

DOI: 10.5846/stxb201502110335

王传华, 曾春函, 沈德嵩, 钟丽, 李俊清. 云南干热河谷水库气候效应对车桑子幼苗生长发育的影响及其作用机制. 生态学报, 2016, 36(17):

Wang C H, Zeng C H, Shen D S, Zhong L, Li J Q. Climatic effects of the artificial reservoir of China's dry-hot valleys on the growth and physiological traits of *Dodonaea viscosa* seedlings. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(17):

云南干热河谷水库气候效应对车桑子幼苗生长发育的影响及其作用机制

王传华^{1,2,*}, 曾春函¹, 沈德嵩¹, 钟丽¹, 李俊清³

1 三峡大学生物与制药学院, 宜昌 443000

2 三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心, 宜昌 443000

3 北京林业大学林学院, 北京 100083

摘要:干热河谷地区水电站建设对当地植被的潜在影响是一个值得关注的生态学问题。车桑子是当地植被灌木层的主要成分, 开展水库气候效应对车桑子生长、发育影响的研究具有现实价值。本研究以车桑子的实生幼苗为材料, 将土壤含水量控制为 13%、7% 和 1.5%, 空气湿度控制为 50%、65% 和 75%, 从幼苗生长、构件发育、根系发育、生物量分配等方面研究了降水减少和大气湿度增加的气候效应对车桑子的影响, 通过叶绿素含量、Fv/Fm、丙二醛(MDA)含量和叶片可溶性糖含量等指标, 从光合系统特性、膜质过氧化和渗透调节 3 个方面研究了车桑子的受损与适应机制。结果表明, 土壤干旱能够抑制车桑子幼苗高生长和根系发育的各项指标, 并促进生物量向根系分配; 当大气湿度增加时, 幼苗高生长和根长虽呈增加趋势, 但生物量积累、根系发育指标及 RMR 却具有单峰效应, 显示空气湿度过高时对其生长发育具有抑制作用。综合而言, 由于大气湿度增加能够部分补偿土壤的干旱效应, 干热河谷区水库建设的气候效应不会对车桑子幼苗的生长和发育产生重要影响。结果还表明, 土壤干旱和大气湿度变化对叶绿素含量无影响, 土壤水分胁迫和空气湿度下降导致 Fv/Fm 显著下降, 说明光合电子传递链受损是车桑子光合抑制的主要原因; 土壤水分胁迫导致 MDA 含量升高, 说明细胞膜质过氧化是车桑子幼苗受损的重要机制; 而土壤干旱导致叶片可溶性糖含量升高, 说明车桑子幼苗具有较好的渗透调节机制。本研究结果对评估干热河谷区水电站建设对植被的影响具有参考价值。

关键词:干热河谷; 车桑子幼苗; 土壤干旱; 大气湿度

Climatic effects of the artificial reservoir of China's dry-hot valleys on the growth and physiological traits of *Dodonaea viscosa* seedlings

WANG Chuanhua^{1,2,*}, ZENG Chunhan¹, SHEN Desong¹, ZHONG Li¹, LI Junqing³

1 College of Life Science and Pharmacy, China Three Gorges University, Yichang 443000, China

2 Collaborative Innovation Center for Geo-Hazards and Eco-Environment in Three Gorges Area, Yichang 443000, China

3 College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: The climatic impacts of the construction of water power stations in the dry-hot valleys in China, including local increases in air moisture and decreased precipitation, negatively affect native vegetation, and thus are a significant ecological problem. *Dodonaea viscosa*, an indigenous shrub of dry-hot valleys, was used to evaluate the effects of these climatic changes. In this paper, a growth chamber experiment was conducted to quantify the growth and development responses of *D. viscosa* seedlings to different soil water and air humidity conditions, and further to explore how soil drought

基金项目: 三峡金沙江云川水电开发有限公司科学研究项目(WDD/0225)

收稿日期: 2015-02-11; 网络出版日期: 2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wang740301@aliyun.com

and air humidity damage this species. *D. viscosa* seedlings were subjected to three water (13.0, 7.0, and 1.5%, water capacity) and three air humidity (RH 75%, 65%, and 50%) regimes, arranged in a completely random design. Then, seedling growth, root development, and biomass allocation were measured to evaluate climatic effects on seedling growth, and leaf chlorophyll, F_v/F_m , and MDA were measured to detect sites damaged by soil drought and increased air humidity; finally, leaf soluble sugar was measured to determine whether the seedlings respond to soil drought and air humidity through osmoregulation. Our results suggested that soil drought dramatically decreased the height, leaf number, branch number, and biomass of seedlings. However, these characteristics increased with air humidity from 50% RH to 65% RH, then decreased when the humidity rose to 75% RH. In addition, soil drought decreased root length, root surface area, root projected area, root tips, and root volume, but increased the seedlings' RMRs (root mass ratio); in contrast, higher air humidity increased root length and decreased RMR, but maximized root surface area, root projected area, root tips, and root volume at the moderate RH 65% level. We also found that soil drought and air humidity had no effect on chlorophyll, but influenced F_v/F_m significantly, which indicates that its photosynthetic electron transport chain was damaged; furthermore, MDA increased under soil drought stress, which suggests that membrane peroxidation occurs under such conditions, but there was no significant MDA increase when air humidity increased from 50% RH to 70% RH. Soil drought also increased leaf sugar levels, suggesting that *D. viscosa* responds to soil water stress through osmoregulation. Thus, we conclude that increased air humidity can alleviate the effects of soil drought on the seedling growth of *D. viscosa*, which implies that the construction of water power stations in the dry-hot valleys of China would not have a significant negative impact the population dynamics of *D. viscosa*. Our results would be useful in evaluating the impacts of water power station construction on vegetation dynamics in dry-hot valleys in China.

Key Words: Dry-Hot Valleys in China; *Dodonaea viscosa* seedlings; soil drought; air humidity

分布于元江、怒江、澜沧江、金沙江及其支流的“干热河谷”，年均温度18—23℃、年降雨量500—800 mm，年干燥度为3—5，是世界上环境最恶劣的地区之一^[1]。稀树草原（又称为“萨王纳”群系）是金沙江干热河谷地区的地带性植被^[2]，是该地区主要的生态屏障。由于对清洁能源的巨大需求，我国正在金沙江的干热河谷地区规划或建设白鹤滩、乌东德等大型水电工程。对新安江水库和三峡水库的研究表明，水库建设可能导致库周地区的降雨量、降雨时空格局发生变化^[3-5]，还会导致库周大气湿度的显著升高^[6]，进而影响水分蒸发和土壤含水量^[7]，预示水电站建设也将引起干热河谷区降雨减少和大气湿度增加，因此，工程建设后的气候效应对该地区植被的长期影响理应得到人们的关注。

车桑子(*Dodonaea viscosa*)是金沙江干热河谷区植被灌木层的建群种，具有喜光、耐旱、耐瘠薄的特点^[2]，已在造林技术^[8]、抗旱机理与光合水分生理^[9]、种子的抗逆与萌发特性^[10-11]等方面进行了研究，在该地区植被恢复实践中也得到了初步应用，具有重要的生态价值和一定的园林价值。幼苗是植物种群较脆弱的生活史阶段，常被选为研究环境因子对植被影响的材料。鉴于车桑子对该地区植被的极端重要性，开展水库气候效应对车桑子幼苗生长、发育及其作用机制的研究就显得十分必要。降雨减少势必加剧土壤干旱，使植物细胞的生理脱水，通过膜系统受损、光合作用受抑制^[12]、改变植物根系形态^[13]和生殖分配^[14]等途径危害植物的生长和发育；大气湿度增加则可能影响植物叶片气孔的数目和开闭程度^[15-16]，抑制植物的光合作用、降低蒸腾作用和树干液流量^[17]及矿质营养运输^[18]。因此，水电站建设后大气湿度增加，既可能补偿降雨减少导致的土壤水分亏缺，也可能在光合作用和矿质营养运输等方面与土壤干旱形成叠加效应，因此，土壤水分胁迫和大气湿度增加的耦合作用对该地区植被的影响具有不确定性。本研究拟以车桑子幼苗为材料，通过室内试验模拟该地区水库气候效应，旨在评估土壤水分胁迫加剧和大气湿度增加耦合作用对其生长和发育的影响，同时，通过测定其光合系统、膜系统损伤和渗透调节物质的响应特征，揭示二者对车桑子幼苗的损伤途径与机制。本研究的开展，对于揭示大气湿度升高对植物的损伤机理及大型水电工程对周边植被动态的影响具有理

论价值,对于当地的植被管理和维持电站安全运行具有现实意义。

1 材料与方法

1.1 实验设计

本实验采用 2 因素完全随机设计。根据郎南军的研究,元谋干热河谷区旱季的土壤质量含水量为 2%—7%^[19],因此,土壤质量含水量(Soil water capacity)设置 13%、7%和 1.5% 3 个梯度,分别代表土壤水分高、中、低 3 个水平,其中 1.5%代表极端干旱情况;据研究,1950—2006 年间云南省金沙江干热区大气相对湿度(Air relative humidity, ARH)为 50%—60%,年均 ARH 53%^[20],因此大气相对湿度设置 ARH 50%、ARH 65%和 ARH 75% 3 个梯度;共 9 个处理,每处理 5 个重复。其中,SWC 1.5%×ARH 75%代表水库建成后微气候的处理,SWC 7%×ARH 50%代表当前的气候处理。

1.2 种子萌发与幼苗处理

试验种子 2013 年 12 月采自乌东德电站右岸地区,自然风干后常温下保存备用。2014 年 8 月,车桑子种子经 0.5% KMnO_4 溶液消毒处理后,在常温下萌发。当出现第 1 片真叶时,选择健壮且长势一致的幼苗 3 株,定植于直径 20 cm、高 20 cm、盛有 2.5 kg 细沙的圆形花钵内,沙子采用薄塑料板覆盖以保水。采用 Hogland's 营养液定期浇灌^[21],至第 3 片真叶时定苗至 1 株,然后移入生态培养箱(PRX-1000C)进行控水、控湿试验。根据干热河谷区的年均温度^[20],将生态培养箱内温度设置为 22℃/15℃(昼/夜),光合有效辐射(PAR) 300 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,光周期 14 h/10 h(昼/夜)。不定期采用 FOM 便携式土壤温湿度计(美国 Fom 公司)监测 8 cm 深度处含水量,并适时补充营养液将河沙含水量控制为 1.5%、7%和 13%;同时,3 台培养箱内相对湿度分别控制为 50%、65%和 75%。培养时间 3 个月。

1.3 数据测定

(1)植物生长特征测定。每 2 周记录幼苗高度、基径、活叶数、枯叶数和分枝数。在 11 月上旬收获幼苗,将其分为根、茎、叶 3 部分。首先清洗并扫描根系,然后用 WinRhizo 软件分析的根系总长、表面积、投影面积、根体积及分支数,最后在 65℃烘干并测定根干重(g)。然后,取少量叶片测定鲜重、扫描测定叶面积后于 4℃冰箱中保存,24 h 内用于叶绿素和抗性生理指标测定;剩余部分测定叶面积、鲜重后在 65℃烘干测定其干重,与用于叶绿素测定叶片合并后计算植株的叶面积和叶质量。最后,将茎在 65℃烘干并测定其干重。

(2)光合生理指标测定。在幼苗收获之前 1 周内,每株选择 3 片健康叶片采用 Mini-Pam 调制荧光仪,参照吴雪霞等的方法测定 F_v/F_m ^[22];采用收获冷藏的叶片参照张志良的方法,采用丙酮法提取、测定并计算叶绿素 a 和叶绿素 b 的含量^[23];

(3)逆境生理指标测定。选用反映细胞膜质过氧化的丙二醛(MDA)及渗透调节物质可溶性糖作为指标。采用冷藏的叶片,参照张志良的方法,采用硫代巴比妥酸法测定丙二醛含量;采用蒽酮比色法测定叶片可溶性糖的含量^[23]。

1.4 数据计算与分析

以实验结束时的数据分析试验因素对幼苗生长发育和根系发育的影响。参照 Walters *et al.*的方法计算各植株的叶质量比(LMR)、径质量比(SMR)、根质量比(RMR)及比叶面积(SLA)^[21]。对各项数据采用双因子 ANOVA 法进行土壤含水量和空气湿度的主效分析,并以 Origin7.5 作图;以 Duncan 法对各指标的 9 个处理进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 对幼苗生长、发育和形态的影响

(1)对幼苗生长的影响

结果表明,空气湿度和土壤含水量变化对车桑子幼苗生长均有显著影响(见表 1)。土壤含水量(图 1)对

幼苗的活叶数、株高、茎分枝数和植株总重的影响呈负增长趋势;而除株高呈负增长趋势外,活叶数、茎分枝数和植株总重等参数随空气湿度增加表现出先增长后下降的趋势(图1),说明空气湿度过大可能抑制车桑子幼苗生长。同对照(SWC 7%×ARH 50%),水库建成后气候效应(SWC 1.5%×ARH75%)导致幼苗生长各项参数有所下降,但达不到显著水平(表1),说明大气湿度的增加可以补偿降雨减少对幼苗生长的影响。

表1 空气湿度和土壤含水量对车桑子幼苗生长的影响(n=5)

Table 1 Effects of air and soil humidity on growth of *Dodonaea viscosa* seedlings(n=5)

| 空气湿度 Relative humidity of air | 土壤含水量 Soil water capacity/(v/v) | 株高 Height/cm | 叶片数 Alive leaves | 枯叶数 Dead leaves | 茎分枝数 Branches | 植株重 Dry mass/g |
|--|------------------------------------|-----------------|---------------------|--------------------|------------------|-------------------|
| 75% | 13% | 17.9±2.5d | 19.8±2.8ab | 1.7±0.4a | 2.4±0.3ab | 1.4±0.2c |
| | 7% | 16.4±2.4d | 15.0±1.8ab | 6.4±0.3b | 1.5±0.2a | 1.4±0.2c |
| | 1.5% | 9.7±1.6ab | 11.2±0.8a | 2.5±0.3a | 1.0±0.0a | 0.5±0.1ab |
| 65% | 13% | 14.3±2.5cd | 25.6±2.7b | 2.0±0.0a | 4.6±0.5b | 1.6±0.2c |
| | 7% | 11.9±2.3bc | 14.4±2.7ab | 1.4±0.3a | 1.6±0.1a | 1.1±0.2bc |
| | 1.5% | 9.7±1.8ab | 10.4±2.9a | 4.2±0.5b | 1.0±0.0a | 0.4±0.1ab |
| 50% | 13% | 10.4±2.7abc | 13.4±2.5a | 2.0±0.2a | 1.6±0.3a | 0.6±0.2ab |
| | 7% | 10.5±2.5abc | 11.6±2.2a | 2.0±0.2a | 1.0±0.0a | 0.6±0.2ab |
| | 1.5% | 7.0±0.8a | 8.8±0.8a | 3.0±0.3ab | 1.0±0.2a | 0.2±0.1a |
| 空气湿度(F) F value of air humidity | | 10.93 ** | 1.87 ns | 3.38 * | 1.41 ns | 6.05 ** |
| 土壤含水量(F) F value of soil water capacity | | 12.48 ** | 5.23 ** | 5.14 ** | 3.71 * | 10.72 ** |
| 空气湿度×土壤含水量(F) F value of interaction between soil water capacity and air humidity | | 1.13 ns | 0.66 ns | 1.81 ns | 0.89 ns | 0.85 ns |

表中数据为平均数±标准差(n=5);同一列数据中,标注有不同字母的数值间在0.05水平显著(Ducan)

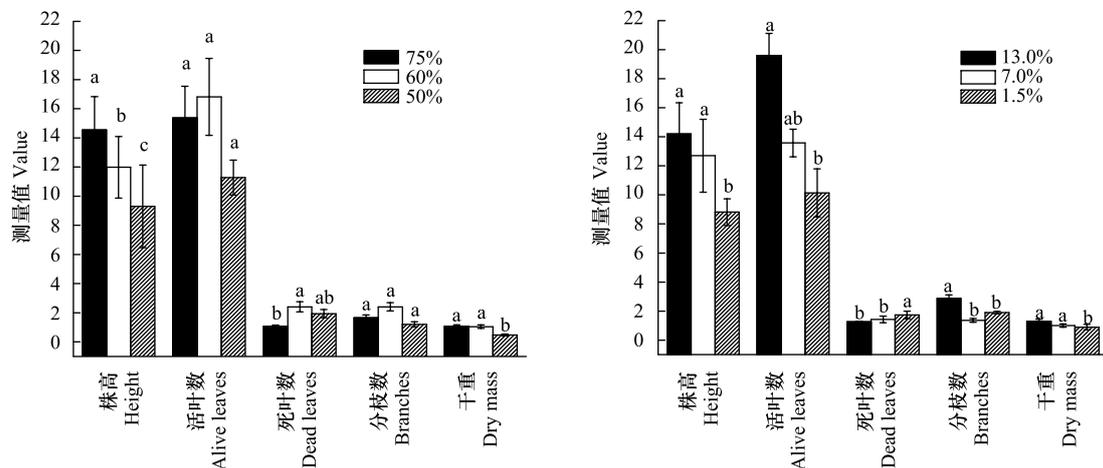


图1 空气湿度和土壤含水量对幼苗生长的影响

Fig.1 Effects of air humidity and soil water capacity on seedlings growth of *D. viscosa*

(2) 对根系发育的影响

结果表明(见表2),空气湿度和土壤含水量对车桑子幼苗根系发育的各项参数产生极显著影响,空气湿度对植物幼苗根系发育各项参数的影响略大于土壤。结果还表明(见图2),土壤干旱抑制根系发育,根系各项指标随土壤含水量减小而降低,1.5%土壤含水量的处理显著低于7%和13%;大气湿度增加促进根系发育,

表现为根长和根表面积随空气湿度增加而增加,根截面积、体积和分支数在 65%达到最大后下降,说明根系的直径发育和分叉数需要合适的空气湿度。同对照(SWC 7%×ARH 50%)相比(见表 2),除根系投影面积外,水库建成后气候效应(SWC 1.5%×ARH75%)车桑子幼苗的根系发育各项指标没有显著影响,说明大气湿度升高能够补偿土壤干旱对车桑子幼苗根系发育的抑制作用。

表 2 车桑子幼苗根系发育对空气湿度和土壤含水量变化的响应

Table 2 Effects of air and soil humidity on root growth and development of *D. viscosa* seedlings

| 空气湿度 Air humidity | 土壤含水量 Soil water capacity/v/v | 根长 Root length/cm | 根表面积 Root surface area /cm ² | 投影面积 Projected area/cm ² | 根体积 Root volume/cm ³ | 根分支数 Root tips |
|--|----------------------------------|----------------------|--|--|------------------------------------|-------------------|
| 75% | 13% | 542.1±34.6cde | 156.9±5.7bed | 49.9±4.1bcd | 3.8±0.9a | 698.2±78.7de |
| | 7% | 570.3±29.8de | 190.3±6.9cd | 59.9±6.8cd | 5.1±0.5 a | 783.3±28.9ef |
| | 1.5% | 396.5±19.3bc | 96.7±4.9a | 30.8±3.3ab | 2.1±0.7a | 579.6±37.1bcde |
| 65% | 13% | 610.2±51.5e | 271.6±8.8e | 86.5±5.7e | 10.8±0.4b | 967.0±57.7f |
| | 7% | 445.3±34.7bcd | 223.8±7.4de | 71.2±1.4de | 9.7±1.4b | 664.6±82.7cde |
| | 1.5% | 396.7±29.1bc | 103.9±3.3ab | 33.1±1.6ab | 2.3±0.2a | 567.8±55.4bcd |
| 50% | 13% | 364.8±16.2b | 85.4±3.5ab | 27.2±2.2ab | 1.7±0.6a | 415.0±19.5ab |
| | 7% | 371.1±16.1b | 113.3±8.0abc | 37.9±1.4c | 2.9±0.5a | 477.6±25.6abc |
| | 1.5% | 209.3±10.5a | 33.7±3.9a | 10.7±1.48a | 0.5±0.1a | 297.6±21.1a |
| 空气湿度(F) F value of air humidity | | 14.10 ** | 16.72 ** | 16.16 ** | 10.93 ** | 23.52 ** |
| 土壤含水量(F) F value of soil water capacity | | 10.62 ** | 13.29 ** | 13.45 ** | 6.49 ** | 8.65 ** |
| 空气湿度×土壤含水量(F) F value of interaction between soil water capacity and air humidity | | 1.25 ns | 1.635ns | 1.64 ns | 1.75ns | 2.99 * |

表中数据为平均数±标准差(n=5);同一列数据中,标注有不同字母的数值间在 0.05 水平显著(Ducan)

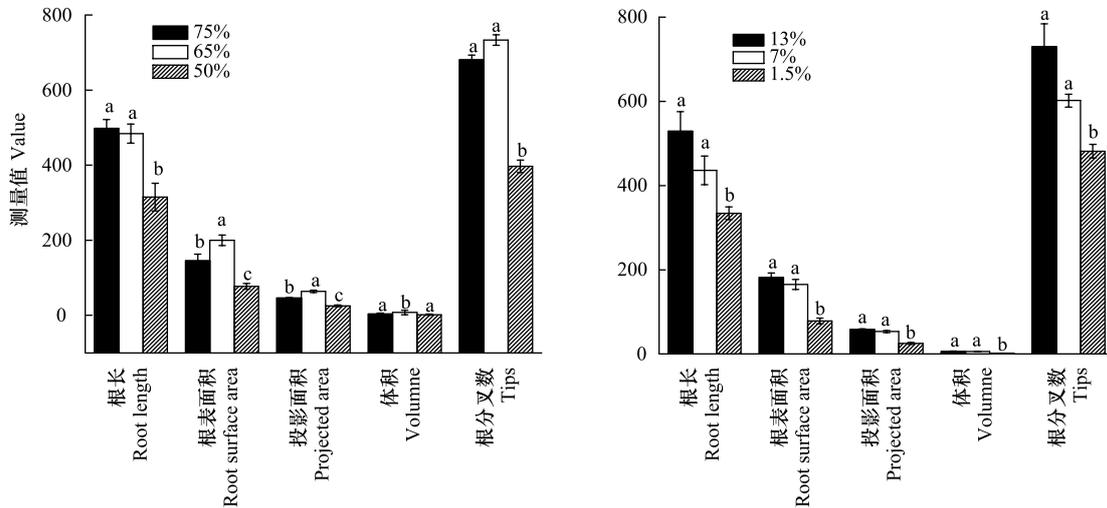


图 2 空气湿度和土壤含水量对幼苗根系发育的影响

Fig.2 Effects of air humidity and soil water capacity on seedlings root development of *D. viscosa*

(3) 对叶性状和植株生物量分配的影响

结果见表 3。空气湿度和土壤水分含量对比叶面积(SLA)的影响不显著。空气湿度对车桑子幼苗根质量比(RMR)的影响极显著,随大气湿度升高,RMR 呈先升后降的趋势(图 3),说明空气湿度过高会抑制生物量向根系的分配;空气湿度叶质量(LMR)、径质量比(SMR)的影响均不显著。土壤含水量对 LMR 和 RMR 的

影响极显著,随土壤干旱加剧,LMR 下降而 RMR 上升;土壤含水量对 SMR 的影响不显著。同对照(SWC 7%×ARH 50%)相比(见表 3),水库建成后气候效应(SWC 1.5%×ARH75%)对车桑子幼苗叶性状和生物量分配各项指标没有显著影响,说明大气湿度升高能够补偿土壤干旱对车桑子幼苗生物量分配的影响。

表 3 车桑子叶性状和生物量分配对空气湿度和土壤含水量变化的响应

Table 3 Response of biomass allocation of *D. viscosa* seedlings to air and soil humidity variation

| 空气湿度 Air humidity | 土壤含水量 Soil water capacity/(v/v) | 叶质量比 LMR | 根质量比 RMR | 茎质量比 SMR | 比叶面积 SLA |
|---|---------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 75% | 13% | 0.61±0.04b | 0.25±0.02a | 0.14±0.04a | 0.0054±0.0023a |
| | 7% | 0.64±0.03b | 0.24±0.02a | 0.12±0.02a | 0.0059±0.0010ab |
| | 1.5% | 0.57±0.07ab | 0.32±0.014ab | 0.11±0.03a | 0.0062±0.0008abc |
| 65% | 13% | 0.56±0.02ab | 0.33±0.02ab | 0.11±0.01a | 0.0075±0.0011abc |
| | 7% | 0.57±0.05ab | 0.33±0.05ab | 0.10±0.02a | 0.0073±0.0018abc |
| | 1.5% | 0.47±0.06a | 0.39±0.05b | 0.14±0.03a | 0.0079±0.0007 bc |
| 50% | 13% | 0.64±0.03b | 0.24±0.04a | 0.12±0.03a | 0.0057±0.0011ab |
| | 7% | 0.57±0.08ab | 0.30±0.07ab | 0.13±0.02a | 0.0068±0.0011ab |
| | 1.5% | 0.52±0.06ab | 0.34±0.02ab | 0.15±0.05a | 0.0083±0.0023c |
| 空气湿度(F) F value of air humidity | | 2.56 ^{ns} | 4.48 ^{**} | 0.52 ^{ns} | 2.54 ^{ns} |
| 土壤含水量(F) F value of soil water capacity | | 4.44 ^{**} | 4.45 ^{**} | 1.65 ^{ns} | 2.93 ^{ns} |
| 空气湿度×土壤含水量(F) | | | | | |
| F value of interaction between soil water capacity and air humidity | | 0.58 ^{ns} | 0.34 ^{ns} | 1.78 ^{ns} | 1.52 ^{ns} |

表中数据为平均数±标准差(n=5);同一列数据中,标注有不同字母的数值间在 0.05 水平显著(Duncan)

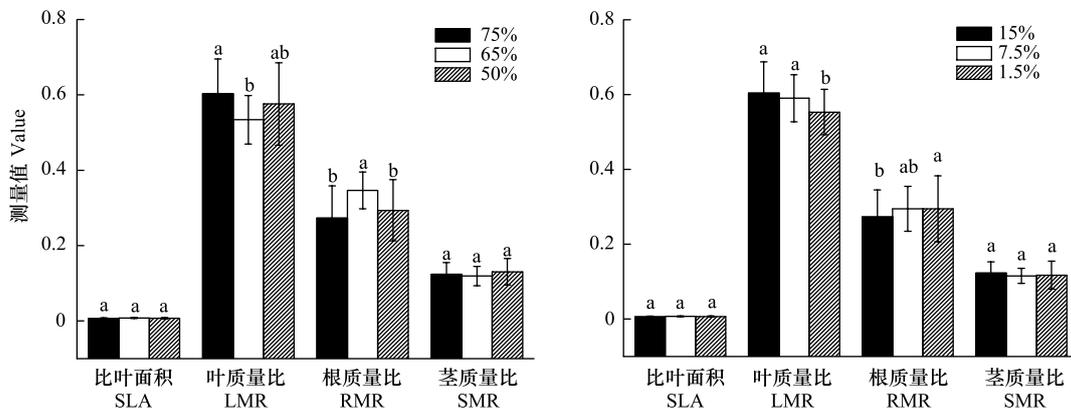


图 3 空气湿度和土壤含水量对幼苗叶性状和生物量分配的影响

Fig.3 Effects of air humidity and soil water capacity on leaf traits and biomass allocation of *D. viscosa* seedling

2.2 空气湿度和土壤含水量变化对幼苗的损伤途径

(1) 对光合系统的影响

结果表明,空气湿度和土壤含水量变化不影响车桑子幼苗叶片的叶绿素含量($P>0.05$),各处理间的差异均不显著(表 4)。而 F_v/F_m 对土壤含水量和大气湿度变化均较为敏感,达到极显著水平(表 4);其中,土壤含水量 1.5%的 F_v/F_m 显著低于 7%和 13%的 F_v/F_m 值,ARH 50%的 F_v/F_m 值显著低于 65%和 75%的 F_v/F_m 值(图 4)。以上数据说明土壤水分胁迫和大气水分胁迫主要通过电子传递链途径,而不是改变叶绿素含量来影响车桑子的光合作用。同时,大气湿度升高能够补偿土壤含水量增加对其光合电子传递的胁迫作用。

(2) 对膜酯过氧化的影响

结果表明(表 5),土壤含水量对叶片 MDA 影响极显著($P<0.01$),空气湿度对叶片 MDA 影响不显著($P>$

0.05), 呈现随空气湿度增加而氧化水平加剧的趋势, 说明(图 5); 从图 5 可以看出, 土壤干旱时的 MDA 的积累影响远高于大气湿度, 说明土壤干旱导致了车桑子幼苗脂膜过氧化。

表 4 空气和土壤含水量变化对车桑子幼苗叶绿素含量和 Fv/Fm 的影响

Table 4 Effects of air and soil humidity on leaf chlorophyll, Fv/Fm of *D. viscosa* seedlings

| 空气湿度 Air humidity | 土壤含水量 Soil water capacity/(v/v) | 叶绿素 a、b 含量 C _a + C _b /(mg/g) | 最大量子产额 Fv/Fm |
|--|------------------------------------|---|--------------------|
| 75% | 13% | 2.78±0.14a | 0.84±0.01a |
| | 7% | 2.44±0.15a | 0.84±0.01a |
| | 1.5% | 3.02±0.18a | 0.84±0.01a |
| 65% | 13% | 2.49±0.15a | 0.85±0.01a |
| | 7% | 2.58±0.13a | 0.85±0.01a |
| | 1.5% | 2.54±0.17a | 0.83±0.03a |
| 50% | 13% | 2.69±0.16a | 0.85±0.01a |
| | 7% | 2.64±0.16a | 0.83±0.02a |
| | 1.5% | 2.31±0.14a | 0.77±0.05b |
| 空气湿度(F) F value of air humidity | | 0.40 ^{ns} | 4.73 ^{**} |
| 土壤含水量(F) F value of soil water capacity | | 0.07 ^{ns} | 8.56 ^{**} |
| 空气湿度×土壤含水量(F) F value of interaction between soil water capacity and air humidity | | 0.58 ^{ns} | 4.43 ^{**} |

表中数据为平均数±标准差(n=5); 同一列数据中, 标注有不同字母的数值间在 0.05 水平显著(Duncan)

(3) 渗透调节物质的响应特征

结果见表 5, 空气湿度对叶片糖积累有极显著影响($P<0.01$), 空气湿度越高糖含量越高, 土壤含水量对叶片糖含量的影响达到显著水平($P<0.05$), 土壤水分越低叶片糖含量越高, 因此, 二者对叶片可溶性糖的影响呈相反的趋势。

以 F 值大小评价, 而空气湿度对叶片糖含量的积累的影响远大于土壤含水量。

3 讨论与结论

3.1 水库气候效应对车桑子幼苗生长、发育和形态的影响

本研究表明, 土壤干旱限制车桑子幼苗的营养生长, 表现为株高和生物量下降、构件数减少、根系发育受阻, 说明车桑子幼苗对土壤干旱具有敏感性, 其响应也具有系统性和整体性, 符合植物干旱适应的一般特征^[24-25]。土壤含水量减小导致根系的长度、分支数、截面积及根体积等下降, 与大豆和紫花苜蓿的研究结果一致^[26-27], 与红砂幼苗根系对土壤干旱的响应规律不一致^[13], 说明根系发育对土壤干旱的适应也具有种特异性; 车桑子具有增加根生物量分配以适应土壤水分亏缺的特性, 与尉秋实等对沙漠苻^[24]、冯燕等对霸王和柠条^[25]的研究结果一致。Huston 等^[28]和 Tilman^[29]的研究认为, 植物地下部分与地上部分生物量比率变化是植物对环境因子需求的响应, 本研究中土壤干旱时车桑子增加根生物量分配的特性符合这一规律。

空气湿度能影响植物树干液流^[17,30]、气孔发育^[15]、矿质营养运输^[31]等, 而有关空气湿度对植物生长、特别是根系发育的研究较为少见。本研究显示空气湿度能显著影响车桑子幼苗的生长和发育。其中, 株高和生

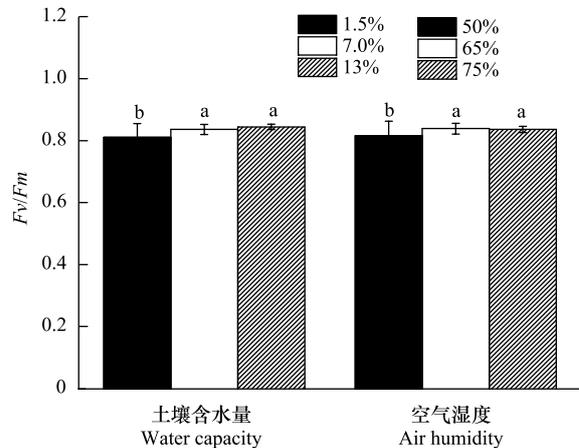


图 4 空气湿度和土壤含水量对 Fv/Fm 的影响

Fig.4 Effects of air humidity and soil water capacity on Fv/Fm of *D. viscosa*

物量积累均随空气湿度下降而下降,具有与土壤干旱类似的规律,与段国晟蓝果忍冬的结果一致^[32],但Mortensend却发现,空气湿度下降使短日植物 *Euphorbia pulcherrima* 和 *Kalanchoe blosfeldiana* 的高生长增加^[33],因此,植物高生长对空气湿度的响应可能具有种特异性。另外,空气湿度对车桑子幼苗根、茎、叶构件发育的影响,呈现先随湿度降低而增加然后再降低的趋势,与江汉平原过高的湿度抑制小麦根系活力显的研究结果一致^[34],说明根系发育需要合适的空气湿度,预示水库的气候效应可能抑制植株的形态发育。事实上,植物叶片气孔导度对空气湿度的响应具有单峰特性^[16],通过气孔导度对“土壤-植物-大气”水分运输连续体进行调节,可能是车桑子幼苗根、茎、叶构件发育对空气湿度单峰响应的作用机制。

表 5 空气和土壤含水量变化对车桑子幼苗糖含量和丙二醛含量的影响

Table 5 Effects of air and soil humidity on leaf MDA and sugar content of *D. viscosa* seedlings

| 空气湿度 Air humidity | 土壤含水量 Soil water capacity (v/v) | 丙二醛 MDA/(10 ⁻⁴ μmol/g) | 可溶性糖 Soluble sugar/(μmol/g) |
|--|------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| 75% | 13% | 5.6±0.3ab | 8.4±0.1c |
| | 7% | 7.6±0.4abc | 6.1±0.6ab |
| | 1.5% | 9.6±0.8bc | 4.3±0.8ab |
| 65% | 13% | 7.3±0.6abc | 4.0±0.4ab |
| | 7% | 5.4±0.2ab | 3.1±0.5a |
| | 1.5% | 8.5±0.9bc | 4.0±0.3ab |
| 50% | 13% | 1.9±0.2a | 5.2±0.6ab |
| | 7% | 3.8±0.1ab | 4.3±0.2ab |
| | 1.5% | 12.4±0.2c | 4.6±0.5ab |
| 空气湿度(F) F value of air humidity | | 0.52 ^{ns} | 7.27 ^{**} |
| 土壤含水量(F) F value of soil water capacity | | 6.30 ^{**} | 3.5 ^{**} |
| 空气湿度×土壤含水量(F) F value of interaction between soil water capacity and air humidity | | 1.74 ^{ns} | 1.94 ^{ns} |

表中数据为平均数±标准差(n=5);同一列数据中,标注有不同字母的数值间在0.05水平显著(Ducan)

综合分析,大气湿度升高可以部分补偿降雨减少导致的干旱,因此水库建设的气候效应不会大幅度改变车桑子幼苗的生长和发育。

3.2 车桑子幼苗对土壤和大气湿度变化的适应机制

植物光合能力下降是植物水分胁迫的重要体现。赵琳等发现,干旱胁迫使车桑子净光合速率下降45.8%^[9],涂璟等也发现土壤水分低于26.7%时,车桑子幼苗的净光合速率就会下降^[35],说明车桑子的光合系统对水分胁迫具有敏感性。尽管土壤水分胁迫使加纳比松、火炬树和紫花苜蓿叶片叶绿素含量升高或降低^[36-38],但本研究中土壤和大气湿度变化对叶绿素含量没有影响,与红松和西伯利亚红松结果的是一致的^[39],因此叶绿素含量不是导致车桑子幼苗光合效率下降的主要原因。本研究显示土壤和空气湿度下降均引起Fv/Fm值下降,说明光合电子传递受阻是水分胁迫时车桑子光合能力下降的主要原因,也可能是空气湿度增加缓解土壤干旱对车桑子幼苗生长影响的主要机制。

膜质过氧化是水分胁迫危害植物的主要途径。当植物受到干旱胁迫时,产生大量的活性氧会引起膜质的过氧化作用,MDA作为脂膜过氧化的终端产物,其含量多少可以反映生物膜被破坏的程度^[12],因此,MDA含量常被选作评价植物干旱胁迫水平的指标。本研究表明,土壤含水量和大气湿度变化对车桑子幼苗叶片膜质

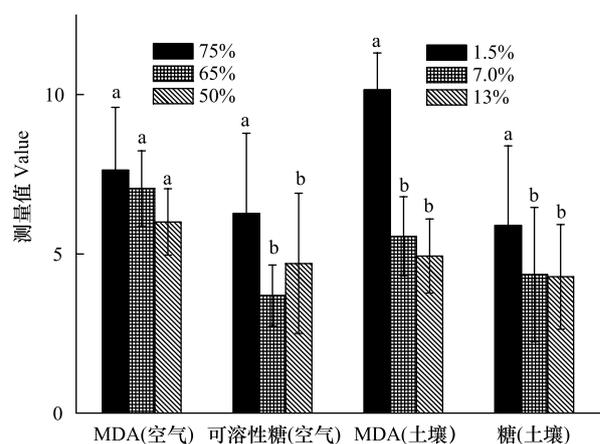


图 5 空气湿度和土壤含水量对叶片 MDA 和可溶性糖含量的影响

Fig.5 Effects of air humidity and soil water capacity on leaf MDA and sugar of *D. viscosa* seedlings

过氧化的作用存在显著差异,叶片 MDA 具有随土壤含水量的下降而增加的趋势,说明车桑子叶片的质膜系统已经发生过氧化反应,与刘瑞香等对沙棘和俄罗斯沙棘的研究结果一致^[40];而大气湿度变化对叶片 MDA 没有显著影响,说明大气湿度升高并未导致植物叶片膜质的急剧过氧化,与江汉平原较高的大气湿度使小麦叶片膜质过氧化的结果不一致^[29],可能是植物膜质对大气湿度的敏感性具有种特异性,也可能是由于本研究中大气湿度未达到 RH100%的原因。

糖是参与调节渗透胁迫的小分子物质,在植物对水分胁迫的适应性调节中,是增加渗透性溶质的重要组成部分^[41]。本研究表明,车桑子幼苗叶片的可溶性糖随土壤含水量下降而降低,与史玉炜等^[42]的研究结果一致,说明其具有通过积累糖类物质以下调水势、增加水分吸收的适应能力。本研究的结果还表明,叶片糖含量具有随空气湿度增加而增加的趋势,这显然与渗透调节无关。由于 Fv/Fm、叶片糖含量随空气湿度变化的趋势相同,因此,高湿条件下车桑子叶片具有较高的光合能力,可能是导致其可溶性糖含量较高的原因。

3.3 结论

土壤水分胁迫抑制车桑子幼苗的生长和发育,而空气湿度升高能够促进其生长和发育,因此大气湿度增加能够部分补偿土壤干旱的效应,干热河谷区的水库效应不会导致车桑子幼苗的生长和发育受损。土壤水分胁迫和大气湿度升高不影响车桑子幼苗的叶绿素含量,而光合电子传递链受损及膜质系统过氧化是水分胁迫的主要机制,同时,车桑子幼苗具有积累可溶性糖进行渗透调节的能力。

参考文献 (References):

- [1] 张荣祖. 横断山区干旱河谷. 北京: 科学出版社, 1992.
- [2] 金振洲. 滇川干热河谷种子植物区系成分研究. 广西植物, 1999, 19(1): 1-14.
- [3] Fu B P, Zhu C G. The effects of Xinanjiang reservoir on precipitation. *GeoJournal*, 1984, 8(3): 229-234.
- [4] 陈鲜艳, 张强, 叶殿秀, 廖要明, 祝昌汉, 邹旭恺. 三峡库区局地气候变化. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(1): 47-51.
- [5] 马占山, 张强, 秦琰琰. 三峡水库对区域气候影响的数值模拟分析. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(9): 1044-1052.
- [6] 张美玲, 鹿翠华, 张慧. 近 45 年微山湖湿地周边大气湿度的变化特征. *现代农业科技*, 2008, (18): 301-303.
- [7] 周祥, 王克勤, 仲增福. 大气湿度对元谋干热河谷水面蒸发的影响. *现代农业科技*, 2006, (15): 191-194.
- [8] 马焕成. 干热河谷造林新技术. 昆明: 云南科技出版社, 2001.
- [9] 赵琳. 云南干热河谷旱季车桑子的光合水分生理特性的研究. *西部林业科学*, 2006, 35(1): 12-17.
- [10] 张春华, 唐国勇, 孙永玉, 刘方炎, 李昆, 和菊. 车桑子种子抗逆生理学特性及其对天然更新的影响. *西南农业学报*, 2010, 23(5): 1471-1476.
- [11] 张琼瑛, 孙海龙, 李绍才, 胡兴, 庞亮. 不同环境条件对车桑子萌发的影响. *种子*, 2013, 32(1): 12-14, 19-19.
- [12] 吴志华, 曾富华, 马生健, 谢耀坚, 卢向阳. 水分胁迫下植物活性氧代谢研究进展(综述 I). *亚热带植物科学*, 2004, 33(2): 77-80.
- [13] 耿东梅, 单立山, 李毅. 土壤水分胁迫对红砂幼苗细根形态和功能特征的影响. *水土保持通报*, 2014, 34(6): 36-42.
- [14] 刘金平, 游明鸿, 段婧, 张丽慧. 水分胁迫下雌雄异株植物葎草繁殖策略的可塑性调节. *草业学报*, 2015, 24(3): 226-232.
- [15] Torre S, Fjeld T, Geslerød H R, Moe R. Leaf anatomy and stomatal morphology of greenhouse roses grown at moderate or high air humidity. *Journal of the American Society of Horticulture Science*, 2003, 128(4): 598-602.
- [16] 李静. 几种植物叶片气孔导度与植物激素对大气湿度的响应[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- [17] 王文杰, 孙伟, 邱岭, 祖元刚, 刘伟. 不同时间尺度下兴安落叶松树干液流密度与环境因子的关系. *林业科学*, 2012, 48(1): 77-85.
- [18] 黄迪, 张佳宝, 张丛志, 黄平. 大气湿度与氮肥水平对冬小麦形态建成及水分利用效率的影响. *中国生态农业学报*, 2011, 19(2): 253-257.
- [19] 郎南军. 云南干热河谷退化生态系统植被恢复影响因子研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2005: 66-73.
- [20] 罗敬萍, 段曰汤, 何璐, 沙毓沧, 朱宏业, 瞿文林, 谭红. 金沙江干热河谷旱地番石榴生长规律及其与气象因子的关系. *西南农业学报*, 2005, 18(4): 459-464.
- [21] Walters M B, Reich P B. Low-light carbon balance and shade tolerance in the seedlings of woody plants: Do winter deciduous and broad-leaved evergreen species differ? *New Phytologist*, 1999, 143(1): 143-154.
- [22] 吴雪霞, 杨晓春, 朱宗文, 查丁石, 许爽. 外源 6-BA 对低温胁迫下茄子幼苗光合作用、叶绿素荧光参数及光能分配的影响. *植物生理学报*, 2013, 49(11): 1181-1188.
- [23] 张志良, 瞿伟菁, 李小方. 植物生理学实验指导. 北京: 高等教育出版社, 2003.

- [24] 尉秋实, 赵明, 李昌龙, 李爱德. 不同土壤水分胁迫下沙漠蒿的生长及生物量的分配特征. 生态学杂志, 2006, 25(1): 7-12.
- [25] 冯燕, 王彦荣, 胡小文. 水分胁迫对两种荒漠灌木幼苗生长与水分利用效率的影响. 草业学报, 2011, 20(4): 293-298.
- [26] 闫春娟, 王文斌, 孙旭刚, 曹永强, 宋书宏, 袁玉璐. 干旱胁迫对大豆根系发育影响初报. 大豆科学, 2012, 31(6): 924-926.
- [27] 李文尧, 张岁岐, 丁圣彦, 山仑. 干旱胁迫下紫花苜蓿根系形态变化及与水分利用的关系. 生态学报, 2010, 30(19): 5140-5150.
- [28] Huston M, Smith T. Plant succession: Life history and competition. *The American Naturalist*, 1987, 130(2): 168-198.
- [29] Tilman D. *Plant Strategies and the Dynamics and Structure of Plant Communities*. Princeton: Princeton University Press, 1988: 52-97.
- [30] Kupper P, Söber J, Sellin A, Löhmus K, Tullus A, Räm O, Lubenets K, Tulva I, Uri V, Zobel M, Kull O, Söber A. An experimental facility for free air humidity manipulation (FAHM) can alter water flux through deciduous tree canopy. *Environmental and Experimental Botany*, 2011, 72(3): 432-438.
- [31] del Amor F M, Marcelis L F M. Differential effect of transpiration and Ca supply on growth and Ca concentration of tomato plants. *Scientia Horticulturae*, 2006, 111(1): 17-23.
- [32] 段国晟. 空气湿度对蓝果忍冬(*Lonicera Caerulea* L.)生长及生理特性影响的初步研究[M]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2010.
- [33] Mortensen L M. Effects of air humidity on growth, flowering, keeping quality and water relations of four short-day greenhouse species. *Scientia Horticulturae*, 2000, 86(4): 299-310.
- [34] 王小燕, 赵晓宇, 陈恢富, 王晓玲, 熊勤学. 江汉平原小麦孕穗期空气相对湿度升高的产量效应. 中国农业科学, 2014, 47(19): 3769-3779.
- [35] 涂璟, 王克勤, 刘惠芳. 新银合欢和车桑子的光合速率对土壤水分和光照的响应. 浙江林业科技, 2010, 30(3): 20-23.
- [36] 陈坤荣, 王永义. 加勒比松耐旱性生理特征研究. 西南林学院学报, 1997, 17(4): 9-15.
- [37] 喻晓丽, 蔡体久, 宋丽萍, 吕清友. 火炬树对水分胁迫的生理生化反应. 东北林业大学学报, 2007, 35(6): 10-12.
- [38] 沈艳, 谢应忠. 干旱对紫花苜蓿叶绿素含量与水分饱和和亏缺的影响. 宁夏农学院学报, 2004, 25(2): 26-28.
- [39] 夏莹莹, 毛子军, 马立祥, 陈婕. 水分条件对红松和西伯利亚红松针叶脯氨酸与叶绿素含量的影响. 植物研究, 2008, 28(3): 330-335.
- [40] 刘瑞香, 杨劫, 高丽. 中国沙棘和俄罗斯沙棘在不同土壤水分条件下保护酶系统和丙二醛的变化. 华北农学报, 2006, 21(2): 87-90.
- [41] 张大鹏, 罗国光. 不同时期水分胁迫对葡萄果实生长发育的影响. 园艺学报, 1992, 19(4): 296-300.
- [42] 史玉炜, 王燕凌, 李文兵, 高述民, 李霞. 水分胁迫对刚毛柽柳可溶性蛋白、可溶性糖和脯氨酸含量变化的影响. 新疆农业大学学报, 2007, 30(2): 5-8.