

5个楸树(*Catalpa bungei*)无性系耗水特性比较

董蕾¹,李吉跃^{1*},谢堃¹,王军辉²

1. 华南农业大学 林学院, 广东 广州 510642

2. 中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091

摘要: 水是西北造林育种需要考虑的关键环境因子, 速生树种高耗水现象是西北造林中亟待解决的问题。为筛选适宜造林的楸树无性系, 本研究利用盆栽称重法及 Li-6400XT 便携式光合作用分析系统 (Li-cor, U.S.) 对于 5 个楸树无性系(004-1、015-1、7080、1-3、1-4)进行比较。结果显示: 试验地甘肃天水地区午间 14:00 时气温达全天最高, 为 41.1±1.86 °C, 湿度仅为 39.21±2.65%。在此条件下, 5 个楸树无性系耗水量及耗水速率均出现“单峰变化”, 可归为“非蒸腾午休型”。其中无性系 1~3 午间耗水速率最大, 达到 7.9691±0.1367 mmol·m⁻²·s⁻¹; 楸树无性系全天耗水量较高, 在 1630.42±38.27~2089.95±34.14 g·d⁻¹, 平均为 1709.30±52.38 g·d⁻¹, 但其日间生产能力较高, 日间耗水速率占全天耗水速率 92.78%, 显著高于毛白杨。与其他 4 个无性系相比, 无性系 004-1 水分利用效率出现“双峰”现象, 分别在 12:00 时及 16:00 时出现两个峰, 全天水分利用效率总和达到 15.723±1.231 μmol·mmol⁻¹。因此, 楸树耗水速率与普通植物相当, 耗水量较高的原因与其较大的叶面积有关; 无性系 004-1 较其他 4 个无性系, 具有更高的苗高、地径, 且整株叶面积达 1.9907±0.032 m²; 在水分利用效率、耗水速率上也表现出良好的水分利用能力和生长能力, 可作为当地丰产速生林的优质无性系进行种植。

关键词: 楸树无性系; 耗水; 蒸腾; 水分利用效率

中图分类号: S722.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-2324(2016)01-0031-06

Comparison among Characteristics of Water Consumption in 5 Clones of *Catalpa bungei*

DONG Lei¹, LI Ji-yue^{1*}, XIE Kun¹, WANG Jun-hui²

1. College of Forestry/South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2. Key Laboratory of National Forestry Bureau, Institute of Forestry/Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

Abstract: Drought was considered to be a key factor for breeding and forestation in northwest China. High water consumption of fast growing trees was an important problem for forestation. To compare water consumption of *Catalpa bungei*, water consumption, transpiration rate, water use efficiency (WUE) of 5 *Catalpa bungei* clones were studied by Li 6400XT Portable Photosynthesis System and SP-30 Precision Balance. Results showed that temperature got a peak point (41.1±1.86 °C) whereas humidity was only 39.21±2.65% at 14:00. In such hydro-thermal conditions, mass water consumption and water consumption rate of 5 clones had a single peak in a whole day and to be classified as “non-transpiration break type”. Clone 1-3 had a maximum midday water consumption rate at 7.9691±0.1367 mmol·m⁻²·s⁻¹. The range of mass water consumption of 5 clones was from 1630.42±38.27 to 2089.95±34.14 g·d⁻¹, average was 1709.30±52.38 g·d⁻¹. The average of daytime water consumption and total water consumption rate was 92.78% which indicated *Catalpa bungei* was a high daytime productive species. Among 5 clones, clone 004-1 got double peak (at 12:00 and 16:00) in daytime water use efficiency and reached 15.723±1.231 μmol·mmol⁻¹ in a day. Conclusion indicated: 1) water consumption rate of *Catalpa bungei* had no significant difference with other normal trees. Due to the big leaf area, *Catalpa bungei* had high total water consumption; 2) clones 004-1 which had a greater capability of water use and water consume among 5 clones was considered as a high quality clones cultivated in northwest China.

Keywords: *Catalpa bungei* clones; water consumption; transpiration; water use efficiency (WUE)

水分是影响树木生长的重要条件。在树木水分生理过程中, 蒸腾耗水是树木水分散失的主要途径, 为树木生长代谢中起重要调节作用; 而水分利用效率 (Water use efficiency: WUE) 则表征树木利用水分的能力, 了解树木水分利用效率不仅可以掌握植物生长策略, 还可以人为调控有限水资源条件下获得较高经济效益^[1]。近年来我国速生丰产林工程发展迅猛, 但整体矛盾较多^[2], 尤其在速生

收稿日期: 2013-10-11

修回日期: 2013-12-15

基金项目: “十二五”农村领域国家科技计划课题(2012BAD21B03); “十二五”农村领域国家科技计划课题研究任务(2012BAD21B0304)

作者简介: 董蕾(1984-), 女, 博士, 主要从事楸树水分生理研究。Email: icefox1984@aliyun.com.cn

***通讯作者:** Author for correspondence. E-mail: ljyymy@vip.sina.com

林高耗水问题引发研究者广泛讨论, 如对于速生树种桉树^[3]、杨树^[4,5]等进行无性系间耗水能力比较研究, 所获得较好的无性系种植品种, 为生产实践提出许多建议。

无性系选育是森林培育技术过程中的关键问题, 已有大量研究报道证明同树种无性系间在各个生理指标有显著差异, 如桉树无性系间光合能力的对比^[6]、对楸树无性系苗期生长特性的比较^[7]等。楸树(*Catalpa bungei*)是我国暖温带和亚热带传统栽培的珍贵优质用材树种和著名园林观赏树种^[8,9], 素以材质优良, 树姿优美而深受群众喜爱^[10,11]。作为优质用材树种及速生树种, 楸树在西北地区进行大面积推广不仅有利于西北地区植被恢复, 同时为当地经济建设提供帮助。近年来不少学者对于楸树主要生物学特性、种质资源现状等进行研究^[12,13]; 对于无性系的研究主要集中于无性系间盐胁迫的差异响应^[14]、施肥后生长情况研究^[15]、叶绿素荧光与生长^[16]; 而楸树水分生理又仅集中于比较品种之间光合情况变化^[17], 无性系间正常生长状态耗水能力比较则鲜有报道^[18]。而在西北干旱半干旱地区造林育种过程中, 树木耗水能力和水分利用效率的无性系筛选是十分重要且应首先完成的。本研究利用不同楸树无性系进行盆栽实验, 通过比较不同无性系耗水能力及水分利用效率, 获得更适宜西北地区造林育种的优良无性系, 以期为我国西北地区有限水资源下选育高水分利用能力树种进行植被恢复的林木选育提供依据。

1 试验材料及方法

1.1 试验地概况

试验地设在甘肃省天水市小陇山林业科学研究所大棚, 105° 48' E、34° 29' N, 海拔约 1450 m。林场属温带半湿润季风气候, 年均降雨量约 600~800 mm, 年均蒸发量约 1290 mm, 平均气温约 11 °C, 极端最高气温 39 °C, 极端最低气温-19.2 °C, 无霜期约 180 d^[19]。

1.2 试验材料

试验材料取自甘肃省小陇山林业科学研究所苗圃, 选取生长相对一致的 5 个楸树无性系 2 年生组培苗 004-1、1-3、1-4、7080 和 015-1 各 50 株。花盆尺寸: 35 cm×35 cm×30 cm (底径×上口径×高), 每盆栽植 1 株。为防止水肥流失, 每个花盆配有塑料托盘; 盆内套有双层白色塑料袋。基质为体积比 7:3 的森林土和泥炭土, 理化性质: pH 值 6.20, 有机质 74.44 g/kg, 全氮 3.03 g/kg, 全磷 1.47 g/kg, 全钾 20.29 g/kg, 碱解氮 325.36 g/kg, 有效磷 131.88 g/kg, 速效钾 372.94 g/kg, 容重 0.96 g/cm³, 总孔隙度 63.64%, 田间持水量(46.59±4.05)%。于 2012 年 3 月 10 日上盆, 待缓苗至 2012 年 7 月 10 日进行试验。

表 1 5 个无性系苗木生长基本情况

Table 1 The description for the growth of 5 clones

无性系 Clone	苗高(cm) Height	地径(mm) Diameter	整株叶面积(m ²) Leaf area
004-1	135.92± 21.63	17.02± 0.97	1.9907±0.032
015-1	118.47± 3.18	14.83± 0.82	1.7800±0.051
7080	141.00± 3.56	15.10± 1.16	1.4892±0.071
1-3	144.00± 4.55	15.44± 0.86	1.1202±0.036
1-4	133.32± 7.41	15.74± 0.81	1.2609±0.048

1.3 试验方法

对供试苗木进行正常浇水管理, 选择典型晴天测定苗木正常生长状态下的生理指标, 具体测定指标如下(每个指标 3 个重复)。

1.3.1 苗木耗水特性 选择典型晴天(具体时间分别为 2012 年 7 月 12 日及 2012 年 7 月 15 日)连续称盆 2 d, 每天上午 8:00 时到晚上 20:00 时, 每隔 2 h 进行。具体指标如下:

a. 耗水量和耗水速率: 用 SP-30 电子天平(美国, 精度 1/10000, 量程 1~30 kg)称重测定计算整株苗木的耗水量。耗水量除以叶面积得到耗水速率。

b. 整株叶面积: 于耗水测定之前进行测定, 自生物学上端向下记录楸树叶片轮数(楸树每轮 3 片树叶), 利用 Li-cor 3000 (Li-cor, U.S.) 测定每轮典型叶片叶面积。整株叶面积计算方法为: 每轮叶面积=3×所测叶面积, 再将各级叶面积加和所得。

1.3.2 光合作用测定 利用 Li-6400XT 便携式光合作用分析系统 (Li-cor, U.S.) 于晴天上午 8:00 时至晚上 20:00 时进行无性系苗木光合生理指标的测定。测定过程中条件如下: 自然光源、叶温 30~35 °C、大气 CO₂ 浓度。测定指数为: 叶片的净光合速率(P_N)、蒸腾速率(Tr)等指标, 瞬时水分利用效率(WUE)计算公式为: $WUE=P_N/Tr$ 。

1.4 数据处理

采用 Excel 对数据进行常规分析; 采用 SAS9.0 对数据进行 ANOVA 方差分析和 DUNCAN 多重比较。

2 结果与分析

2.1 5 个楸树无性系水分耗散情况比较

测试当天的气象因子日变化趋势在图 1 中显示。光强与温度均出现单峰变化, 而湿度则为单凹变化。光强从早上 8:00 时起快速上升, 在中午 14:00 时达到最大值 $1071.84 \pm 4.68 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 随后急速下降; 温度的变化幅度则较缓和, 在上午 12:00 时前平均温度在 $28.57 \text{ }^\circ\text{C}$, 12:00 时以后开始上升, 在 14:00 时达到最高, 达到 $41.1 \pm 1.86 \text{ }^\circ\text{C}$, 随后开始下降。湿度变化相对光强和温度变化有不同的趋势, 在中午 12:00 时之前有小幅上升, 随后下降, 至下午 14:00 时降至最低点 $39.21 \pm 2.65\%$; 其后有上升至上午 8:00 时的水平。

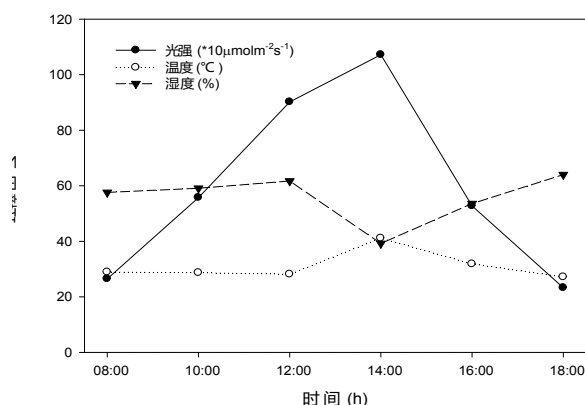


图 1 环境因子日变化示意图

Fig.1 Daily changes of environmental factors

在选择抗旱节水树种的诸多测定指标中, 蒸腾耗水量是一个重要指标。在水分条件相对一致、树木叶面积相近情况下, 蒸腾耗水量越少, 则表明树木维持体内水分的能力越强, 即具有较强的抗旱性。在图 1 所示的环境因子变化影响下, 5 个楸树无性系蒸腾耗水情况也各有不同。图 2 中显示出 5 个楸树无性系日间耗水量(A)及耗水速率(B)的日变化。不难看出, 楸树无性系间呈现相似的变化趋势: 在上午 8:00 时至中午 14:00 时期间, 耗水总量均出现上升, 中午 12:00 时至 14:00 时的耗水总量达到最大值, 其后出现下降。供试的 5 个无性系日变化曲线均为单峰曲线, 可以归为董学军等^[20]所定义的非蒸腾午休型树种。其中, 无性系 004-1 起始耗水量高于其他 4 个无性系, 且变化幅度较大, 在下午 14:00 时后下降幅度也最大; 无性系 7080 的起始值及变化幅度在 5 个无性系中最小(图 2 A)。

5 个楸树无性系耗水速率日变化趋势与耗水总量日变化相似, 均在午间 12:00 时至 14:00 时出现了峰值。无性系 1-3 从上午 8:00 时开始耗水速率处于 5 个无性系的中间水平, 为 $3.3915 \pm 0.0134 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 但随后迅速上升, 在午间峰值达到 $7.9691 \pm 0.1367 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 为 5 个无性系中最高; 而无性系 004-1 由于叶面积大(表 1), 虽然在耗水总量上表现为较高的水平, 但在单位面积耗水速率上仅为 5 个无性系的中等水平, 且峰值后下降幅度较大(图 2 B)。

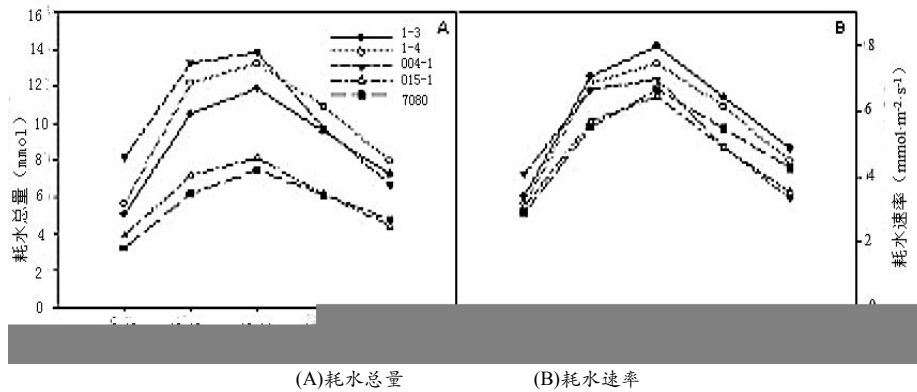


图 2 5 个楸树无性系耗水总量与耗水速率示意图

Fig.2 Mass water consumption and water consumption rate of 5 clones

A: Mass water consumption; B: Water consumption rate

2.2 楸树无性系全天耗水与日间耗水差异分析

表 2 楸树无性系日间与全天耗水比较*

Table 2 Comparison of water consumption between daytime and 24 h in 5 clones

无性系 Clones	全天耗水量(g·d ⁻¹) Mass water consumption	全天耗水速率(g·d ⁻¹ ·m ⁻²) Mass water consumption rate	日间耗水量(g·d ⁻¹) Daily water consumption	日间耗水速率(g·d ⁻¹ ·m ⁻²) Daily water consumption rate
004-1	1794.52±86.02 abc	901.76±32.14 a	1678.57±73.19 ab	843.50±65.19 a
015-1	1630.42±38.27 a	1293.98±53.18 abc	1527.08±74.10 a	1211.97±43.98 abc
7080	1747.75±76.18 abc	1560.49±62.31 abcd	1602.33±56.39 a	1430.65±64.02 abcd
1-3	2089.95±34.14 abcd	1403.59±64.12 abcde	1922.52±45.19 abc	1291.14±74.02 abcde
1-4	1952.23±40.54 ab	1097.37±45.48 ab	1816.02±45.38 abc	1020.81±65.82 ab

* 同列数据后不同字母表示 0.1 水平上有显著差异。

*Different letters mean the significant difference at $P < 0.1$ level.

在晴朗的受试全天中,楸树无性系之间全天耗水与日间耗水情况有显著差异(表 2)。5 个无性系全天耗水量在 $1630.42 \pm 38.27 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ (无性系 015-1)至 $2089.95 \pm 34.14 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ (无性系 1-3)区间内,平均为 $1842.97 \pm 55.02 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$,各无性系间差异显著;但全天耗水速率则有不同规律,由于无性系 004-1 叶面积较大(表 1),故其耗水速率在 5 个无性系中最低,仅有 $901.76 \pm 32.14 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$,最高为无性系 7080,达到 $1560.49 \pm 62.31 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 。由于叶面积差异以及需水能力不同,各无性系全天耗水情况差异显著,这要求我们在进行楸树选育时应将无性系水分消耗能力作为考虑因素之一。

同时,在分别考察日间与全天耗水情况后不难看出,楸树无性系的蒸腾耗水主要发生在白天,日间耗水量占全天耗水量的 91.68%~93.67%,平均在 92.78%,夜间耗水占全天耗水量的 6.34%~8.32%,平均为 7.22%。相比毛白杨^[1],楸树在日间的耗水能力更高,则说明在耗水能力方面,楸树具有更高的水分利用能力。

2.3 5 个楸树无性系水分利用比较

蒸腾作用是水分从叶片表面以水蒸气状态散失到大气过程,不仅受外界环境影响,也受植物的本身调节与控制。除了考察植株耗水能力以外,瞬时蒸腾速率也是需要考虑的因素之一。随着日间环境因子的变化,5 个楸树无性系瞬时蒸腾速率(T_r)以及水分利用效率(WUE)也发生相应变化(图 3)。随着温度和光强升高,5 个无性系 T_r 均上升,但在午间出现“午休”现象,除无性系 015-1 下午 T_r 无上升以外,其余 4 个无性系均进一步上升,并在下午 14:00(004-1 及 7080)或 16:00(1-4 及 1-3)出现峰值,最高达到 $9.49 \pm 0.23 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

水分利用效率(Water Use Efficiency: WUE)是对植物性能的一种测量,尤其在森林系统中,WUE 是林木生产和水分管理的关键环节^[21]。随着日间光强、温湿度变化,5 个楸树无性系 WUE 也出现不同的变化趋势。晨间 5 个无性系 WUE 均较低,随时间推移均上升,其中 4 个无性系 7080、1-3、1-4 及 004-1 在 12:00 出现峰值,无性系 015-1 则继续上升,在 14:00 时达到峰值;此时无性系 7080、1-3

及 1-4 已出现下降; 在 16:00 时, 无性系 004-1 出现第二个峰值(即“双峰”现象), 且高于 12:00 时的峰值。就数值而言, 12:00 时“单峰”无性系 7080、1-4 及 1-3 峰值间无显著差异, 平均达到 $6.559 \pm 0.281 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$; 与无性系 015-1 及 004-1 的最高峰值间差异显著($P < 0.1$)。这说明在进行楸树无性系培育筛选时还应考虑高水分利用效率的无性系品种。

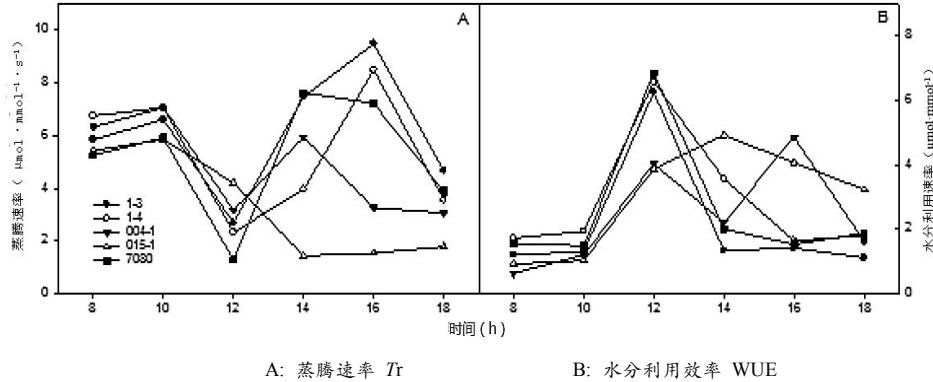


图 3 5 个楸树无性系蒸腾速率(T_r)及水分利用效率(WUE)示意图

Fig.3 Transpiration rate (T_r) and water use efficiency(WUE) of 5 clones

3 讨论与结论

3.1 楸树耗水能力比较

水分是影响树木生长的重要条件和基础, 蒸腾耗水则是树木水分散失的主要途径。蒸腾耗水特性作为植物利用水分状况的最直接体现, 也是决定植物抗旱性能差异的一个重要评价指标。通过掌握树木需水量和需水规律, 可以有效提高水分利用效率, 合理选择造林树种, 确定合理的造林密度, 对人工林分稳定性评价及防护林体系优化配置等具有重要意义, 是林业生态治理工程建设技术中最关键的问题^[22-24]。由于树木的蒸腾作用强弱与其自身生物学特性以及环境因素综合相关, 已有大量研究发现环境因子对蒸腾作用有显著影响^[25-27]。通过对甘肃天水地区环境因子的调查发现: 该地区日间光照、温度呈单峰变化、湿度呈单谷变化, 其峰值谷值均出现在中午 14:00 时(图 1); 与 5 个楸树无性系耗水速率日间平均值进行相关分析后发现: 耗水速率与 3 个环境因子的相关性排序为: 光照强度($R^2=0.7648$)>温度($R^2=0.6412$)>湿度($R^2=0.6014$), 这与众多树种耗水研究结果相似^[23,28,29]。由于天水地区日间光照强度、温度较高而湿度很低, 对于西北地区大面积造林提出更高要求, 则在进行造林选育中更应注意对于无性系水分利用能力的选择。

5 个楸树无性系耗水量日变化及耗水速率日变化: 曲线均呈现“单峰”, 可以归为“非蒸腾午休型”, 其潜在耗水量均出现在 12:00 时至 14:00 时, 与招礼军等^[30]结果一致。楸树属于传统认为的高耗水物种^[5], 本实验发现虽然 5 个无性系全天耗水量之间差异显著, 且高于枸杞、毛白杨^[1]、大叶相思、马占相思^[31]的日间耗水量。由于叶面积会随苗木年龄、生长状况及种类的不同而发生变化, 因此耗水速率作为稳定性指标, 是树种内在水分生理特性的表征。在 5 个楸树无性系中日间耗水速率最高的无性系 1-3 仅为 $5.934 \pm 0.134 \text{ m} \cdot \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 低于枸杞日间耗水速率, 与毛白杨、大叶相思相当^[1,31], 这表明在同等考察因素下, 楸树并不需要消耗大量土壤水分, 蒸腾耗水速率较低, 能够适应干旱条件, 其整株耗水量大的原因与其较大的叶面积(表 1)有关。同时与其他速生树种相比^[1,31], 楸树具有更高的日间耗水速率比(日间耗水速率占全天耗水速率比), 表明楸树日间生理活动能力更强。

3.2 楸树水分利用效率比较

WUE 是植物消耗单位水量所能产生的同化指标, 可以表征植物生产能量转化效率, 一直是树木水分生理以及造林选种中的重要问题^[32]。了解植物的水分利用效率不仅可以掌握植物的生存适应策略, 亦可人为选择调控有限水资源下可获得最高产量或最佳利益^[21]。具有高 WUE 特性一直是干旱半干旱地区能够成功或良好生长和生产的树木选育标准^[30]。考察 5 个楸树无性系的水分利用特性后发现, 楸树无性系普遍具有较高的 WUE, 作为速生木本树种, 其最高 WUE(午间 12:00)与禾本

科农作物(玉米、高粱等^[32])相当或略高(大豆、甘薯、花生等^[32]),表明其水分利用能力较高,尤其在干旱半干旱地区水分相对较少时,高效利用水资源能力较强。在 5 个楸树无性系中,无性系 004-1 在水分利用方面表现出更为突出:虽然在午间 12:00 时所达峰值较低,但在 16:00 出现第二个峰值,全天 WUE 可达 $15.723 \pm 1.231 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$,显著高于其他四个无性系($P < 0.1$),表现出持续较强的水分利用能力。

造林选种应考虑造林当地环境,受试地区日间温度高、湿度低、光照强的条件要求我们需要选择需水能力较低、水分利用能力较高的无性系。通过本研究发现,楸树无性系 004-1 在耗水速率上较低,且日间耗水量占全天耗水量的 93.51%,表明其单位叶面积需水较少但日间生产能力较高;水分利用效率在午间 12:00 时及 16:00 时出现两次峰值,两次峰值加合可达 $8.897 \pm 0.183 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$,全天 WUE 可达 $15.723 \pm 1.231 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$,显著高于其他无性系峰值($P < 0.1$);在生长状态上,无性系 004-1 的苗高、地径及叶面积等指标较高,表现出较高的生产能力。因此在甘肃省天水市的气候条件下,楸树无性系 004-1 可以作为当地丰产速生林的优质无性系进行种植。

参考文献

- [1] 何 茜,李吉跃,姜 枫.毛白杨无性系抗旱节水特性与评价[M].北京:中国林业出版社,2010
- [2] 马花如,李红勋.中国速生丰产林发展状况研究[J].林业经济问题,2009,29(1):1-4
- [3] 胡红玲,张 健,万雪琴,等.巨桉 5 种木本植物幼树的耗水特性及水分利用效率的比较[J].生态学报,2012,32(12):3873-3882
- [4] 何 茜,李吉跃,陈晓阳,等.毛白杨不同无性系苗木耗水量及其昼夜分配[J].华南农业大学学报,2010,31(1):47-50
- [5] 方晓娟,李吉跃,聂立水,等.毛白杨杂种无性系生长及耗水特性研究[J].西北林学院学报,2010,25(5):12-17
- [6] 陆钊华,徐建民,陈儒香,等.桉树无性系苗木光合作用特性研究[J].林业科学研究,2003,16(5):575-580
- [7] 麻文俊,张守攻,王军辉,等.1 年生楸树无性系苗期生长特性[J].林业科学研究,2012,25(5):657-663
- [8] 郭从俭,钱士金,王连卿,等.楸树栽培[M].北京:中国林业出版社,1988
- [9] 杨玉珍,王顺财,彭方仁.我国楸树研究现状及开发利用策略[J].林业科技开发,2006,20(3):4-7
- [10] 潘庆凯,康平生,郭 明.楸树[M].北京:中国林业出版社,1991
- [11] 张 锦.楸树无性繁殖技术[J].林业科技开发,2002,16(4):35-37
- [12] 乔勇进,夏 阳,梁惠敏,等.试论楸树的生物生态学特性及发展前景[J].防护林科技,2003(4):23-24
- [13] 张 锦,田菊芬.优良乡土树种楸树种质资源及发展策略[J].安徽农业科学,2003,31(6):1012-1013
- [14] 王 臣,禹木奎,王宗星,等.9 个楸树无性系对盐胁迫的差异响应[J].南京林业大学学报:自然科学版,2011,35(2):20-24
- [15] 王力朋,晏紫依,李吉跃,等.指数施肥对楸树无性系生物量分配和根系形态的影响[J].生态学报,2012,32(23):7452-7462
- [16] 赵曦阳,王军辉,张金凤,等.楸树无性系叶绿素荧光及生长特性变异研究[J].北京林业大学学报,2012,34(3):41-47
- [17] 王改萍,岑显超,何 力,等.水分胁迫对楸树苗木光合特性的影响[J].南京林业大学学报:自然科学版,2007,31(6):57-60
- [18] 陈 博.楸树无性系抗旱节水特性及其应用研究[D].广州:华南农业大学,2012
- [19] 马建伟,张宋智,郭小龙,等.小陇山森林生态系统服务功能价值评估[J].生态与农村环境学报,2007,23(3):27-30,35
- [20] 董学军,杨宝珍,郭 柯,等.几种沙生植物水分生理生态特征的研究[J].植物生态学报,1994,18(1):86-94
- [21] 曹生奎,冯 起,司建华,等.植物叶片水分利用效率研究综述[J].生态学报,2009,29(7):3882-3892
- [22] 郭连生,田有亮.9 种针阔叶幼树的蒸腾速率、叶水势与环境因子关系的研究[J].生态学报,1992,12(1):47-52
- [23] 周 平,李吉跃,招礼军.北方主要造林树种苗木蒸腾耗水特性研究[J].北京林业大学学报,2002,24(5):50-55
- [24] 胡新生,王世绩.树木水分胁迫生理与耐旱性研究进展及展望[J].林业科学,1998,34(2):77-89
- [25] Kramer PJ. Water relations of plants [M]. New York and London: Academic Press,1983
- [26] Tyree MT, Hammel UT. The measurement of the turgor pressure and the water relations of plants by the pressure-bomb technique [J]. Exp. Bot, 1972,23:267-282
- [27] 蒋高明.毛乌素沙地若干植物光合作用、蒸腾作用和水分效率种间及生境间差异[J].植物学报:英文版,1999,41(10):1114-1124
- [28] 何 茜,李吉跃,齐 涛.“施丰乐”对国槐蒸腾耗水日变化的影响[J].福建林学院学报,2006(4):358-362
- [29] 何 茜,李吉跃,齐 涛.植物生长调节剂对国槐蒸腾耗水的影响[J].北京林业大学学报,2007,29(1):74-78
- [30] 招礼军,李吉跃,于界芬,等.干旱胁迫对苗木蒸腾耗水日变化的影响[J].北京林业大学学报,2003,25(5):42-47
- [31] 段爱国,张建国,张俊佩,等.金沙江干热河谷植被恢复树种盆植苗蒸腾耗水特性研究[J].林业科学研究,2009,22(1):55-62
- [32] 山 仑.水分利用效率[M]//邹承鲁.当代生物学.北京:中国致公出版社,2000:399-400
- [33] 王建林,于贵瑞,房全孝,等.不同植物叶片水分利用效率对光和 CO₂ 的响应与模拟[J].生态学报,2008,28(2):525-533