

# 土壤水分胁迫对刺槐幼苗生长、根叶性状和生物量分配的影响

唐洋<sup>1</sup>, 温仲明<sup>1,2,3</sup>, 王杨<sup>2</sup>, 刘静<sup>3</sup>

(1. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 草业与草原学院, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院 教育部 水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** [目的] 探索刺槐幼苗在干旱胁迫下的适应策略, 为植被恢复过程中人工刺槐林的造林选址提供科学依据。[方法] 采用盆栽控水实验法, 以 1 年生刺槐幼苗为实验对象, 设置 4 个水分梯度(分别为田间持水量的 75%~90%, 60%~75%, 45%~60%, 30%~45%), 研究水分胁迫下刺槐幼苗的适应机制。[结果] ① 中度(45%~60%)和重度水分胁迫(30%~45%)明显抑制幼苗生长, 其株高、地径和冠幅显著低于对照组(75%~90%), 轻度水分胁迫(60%~75%)与对照组差异不显著, 在实验结束时其生长状态优于对照组; ② 随土壤水分胁迫程度加深, 刺槐幼苗根磷含量升高, 比叶面积和比根长减小, 叶厚度和叶组织密度增大; ③ 中度(45%~60%)和重度水分胁迫(30%~45%)显著减少了幼苗的生物量积累, 提高了幼苗的根冠比。[结论] 刺槐幼苗通过将同化物质相对多的投入到防御组织的策略来适应干旱环境。重度水分胁迫严重抑制幼苗的生长, 而在轻度水分胁迫下, 幼苗能取得最大生长收益。

**关键词:** 刺槐; 水分胁迫; 功能性状; 生物量; 适应机制

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)06-0098-08

中图分类号: Q142.9

**文献参数:** 唐洋, 温仲明, 王杨, 等. 土壤水分胁迫对刺槐幼苗生长、根叶性状和生物量分配的影响[J]. 水土保持通报, 2019, 39(6): 98-105. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2019. 06. 014; Tang Yang, Wen Zhongming, Wang Yang, et al. Effects of soil water stress on growth, root and leaf traits, and biomass allocation of *Robinia pseudoacacia* seedlings[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(6): 98-105.

## Effects of Soil Water Stress on Growth, Root and Leaf Traits, and Biomass Allocation of *Robinia Pseudoacacia* Seedlings

Tang Yang<sup>1</sup>, Wen Zhongming<sup>1,2,3</sup>, Wang Yang<sup>2</sup>, Liu Jing<sup>3</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 2. College of Grassland Agriculture, Northwest A&F University,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological

Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** [Objective] The adaptation strategies of *Robinia pseudoacacia* seedlings under drought stress were explored, in order to provide support for afforestation site selection of artificial *Robinia pseudoacacia* forests during vegetation restoration. [Methods] Using the potted water control experiment method, the annual seedlings were used as experimental subjects to study the adaptation mechanism of *Robinia pseudoacacia* seedlings. Four water gradients were respectively set as follows: 75%~90%, 60%~75%, 45%~60%, and 30%~45% of soil water holding capacity. [Results] ① Moderate water stress(45%~60%) and severe water stress(30%~45%) significantly inhibited the growth of seedling, and the plant height, ground diameter and crown width were significantly lower than those of the control group(75%~90%). ② With the deepening of soil water stress, root phosphorus content, specific leaf area and specific root length decreased, while leaf

收稿日期: 2019-05-16

修回日期: 2019-06-17

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄土高原刺槐环境适应机制、成本与群落性状结构及功能变化”(41671289)

第一作者: 唐洋(1994—), 女(汉族), 四川省广安市人, 硕士研究生, 研究方向为林草生态。E-mail: 291009715@qq.com.

通讯作者: 温仲明(1969—), 男(汉族), 陕西省定边县人, 博士, 研究员, 主要从事植物生态恢复方面的研究。E-mail: zmwen@ms. iswc. ac. cn.

thickness and leaf tissue density increased in *Robinia pseudoacacia* seedlings. There was no significant different between mild water stress(60%~75%) and the control group, and the growth state of mild water stress was even better than that of the control group at the end of the experiment. ③ Moderate water stress and severe water stress significantly reduced the biomass accumulation of seedlings and increased the root-shoot ratio of seedlings. [Conclusions] *Robinia pseudoacacia* seedlings adapts to the arid environment by investing a relatively large amount of assimilated material into the defense organization. Severe water stress inhibited the growth of seedlings seriously, while under mild water stress, seedlings could achieve maximum growth benefit.

**Keywords:** *Robinia pseudoacacia*; water stress; functional traits; biomass distribution; adaptation mechanism

自然环境中的植物在生长过程中,由于其生存环境的改变,通常会面临干旱、盐碱、高温等逆境胁迫。其中干旱作为影响植被生态效益、作物生产能力的重要因素,已经成为生态学领域的热点话题之一<sup>[1-5]</sup>。干旱胁迫通常会对植物的生理、形态和生物量分配等方面产生一系列的影响,如植株矮小、枝条稀疏、叶片凋萎、叶面积减小、叶厚度增大,植株干物质积累降低,根冠比增大等<sup>[2,6-7]</sup>。根据最优分配理论和生长平衡假说<sup>[8]</sup>,为更有效地获取环境中的稀缺资源,植物会将资源分配到最需要的器官中。当植物处于水分充足的环境中,会将更多的光合产物分配至地上部分以增加光合能力;相反,植物在遭受干旱时,为更有效地获取资源,其分配至根系的光合产物会增加以提升资源获取能力,相应地减少用于植物生长的光合产物分配<sup>[9]</sup>。植物这种对环境的适应策略以及资源获取能力的变化,通常通过植物功能性状、生长及生物量分配得到反映<sup>[10-11]</sup>。

刺槐(*Robinia pseudoacacia*)是豆科刺槐属的温带落叶乔木,原产于美国,因其具有生长速度快、适应能力强、成活率高等优点而被广泛种植在黄土高原地区,为改善生态环境、防治水土流失发挥了重要作用<sup>[12]</sup>。近年来,一系列的研究发现由于刺槐的高耗水特性与黄土高原特殊的水分异质性分布的矛盾,导致部分人工刺槐林出现林分退化的现象<sup>[13-14]</sup>,因此部分学者对刺槐生长与林下土壤水分的响应关系进行了探索<sup>[15-16]</sup>。但因大田条件变化的多样性和复杂性,结论难以一致或具有一般性。为此,本研究拟通过控制实验,定量分析刺槐幼苗在不同水分梯度下的功能性状、形态结构的变异特征及生物量分配规律,以探讨刺槐对干旱胁迫的适应机制,为植被恢复过程中更好地发挥刺槐的生态效益提供科学依据。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区概况

本研究在陕北黄土丘陵沟壑区的安塞水土保持综合试验站(36°15'30"N,109°19'23"E)中进行。安塞县属于典型黄土丘陵沟壑区,黄绵土和沙黄土是研究

区内主要土壤类型;在气候上处于暖温带半湿润向半干旱过渡区,属大陆性季风气候,年平均气温 8.8℃,年平均降水量 505.3 mm,无霜期 157 d/a,其中 6—9 月雨季降水占全年降水量的 72.9%;常见乔灌木主要是刺槐、小叶杨(*Populus simonii*)、沙棘(*Sea buckthorn*)和柠条(*Caragana intermedia*),其中刺槐在研究区内被广泛种植,是主要的人工次生林<sup>[17]</sup>。

### 1.2 材料和设计

实验用苗为安塞本地 1 年生刺槐实生苗,土壤为过筛黄绵土,采自安塞水土保持综合试验站,田间持水量为 20.75%;试验期间栽培土壤保持自然肥力,不施肥。于 2017 年 4 月下旬将幼苗植入花盆(32 cm×29 cm×26 cm)中,每盆栽植 3~4 株幼苗,每盆盛土量为 15 kg,共 120 盆,保证土壤水分充足使其健康成活。待幼苗正常生长 2 个月后,每盆选取长势基本一致的幼苗保留 2 株进行控水实验。设置 4 个水分梯度,分别为田间持水量的 75%~90%(水分充足,对照 CK),60%~75%(轻度干旱, T<sub>1</sub>),45%~60%(中度干旱, T<sub>2</sub>),30%~45%(重度干旱, T<sub>3</sub>),每个处理 30 盆。置于防雨棚内,晴天露天生长,雨天用可移动防雨棚防雨。使用称重法控制土壤水含量,实验过程中每 3 天称重 1 次,计算出需要浇水水量,当低于设计中的处理下限时向盆中准确均匀加入相应水量,补水到试验设计的水分范围上限。从处理开始,每 15 天进行 1 次指标测定,持续至 10 月中旬结束。

### 1.3 测定项目及方法

1.3.1 生长形态指标 苗高的测定是用钢尺量取盆中土壤表面到植株顶部的距离(精确到 0.1 cm);地径则是用游标卡尺选取植株距离土壤表面 1 cm 处进行测量(精确到 0.01 cm);冠幅取东西冠幅和南北冠幅的平均值(精确到 0.1 cm)。

1.3.2 生物量测定 采用收获法测定植株的生物量(每个处理测定 3 株)。将取出的幼苗洗净,擦拭多余的水分后,用电子游标卡尺(精度为 0.01 mm)量取 10 根细根(<2mm)的直径和长度,用量筒测定根体积。将测定完成的植株在 105℃下杀青 20 min,

80 ℃下烘干 48~72 h 后,使用万分之一天平称量得到地下部分干重(上一步骤中的细根需额外测量,用于测定根性状)和地上部分干重。将称量后的根与叶分组收集以测定根、叶性状。根冠比=地下部分干重/地上部分干重(无量纲)

1.3.3 根、叶性状测定 每次每组随机选取 10 株,摘取生长均匀的刺槐幼苗功能叶片 30 片,利用游标卡尺测量叶片厚度,使用扫描仪结合 Adobe Photoshop CS5 软件测定叶片面积。将完成测量的叶片样品在 105 ℃下杀青 20 min,80 ℃下烘干 48~72 h 后,使用万分之一天平称量得到叶干质量。

植物叶片、根系中有机碳含量采用重铬酸钾—外加加热法测定;氮含量采用  $H_2SO_4-H_2O_2$  消煮法,再用全自动凯氏定氮仪进行测定;磷含量采用  $H_2SO_4-H_2O_2$  消煮法,钒钼黄比色法测定<sup>[18]</sup>。

比叶面积(specific leaf area, SLA)( $cm^2/g$ )=叶面积/叶干质量(叶片烘干后质量)

叶组织密度(leaf tissue density, LTD)( $g/cm^3$ )=叶干质量(叶片烘干后质量)/叶体积

比根长(specific root length, SRL)( $m/g$ )=根长/根干质量(细根烘干后质量)

根组织密度(root tissue density, RTD)( $g/cm^3$ )=根干质量(细根烘干后质量)/根体积

## 1.4 数据处理

采用 SPSS 19.0 软件进行单因素方差分析(One-Way ANOVA)和 LSD 法多重比较( $\alpha=0.05$ ),分析不同水分胁迫强度和胁迫时长对刺槐功能性状、生长及生物量分配特征的影响,数据的预处理、统计学分析和图表制作使用 Excel 软件。图表中数据为平均值±标准误。

## 2 研究结果

### 2.1 生长形态对水分胁迫的响应

由图 1 可以看出,整个试验期间,刺槐的株高、地径、冠幅均呈累计增加趋势。随水分胁迫时间增加和水分胁迫程度增大,水分胁迫对刺槐生长形态的影响也不断增大。单因素方差分析结果表明:中度水分胁迫和重度水分胁迫的株高均显著低于轻度水分胁迫处理和对照组( $p<0.05$ ),中度水分胁迫和重度水分胁迫之间无显著差异。株高在不同生长月的 4 个水分处理均具有显著性差异( $p<0.05$ ),其中轻度和中度水分胁迫下 10 月最大,7 月最小;对照组和重度水分胁迫下 9 月最大,7 月最小。在不同处理下的株高在各生长月均差异显著( $p<0.05$ ),其中 7 月和 9 月对照组最大,中度水分胁迫最小;8 月对照组最大,重

度水分胁迫最小;10 月轻度水分胁迫最大,重度水分胁迫最小。

整个试验期内,刺槐的地径均表现为:对照组>轻度水分胁迫>中度水分胁迫>重度水分胁迫。地径在不同生长月的 4 个水分处理均具有显著性差异( $p<0.05$ ),均表现为 10 月最大,7 月最小。在不同处理下的地径在各生长月均有显著性差异( $p<0.05$ ),其中 7 月、8 月和 9 月对照组最大,重度水分胁迫最小;10 月轻度水分胁迫最大,重度水分胁迫最小。

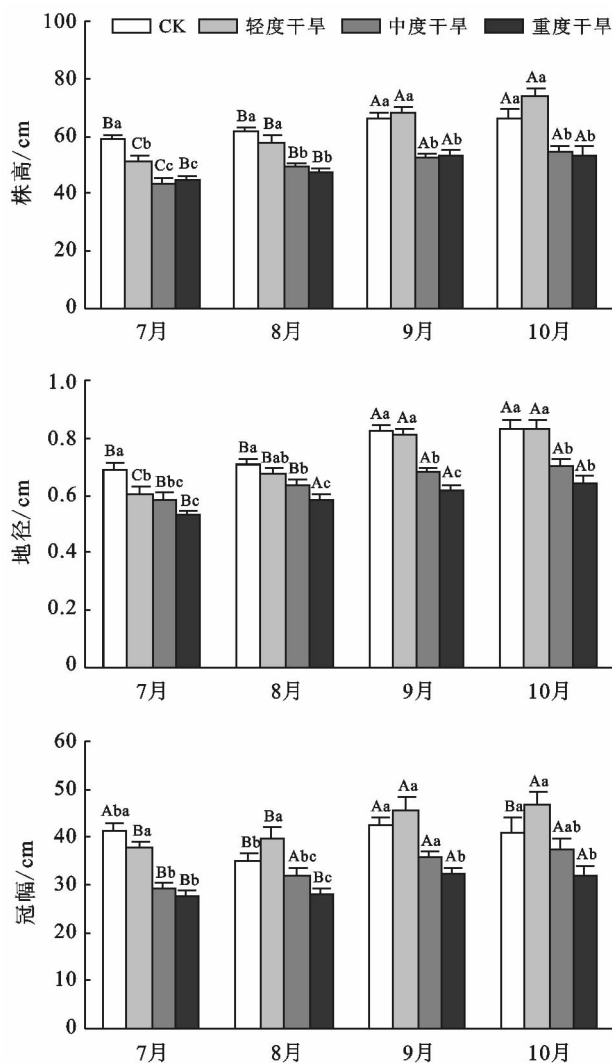


图 1 刺槐在不同水分梯度下的生长形态变化

注:不同小写字母表示刺槐性状在同一生长月的不同水分梯度下差异性显著( $p<0.05$ );不同大写字母表示同一水分梯度下不同生长月之间差异性显著( $p<0.05$ )。下同。

与地径对水分胁迫的反应略有不同,轻度水分胁迫对冠幅生长的促进作用较为明显。冠幅在不同生长月在 4 个水分处理下均有显著差异( $p<0.05$ ),其中对照组和重度水分胁迫下 9 月最大,7 月最小;轻

度和中度水分胁迫下 10 月最大,7 月最小。在不同处理下的冠幅在各生长月均有显著性差异 ( $p < 0.05$ ),其中 7 月对照组最大,重度水分胁迫最小;8 月、9 月和 10 月轻度水分胁迫最大,重度水分胁迫最小。以上结果表明,中度和重度水分胁迫对刺槐的生长具有明显的抑制作用,但轻度水分胁迫对幼苗的生长抑制作用不显著,甚至在一定程度上具有促进作用。

## 2.2 叶功能性状对水分胁迫的响应

植物的功能性状在一定程度上能够反映出植物对环境的适应策略。从图 2 可以看出,随时间变化(7 月至 10 月),比叶面积呈先增大后减小再增大的 N 形走势;叶厚度呈减小趋势;叶组织密度、叶有机碳含量、叶氮含量和叶磷含量表现为先增大后减小。在不同处理下比叶面积在 8 月和 9 月差异显著 ( $p <$

$0.05$ ),其中 8 月轻度水分胁迫最大、中度水分胁迫最小,9 月轻度水分胁迫最大、重度水分胁迫最小;在 7 月和 10 月无显著差异。叶厚度在 8 月、9 月和 10 月差异显著 ( $p < 0.05$ ),均表现为中度水分胁迫最大,轻度水分胁迫最小;在 7 月无显著差异。叶组织密度在 7 月和 8 月差异显著 ( $p < 0.05$ ),其中 7 月重度水分胁迫最大、对照组最小,8 月对照组最大、轻度水分胁迫最小;在 9 月和 10 月无显著差异。叶有机碳含量在 10 月具有显著性差异 ( $p < 0.05$ ),其中轻度水分胁迫最大,中度水分胁迫最小;在 7 月、8 月、9 月无显著差异。在不同水分处理下,叶氮含量在 7 月和 9 月有显著差异 ( $p < 0.05$ ),其中 7 月对照组最小、中度水分胁迫最大,9 月中度水分胁迫最小、对照组最大;在 8 月和 10 月无显著差异。不同水分处理下的叶磷含量在各生长月均无显著差异。

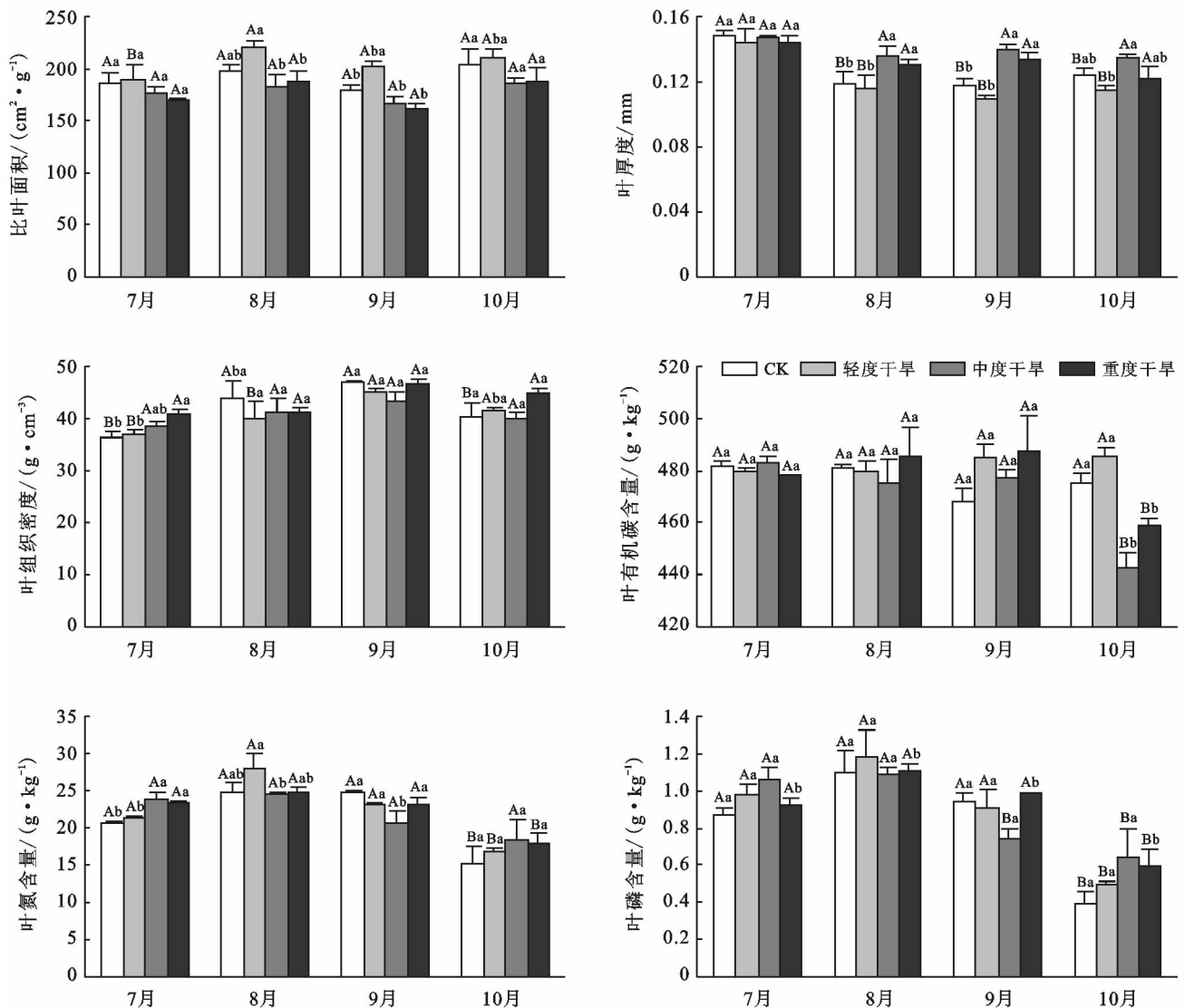


图 2 刺槐叶性状在不同水分梯度下的动态变化

### 2.3 根功能性状对水分胁迫的响应

从图 3 可以看出,随干旱胁迫时间延长,比根长呈减小趋势;根组织密度呈增大趋势;根碳含量先减小后增大;根氮含量和根磷含量先增大后减小。比根长在 7 月和 10 月差异显著( $p < 0.05$ ),其中 7 月重度水分胁迫最大、对照组最小,10 月对照组最大、轻度水分胁迫最小;在 8 月和 9 月无显著差异。根组织密度在 7 月和 10 月差异显著( $p < 0.05$ ),其中 7 月重度水分胁迫最大、对照组最小,10 月轻度水分胁迫最大、对照组最小;在 8 月和 9 月无显著差异。根有机碳含量在 7 月具有显著差异( $p < 0.05$ ),其中重度水分胁迫最大,对照组最小;在 8 月、9 月和 10 月差异不显著。根氮和根磷含量在 7 月差异显著( $p < 0.05$ ),均表现为重度水分胁迫最大,对照组最小;在 8 月、9 月和 10 月无显著差异。

### 2.4 生物量积累及分配对水分胁迫的响应

土壤水分胁迫不仅会影响植物的形态构建和功能性状,还会抑制植物的光合产物积累,降低植株的生物量,使生物量分配趋向于地下部分。由图 4 可以看出,随干旱胁迫时间增加,刺槐的总生物量、地上生物量、地下生物量、根冠比均呈累计增大的趋势;随水分胁迫程度加深,总生物量、地上生物量、地下生物量呈减小趋势,而根冠比则呈增大趋势。在水分胁迫初期(7 月),生物量和根冠比受供水影响不大,在各水分处理间均无显著差异。总生物量在不同生长月在轻度水分胁迫下差异显著( $p < 0.05$ ),其中 10 月最大,7 月最小;在对照组和轻度、重度水分胁迫下无显著差异。在不同处理下的总生物量在 8 月、9 月和 10 月差异显著( $p < 0.05$ ),其中 8 月和 10 月轻度水分胁迫最大,重度水分胁迫最小,9 月对照组最大,中度水分胁迫最小;在 7 月无显著差异。

地上生物量在不同生长月在轻度水分胁迫下差异显著( $p < 0.05$ ),其中 9 月最大,7 月最小;在对照组和轻度、重度水分胁迫下无显著差异。在不同处理下的地上生物量在 8 月、9 月和 10 月差异显著( $p < 0.05$ ),其中 8 月和 10 月轻度水分胁迫最大,重度水分胁迫最小,9 月对照组最大、中度水分胁迫最小;在 7 月差异不显著。

地下生物量在不同生长月在轻度、中度和重度水分胁迫下差异显著( $p < 0.05$ ),其中轻度和中度水分胁迫下 10 月最大,7 月最小,重度水分胁迫下 9 月最大,7 月最小;在对照组无显著差异。在不同处理下的地下生物量在 9 月和 10 月有显著性差异( $p < 0.05$ ),其中 9 月对照组最大、中度水分胁迫最小,10 月轻度水分胁迫最大、重度水分胁迫最小;在 7 月和 8 月无显著性差异。

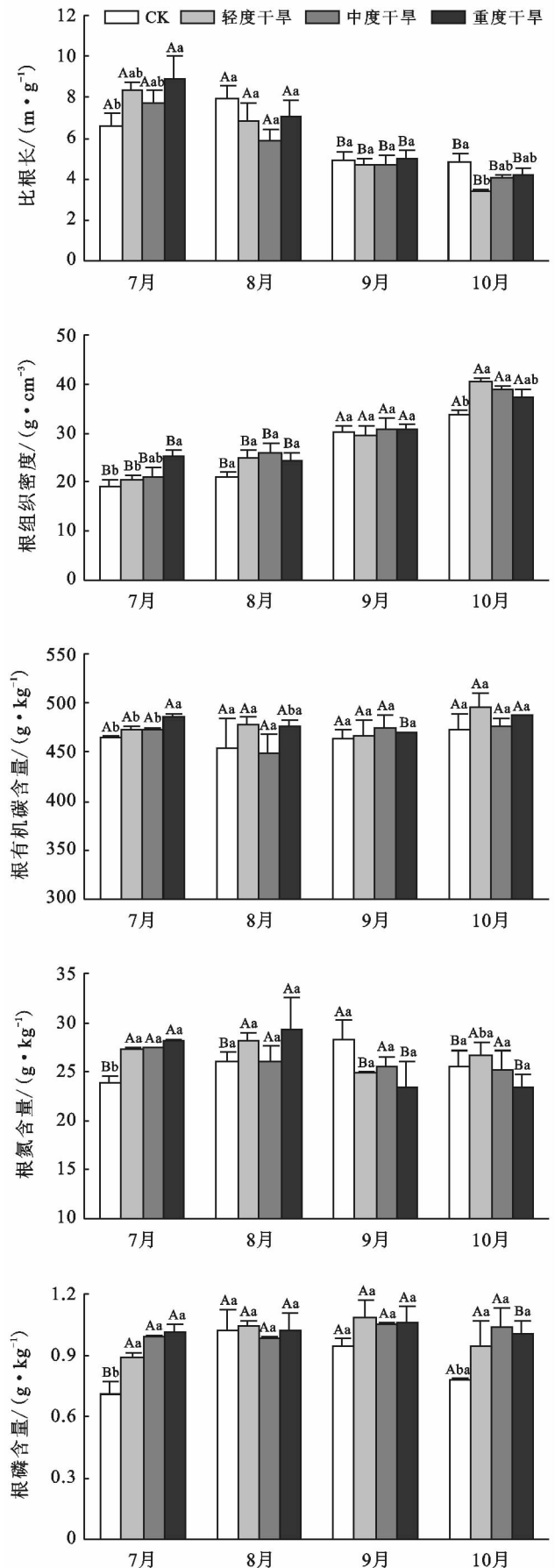


图 3 刺槐根性状在不同水分梯度下的动态变化

根冠比在不同生长月在4个水分处理下都具有显著性差异( $p < 0.05$ ),其中对照组和轻度水分胁迫下10月最大,8月最小;中度和重度水分胁迫下10月最大,7月最小。

在不同处理下的根冠比在8月、9月和10月差异显著( $p < 0.05$ ),其中8月和9月中度水分胁迫最大,对照组最小,10月重度水分胁迫最大,对照组最小;在7月差异不显著。

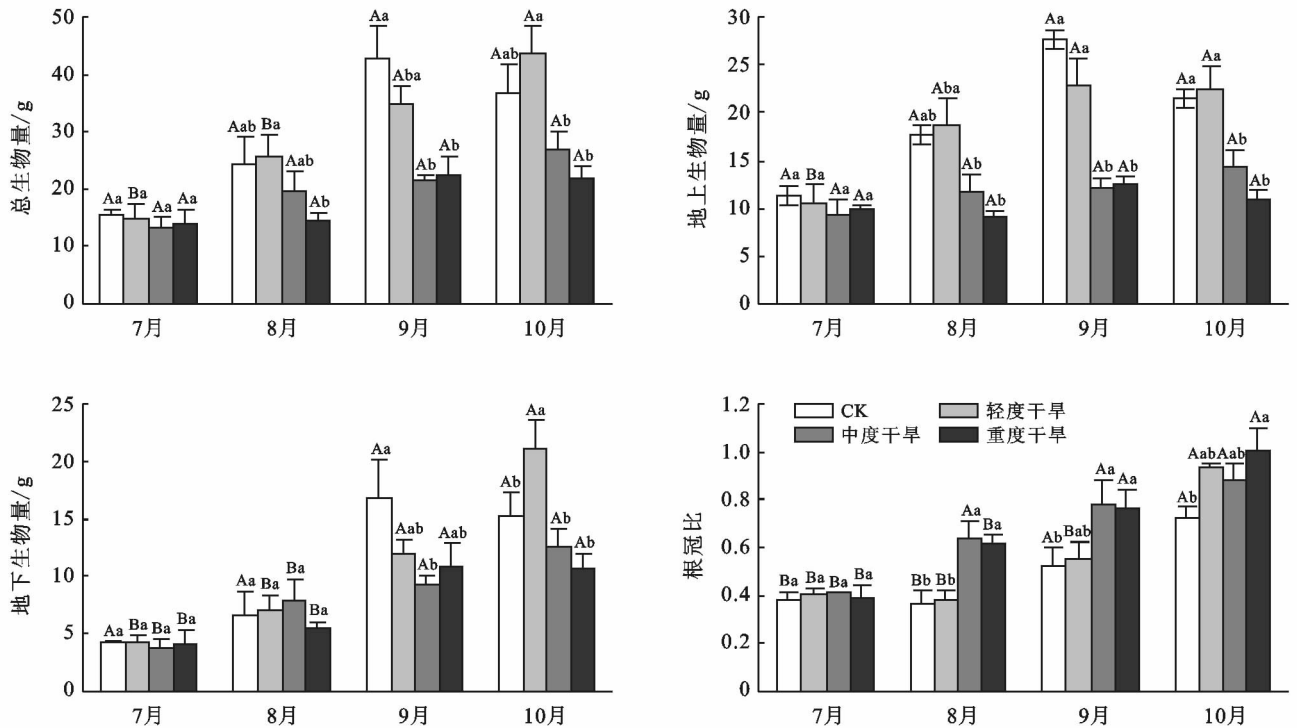


图4 刺槐在不同水分梯度下的生物量变化

### 3 讨论与结论

土壤水分胁迫能使树木的光合作用受到制约<sup>[5]</sup>,从而抑制植株的生长。土壤水分短缺时,根系最先感知,并向地上部分发出信号使叶片气孔关闭<sup>[19]</sup>。随水分胁迫程度的加深和胁迫时间的延长,植株单叶面积减小,处于中下部的非功能性叶片逐渐衰老、脱落,在有效减少水分散失、适应水分胁迫的同时,也减小了幼苗的冠幅、降低了其光合作用能力<sup>[20]</sup>。本实验中,重度水分胁迫下刺槐的冠幅显著低于对照组也验证了这一规律。中度水分胁迫和重度水分胁迫的株高和地径均显著低于轻度水分胁迫处理和对照组,轻度水分胁迫和对照组之间,中度水分胁迫和重度水分胁迫之间无显著差异,这说明本实验中的中度水分胁迫下的水分供应,已经小于刺槐幼苗正常生长所需水分的最低阈值<sup>[6]</sup>。随水分胁迫时间延长,轻度水分胁迫下幼苗生长状态逐渐优于对照组,这可能是由于轻度水分胁迫刺激了幼苗根系的生长,从而使幼苗可以吸收比对照组相对多的水分和养分供地上部分的生长发育,提高其光合作用效率,形成良性生长循环。

植物的功能性状能够客观地反映植物对环境的

适应性和资源利用策略<sup>[21]</sup>。其中,比叶面积能够反映植物获取资源的能力,与植物的生长速率密切相关<sup>[22]</sup>;叶片厚度和叶组织密度与植物体细胞体积、水分储备变化密切相关<sup>[23]</sup>,反映植物对干旱环境的适应性。与轻度水分胁迫和对照组相比,中度和重度水分胁迫有更小的比叶面积和更大的叶厚度和叶组织密度。有研究认为,这是干旱环境下植株对自身的一种保护机制<sup>[24]</sup>。幼苗在快速生长的同时,需要消耗大量的氮和磷来满足核酸合成蛋白质的需要<sup>[25]</sup>。因此,随干旱时间延长,各水分梯度下的叶磷和叶氮含量均呈下降趋势<sup>[4]</sup>。根磷含量在干旱胁迫下明显大于对照组<sup>[4]</sup>,这可能是由于水分亏缺导致植株木质部形成栓塞<sup>[26]</sup>,随蒸腾作用运输至地上部分的磷减少,而滞留于根系中的磷含量增加。重度干旱胁迫下,根氮含量在水分胁迫前期高于对照组,之后低于对照组。这与豆科植物的固氮特性有关,前期水分胁迫促进根系发育以保证植株的正常生长,而长时间的干旱影响了土壤中氮元素的转化,导致土壤氮含量降低<sup>[3]</sup>,从而限制了根系氮元素的吸收。比根长表征根系收益和花费的关系<sup>[22]</sup>,决定了根系吸收水分和养分的潜在能力,反映投入到细根的生物量中用于吸收

养分的效率,其值越大,表明投入相同的成本有较高的养分利用效率<sup>[27]</sup>;根组织密度能够反映根系组织的抗拉力和防御力<sup>[28]</sup>,通常根组织密度越大,根系的防御力越大。在本研究中,水分胁迫下的根组织密度大于对照组,比根长则小于对照组。说明在相对干旱的环境中,刺槐为保证其存活,增加了对防御组织的投资,导致其水分养分的利用效率降低,生长受到抑制。

生物量分配是植物适应环境变化的重要手段之一<sup>[29]</sup>,在不同水分胁迫条件下生物量的积累和分配规律也会出现变化<sup>[2]</sup>。水分胁迫的程度和胁迫历时长均对刺槐的干旱耐受反应具有影响,导致刺槐幼苗产生了不同的适应策略<sup>[30]</sup>。水分胁迫初期,供水量对刺槐的生物量积累及分配影响不显著。分析其原因,黄土高原在7月频繁降雨,月中多为阴雨天气,且降雨增大了空气湿度,减小了水分胁迫对光合产物积累的影响。在8月,轻度和中度水分胁迫下的地下生物量大于对照组。因为短期水分胁迫下,根系作为树木重要的营养器官,要尽可能吸收较多的水分和营养物质<sup>[31]</sup>,以满足本身及地上部分的需要,其生长在一定程度上受到促进;而长期水分亏缺限制植株地上部分的生长会降低其光合产物产量,从而导致植株的根系生长受到限制。与徐飞<sup>[30]</sup>等对刺槐幼苗的研究结果相似,轻度水分胁迫下,幼苗生物量积累不仅未有明显降低甚至高于对照组。这可能是因为轻度水分胁迫可以促进植株根系的发育,而负责捕获光资源、合成光合产物的地上部分并未受到抑制,保证了植株的正常生长。相对于对照组,水分胁迫下的幼苗地上部分生物量减小幅度明显大于地下部分生物量减小幅度;幼苗的根冠比随土壤水分亏缺的加剧而增大,在中度和重度水分胁迫下显著大于对照组。这说明在水分充足的环境中,刺槐幼苗将相对多的资源分配到地上部分,提高其对光的捕获能力,以满足植株本身快速生长的需要;在土壤水分亏缺加重时,刺槐为保持体内物质生产和水分的平衡,通过降低株高、减小地径、缩小冠幅来减少地上生物量的分配,将光合产物更多地向地下部分转移。这与刘国军<sup>[32]</sup>等对梭梭幼苗的研究结果相一致。结合刺槐在陕北等缺水地区根系的生长特性来看,这可能是导致刺槐形成“小老树”的重要原因之一。

从以上实验结果可以看出,重度干旱会严重抑制刺槐幼苗的生长,促使植株将相对多的资源投入到防御组织;轻度干旱不仅对幼苗影响较小,甚至在一定程度上对其生长具有促进作用<sup>[7]</sup>,说明刺槐在轻度水分胁迫下能取得最大生长收益。在不同水分胁迫梯

度下,刺槐幼苗的功能性状、生长形态、生物量积累和分配均表现出明显的变异规律,这反映了刺槐能够及时地通过对其自身各方面的调节,对干旱环境形成适宜的适应策略。本文中的实验对象仅为1年生幼苗,所得出的结论不具有普适应,关于成树对水分的胁迫是否具有相同的响应规律还需要进一步的实验加以验证。

#### [参 考 文 献]

- [1] 刘颖慧,贾海坤,高琼. 植物同化物分配及其模型研究综述[J]. 生态学报, 2006, 26(6): 1981-1992.
- [2] 高小锋,王进鑫,张波,等. 不同生长期干旱胁迫对刺槐幼树于物质分配的影响[J]. 生态学杂志, 2010, 29(6): 1103-1108.
- [3] Delgado-Baquerizo M, Maestre F T, Gallardo A, et al. Decoupling of soil nutrient cycles as a function of aridity in global drylands[J]. Nature, 2013, 7473(502): 672.
- [4] 王凯,沈潮,孙冰,等. 干旱胁迫对科尔沁沙地榆树幼苗C、N、P化学计量特征的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(7): 2286-2294.
- [5] Galmés J, Ochogavía J M, Gago J, et al. Leaf responses to drought stress in Mediterranean accessions of *Solanum lycopersicum*: Anatomical adaptations in relation to gas exchange parameters[J]. Plant, Cell & environment, 2013, 36(5): 920-35.
- [6] 肖冬梅,王森,姬兰柱. 水分胁迫对长白山阔叶红松林主要树种生长及生物量分配的影响[J]. 生态学杂志, 2004, 23(5): 93-97.
- [7] 文瑛,廖飞勇. 不同水分胁迫对刺槐生理的影响[J]. 基因组学与应用生物学, 2011, 30(6): 714-721.
- [8] McCarthy M C, Enquist B J. Consistency between an allometric approach and optimal partitioning theory in global patterns of plant biomass allocation[J]. Functional Ecology, 2007, 21(4): 713-720.
- [9] Gleeson SK, Tilman D. Allocation and the transient dynamics of succession on poor soils[J]. Ecology, 1990, 71(3): 1144-1155.
- [10] Westoby M A. A leaf-height-seed(LHS) plant ecology strategy scheme[J]. Plant and Soil, 1998, 199(2): 213-227.
- [11] Vendramini F, Díaz S, Gurvich D E, et al. Leaf traits as indicators of resource-use strategy in floras with succulent species[J]. New Phytologist, 2002, 154(1): 147-157.
- [12] 王百田,王颖,郭江红,等. 黄土高原半干旱地区刺槐人工林密度与地上生物量效应[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(3): 35-39.
- [13] Craine J M, Lee W G. Covariation in leaf and root traits for native and non-native grasses along an altitudinal

- gradient in New Zealand[J]. *Oecologia*, 2003, 134(4): 471-478.
- [14] 单长卷,梁宗锁,韩蕊莲,等.黄土高原陕北丘陵沟壑区不同立地条件下刺槐水分生理生态特性研究[J]. *应用生态学报*, 2005, 17(7): 1205-1212.
- [15] 韩蕊莲,侯庆春.延安试区刺槐林地不同立地条件下土壤水分变化规律[J]. *西北林学院学报*, 2003, 18(1): 74-76.
- [16] 李俊辉,李秧秧,赵丽敏,等.立地条件和树龄对刺槐和小叶杨叶水力性状及抗旱性的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(9): 2397-2403.
- [17] 李超然,温仲明,李鸣雷,等.黄土丘陵沟壑区地形变化对土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. *生态学报*, 2017, 37(16): 5436-5443.
- [18] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社, 2000.
- [19] Meinen C, Hertel D, Leuschner C. Biomass and morphology of fine roots in temperate broad-leaved forests differing in tree species diversity: Is there evidence of below-ground overyielding? [J]. *Oecologia*, 2009, 161(1): 99-111.
- [20] 韩蕊莲,侯庆春.作物对缺水环境的感知及其反应[J]. *西北植物学报*, 1996, 16(6): 67-72.
- [21] Duarte C M, Sand-Jensen K, Nielsen S L, et al. Comparative functional plant ecology: Rationale and potentials[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 1995, 10(10): 418-421.
- [22] Cornelissen J H C, Lavorel S, Garnier E, et al. A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide[J]. *Australian Journal of Botany*, 2003, 51(4): 335-380.
- [23] Meziane D, Shipley B. Interacting components of interspecific relative growth rate: Constancy and change under differing conditions of light and nutrient supply[J]. *Functional Ecology*, 1999, 13(5): 611-622.
- [24] Abrams M D. Adaptations and responses to drought in *Quercus* species of North America[J]. *Tree Physiology*, 1990, 7(1/4): 227-238.
- [25] 段媛媛,宋丽娟,牛素旗,等.不同林龄刺槐叶功能性状差异及其与土壤养分的关系[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(1): 28-36.
- [26] 李荣,党维,蔡靖,等.6个耐旱树种木质部结构与栓塞脆弱性的关系[J]. *植物生态学报*, 2016, 40(3): 255-263.
- [27] 戚德辉,温仲明,杨士梭,等.基于功能性状的铁杆蒿对环境变化的响应与适应[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(7): 1921-1927.
- [28] Craine J M, Froehle J, Tilman D G, et al. The relationships among root and leaf traits of 76 grassland species and relative abundance along fertility and disturbance gradients[J]. *Oikos*, 2001, 93(2): 274-285.
- [29] 刘颖慧,贾海坤,高琼.植物同化物分配及其模型研究综述[J]. *生态学报*, 2006, 26(6): 1981-1992.
- [30] 徐飞,郭卫华,徐伟红,等.刺槐幼苗形态、生物量分配和光合特性对水分胁迫的响应[J]. *北京林业大学学报*, 2010, 32(1): 24-30.
- [31] 孙书存,陈灵芝.辽东栎幼苗对干旱和去叶的生态反应的初步研究[J]. *生态学报*, 2000, 5(5): 893-897.
- [32] 刘国军,张希明,吕朝燕,等.不同供水条件下梭梭幼苗生长动态的研究[J]. *中国沙漠*, 2012, 32(2): 388-394.