水分利用的有效性直接影响植物的光合作用和群落生产力<sup>[15]</sup>。尤其是在水分匮乏的荒漠生态系统中, 有限的降水补给和巨大的蒸散消耗, 导致该区土壤经常性处于干旱状态, 而干旱胁迫严重影响植物的生长生理进程, 是植物受到的一切非生物损害中, 最严重的影响因子之一。在本研究中, 通过人工控制土壤水分补给量和干旱程度, 结果表明土壤干旱程度可以显著影响柠条叶片的光合特性,  $P_n$ 、 $T_r$ 、 $G_s$  和  $C_i$  均表现为轻度干旱>中度干旱>重度干旱>特重干旱, 植物的光合作用在干旱胁迫下受到严重制约, 这与罗彬

莹等<sup>[14]</sup>对樟树 (*Cinnamomum camphora*) 幼苗及 Yin 等<sup>[16]</sup>对干旱区杨树 (*Populus sp.*) 的研究结果一致。柠条叶片光合指标对干旱胁迫的响应, 与植物自身的抗旱策略有关<sup>[17]</sup>。干旱越严重, 气孔关闭的程度越大, 导致  $G_s$  大幅下降, 并造成  $P_n$  的明显受限。气孔关闭的同时能显著减少水分蒸腾, 防止体内水分逸散<sup>[18]</sup>。因此, 植物在干旱胁迫下的自我保护机制, 是造成光合作用受限的主要原因<sup>[19-20]</sup>。

WUE 能够反映植物耗水与其生产力之间的关系, 荒漠生态系统中的植物以其独特的抗旱策略, 在水分亏缺时能以高效的水分利用方式来抵御干旱胁迫<sup>[21]</sup>。在本研究中, WUE 随土壤含水量的增大呈先增大后减小的趋势, 当土壤含水量为 7%~9% 时, WUE 达到最优化, 而在土壤含水量相对较大或是极端干旱的条件下, WUE 均处于较低水平, 这与崔英等<sup>[22]</sup>对祁连山柏及杨司睿等<sup>[18]</sup>对罗布泊人工梭梭林的研究结果一致。Jennifer 等<sup>[23]</sup>研究也表明, 土壤水分变化能够改变植物的水分利用特征, 并且植物对水分变化的适应性与环境关系密切 (如持续干旱或高于平均值的降雨)。这说明荒漠区柠条对水分的利用存在一个最适区间, 适当干旱的土壤水分环境, 能够促进其健康生长和正向演替。因此, 在水分匮乏的荒漠区进行人工建植时, 应当考虑对拟选植物种 WUE 的科学评价, 以及对植物生长需水与环境水分承载力间动态平衡的考量, 从而促进荒

漠生态系统的正向演替和发展。

植物 WUE 既受自身因子调控, 同时还受外部环境因子的影响。在本研究中, 柠条叶片 WUE 与太阳总辐射、光合有效辐射、空气温度和  $T_r$  呈显著负相关关系, 这与苏培玺等<sup>[24]</sup>对沙拐枣和泡泡刺等荒漠植物以及白灵娜等<sup>[25]</sup>对青海不同抗旱植物的研究结果一致。植物叶片光合作用、蒸腾作用及气孔变化规律对外部环境因子的敏感性, 是叶片 WUE 差异性表现的基础, 太阳辐射、温度等环境因子都是通过对植物的生理生化功能产生影响, 进而间接改变了叶片的水分策略<sup>[26]</sup>。但是也有学者提出, 植物 WUE 不仅受自身和环境因子控制, 基因遗传特性也能够很大程度上改变叶片水力行为<sup>[27]</sup>。然而, 目前对于柠条光合和水分利用的相关调控基因研究仍比较缺乏, 这是今后需要深入研究的科学问题。

#### [参 考 文 献]

- [1] Gao S B, Zheng Z R, Wang Y K, et al. Drought and grazing drive the retrogressive succession by changing the plant-plant interaction of the main species in Inner Mongolia Steppe [J]. *Ecology & Evolution*, 2018, 8(23): 11954–11963.
- [2] 董蕾, 李吉跃. 植物干旱胁迫下水分代谢、碳饥饿与死亡机理 [J]. *生态学报*, 2013, 33(18): 5477–5483.
- [3] Slot M, Winter K. In situ temperature relationships of biochemical and stomatal controls of photosynthesis in four lowland tropical tree species [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2017, 40(12): 3055–3068.
- [4] 黄晓露, 李慈代, 廖健明, 等. PEG 模拟干旱胁迫对美国山核桃实生幼苗生理特性的影响 [J]. *西部林业科学*, 2020, 49(5): 47–53.
- [5] Li Z, Bai W, Zhang L, et al. Increased water supply promotes photosynthesis, C/N ratio, and plantamajoside accumulation in the medicinal plant *Plantago depressa* Willd [J]. *Photosynthetica*, 2016, 54(4): 551–558.
- [6] 郭忠升, 邵明安. 黄土丘陵半干旱区柠条锦鸡儿人工林对土壤水分的影响 [J]. *林业科学*, 2010, 46(12): 1–7.
- [7] 程积民, 万惠娥, 王静, 等. 半干旱区柠条生长与土壤水分消耗过程研究 [J]. *林业科学*, 2005, 41(2): 37–41.
- [8] 李彦瑾, 赵忠, 孙德祥, 等. 干旱胁迫下柠条锦鸡儿的水分生理特征 [J]. *西北林学院学报*, 2008, 23(3): 1–4.
- [9] 张文文, 郭忠升, 宁婷, 等. 黄土丘陵半干旱区柠条林密度对土壤水分和柠条生长的影响 [J]. *生态学报*, 2015, 35(3): 725–732.
- [10] 裴斌, 张光灿, 张淑勇, 等. 土壤干旱胁迫对沙棘叶片光合作用和抗氧化酶活性的影响 [J]. *生态学报*, 2013, 33(5): 1386–1396.
- [11] 王林龙, 李清河, 徐军, 等. 不同种源油蒿形态与生理特征对干旱胁迫的响应 [J]. *林业科学*, 2015, 51(2): 37–43.
- [12] 全国气候与气候变化标准化技术委员会. 气象干旱等级: GB/T 20481—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [13] 李友文, 李春梅, 郝璐. 我区农田、草地土壤墒情类型及其相对含水率等级指标的确定 [J]. *内蒙古气象*, 1999(4): 24–28.
- [14] 罗彬莹, 刘卫东, 吴际友, 等. 干旱胁迫对樟树幼苗光合特性和水分利用的影响 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2019, 39(5): 49–55.
- [15] Phoenix G K, Gwynn J D, Callaghan T V, et al. Effects of global change on a sub-Arctic heath: effects of enhanced UV-B radiation and increased summer precipitation [J]. *Journal of Ecology*, 2001, 89(2): 256–267.
- [16] Yin C, Duan B, Wang X, et al. Morphological and physiological responses of two contrasting Poplar species to drought stress and exogenous abscisic acid application [J]. *Plant Science*, 2004, 167(5): 1091–1097.
- [17] Calcerrada R J, Letts G M, Rolo V, et al. Multiyear impacts of partial throughfall exclusion on *Buxus sempervirens* in a Mediterranean forest [J]. *Forest Systems*, 2013, 22(2): 202–213.
- [18] 杨司睿, 范井伟, 孙永强, 等. 罗布泊腹地人工植被梭梭的光学特性及其对干旱胁迫的响应 [J]. *干旱区研究*, 2018, 35(2): 379–386.
- [19] 王连红, 苗杰, 左进城, 等. 不同种源单叶蔓荆对干旱胁迫的生理响应与耐旱性评价 [J]. *西南林业大学学报 (自然科学)*, 2019, 39(1): 69–79.
- [20] 张依南, 张蔚, 田昆, 等. 不同水位下莼菜叶片气孔及光合特性的相关性分析 [J]. *西南林业大学学报 (自然科学)*, 2019, 39(5): 35–42.
- [21] 闫海龙, 张希明, 许浩, 等. 塔里木沙漠公路防护林 3 种植物光合特性对干旱胁迫的响应 [J]. *生态学报*, 2010, 30(10): 2519–2528.



- [22] 崔英, 王占林, 张得芳, 等. 土壤含水量和光照对祁连山圆柏光合生理指标的影响 [J]. 西部林业科学, 2019, 48(5): 95-100.
- [23] Jennifer A P, Wadsworth D W, Pangle R, et al. Reduced transpiration response to precipitation pulses precedes mortality in a pinon-juniper woodland subject to prolonged drought [J]. *New Phytologist*, 2013, 200(2): 375-387.
- [24] 苏培玺, 严巧嫡, 陈怀顺. 荒漠植物叶片或同化枝  $\delta^{13}\text{C}$  值及水分利用效率研究 [J]. 西北植物学报, 2005, 25(4): 116-121.
- [25] 白灵娜, 王占林, 贺康宁, 等. 青海 4 种抗旱树种水分利用效率对水分和光照的响应 [J]. *中国农学通报*, 2016, 32(16): 12-17.
- [26] 夏江宝, 张淑勇, 赵自国, 等. 贝壳堤岛旱柳光合效率的土壤水分临界效应及其阈值分级 [J]. 植物生态学报, 2013, 37(9): 851-860.
- [27] Masle J, Gilmore S R, Farquhar G D. The ERECTA gene regulates plant transpiration efficiency in *Arabidopsis* [J]. *Nature*, 2005, 436(7052): 866-870.

(责任编辑 冯 雪)

