

DOI: 10.11766/trxb201807090294

黄土高原 2 种典型灌木地土壤水分有效性及其影响因素*

裴艳武^{1, 2} 黄来明^{1, 3, 4†} 贾小旭^{1, 3, 4} 邵明安^{1, 2, 3, 4†} 张应龙⁵

(1 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)

(2 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

(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 为确定土壤质地对旱生植物长柄扁桃 (*Amygdalus pedunculata* Pall) 和沙柳 (*Salix psammophila*) 幼苗不同生理指标水分有效性的影响, 采用盆栽控水试验, 研究了黄土高原 2 种典型质地土壤 (砂土和壤土) 下长柄扁桃和沙柳幼苗不同生理指标随相对土壤含水率 (土壤含水率占田间持水率的比值) 的动态变化。结果表明: 2 种质地土壤下长柄扁桃和沙柳幼苗各生理指标相对值在相对含水率降低至土壤水分阈值之前保持相对稳定, 低于此阈值时随相对含水率的降低而迅速下降, 且均可用非线性连续函数来拟合 ($R^2=0.890\ 5\sim 0.986\ 4$)。2 种植物土壤水分有效性因选取指标的不同而略有差异, 当以瞬时气体交换指标 (相对净光合速率 R_{pn} 和相对气孔导度 R_{Gs}) 为评价指标时, 砂土水分有效性高于壤土; 当以相对水分利用效率 R_{WUE} 为评价指标时, 壤土水分有效性高于砂土。瞬时气体交换指标 (R_{pn} 和 R_{Gs}) 的水分阈值高于日变化指标 (相对日蒸腾速率 R_{Td}), 表明土壤质地和时间尺度均会影响植物生理指标对土壤水分有效性的响应。因此, 在黄土高原进行植被恢复与生态建设时应考虑土壤质地对植物水分有效性的影响。

关键词 土壤质地; 长柄扁桃; 沙柳; 生理指标; 水分有效性

中图分类号 S728.2 **文献标识码** A

土壤水分有效性是制约干旱半干旱地区陆地生态系统生产力的一个重要限制因素。在我国黄土高原地区, 土壤水分是限制植物生长发育的关键因素, 研究土壤水分有效性可为黄土高原区域生态系统建设、植被恢复与重建及科学高效用水提供理论

依据^[1]。关于土壤水分有效性的研究有“等效”和“非等效”两种基本观点, 其中, “非等效”学说又可分为极易有效和有效递减学说, 前者表示在土壤含水量由田间持水量降低至凋萎含水量的过程中土壤水分有效性持续降低, 而后者表示在土壤含

* 国家自然科学基金项目 (41601221)、国家重点研发计划重点专项课题 (2016YFC051605)、中国科学院地理科学与资源研究所乘维优秀青年人才项目 (2017RC203) 和生态网络观测与模拟重点实验室青年创新研究团队项目 (LENOM2016Q0001) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41601221), the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFC051605), the Outstanding Young Talent Project of Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research (No. 2017RC203), and the Youth Innovation Research Team Project from Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research (No. LENOM2016Q0001)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: huanglm@igsrr.ac.cn; shaoma@igsrr.ac.cn

作者简介: 裴艳武 (1992—), 男, 河南三门峡人, 博士研究生, 主要从事土壤物理研究。E-mail: peiyanwuxn@163.com

收稿日期: 2018-07-09; 收到修改稿日期: 2018-11-22; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2018-12-17

水量低于临界含水量之前等同有效, 低于此水量后, 随着土壤含水量的降低而逐渐降低, 该临界含水量称为土壤水分阈值^[2-3]。目前, 黄土高原地区土壤水分对植物的有效性研究已取得重要进展, 邵明安等^[4]采用土壤水分有效性来解释黄土区天气少雨而作物高产的现象, 并指出黄土高原土壤水分对植物的有效性存在两个显著特点: (1) 在田间持水量附近随着土壤含水率的下降而迅速下降; (2) 当土壤含水量在40%~80%田间持水量的范围内时, 土壤水分有效性基本保持不变。在此基础上, 郭庆荣和李玉山^[5]采用数学模型量化了黄土高原南部地区土壤水分对植物有效性的动态规律, 并指出植物水分有效性在田间持水量的55%~95%范围内随土壤水分含量的降低呈抛物线规律递减。此后, 张光灿等^[6]研究了黄土高原半干旱区刺槐和侧柏土壤水分有效性, 结果表明, 当土壤含水率低于4.5%和高于19.0%时均为“无效水”, 并将土壤水分划分为“低产低效水”、“中产高效水”、“高效中产水”和“中产低效水”。Sadars和Milroy^[7]总结前人研究指出, 土壤水分阈值依植物类型、选用指标、土壤质地等因子的变化而不同, 并且相同植物属不同基因型的植物表现出不同的土壤水分阈值^[8]。Yan等^[9-10]采用不同指标研究了刺槐、紫穗槐、苜蓿等黄土区典型植物土壤水分有效性, 结果表明, 木本植物土壤水分有效性阈值低于草本植物, 并进一步研究指出, 植物经重复干旱胁迫后, 土壤水分有效性阈值会有不同程度的提高。吴元芝和黄明斌^[11]对不同质地土壤下玉米各生理指标水分有效性进行了研究, 结果表明, 土壤质地显著影响玉米不同生理指标水分有效性, 总体表现为由大到小依次为砂壤土、中壤土、重壤土, 并进一步指出不同生理指标水分有效性也存在差异。以往的研究针对黄土高原地区单一作物或单一林、草植物的土壤水分有效性进行了深入研究, 并取得了重要进展^[3-6, 9-11], 但不同质地土壤下同一植物或不同植物水分有效性是否存在差异目前研究较少。黄土高原土壤质地空间变异较大, 人工植被分布广泛^[12-15], 研究不同质地土壤下典型植物土壤水分有效性差异可为黄土高原因地制宜进行植被建设提供科学依据。

长柄扁桃 (*Amygdalus pedunculata* Pall) 和沙柳 (*Salix psammophila*) 是黄土高原优良的

防风固沙树种, 广泛分布于陕西北部及内蒙古沙地^[16-20]。近年来, 国家和地方政府为加快荒漠化治理, 在黄土高原北部大面积推广和种植长柄扁桃与沙柳。然而, 干旱缺水是限制该地区植被大规模建设的关键因子, 揭示不同质地土壤下长柄扁桃和沙柳土壤水分有效性对于植被合理布局与可持续建设具有重要意义。基于此, 本研究选取旱生植物长柄扁桃和沙柳作为研究对象, 以砂土和壤土为生长基质, 用不同生理参数包括相对净光合速率 (R_{P_n})、相对气孔导度 (R_{G_s})、相对胞间CO₂浓度 (R_{C_i})、相对日蒸腾速率 (R_{T_d}) 以及相对水分利用效率 (R_{WUE}) 作为评价指标, 研究土壤质地对长柄扁桃和沙柳幼苗不同生理指标水分有效性的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

本试验在中国科学院水利部水土保持研究所侵蚀与环境实验站(陕西省神木市)进行, 该站位于神木市以西14 km处的六道沟小流域(38°46'N~38°51'N, 110°21'E~110°23'E), 地处黄土高原与毛乌素沙地过渡地带, 属于黄土高原水蚀风蚀交错带。平均海拔高度约为1 178 m。年均气温8.4 °C, 年降水量442 mm, 降水集中在7—9月份, 暴雨相对集中, 占全年降水量的70%~80%。流域地貌类型为片沙覆盖的黄土丘陵, 土壤颗粒组成差异较大, 主要土壤类型为黄土正常新成土和干旱砂质新成土, 按质地可分为砂土、壤质砂土、砂质壤土、粉砂壤土。流域内土壤颗粒组成以粉砂粒为主, 其中, 粉砂壤土面积约为39.3%, 砂质壤土约为27.8%, 壤质砂土约为16.2%, 砂土约为11.9%^[21]。流域内自然植被破坏严重, 自退耕还林还草以来, 植被条件逐渐得到改善, 目前以人工林为主, 主要植被类型包括山杏、沙柳、长柄扁桃、柠条、苜蓿、紫穗槐、长茅草等^[22]。

1.2 试验材料与设计

试验选取流域内生长1年的长柄扁桃和沙柳幼苗, 采集该流域内黄土正常新成土(以下简称壤土)和干旱砂质新成土(以下简称砂土)(基本理化性质见表1), 待风干后过筛(10目)。称取

等量壤土和砂土分装于盆栽所用的铁皮桶中(桶高30 cm, 直径25 cm), 加水至饱和, 静置1~2天, 将长柄扁桃和沙柳幼苗移栽于铁皮桶中, 定期管理, 待其生长稳定后选取长势基本一致的幼苗盆栽作为供试植株, 每盆定株3棵, 试验开始前一个月内水分供养充足(土壤水分控制在田间持水量的80%~100%), 保证其全部成活, 盆栽随机摆放, 所有试验均在室外移动遮雨棚下进行。试验设置四种组合方式(砂土—长柄扁桃、壤土—长柄扁桃、砂土—沙柳、壤土—沙柳), 每种组合方式五次重复。盆栽表面均匀覆盖碎石(碎石直径0.5~1.5 cm, 覆盖厚度2 cm)抑制土壤水分蒸发。试验开始时维持各处理土壤含水量在田间持水量的100%±2%, 试验开始后, 各处理停止供水, 土壤水分自由蒸发, 每隔2天对盆栽依次称重, 当土壤含水量由田间持水量(壤土田间持水量为

273.4 g·kg⁻¹, 砂土田间持水量为146.7 g·kg⁻¹)的100%±2%分别下降至田间持水量的90%±2%、80%±2%、60%±2%、40%±2%和20%±2%(对应的土壤质量含水量壤土分别为246.0±5.5 g·kg⁻¹、218.7±5.5 g·kg⁻¹、164.0±5.5 g·kg⁻¹、109.4±5.5 g·kg⁻¹和54.67±5.5 g·kg⁻¹, 砂土分别为132.1±3.9 g·kg⁻¹、117.4±3.9 g·kg⁻¹、88.03±3.9 g·kg⁻¹、58.69±3.9 g·kg⁻¹和29.35±3.9 g·kg⁻¹)并维持3~5天后, 对长柄扁桃和沙柳幼苗的光合特性(净光合速率P_n、气孔导度G_s、胞间CO₂浓度C_i)、水分利用效率WUE及叶片水势Ψ_w进行全天候观测(8:00~18:00, 每小时1次)。维持期间通过称重适当补充少量水分, 以保证各阶段含水量处于稳定状态, 使各盆栽植株充分适应某一含水量处理后进行各生理指标的测定。

表1 土壤基本理化性质

Table 1 Basic physi-chemical properties of the studied soils

土壤类型 Soil type	容重 ^① (g·cm ⁻³)	饱和导水率 ^② (10° C, cm·h ⁻¹)	田间持水量 ^③ (g·kg ⁻¹)	土壤机械组成 Soil mechanical composition/%			总有机碳 ^④ (g·kg ⁻¹)	全氮 ^⑤ (g·kg ⁻¹)	全磷 ^⑥ (g·kg ⁻¹)
				黏粒 Clay	粉粒 Silt	砂粒 Sand			
砂土 ¹⁾	1.64	13.42	146.7	5.95	31.28	62.78	2.49	1.34	1.68
壤土 ²⁾	1.37	8.21	273.4	13.88	50.13	35.99	3.27	1.52	1.48

注: 1) 干旱砂质新成土, 2) 黄土正常新成土 Note: 1) Sandy soil (Aridi-Sandic Primosols), 2) Loamy soil (Loessi-Orthic Primosols); ①Bulk density, ②Saturated hydraulic conductivity, ③Field water holding capacity, ④Total organic carbon, ⑤Total nitrogen, ⑥Total phosphorus

1.3 数据采集与处理

盆栽每隔2天用高灵敏电子秤(最小感应1 g)进行一次称重并记录相关数值, 利用本次称重质量与初始称重质量之差计算土壤水分减少量, 根据水量平衡计算各处理累积日蒸腾量(T_d)。用光合仪(手持式光合作用测量系统CL—340, 美国)测定叶片气体交换参数: 净光合速率P_n、气孔导度G_s、胞间CO₂浓度C_i、蒸腾速率Tr。采用露点水势仪(Psypro露点水势测量系统, 美国)测量各水分处理下叶片水势。过去对于植物生理指标与土壤含水率的关系研究多采用分段线性函数和连续非线性函数描述^[23-24], 本研究对比了两种方法的拟合效果, 发现连续非线性函数拟合效果更好, 因此, 本文采用连续非线性函数来拟合土壤水分有效性

的动态变化曲线, 曲线的拐点为各指标水分阈值(W₀)。为减少不同时期观测指标变化对试验结果造成的影响, 本试验参照Ray和Sinclair^[25]提出的标准参数方程将盆栽试验相关指标进行标准化处理, 即盆栽中不同土壤水分处理下观测值的平均值与最高水分处理下对应的平均值之比作为相对指标,

$$R_x = \frac{x}{x_{FC}} \quad (1)$$

式中, R_x为相对指标, 如: 相对净光合速率R_{P_n}、相对气孔导度R_{G_s}、相对胞间CO₂浓度R_{C_i}、相对叶片日蒸腾速率R_{T_d}; x为盆栽各水分条件下的某一指标观测值的平均值, x_{FC}为最高水分条件下对应的

平均值, 即田间持水量 (FC) 为100% FC时对应的平均值。本文中水分利用效率为叶片水分利用效率即净光合速率与蒸腾速率的比值, 日蒸腾速率为单株全天的蒸腾量 ($\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$)。

田间持水量通过环刀法进行测定, 即将采好的环刀样品放入盛有清水的容器中 (清水没过环刀上边缘约1~2 cm) 静置约12 h, 以保证环刀样品充分饱和, 将饱和后的环刀 (环刀底部垫滤纸) 放于干燥常温的石英砂表面 (为保证充分接触, 环刀上部可适当放置重物) 约8 h, 取出称重 (减去空环刀质量), 记录为 m_1 , 然后将称好的环刀在105℃下烘干称重 (减去空环刀质量), 记录为 m_2 , 具体如下公式 (2):

$$\text{FC} = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 1000 \quad (2)$$

式中, FC为田间持水量, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

试验数据采用Origin9.0进行作图, 采用SPSS16.0进行回归分析, 并采用最小显著差异法 (LSD) 进行差异显著性检验 ($P=0.05$)。

2 结果

2.1 不同质地土壤中各生理指标水分有效性动态变化模拟

表2为2种质地土壤中长柄扁桃和沙柳各项生理指标的土壤水分有效性动态变化模拟结果。由表2可以看出, 不同土壤质地间长柄扁桃和沙柳幼苗水分有效性动态变化存在明显差异, 且连续非线性函数对土壤水分有效性动态曲线的拟合效果较好, 决定系数 R^2 在0.890 5~0.986 4之间 (表2), 表明连续非线性函数可用来模拟土壤水分有效性动态变化。

2.2 土壤质地对光合特性水分有效性的影响

2种质地土壤中长柄扁桃和沙柳瞬时气体交换指标 (R_{pn} 、 R_{Gs} 和 R_{Ci}) 水分有效性动态变化如图1。由图1可以看出, 随着土壤含水率的持续降低, 长柄扁桃和沙柳相对气体瞬时交换指标 (R_{Ci} 除外) 的土壤水分有效性呈现相同的变化趋势, 即在高于土壤水分阈值时基本保持不变, 而后迅速下降, 且不同指标间存在一定差异。壤土中长柄扁桃 R_{pn} 和 R_{Gs} 土壤水分阈值分别为0.61和0.58, 低于砂土中相应的土壤水分阈值 (0.70和0.63), 壤土中

沙柳各指标 (R_{pn} 和 R_{Gs}) 所对应的土壤水分阈值分别为0.61和0.68, 高于砂土中对应的土壤水分阈值 (0.58和0.62)。与壤土相比, 砂土中长柄扁桃光合特性各生理指标 (R_{Ci} 除外) 水分有效性随着土壤含水率的降低, 首先达到土壤水分阈值, 之后出现较大幅度的下降, 但降幅低于壤土中各指标水分有效性降幅, 因此, 砂土中长柄扁桃光合特性各指标 (R_{Ci} 除外) 水分有效性高于壤土中各指标水分有效性。不同质地土壤中两种植物光合特性各指标 (R_{Ci} 除外) 水分有效性变化一致。与壤土相比, 虽然砂土中沙柳光合各指标 (R_{Ci} 除外) 对应的土壤水分阈值较先出现, 但在快速下降阶段, 壤土中沙柳各生理指标 (R_{Ci} 除外) 水分有效性下降速率明显高于砂土, 砂土中长柄扁桃和沙柳对应的水分有效性降幅分别为30%和36%, 壤土中长柄扁桃和沙柳对应的水分有效性降幅分别为40%和45%, 因此, 砂土中沙柳光合特性各生理指标 (R_{Ci} 除外) 土壤水分有效性高于壤土。长柄扁桃光合特性各指标 (R_{Ci} 除外) 水分有效性在快速下降阶段降幅低于沙柳各指标 (R_{Ci} 除外) 水分有效性降幅。长柄扁桃和沙柳胞间 CO_2 浓度 R_{Ci} 随着土壤含水率的降低呈上升趋势, 这与光合指标 (R_{pn} 和 R_{Gs}) 水分有效性动态变化相反, 因此, R_{Ci} 是否可作为土壤水分有效性的评价指标需进一步研究。

2.3 土壤质地对叶片水势和水分利用效率水分有效性的影响

图2表示2种质地土壤中长柄扁桃和沙柳幼苗水分利用效率和叶片水势水分有效性动态变化。从图2可以看出, 水分利用效率可作为反映植物水分有效性的一个指标。随着土壤含水量的不断降低, 长柄扁桃和沙柳水分利用效率对应的土壤水分有效性随着土壤含水率的降低在未达到土壤水分阈值之前相对保持稳定, 而后出现较大幅度的下降。然而, 壤土中长柄扁桃和沙柳水分利用效率优先于砂土达到土壤水分阈值, 而后在土壤水分有效性快速下降阶段壤土水分有效性降幅高于砂土水分有效性降幅, 分别降低38%和49%, 因此, 以水分利用效率为评价指标时, 壤土土壤水分有效性高于砂土, 这与瞬时气体交换指标所对应的土壤水分有效性结果相反。长柄扁桃和沙柳叶片水势随着土壤含水率的降低呈直线降低, 因此, 叶片水势不适宜作为反映土壤水分有效性的评价指标。

表2 土壤水分对不同质地土壤植物各生理指标有效性动态变化曲线回归分析结果

Table 2 Regression analysis of the dynamic curves of soil water availability relative to soil texture, plant species and physiological index used in evaluation

指标 Index	土壤类型 Soil type	植物类型 Plant type	回归方程 Equation of regression	土壤水分阈值 Soil moisture threshold (W_0)	决定系数 Coefficient of determination (R^2)
相对净光合速率 ^①	砂土 ^⑥	长柄扁桃 ^⑧	$y=0.98(1+e^{-6.16(x-0.27)})$	0.70	0.962 8
	壤土 ^⑦		$y=1.03(1+e^{-8.56(x-0.25)})$	0.61	0.939 9
	砂土 ^⑥	沙柳 ^⑨	$y=1.03(1+e^{-5.18(x-0.21)})$	0.58	0.902 0
	壤土 ^⑦		$y=1.20(1+e^{-3.79(x-0.41)})$	0.61	0.893 8
相对气孔导度 ^②	砂土 ^⑥	长柄扁桃 ^⑧	$y=1.05(1+e^{-10.14(x-0.27)})$	0.63	0.963 4
	壤土 ^⑦		$y=1.07(1+e^{-5.16(x-0.30)})$	0.58	0.956 7
	砂土 ^⑥	沙柳 ^⑨	$y=0.99(1+e^{-7.14(x-0.21)})$	0.62	0.918 5
	壤土 ^⑦		$y=1.10(1+e^{-5.29(x-0.32)})$	0.68	0.934 5
相对胞间CO ₂ 浓度 ^③	砂土 ^⑥	长柄扁桃 ^⑧	$y=0.62e^{-x/0.41}+0.95$	0.75	0.928 7
	壤土 ^⑦		$y=0.37e^{-x/0.43}+0.96$	0.70	0.952 8
	砂土 ^⑥	沙柳 ^⑨	$y=1.09e^{-x/0.18}+1.02$	0.66	0.906 2
	壤土 ^⑦		$y=0.48e^{-x/0.28}+0.99$	0.78	0.8905
相对日蒸腾速率 ^④	砂土 ^⑥	长柄扁桃 ^⑧	$y=1.06(1+e^{-5.54(x-0.28)})$	0.58	0.914 3
	壤土 ^⑦		$y=1.07(1+e^{-6.90(x-0.19)})$	0.60	0.903 6
	砂土 ^⑥	沙柳 ^⑨	$y=1.18(1+e^{-3.66(x-0.38)})$	0.55	0.890 9
	壤土 ^⑦		$y=1.05(1+e^{-7.27(x-0.27)})$	0.62	0.967 4
相对水分利用效率 ^⑤	砂土 ^⑥	长柄扁桃 ^⑧	$y=1.04(1+e^{-6.92(x-0.28)})$	0.52	0.974 3
	壤土 ^⑦		$y=1.07(1+e^{-10.27(x-0.19)})$	0.58	0.989 4
	砂土 ^⑥	沙柳 ^⑨	$y=1.02(1+e^{-6.36(x-0.16)})$	0.56	0.951 1
	壤土 ^⑦		$y=1.05(1+e^{-6.17(x-0.25)})$	0.60	0.985 0

注: 表中所选函数为logistic函数(相对胞间CO₂浓度 R_{Ci} 除外), 曲线拐点对应的土壤含水率为土壤水分阈值(W_0)。Note: The functions in the table are logistic functions (except for relative intercellular CO₂ concentration (R_{Ci})), the soil water content corresponding to the reflexion in the curve is deemed as soil moisture threshold (W_0). ①Relative net photosynthetic rate (R_{Pn}), ②Relative stomatal conductance (R_{Gs}), ③Relative intercellular CO₂ concentration (R_{Ci}), ④Relative daily transpiration rate (R_{Td}), ⑤Relative water use efficiency (R_{WUE}), ⑥Sandy soil, ⑦Loamy soil, ⑧*Amygdalus pedunculata* Pall, ⑨*Salix psammophila*

2.4 土壤质地对蒸腾特性水分有效性的影响

图3表示2种质地土壤中长柄扁桃和沙柳相对日蒸腾速率(R_{Td})和相对累积蒸腾速率(R_{Tc})水分有效性动态变化。从图3可以看出, 长柄扁桃以相对日蒸腾速率(R_{Td})作为评价土壤水分有效性指标时, 土壤水分有效性表现为壤土高于砂土, 而沙柳土壤水分有效性质地间差异较小。长柄扁桃和沙

柳相对累积日蒸腾速率(R_{Tc})质地间存在差异, 而从时间尺度上看, 壤土中长柄扁桃累积蒸腾速率水分有效性随土壤含水率的降低始终高于砂土水分有效性, 而沙柳累积蒸腾速率水分有效性在土壤含水率低至0.6之前未表现出差异, 而后随着土壤含水率的持续降低, 砂土中沙柳累积蒸腾速率水分有效性略高于壤土, 表明长柄扁桃对土壤水分亏缺性

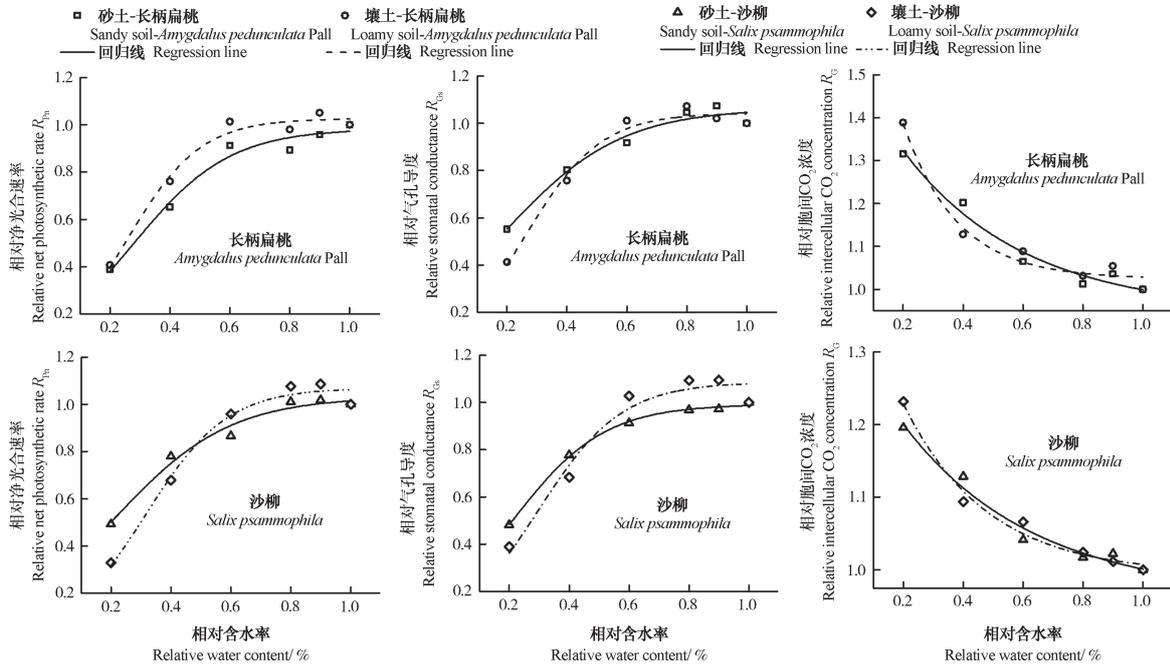


图1 2种质地土壤中长柄扁桃和沙柳幼苗光合特性水分有效性动态变化

Fig. 1 Variation of soil water availability based on photosynthesis indices of *Amygdalus pedunculata* Pall and *Salix psammophila* relative to type of the soil

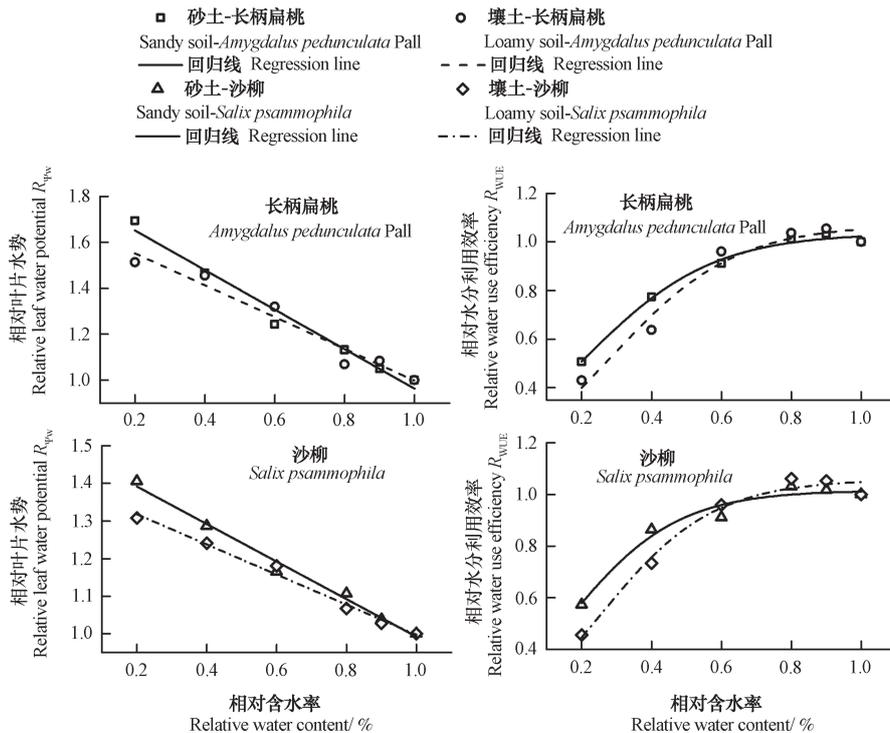


图2 2种质地土壤中长柄扁桃和沙柳幼苗水分利用效率 (R_{WUE}) 和叶片水势 (R_{psw}) 水分有效性动态变化

Fig. 2 Variation of soil water availability based on water use efficiency (R_{WUE}) and relative leaf water potential (R_{psw}) of *Amygdalus pedunculata* Pall and *Salix psammophila* relative to type of the soil

的敏感程度略高于沙柳。

以上生理指标中,长柄扁桃和沙柳瞬时气体

交换指标 (R_{pn} 和 R_{Gs}) 不同质地间土壤水分有效性

表现不同:以瞬时气体交换指标(相对净光合速率

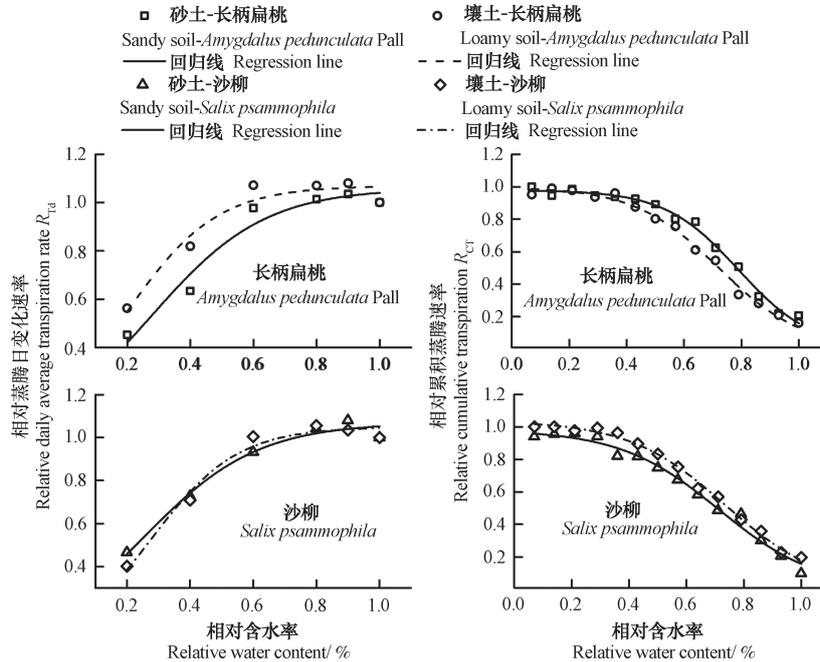


图3 2种土壤质地中长柄扁桃和沙柳幼苗相对日蒸腾速率 (R_{Td}) 和相对累积蒸腾速率 (R_{Tc}) 水分有效性动态变化
 Fig. 3 Variation of soil water availability based on daily average transpiration rate (R_{Td}) and cumulative transpiration (R_{Tc}) of *Amygdalus pedunculata* Pall and *Salix psammophila* relative to type of the soil

R_{Pn} 和相对气孔导度 R_{Gs})为评价指标时, 砂土水分有效性高于壤土; 以相对水分利用效率 R_{WUE} 为评价指标时, 壤土水分有效性高于砂土。瞬时指标对应的水分阈值略高于相对蒸腾日变化速率 (R_{Td}) 和累积日变化速率 (R_{Tc}) 所对应的水分阈值, 表明土壤质地和时间尺度均会影响长柄扁桃和沙柳对土壤水分有效性的响应。

3 讨论

在干旱和半干旱地区, 土壤水分是限制植物生长发育和作物产量的关键因子, 尤其在生态环境脆弱、水土流失严重的黄土高原地区, 如何提高黄土高原水资源利用效率对黄土高原植被恢复与科学高效用水有着重要作用。本研究通过盆栽试验, 揭示了不同质地土壤下旱生植物长柄扁桃和沙柳幼苗各生理指标水分有效性动态变化特征, 对黄土高原植被恢复与可持续建设具有重要意义。试验结果表明, 随着土壤含水量的持续降低, 不同质地土壤中长柄扁桃和沙柳各生理指标 (R_{Ci} 和 R_{Ψ_w} 除外) 在未达到土壤水分阈值之前基本保持不变, 而后随土壤含水量的降低迅速下降, 这与郭庆荣和李玉山^[5]得到的结果相同。不同质地土壤中

长柄扁桃和沙柳各生理指标土壤水分阈值略有差异, 当以瞬时气体交换指标为评价指标时, 砂土中长柄扁桃和沙柳的 R_{Pn} 、 R_{Gs} 对应的土壤水分阈值较壤土先达到此阈值, 而低于此阈值时, 壤土中长柄扁桃和沙柳的 R_{Pn} 、 R_{Gs} 随着土壤含水率的下降其下降幅度 (降幅约为40%和45%) 超过砂土中水分有效性降幅 (降幅约为30%和36%)。吴元芝和黄明斌^[11]对不同质地土壤下玉米各生理指标水分有效性进行了研究, 结果表明, 土壤质地显著影响玉米不同生理指标水分有效性, 总体表现为由大到小依次为砂壤土、中壤土、重壤土。本研究表明, 以长柄扁桃和沙柳为研究对象, 选取不同生理指标作为土壤水分有效性评价指标时, 其结论也存在一定差异, 具体表现为: 当以 R_{Pn} 为评价指标时, 砂土中长柄扁桃的水分阈值高于壤土中长柄扁桃水分阈值, 而砂土中沙柳水分阈值低于壤土中沙柳水分阈值; 当以 R_{Gs} 为评价指标时, 砂土中长柄扁桃水分阈值高于壤土中水分阈值, 而砂土中沙柳水分阈值同样低于壤土中沙柳水分阈值, 其中, 当以 R_{Pn} 为评价指标时其对应的水分阈值高于 R_{Gs} 对应的水分阈值, 当以 R_{WUE} 和 R_{Td} 为评价指标时, 砂土中长柄扁桃和沙柳的水分阈值低于壤土中长柄扁桃和沙柳的水分阈值, 这与张喜英和裴冬^[26]的研究结论

相似,表明植物不同生理指标的差异对土壤水分有效性阈值具有明显的影响。张喜英等^[26]比较了生长盛期的谷子、高粱、冬小麦土壤水分阈值,结果表明,植物不同生理指标水分有效性存在差异。Wery^[27]总结比较了大量豆类作物土壤水分,指出瞬时指标(R_{pn} 和 R_{Gs})水分有效性略低于累积蒸腾速率(R_{Td})水分有效性。本研究中长柄扁桃和沙柳瞬时气体交换指标(R_{pn} 和 R_{Gs})以及水分利用效率对应的水分阈值略高于日尺度指标(R_{Td})对应的水分阈值,且不同质地间存在差异,如长柄扁桃的 R_{pn} 和沙柳的 R_{Gs} 对应的水分阈值高于日尺度指标(R_{Td})对应的水分阈值,而沙柳的 R_{pn} 和长柄扁桃的 R_{Gs} 对应的土壤水分阈值因质地的不同而略有差异。上述结果表明,土壤质地和时间尺度均会影响植物水分有效性。

综上所述,长柄扁桃和沙柳水分有效性因选取的生理指标不同而不同,同时,土壤质地和时间尺度也会对土壤水分有效性产生影响。因此,在黄土高原进行植被恢复与生态建设时应考虑土壤质地对植物水分有效性的影响。

4 结论

不同质地土壤中长柄扁桃和沙柳幼苗各生理指标相对值在相对含水率降低至土壤水分阈值之前保持相对稳定,低于此阈值时,随相对含水率的降低而迅速下降,且均可用非线性连续函数来拟合。土壤质地和时间尺度均会影响长柄扁桃和沙柳各生理指标对土壤水分有效性的响应。因此,在黄土高原进行植被恢复与生态建设时应充分考虑土壤质地差异和时间尺度不同对植物水分有效性所造成的影响。

参考文献

- [1] Warrington D N. Black locust transpiration responses to soil water availability as affected by meteorological factors and soil texture. *Pedosphere*, 2015, 25 (1): 57—71
- [2] Veihmeyer F J, Hendrickson A H. Soil moisture in relation to plant growth. *Annual Review of Plant Physiology*, 1950 (1): 285—304
- [3] Shaw B T. Soil physical conditions and plant growth. *Soil Science*, 1952, 74 (5): 89—99
- [4] 邵明安, 杨文治, 李玉山. 黄土区土壤水分有效性研究. *水利学报*, 1987 (8): 40—46
- [5] Shao M A, Yang W Z, Li Y S. Study on soil water availability in Loess region (In Chinese). *Journal of Hydraulic Engineering*, 1987 (8): 40—46
- [5] 郭庆荣, 李玉山. 黄土高原南部土壤水分有效性研究. *土壤学报*, 1994, 31 (3): 236—243
- [6] Guo Q R, Li Y S. Soil moisture availability to plant in the southern the Loess Plateau (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1994, 31 (3): 236—243
- [6] 张光灿, 刘霞, 贺康宁. 黄土半干旱区刺槐和侧柏林地土壤水分有效性及生产力分级研究. *应用生态学报*, 2003, 14 (6): 858—862
- [6] Zhang G C, Liu X, He K N. Grading of *Robinia pseudoacacia* and *Platycladus orientalis* woodland soil' s water availability and productivity in semi-arid region of Loess Plateau (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14 (6): 858—862
- [7] Sadras V O, Milroy S P. Soil-water thresholds for the responses of leaf expansion and gas exchange: A review. *Field Crops Research*, 1996, 47 (2/3): 253—266
- [8] Devi M J, Sinclair T R, Vadez V, et al. Peanut genotypic variation in transpiration efficiency and decreased transpiration during progressive soil drying. *Field Crops Research*, 2009, 114 (2): 280—285
- [9] Yan W, Zhong Y, Shangguan Z. A meta-analysis of leaf gas exchange and water status responses to drought. *Scientific Reports*, 2016 (6): 20917
- [10] Yan W, Zhong Y, Shangguan Z. Rapid response of the carbon balance strategy in *Robinia pseudoacacia*, and *Amorpha fruticosa* to recurrent drought. *Environmental & Experimental Botany*, 2017, 138: 46—56
- [11] 吴元芝, 黄明斌. 土壤质地对玉米不同生理指标水分有效性的影响. *农业工程学报*, 2010, 26 (2): 82—88
- [11] Wu Y Z, Huang M B. Effect of soil texture on soil water availability for different maize physiological indices (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineer*, 2010, 26 (2): 82—88
- [12] 张孝中. 黄土高原土壤颗粒组成及质地分区研究. *中国水土保持*, 2002 (3): 11—13
- [12] Zhang X Z. Study on the Composition of soil particles and texture zoning of the Loess Plateau (In Chinese). *Soil and Water Conservation in China*, 2002 (3): 11—13
- [13] 鞠析倪, 贾玉华, 甘森, 等. 黄土沟壑区不同地形部位土壤大孔隙特征研究. *土壤学报*, 2018, 55 (5):

- 1099—1107
- Ju X N, Jia Y H, Gan M, et al. Characteristics of soil macropores in the gully area of Loess Plateau as affected by terrain (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 (5): 1099—1107
- [14] 高晓东, 吴普特, 张宝庆, 等. 黄土丘陵区小流域土壤有效水空间变异及其季节性特征. *土壤学报*, 2015, 52 (1): 57—67
- Gao X D, Wu P T, Zhang B Q, et al. Spatial variability of available soil moisture and its seasonality in a small watershed in the hilly region of the Loess Plateau (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (1): 57—67
- [15] 刘钊, 魏天兴, 朱清科, 等. 黄土丘陵沟壑区典型林地土壤微生物、酶活性和养分特征. *土壤*, 2016, 48 (4): 705—713
- Liu Z, Wei T X, Zhu Q K, et al. Microbes, enzyme activities and nutrient characteristics of rhizosphere and non-rhizosphere soils in forests of Loess Hilly region (In Chinese). *Soils*, 2016, 48 (4): 705—713
- [16] 郭改改, 封斌, 麻保林, 等. 不同区域长柄扁桃抗旱性的研究. *植物科学学报*, 2013, 31 (4): 360—369
- Guo G G, Feng B, Ma B L, et al. Studies on drought resistance of different regional *Amygdalus pedunculata* Pall (In Chinese). *Plant Science Journal*, 2013, 31 (4): 360—369
- [17] Chu J, Yang H, Lu Q, et al. Endemic shrubs in temperate arid and semiarid regions of northern China and their potentials for rangeland restoration. *AoB Plants*, 2015 (7): PMC4516776
- [18] 田佳, 曹兵, 及金楠, 等. 防风固沙灌木花棒沙柳根系生物力学特性. *农业工程学报*, 2014, 30 (23): 192—198
- Tian J, Cao B, Ji J N, et al. Biomechanical characteristics of root systems of *Hedysarum scoparium* and *Salix psammophila* (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30 (23): 192—198
- [19] Li Y, Chen W, Chen J, et al. Contrasting hydraulic strategies in *Salix psammophila*, and *Caragana korshinskii*, in the southern Mu Us Desert, China. *Ecological Research*, 2016, 31 (6): 869—880
- [20] Chu J, Xu X, Zhang Y. Production and properties of biodiesel produced from *Amygdalus pedunculata* Pall. *Bioresource Technology*, 2013, 134 (4): 374—376
- [21] 杨勤科, 郑粉莉, 张竹梅. 神木试区土地资源与利用. *水土保持研究*, 1993 (2): 47—56
- Yang Q K, Zheng F L, Zhang Z M. Land resources and its utilization in the Shenmu experimental area (In Chinese). *Research of Soil and Water Conservation*, 1993 (2): 47—56
- [22] 毛娜, 邵明安, 黄来明, 等. 六道沟小流域地形序列土壤碳剖面分布特征及影响因素. *水土保持学报*, 2017, 31 (5): 222—230
- Mao N, Shao M A, Huang L M, et al. Distribution characteristics and influencing factors of soil carbon profile along toposequences in Liudaogou watershed (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31 (5): 222—230
- [23] Lagergren F, Lindroth A. Transpiration response to soil moisture in pine and spruce trees in Sweden. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2002, 112 (2): 67—85
- [24] Soltani A, Khoosheh F R, Ghassemigolezani K, et al. Thresholds for chickpea leaf expansion and transpiration response to soil water deficit. *Field Crops Research*, 2000, 68 (3): 205—210
- [25] Ray J D, Sinclair T R. Stomatal closure of maize hybrids in response to drying soil. *Crop Science*, 1997, 37 (3): 803—807
- [26] 张喜英, 裴冬. 几种作物的生理指标对土壤水分变动的阈值反应. *植物生态学报*, 2000, 24 (3): 280—283
- Zhang X Y, Pei D. Response of leaf water potential, photosynthesis and stomatal conductance to varying soil moisture in four crops: Winter wheat, corn, sorghum and millet (In Chinese). *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24 (3): 280—283
- [27] Wery J. Differential effects of soil water deficit on the basic plant functions and their significance to analyse crop responses to water deficit in indeterminate plants. *Australian Journal of Agricultural Research*, 2005, 56 (11): 1201—1209

Soil Water Availability and Its Influencing Factors in Soils under Two Types of Shrubberies Typical of the Loess Plateau

PEI Yanwu^{1,2} HUANG Laiming^{1,3,4†} JIA Xiaoxu^{1,3,4} SHAO Ming'an^{1,2,3,4†} ZHANG Yinglong⁵

(1 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

(2 College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(3 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(4 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(5 Shenmu Ecological Association, Shenmu, Shaanxi 719399, China)

Abstract 【Objective】 *Amygdalus pedunculata* Pall and *Salix psammophila* are shrubs of the Loess Plateau in China, which have widely been used in recent years as pioneer plants in vegetation restoration on the Loess Plateau, thanks to their good ecological adaptability and high economic value. However, how *Amygdalus pedunculata* Pall and *Salix psammophila* utilize soil water and its influencing factors are still unclear. This study is oriented to investigate soil water availability in soils under and two types of shrubs (i.e., *Amygdalus pedunculata* Pall and *Salix psammophila* seedlings) typical of the Loess Plateau, but different in physiological indices and its influencing factors. 【Method】 A pot experiment, designed to have two species of shrub (*Amygdalus pedunculata* Pall and *Salix psammophila*) planted separately in pots containing separately two types of soil (sandy soil and a loamy soil) combined with five levels of water regime (100%, 80%, 60%, 40% and 20% of the soil water holding capacity) and 5 replicates for each treatment, was carried out. Dynamics of physiological indices (net photosynthetic rate (Pn), stomatal conductance (Gs), intercellular CO₂ concentration (Ci), water use efficiency (WUE), leaf water potential (Ψ_w), daily transpiration rate (Td), cumulative transpiration rate (Tc)) of the seedlings in each treatment were monitored. 【Result】 Results show that all the physiological indices of the *Amygdalus pedunculata* Pall and *Salix psammophila* seedlings in the pots regardless of type of the soil they contained remained relatively constant in relative value till the relative water content fell below the soil moisture threshold and then they declined rapidly with soil water depletion going on. The variation curves of the indices could all be fitted with the nonlinear continuous function with R^2 ranging between 0.890 5 and 0.986 4. The inflexions on the curves could be deemed as soil moisture threshold (W_0), which varied with species of the shrub and index selected, and with type of the soil too. The soil moisture threshold (W_0) corresponding to the instantaneous gas indices (Pn and Gs) was higher in the loamy soil than in the sandy soil, whereas a reverse trend was observed with soil moisture threshold (W_0) corresponding to the water use efficiency (WUE). The soil moisture threshold (W_0) corresponding to the daily transpiration rate (Td) was higher in the sandy soil than in the loamy soil. Water availability was higher in the sandy soil than in the loamy soil when instantaneous gas exchange indices (relative net photosynthetic rate (R_{Pn}) and relative stomatal conductance (R_{Gs})) were used as evaluation index, whereas an opposite trend was observed with relative water use efficiency (R_{WUE}) used as evaluation index. The soil moisture thresholds based on instantaneous gas exchange indices (R_{Pn} and R_{Gs}) at the transient scale were higher than those based on index at the daily scale

(relative daily average transpiration rate, R_{Td}). 【 Conclusion 】 All the findings in this study demonstrate that both soil texture and time scale affect response of the plant in physiological indices to soil water availability. Continuous nonlinear function can be used to well describe dynamics of water availability under *Amygdalus pedunculata* Pall and *Salix psammophila*. Net photosynthetic rate (Pn), stomatal conductance (Gs), water use efficiency (WUE) and the transpiration rate (Td) can be used as indices for evaluating soil water availability. It is, therefore, essential to take into account effects of soil texture on water availability to plants in vegetation restoration and ecological construction on the Loess Plateau.

Key words Soil texture; *Amygdalus pedunculata* Pall; *Salix psammophila*; Physiological indices; Water availability

(责任编辑：陈荣府)