

# 干旱胁迫对黄土高原不同质地土壤长柄扁桃和沙柳幼苗生理生态特征的影响

裴艳武<sup>1</sup>, 黄来明<sup>2,3,4</sup>, 贾小旭<sup>2,3,4</sup>, 邵明安<sup>1,2,3,4</sup>, 张应龙<sup>5</sup>

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101;

3. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

4. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 5. 陕西省神木县生态协会, 陕西 神木 719399)

**摘要:** 通过盆栽控水试验, 研究了干旱胁迫对黄土高原不同质地土壤(砂土、壤土)长柄扁桃和沙柳幼苗光合特性(净光合速率  $P_n$ 、气孔导度  $G_s$ 、胞间  $CO_2$  浓度  $C_i$ 、内禀水分利用效率 WUE)、蒸腾速率  $T_r$  及叶片水势  $\Psi_w$  的影响。结果表明: 干旱胁迫下不同质地土壤长柄扁桃和沙柳  $P_n$ 、 $G_s$ 、WUE 及  $T_r$  均呈现先上升后下降的趋势, 而  $C_i$  和  $\Psi_w$  分别表现为上升和下降趋势。土壤质地显著影响长柄扁桃和沙柳对水分亏缺的敏感性, 在相同干旱程度下, 壤土中长柄扁桃  $P_n$  和  $G_s$  均显著高于砂土, 而沙柳  $P_n$  和  $G_s$  表现为砂土显著高于壤土 ( $p < 0.05$ ) (重度干旱除外)。当土壤含水量降至中度和重度干旱时, 长柄扁桃和沙柳 WUE 在不同质地土壤间具有显著差异 ( $p < 0.05$ )。壤土中长柄扁桃生长优于砂土, 而沙柳则相反。因此, 黄土高原植被恢复与生态建设过程中不仅应根据土壤水分状况选择造林树种, 还应考虑植物在不同质地土壤上对干旱胁迫的不同响应。

**关键词:** 干旱胁迫; 土壤质地; 长柄扁桃; 沙柳; 生理响应

**中图分类号:** S728.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2018)05-0000-00

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbxb.2018.05.000

## Effects of Drought Stress on the Physiological and Ecological Characteristics of *Amygdalus pedunculata* Pall and *Salix psammophila* Seedlings in Soils with Different Texture on the Loess Plateau

PEI Yanwu<sup>1</sup>, HUANG Laiming<sup>2,3,4</sup>, JIA Xiaoxu<sup>2,3,4</sup>, SHAO Ming'an<sup>1,2,3,4</sup>, ZHANG Yinglong<sup>5</sup>

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100;

2. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources

Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101; 3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the

Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100; 4. College of Resources and

Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 5. Shenmu Ecological Association, Shenmu, Shaanxi 719399)

**Abstract:** The present study investigated the photosynthetic characteristics (net photosynthetic rate ( $P_n$ ), stomatal conductance ( $G_s$ ), intercellular  $CO_2$  concentration ( $C_i$ ), internal water use efficiency (WUE)), transpiration rate ( $T_r$ ) and leaf water potential ( $\Psi_w$ ) of *Amygdalus pedunculata* Pall and *Salix psammophila* under drought stress in soils with different textures (sandy soil and loamy soil) on the Loess Plateau through water control pot experiment. The results showed that  $P_n$ ,  $G_s$ , WUE and  $T_r$  of *A. pedunculata* Pall and *S. psammophila* in soils with different textures increased firstly and then declined under the drought stress, while  $C_i$  and  $\Psi_w$  showed a trend of rising and decreasing, respectively. Soil texture significantly affected the sensitivity of *A. pedunculata* Pall and *S. psammophila* to the water deficiency. Under the same drought degree, the  $P_n$  and  $G_s$  of *A. pedunculata* Pall in the loamy soil were significantly higher than those in the sandy soil, while an opposite trend was observed for the *S. psammophila* ( $p < 0.05$ ) (except the severe

收稿日期: 2018-00-00

资助项目: 国家自然科学基金项目(41601221); 中国科学院水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室开放基金项目(A314021402-1602); 中国科学院地理科学与资源研究所兼维优秀青年人才基金项目(2017RC203); 生态系统观测与模拟重点实验室青年创新研究团队项目(LENOM2016Q0001)

第一作者: 裴艳武(1992—), 男, 博士研究生, 主要从事土壤物理研究。E-mail: peiyanwuxn@163.com

通信作者: 邵明安(1956—), 男, 研究员, 主要从事土壤物理研究。E-mail: shaoma@igsnr.ac.cn

黄来明(1984—), 男, 副研究员, 主要从事土壤地理与水文生态研究。E-mail: huanglm@igsnr.ac.cn

drought treatment). A significant difference in WUE of *A. pedunculata* Pall and *S. psammophila* was observed between the soils with different textures when the soil moisture was reduced to moderate and severe drought ( $p < 0.05$ ). The growth of *A. pedunculata* Pall in the loamy soil was better than that in the sandy soil, while *S. psammophila* showed an opposite trend. Therefore, during the vegetation restoration and ecological construction on the Loess Plateau, the tree species should be chosen not only according to the soil water condition, but also considering the different responses of vegetation to drought stress in soils with different textures.

**Keywords:** drought stress; soil texture; *Amygdalus pedunculata* Pall; *Salix psammophila*; physiological response

黄土高原地区水土流失十分严重,是我国西北典型的生态脆弱区,植被恢复与生态重建是提高黄土高原生态系统服务功能的重要措施。然而,长期以来黄土高原生态建设面临水资源不足→植被配置不合理→生态系统服务功能低。特别是在降水量少、植物蒸腾量大、人为扰动剧烈等因素的长期共同作用下,近年来黄土高原不同地区均出现了土壤水分亏缺现象,土壤干燥化日趋严重<sup>[1-2]</sup>。最近的研究<sup>[3]</sup>表明,黄土高原植被恢复已接近该地区水资源植被承载力的阈值。如何适地适度进行植被建设是黄土高原当前生态文明建设面临的重要问题。随着全球气候变暖<sup>[4]</sup>和人为活动不断改变区域水循环格局<sup>[5]</sup>,世界各地包括黄土高原短期干旱现象频繁发生且日益加重。自然因素和人为作用共同驱动下的地区干旱和土壤干燥化已成为黄土高原植被可持续建设的重要限制因子。因此,研究典型植被对干旱胁迫的响应特征及其适应机制对于黄土高原植被恢复与生态重建具有重要意义。

已有研究<sup>[6-8]</sup>表明,不同类型植物以及同一植物各个时期和生理过程对于干旱胁迫的敏感性不同。最近一些学者对于干旱胁迫下黄土高原 4 种乡土禾草的抗氧化特性<sup>[6]</sup>和 4 种蒿属植物的叶片形态解剖学特征<sup>[8]</sup>进行了研究,结果表明,4 种乡土禾草中冰草的抗氧化能力和抗旱性最强,其次为无芒隐子草和白羊草,长芒草的抗氧化能力和抗旱性最差;而 4 种蒿属植物中黄花蒿的叶片解剖学特征受到干旱的影响变化最大,铁杆蒿和猪毛蒿次之,茭蒿最弱,3 种优势种(猪毛蒿,茭蒿,铁杆蒿)的干旱适应性显著强于黄花蒿。此外,大量研究<sup>[9-10]</sup>表明,植物对于干旱胁迫的响应方式和适应机制也会因胁迫程度和胁迫时间而呈现出明显的阶段性特点,并且不同植物各阶段响应的信号阈值不同。目前关于干旱胁迫下黄土高原常见林、草的生长、形态和生理生化特征已有许多报道<sup>[6-8]</sup>,但对于该地区固沙植物长柄扁桃和沙柳在不同质地土壤上的适生性及抗旱性研究较少。为此,本研究采用盆栽控水试验,以黄土高原典型植被长柄扁桃和沙柳为研究对象,研究了干旱胁迫对长柄扁桃和沙柳光合特性、蒸腾速率及叶片水势的影响,探讨了不同质地土壤上长柄扁桃和沙柳对干旱胁迫响应的差异,以期黄土高原干旱半干旱地区植被恢复与生态重建提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本研究在中国科学院水利部水土保持研究所神木侵蚀与环境试验站进行,试验站位于陕西省神木市六道沟小流域(110°21′—110°23′ E, 38°46′—38°51′ N),海拔 1 094~1 273 m。该小流域位于毛乌素沙漠边缘地带,属于典型的盖沙黄土丘陵地貌,是晋陕蒙水蚀风蚀交错带强烈侵蚀中心。该流域面积为 6.9 km<sup>2</sup>,成土母质为黄土,气候类型为半干旱大陆性季风气候。年均气温 8.4℃,年均降水量为 437 mm,年际变化较大,其中 6—9 月的降水占全年降水量的 77%,且多以暴雨形式出现。流域内大部分天然植被已经被人为破坏,为了防止土壤侵蚀和生态环境的进一步恶化,该区域开展了退耕还林草措施,植被类型主要包括杏树、沙柳、苜蓿、柠条、长柄扁桃、长芒草等<sup>[12]</sup>。长柄扁桃和沙柳是优良的防风固沙树种<sup>[11-12]</sup>,近年来国家和地方政府为加快荒漠化治理在陕北地区进行了大面积推广和种植,并建设了大面积长柄扁桃基地<sup>[13]</sup>。

### 1.2 供试材料与处理

本研究选取基地培育的 1 年生长柄扁桃幼苗和扦插获得的沙柳幼苗,采用盆栽实验的方法在神木侵蚀与环境试验站进行露天培养,阴雨天时利用可移动遮雨棚防止雨水的渗入。盆栽所用铁皮桶高 30 cm,口径 25 cm。所用土壤采自六道沟小流域内壤土和砂土,土壤基本理化性质见表 1。土壤采集后风干过筛(筛孔直径 2 mm),风干土分层多次填装保持土壤容重与田间一致,壤土和砂土分别填装 7, 8 kg。填装土壤后向各盆加水至饱和,静置 2 天后,取长势一致的长柄扁桃和沙柳幼苗移栽至盆中,植株长势稳定后每盆定株幼苗 3 棵。

盆栽实验设置 4 种组合方式(砂土—长柄扁桃、壤土—长柄扁桃、砂土—沙柳和壤土—沙柳),每种组合方式设置 5 次重复。各盆表面均匀覆盖砾石(直径 0.5~1.0 cm),抑制土壤水分蒸发。待植株生长 1 个月(保证受试植株全部成活)后开始干旱胁迫试验,当盆栽土壤含水量由 80% FC(对照)分别降至 60% FC, 40% FC 和 20% FC 时,分别观测长柄扁桃和沙柳幼苗光合特性(净光合速率  $P_n$ 、气孔导度  $G_s$ 、胞间  $CO_2$  浓度  $C_i$ 、内禀水分利用效率 WUE)及叶片水势

( $\Psi_w$ )的日变化规律,其中内禀水分利用效率(WUE)由计算获得。此外,在土壤水分自然消耗过程中,每

隔2天采用称重法观测植株蒸腾耗水和土壤含水量随持续干旱天数的变化规律。

表1 土壤基本理化性质

土壤类型	容重/ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	饱和导水率/ ( $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ )	田间持水量/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	土壤机械组成/%			总有机碳/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	全氮/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	全磷/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
				黏粒	粉粒	砂粒			
砂土	1.65	13.44	147.72	5.15	31.28	63.58	2.07	1.32	1.38
壤土	1.36	8.23	274.35	13.88	51.13	34.99	3.49	1.54	1.67

注:表中饱和导水率为 $10^\circ\text{C}$ 条件下的测定结果。下同。

### 1.3 测定项目与方法

采用便携式CL-340光合仪和露点法PSYPRO水势测量系统分别对各处理光合特性和叶水势进行全天候观测(8:00—19:00),测定频率为1次/h。各处理土壤水分自然消耗,期间采用称重法每隔2天(共14次)测定植株蒸腾速率和土壤质量含水量。试验期间气温和光照强度日均值变化见图1。

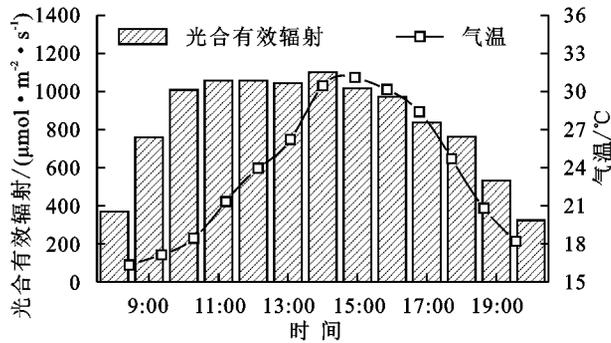


图1 光合有效辐射(PAR)和气温日动态变化特征

### 1.4 数据分析

采用SPSS 16.0进行数据分析,采用双因素分析法(LSD)分析处理间的差异显著性( $\alpha=0.05$ ),采用Origin 9.0进行作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 干旱胁迫对不同质地土壤长柄扁桃和沙柳幼苗光合参数的影响

由图2可知,干旱胁迫显著影响不同质地土壤长柄扁桃和沙柳幼苗净光合速率( $P_n$ )和气孔导度( $G_s$ )( $p<0.05$ )。与对照(CK—80%FC)相比,随着干旱胁迫的增强不同质地土壤长柄扁桃和沙柳幼苗 $P_n$ 和 $G_s$ 均呈现先升高后下降的趋势,表明轻度干旱有利于长柄扁桃和沙柳的生长。相同干旱程度下(60%FC,40%FC,20%FC)壤土中长柄扁桃 $P_n$ 和 $G_s$ 均显著高于砂土,分别高出3.87,2.64,1.01  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和24.72,20.47,13.12  $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。相反,砂土中沙柳 $P_n$ 和 $G_s$ 在轻度干旱(60%FC)和中度干旱(40%FC)胁迫下显著高于壤土,分别高出3.21,2.28  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和18.79,15.67  $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,而重度干旱胁迫下(20%FC)不同质地土壤沙柳 $P_n$ 和 $G_s$ 没有显著差异。不同质地土壤长柄扁桃和沙柳胞间 $\text{CO}_2$ 浓度( $C_i$ )对干旱胁迫的响应特征不同。与对照(CK—80%FC)相比,长柄扁桃和沙

柳 $C_i$ 在不同干旱胁迫下(60%FC,40%FC和20%FC)呈现先下降后上升趋势,不同质地间长柄扁桃 $C_i$ 无显著差异,而壤土中沙柳 $C_i$ 在中度干旱胁迫(40%FC)下显著高于砂土( $p<0.05$ )。

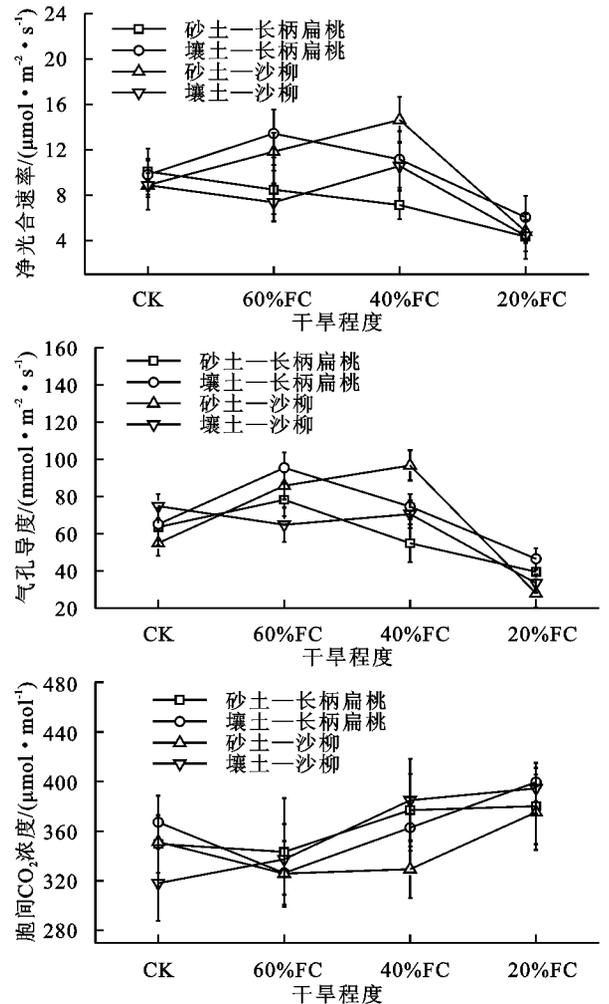


图2 不同土壤质地条件下长柄扁桃和沙柳幼苗净光合速率、气孔导度和胞间 $\text{CO}_2$ 浓度变化特征

### 2.2 干旱胁迫对不同质地土壤长柄扁桃和沙柳幼苗叶片水势和内禀水分利用效率的影响

由表2可知,干旱胁迫显著影响不同质地土壤长柄扁桃和沙柳叶片水势( $\Psi_w$ )( $p<0.05$ )及内禀水分利用效率(WUE)( $p<0.01$ )。与对照(CK—80%FC)相比,60%FC水分处理对不同质地土壤长柄扁桃和沙柳 $\Psi_w$ 的影响较小( $p>0.05$ ),但显著增加了WUE( $p<0.01$ )。随着土壤含水量的持续下降,不同质地土壤长柄扁桃和沙柳 $\Psi_w$ 及WUE与对照

(CK—80% FC)相比均具有显著差异,表明土壤含水量是影响长柄扁桃和沙柳  $\Psi_w$  及 WUE 的重要因素。当土壤含水量降至中度干旱(40% FC)时,不同质地土壤间长柄扁桃和沙柳  $\Psi_w$  及 WUE 均具有显著差异( $p < 0.05$ ),而重度干旱胁迫下(20% FC)砂土中沙柳 WUE 显著高于壤土,表明土壤质地是影响低水势段长柄扁桃和沙柳  $\Psi_w$  及 WUE 的重要因素,且不同植物表现不同。

由图 3 可知,长柄扁桃和沙柳  $\Psi_w$  在不同质地土壤上具有相同的日变化趋势,全天波动较大,最大值和最小值分别出现在 10:00 和 14:00。与对照(CK—80% FC)相比,60% FC 水分处理对长柄扁桃和沙柳  $\Psi_w$  日波动影响较大。当土壤含水量低于 40% FC 时,不同质地土壤长柄扁桃和沙柳  $\Psi_w$  日波动均变小,长柄扁桃和沙柳不同时间  $\Psi_w$  均表现为壤土高于砂土。上述结果进一步证实了当土壤含水量处在低水势段(40% FC 和 20% FC)时土壤质地显著影响长柄扁桃和沙柳  $\Psi_w$ 。不同质地土壤长柄扁桃和沙柳 WUE 日变化趋势相同,均呈现双峰变化趋势,但不同水分处理条件下长柄扁桃和沙柳峰值出现时间略有差异。与对照(CK—80% FC)相比,干旱胁迫处理后长柄扁桃和沙柳幼苗 WUE 日均值呈现先上升后下降趋势。60% FC 水分处理下长柄扁桃和沙柳不同时间 WUE 均表现为砂土略高于壤土,而

40% FC 水分处理下长柄扁桃和沙柳不同时间 WUE 均表现为壤土略高于砂土。当土壤含水量下降至重度干旱(20% FC)时,不同质地土壤长柄扁桃和沙柳  $\Psi_w$  和 WUE 快速下降,且日波动变小。

表 2 不同质地和水分处理条件下长柄扁桃和沙柳叶片水势和内禀水分利用效率变化特征

土壤类型	植物类型	水分处理	叶片水势/MPa	内禀水分利用效率/ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ )
砂土	长柄扁桃	CK(80% FC)	-2.62±0.68 <sup>Aa</sup>	3.20±1.12 <sup>Aa</sup>
		60% FC	-2.84±0.43 <sup>Aa</sup>	4.84±0.95 <sup>Ab</sup>
		40% FC	-3.07±0.29 <sup>Ab</sup>	4.59±1.23 <sup>Ab</sup>
		20% FC	-3.39±0.18 <sup>Ac</sup>	3.76±0.78 <sup>Ac</sup>
壤土	长柄扁桃	CK(80% FC)	-2.68±0.25 <sup>Aa</sup>	3.08±1.01 <sup>Aa</sup>
		60% FC	-2.72±0.28 <sup>Aa</sup>	4.58±0.96 <sup>Ab</sup>
		40% FC	-2.89±0.11 <sup>Ab</sup>	4.82±1.04 <sup>Ab</sup>
		20% FC	-3.47±0.45 <sup>Ac</sup>	3.89±1.23 <sup>Ac</sup>
砂土	沙柳	CK(80% FC)	-2.36±0.43 <sup>Ba</sup>	3.33±1.11 <sup>Aa</sup>
		60% FC	-2.52±0.21 <sup>Ba</sup>	4.03±1.08 <sup>Bb</sup>
		40% FC	-3.01±0.13 <sup>Ab</sup>	5.30±1.02 <sup>Bc</sup>
		20% FC	-3.33±0.26 <sup>Ac</sup>	3.75±1.13 <sup>Abd</sup>
壤土	沙柳	CK(80% FC)	-2.16±0.23 <sup>Ba</sup>	2.60±1.08 <sup>Aa</sup>
		60% FC	-2.28±0.38 <sup>Ba</sup>	4.51±0.98 <sup>Ab</sup>
		40% FC	-2.80±0.16 <sup>Ab</sup>	5.01±1.15 <sup>Bc</sup>
		20% FC	-3.28±0.26 <sup>Ac</sup>	3.26±1.23 <sup>Bd</sup>

注:FC 表示田间持水量;不同大写字母表示同种植物相同含水量不同质地间差异显著( $p < 0.05$ );不同小写字母表示同种植物相同质地不同干旱程度间差异显著( $p < 0.05$ )。

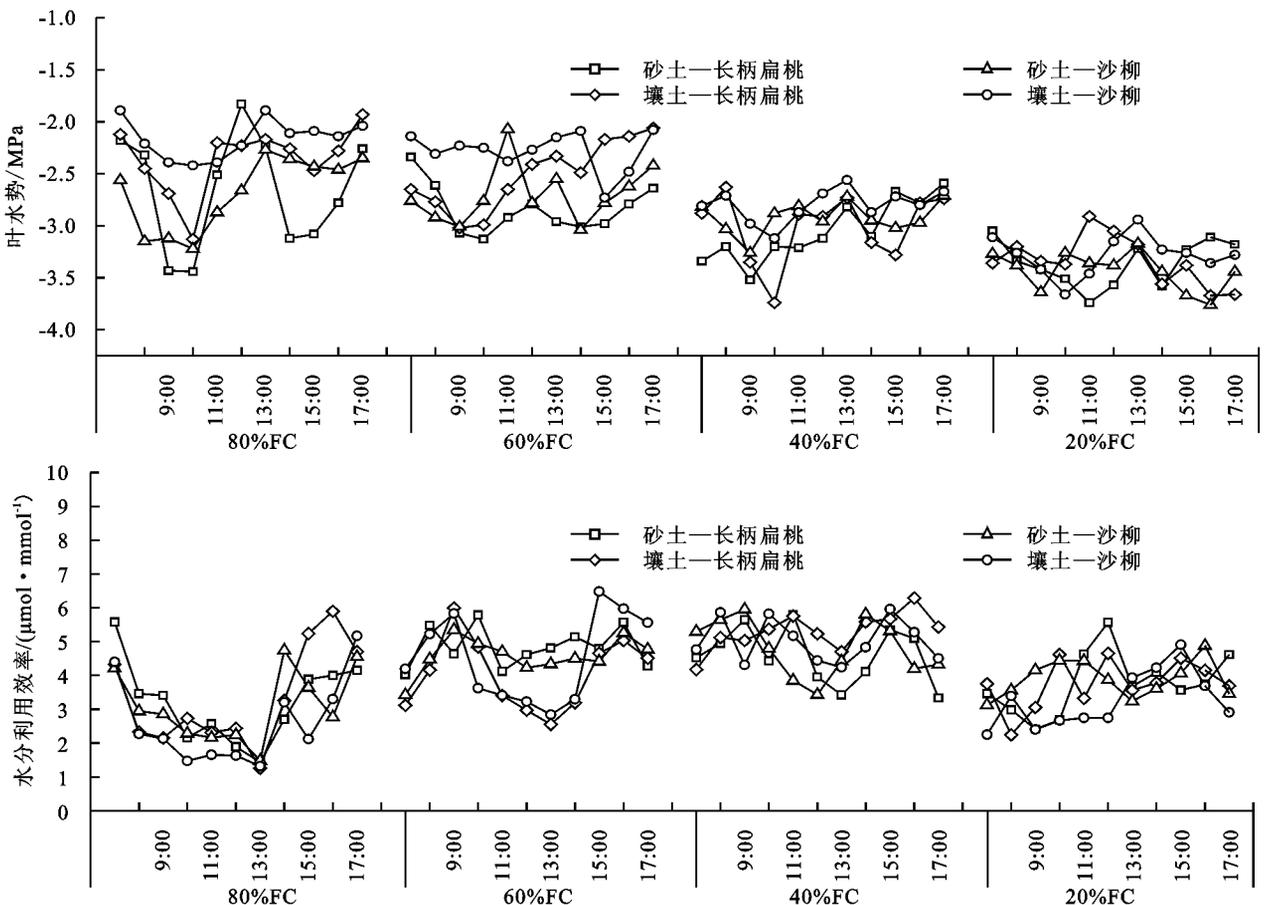


图 3 不同质地和水分处理条件下长柄扁桃和沙柳叶片水势和内禀水分利用效率日变化特征

### 2.3 干旱胁迫对不同质地土壤长柄扁桃和沙柳幼苗蒸腾速率的影响

干旱胁迫下,植物可以通过降低叶片的蒸腾速率来维持体内的水分收支平衡,这是植物应对干旱逆境的一种生存方式。由图4可知,不同质地土壤长柄扁桃和沙柳蒸腾速率随干旱天数增加和土壤质量含水量下降均呈现降低—升高—降低的趋势。在干旱胁迫初期(1~7天),土壤含水量下降较为缓慢,不同质地土壤长柄扁桃和沙柳  $T_r$  出现短暂的下降趋势。当干旱持续至10天左右时,土壤含水量下降速度加快,不同质地土壤长柄扁桃和沙柳  $T_r$  出现上升趋势。当干旱持续至20天时,土壤含水量下降速度减缓,不同质地土壤长柄扁桃和沙柳  $T_r$  均快速下降。在整个干旱胁迫期间,砂土中长柄扁桃  $T_r$  峰值较壤土中长柄扁桃早出现7天左右,而砂土中沙柳  $T_r$  峰值较壤土中沙柳早出现4天左右,表明土壤质地影响干旱胁迫下长柄扁桃和沙柳  $T_r$  的变化速率。

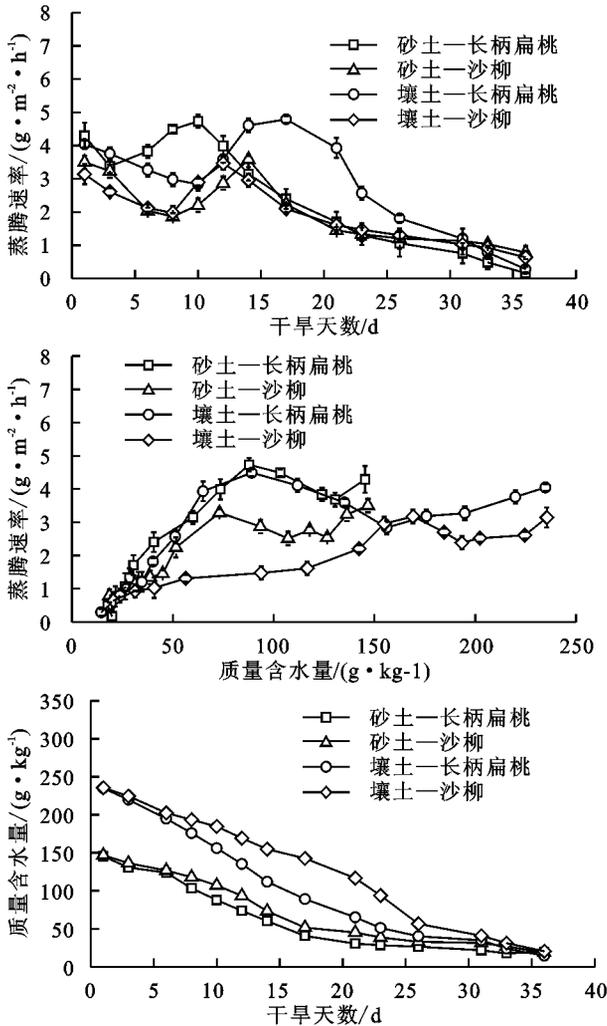


图4 不同质地土壤长柄扁桃和沙柳幼苗蒸腾速率及土壤含水量随干旱时间的变化规律

## 3 讨论

干旱是阻碍植物生长发育的最重要的非生物因子之一。黄土高原植被恢复已接近该地区水资源植被承

载力的阈值<sup>[3]</sup>,自然和人为作用共同驱动下的土壤干旱已成为黄土高原植被恢复和生态重建的重要限制因子。本研究通过盆栽控水试验揭示了不同质地土壤上长柄扁桃和沙柳对干旱胁迫的响应特征,对于黄土高原因地制宜进行植被建设和优化植被配置具有重要意义。光合作用是构成植物生物量的基础,光合参数发生变化是植物响应干旱胁迫的重要特征之一<sup>[14]</sup>。本研究结果表明,干旱胁迫强度和土壤质地均影响长柄扁桃和沙柳光合参数的响应特征。与对照(CK—80% FC)相比,不同质地土壤长柄扁桃和沙柳  $P_n$  及  $G_s$  在轻度干旱胁迫下(60% FC)略有升高,而在中度和重度干旱胁迫下(40% FC和20% FC)显著降低。在相同干旱程度下,壤土中长柄扁桃  $P_n$  和  $G_s$  均显著高于砂土,而沙柳  $P_n$  和  $G_s$  却表现为砂土显著高于壤土(重度干旱20% FC除外)。上述结果表明植物在不同质地土壤上的适生性不同,长柄扁桃在壤土中对干旱的适应性更强,而沙柳在砂土中对干旱的适应性更强。影响光合作用的因素分为气孔因素和非气孔因素,前者是指干旱胁迫导致气孔导度下降,CO<sub>2</sub> 进入叶片受阻而使光合速率下降,而后者是指叶肉细胞的光合活性下降。Farquha等<sup>[15]</sup>认为  $P_n$ ,  $G_s$  和  $C_i$  浓度均下降,是由于气孔因素所致,  $P_n$  和  $G_s$  下降而  $C_i$  升高,则表明是非气孔因素所致。本研究不同质地土壤长柄扁桃和沙柳  $P_n$  及  $G_s$  下降时  $C_i$  略有升高,因此光合作用下降主要受非气孔因素控制。裴斌等<sup>[16]</sup>对不同程度干旱胁迫下沙棘叶片的光合作用进行了研究,得出相同的结论。李娟等<sup>[17]</sup>研究表明,气孔是干旱胁迫下黄条金刚竹光合参数变化的主导因素,但外界环境条件(大气湿度和温度)对  $P_n$  和  $G_s$  也具有显著影响。

在干旱胁迫环境下,植物可以通过合理协调碳同化和水分消耗之间的关系,从而调节叶片水势和水分利用效率,这是植物抗旱策略的重要组成部分<sup>[9]</sup>。本研究表明随着干旱胁迫增强,不同质地土壤长柄扁桃和沙柳 WUE 均呈现先升高后下降的趋势,即适度干旱胁迫能够提高长柄扁桃和沙柳 WUE。对沙棘<sup>[16]</sup>、山杏<sup>[18]</sup>和玉米<sup>[19]</sup>等不同植物的研究也有类似的规律。Zhang等<sup>[20]</sup>、Zhang等<sup>[21]</sup>将植物叶片同时获得较大光合作用水平和 WUE 时的土壤水分含量称之为“高效水阈值”或“经济水阈值”,但未考虑土壤质地对植物 WUE 的影响。本研究表明,长柄扁桃和沙柳 WUE 不仅随土壤含水量变化而变化,还受土壤质地的影响。当土壤含水量降至中度干旱(40% FC)时,不同质地土壤间长柄扁桃和沙柳  $\Psi_w$  及 WUE 均具有显著差异( $p < 0.05$ ),而重度干旱胁迫下(20% FC)砂土中沙柳 WUE 显著高于壤土,表明土壤质地是影响低水势段长柄扁桃和沙柳  $\Psi_w$  及 WUE 的重要因素,且不同植物表现不同,表明土壤质地是影响低水势段长柄扁桃和沙柳 WUE 的重要因素。因此,

建立植物“高效水阈值”时应充分考虑不同质地土壤上植物 WUE 可能存在的显著差异。

蒸腾速率是反映植物耗水能力的重要参数,植物可以通过气孔开合来调节蒸腾,降低或抵抗干旱胁迫对植物生理活动的影响<sup>[22]</sup>。当水分不足时,气孔往往部分关闭或全部关闭,从而降低  $T_r$ ,减少水分散失,也使进入叶片的  $\text{CO}_2$  减少,导致  $P_n$  下降。但在轻度干旱条件下,气孔对蒸腾散失水分的影响大于对  $\text{CO}_2$  吸收和扩散的限制。蒸腾失水与光合碳同化对水分亏缺敏感性的差异直接导致轻度干旱胁迫下植物水分利用效率的提高,这构成节水生物学的生理基础<sup>[9]</sup>。本研究表明,不同质地土壤长柄扁桃和沙柳  $T_r$  随干旱天数增加和土壤质量含水量下降均呈现降低—升高—降低的趋势,当土壤含水量低于 75 g/kg (30% FC) 时,  $T_r$  快速下降。砂土中长柄扁桃  $T_r$  峰值较壤土中长柄扁桃早出现 7 天左右,而砂土中沙柳  $T_r$  峰值较壤土中沙柳早出现 4 天左右,表明土壤质地影响干旱胁迫下长柄扁桃和沙柳  $T_r$  的变化速率。

## 4 结论

干旱胁迫下不同质地土壤长柄扁桃和沙柳幼苗净光合速率 ( $P_n$ ), 气孔导度 ( $G_s$ ), 水分利用效率 (WUE) 及蒸腾速率 ( $T_r$ ) 均呈现先上升后下降的趋势,而胞间  $\text{CO}_2$  浓度 ( $C_i$ ) 和叶水势 ( $\Psi_w$ ) 分别表现为上升和下降趋势。土壤质地显著影响长柄扁桃和沙柳对水分亏缺的敏感性,在相同干旱程度下,壤土中长柄扁桃  $P_n$  和  $G_s$  均显著高于砂土,而沙柳  $P_n$  和  $G_s$  表现为砂土显著高于壤土 ( $p < 0.05$ ) (重度干旱除外)。当土壤含水量降至中度和重度干旱时,长柄扁桃和沙柳 WUE 在不同质地土壤间具有显著差异 ( $p < 0.05$ )。因此,在黄土高原进行植被恢复与生态建设时,不仅应根据土壤水分状况选择造林树种,还应考虑植物在不同质地土壤上对干旱胁迫的不同响应。

### 参考文献:

[1] 邵明安,贾小旭,王云强,等. 黄土高原土壤干层研究进展与展望[J]. 地球科学进展,2016,31(1):14-22.

[2] Shao M A, Wang Y Q, Xia Y Q, et al. Soil drought and water carrying capacity for vegetation in the critical zone of the Loess Plateau: A review [J]. Vadose Zone Journal, 2018, 17:e170077.

[3] Feng X, Fu B, Piao S, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits [J]. Nature Climate Change, 2016, 6(11): 1019-1022.

[4] Dai A. Erratum: Drought under global warming: A review [J]. Wiley Interdisciplinary Reviews Climate Change, 2011, 2(1): 45-65.

[5] Liang W, Bai D, Wang F, et al. Quantifying the impacts of climate change and ecological restoration on streamflow changes based on a Budyko hydrological model in China's Loess Plateau [J]. Water Resources

Research, 2015, 51(8): 6500-6519.

- [6] 单长卷,韩蕊莲,梁宗锁. 干旱胁迫下黄土高原 4 种乡土禾草抗氧化特性[J]. 生态学报,2012,32(4):1174-1184.
- [7] 蔡马,韩蕊莲,靳淑静,等. 黄土高原半灌木达乌里胡枝子和铁杆蒿对土壤干旱胁迫的生理响应[J]. 植物资源与环境学报,2013,22(1):43-49.
- [8] 王勇,梁宗锁,龚春梅,等. 干旱胁迫对黄土高原 4 种蒿属植物叶形态解剖学特征的影响[J]. 生态学报,2014,34(16):4535-4548.
- [9] Katiyaragarwal S. Methods and concepts in quantifying resistance to drought, salt and freezing, abiotic stresses that affect plant water status [J]. Plant Journal, 2006, 45(4): 523-539.
- [10] 安玉艳,梁宗锁. 植物应对干旱胁迫的阶段性策略[J]. 应用生态学报,2012,23(10):2907 - 2915.
- [11] Jia H, Yang H, Sun P, et al. De novo transcriptome assembly, development of EST-SSR markers and population genetic analyses for the desert biomass willow, *Salix psammophila* [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 39591.
- [12] 毛娜,邵明安,黄来明. 六道沟小流域地形序列土壤碳剖面分布特征及影响因素[J]. 水土保持学报,2017,31(05):222-230.
- [13] 张应龙,申烨华,郭春会,等. 长柄扁桃在治沙固沙中的应用,中国 CN200910021255.5 [P]. 2009-07-22.
- [14] 王海珍,韩路,徐雅丽,等. 干旱胁迫下胡杨光合响应过程模拟与模型比较[J]. 生态学报,2017,37(7):2315-2324.
- [15] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis [J]. Annual Review of Plant Physiology, 1982, 33(3): 317-345.
- [16] 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.
- [17] 李娟,彭镇华,高健,等. 干旱胁迫下黄条金刚竹的光合和叶绿素荧光特性[J]. 应用生态学报,2011,22(6): 1395-1402.
- [18] 夏江宝,张光灿,孙景宽,等. 山杏叶片光合生理参数对土壤水分和光照强度的阈值效应[J]. 植物生态学报, 2011,35(3):322-329.
- [19] 于文颖,纪瑞鹏,冯锐,等. 不同生育期玉米叶片光合特性及水分利用效率对水分胁迫的响应[J]. 生态学报, 2015,35(9):2902-2909.
- [20] Zhang G, Xia J, Shao H, et al. Grading woodland soil water productivity and soil bioavailability in the semi-arid Loess Plateau of China [J]. Acta Hydrochimica Et Hydrobiologica, 2012, 40(2): 148-153.
- [21] Zhang S Y, Zhang G C, Gu S Y, et al. Critical responses of photosynthetic efficiency of goldspur apple tree to soil water variation in semiarid loess hilly area [J]. Photosynthetica, 2010, 48(4): 589-595.
- [22] Cochard H. An overview of models of stomatal conductance at the leaf level [J]. Plant Cell & Environment, 2010, 33(9): 1419-1438.