

西南地区 9 种乡土杨树的秋季光合特性比较

纵 丹^{1,2,3},王静敏^{1,2},张 垚^{1,2},马东晓^{1,2},姜辅瑞^{1,2},张晓琳^{1,2},何承忠^{1,2,3*}

(1. 西南林业大学 西南山地森林资源保育与利用教育部重点实验室,云南 昆明 650224;

2. 西南林业大学 云南省高校林木遗传改良与繁育重点实验室,云南 昆明 650224;

3. 西南林业大学 西南地区生物多样性保育国家林业和草原局重点实验室,云南 昆明 650224)

摘 要:季节是影响植物光合特性的重要因素之一,而树木秋季光合作用为次年生长储备营养物质,也是林木育种的重要指标。为了解西南地区 9 种乡土杨树在秋季生长期对光能的利用效率,以收集于西南地区不同海拔的滇杨、大叶杨、藏川杨、德钦杨、昌都杨、康定杨、乡城杨、西南杨和三脉青杨为研究对象,在 10 月初采用 LI-6400 便携式光合测定仪对其光合参数进行测定。结果表明:1)滇杨和藏川杨的生长量优于其他树种。2)乡城杨净光合速率(P_n)日变化呈现为不对称的双峰曲线,其他 8 种杨树均为单峰曲线,但峰值出现的时间不同;而 9 种杨树的蒸腾速率(T_r)日变化均为单峰曲线,大叶杨 T_r 峰值出现在 12:00,其他 8 种杨树均在 14:00;9 种杨树的气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和水分利用率(WUE)日均值均存在极显著差异,昌都杨 G_s 日均值最大($0.37 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),康定杨 C_i 日均值最小($284.2224 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$),且水分利用率(WUE)最高($4.9966 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$)。3)综合 4 个光合参数,西南杨和康定杨具有较大的后续生长潜力,且康定杨耐旱性较强,而昌都杨和大叶杨耐旱能力较弱。因此,在今后推广应用及经营管理中,需要考虑不同树种对水分需求的差异。

关键词:西南地区;乡土杨树;光合特性;秋季

中图分类号:S718.49

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2022)04-0057-07

Comparison of Photosynthetic Characteristics of Nine Poplar Species in Southwest China in Autumn

ZONG Dan^{1,2,3}, WANG Jing-min^{1,2}, ZHANG Yao^{1,2}, MA Dong-xiao^{1,2}, JIANG Fu-rui^{1,2},

ZHANG Xiao-lin^{1,2}, HE Cheng-zhong^{1,2,3*}

(1. Key Laboratory for Forestry Resources Conservation and Utilization in the Southwest Mountains of China, Ministry of

Education/Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China; 2. Key Laboratory for Forest Genetic and

Tree Improvement & Propagation in Universities of Yunnan Province, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China;

3. Key Laboratory of Biodiversity Conservation in Southwest China, National Forestry and Grassland Administration,

Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract: Season is one of important factors affecting the photosynthetic characteristics of the plants, and photosynthesis of trees in autumn reserves nutrients for the next year's growth as well as an important index of tree breeding. In order to understand the light utilization efficiency of poplar species in southwest China during autumn, nine poplar species, which distribute at different altitudes in southwest China, including *Populus yunnanensis*, *P. lasiocarpa*, *P. szechuanica* var. *tibetica*, *P. haoana*, *P. qamdoensis*, *P. kangdingensis*, *P. xiangchengensis*, *P. schneideri* and *P. trinervis*, were used as the research materials.

收稿日期:2021-04-20 修回日期:2021-08-11

基金项目:国家自然科学基金项目(31860219);西南山地森林资源保育与利用教育部重点实验室开放基金项目(KLESWFU-201906);云南省教育厅科学研究基金项目(2021J0177)。

作者简介:纵 丹,讲师。研究方向:林木遗传育种。E-mail:zdkathy@163.com

* 通信作者:何承忠,教授。研究方向:林木遗传育种与生物技术。E-mail:hc70@163.com

and the photosynthetic parameters were measured by LI-6400 portable photosynthesis measurement system in early October. The results showed that 1) the growth of *P. yunnanensis* and *P. szechuanica* var. *tibetica* was superior to other poplar species. 2) The curve of net photosynthetic rate (P_n) of *P. xiangchengensis* was bimodal while those of other poplar species unimodal, but the peak value of P_n appeared at different time. The diurnal variation of transpiration rates (T_r) of nine poplar species were unimodal curves, and the maximum value of T_r in *P. lasiocarpa* occurred at 12:00, while other eight poplar species occurred at 14:00. The mean values of stomatal conductance (G_s), intercellular CO_2 concentration (C_i) and water use efficiency (WUE) were all extremely and significantly different, and *P. qamdoensis* had the maximum mean value of G_s ($0.37 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), *P. kangdingensis* had the minimum mean value of C_i ($284.222 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$) and the maximum mean value of WUE ($4.996 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$). 3) Comprehensive analysis of the photosynthetic parameters indicated that *P. schneideri* and *P. kangdingensis* should have great potential for subsequent growth. Meanwhile, *P. kangdingensis* has showed strong drought tolerance, but the drought tolerances of *P. qamdoensis* and *P. lasiocarpa* were weak. Therefore, attention should be paid to the differences in water demand among different poplar species during spreading application and management.

Key words: southwest China; native poplar species; photosynthetic characteristics; autumn

光合作用是植物将太阳能转化为化学能的过程,是植物体内唯一的碳素来源,也是植物生长发育的基础^[1]。光合作用作为植物重要生理活动,其变化特征受植物遗传特性和环境条件的双重制约,而光合参数是植物适应环境的直接表现,因此,对不同植物光合指标的测定能够反映其生理特征的差异以及对环境因子的适应性^[2]。此外,研究者不仅可以依据植物光合特性快速了解植物的生长和生理特性,而且可依据光合作用参数的变化分析植物对光照、温度和水分等的需求,从而明确植物对生态环境的适应性^[3-5]。

杨树(*Populus*)是杨柳科(*Salicaceae*)杨属(*Populus*)树种的统称,属于种类最为丰富的树种之一,具有防风固沙、涵养水源和保持水土等作用,此外,因具有速生性和抗寒性等特点,也是世界重要的造林绿化树种之一^[6]。我国杨树资源丰富,广泛分布于东北、西北、华北和西南等地。其中,西南地区复杂的地形地貌,多样的气候环境,独特的地史条件,孕育了丰富多样的杨树种质资源,不同杨树在海拔 600~4 200 m 呈现为明显的海拔梯度分布,且具有良好的速生性和抗逆性^[7],对当地生态环境建设和经济发展发挥了重要的作用^[8]。

为丰富昆明地区杨树资源,满足山地杨树速生人工林营建的需求,前期从青藏高原及其邻近地区收集分布于海拔 2 000 m 以上的乡土杨树 8 种,以昆明当地分布的滇杨(*Populus yunnanensis*)为对照,采用硬枝扦插繁殖育苗后,在海拔 2 044 m 的基地内建立了西南地区 9 种乡土杨树的同质园。经过 3 a 生长观测,收集于不同海拔的 9 种杨树在昆明地

区均能够正常生长,且收集于 3 000 m 以上高海拔地区的杨树,其落叶期延迟至 10 月底,生长期较原生地延长近 1 个月。树木生长期的延长,有利于光合作用为树木次年生长储备更为丰富的营养物质,也是林木育种的重要指标。为充分了解西南地区 9 种乡土杨树在秋季生长期对光能的利用效率,于 10 月初采用 LI-6400 便携式光合测定仪对其光合参数进行测定分析^[9],旨在揭示 9 种杨树的光合特性,为高光效杨树的筛选提供理论依据,也为西南地区高海拔杨树在昆明地区的引种驯化与推广应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

建立同质园的大叶杨(*P. lasiocarpa*)、藏川杨(*P. szechuanica* var. *tibetica*)、德钦杨(*P. haoana*)、昌都杨(*P. qamdoensis*)、康定杨(*P. kangdingensis*)、乡城杨(*P. xiangchengensis*)、西南杨(*P. schneideri*)、三脉青杨(*P. trinervis*)及滇杨共 9 种西南地区乡土杨树原始插穗采集信息(表 1)。2018 年 3 月,从同质园内分别采集 9 种杨树 1 年生健康枝条制作插穗,采用盆栽试验,每树种扦插 9 盆,每盆扦插 3 株。按照完全区组试验设计,将盆栽苗木摆放于西南林业大学智能温室大棚基地的空旷处,3 个区组,每小区 3 盆。待扦插成活后,每插穗仅保留靠近顶端的 1 根萌枝,及时抹除其他部位萌枝。采用相同栽培管理方式对苗木进行日常管理。

1.2 试验方法

1.2.1 生长指标的测定 于 9 月底,从每盆中选取

生长正常、长势相近的 1 株扦插苗作为样株,采用卷尺测定主枝的长度(苗高),应用游标卡尺于主枝基部 2 cm 处测定粗度(地径)。

1.2.2 光合日变化的测定 以测定生长指标的样株为对象,采用 LI-6400 便携式光合测定仪,于 2018 年 10 月 1—3 日 8:00—18:00(晴天)测定 9 种杨树的光合特性指标^[10-11]。每 2 h 测定 1 次,从苗木主干顶端自上向下的第 5~8 片叶中,选取生长正常且完整的叶片作为观测叶,每株测定 3 次,取其平均

值。每个树种测定 9 株。测定指标主要包括净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和气孔导度(G_s)。依据公式 $W_{UE}=P_n/T_r(\text{mmolCO}_2\cdot\text{mol}^{-1}\text{H}_2\text{O})$ 计算水分利用率。

1.3 数据统计与分析

采用 Excel 2007 和 SPSS 21.0 分别对苗木生长指标和光合日变化参数及数据整理与统计分析,当差异显著时,采用 Duncan 法进行多重比较分析。应用 Origin 8.5 软件进行制图。

表 1 9 种杨树采集信息

Table 1 The information of nine *Populus* species

组别	树种	采集地	经度	纬度	海拔/m
大叶杨派	大叶杨 (<i>P. lasiocarpa</i>)	泸定	102°13'26"	29°57'26"	2 265
青杨派	康定杨 (<i>P. kangdingensis</i>)	康定	101°36'43"	30°05'20"	3 609
	三脉青杨 (<i>P. trinervis</i>)	康定	101°52'46"	29°59'36"	3 436
	乡城杨 (<i>P. xiangchengensis</i>)	乡城	99°39'54"	28°56'22"	3 630
	滇杨 (<i>P. yunnanensis</i>)	昆明	102°48'44"	25°17'12"	2 044
	藏川杨 (<i>P. szechuanica</i> var. <i>tibetica</i>)	芒康	98°13'00"	29°32'36"	3 533
	昌都杨 (<i>P. gamdoensis</i>)	昌都	97°01'17"	31°11'44"	3 490
	德钦杨 (<i>P. haoana</i>)	德钦	98°56'56"	28°09'31"	3 233
	西南杨 (<i>P. schneideri</i>)	理塘	100°22'35"	29°45'28"	4 018

2 结果与分析

2.1 9 种杨树生长量比较

苗高和地径可用于反映植物的长势,是衡量苗木质量最为直观的指标^[12]。9 种杨树苗高和地径的测定结果见表 2。方差分析结果表明,9 种杨树的苗高和地径均存在极显著差异($P<0.01$)。其中,苗高从大到小依次为滇杨(68.63 cm)>藏川杨(58.56 cm)>乡城杨(49.23 cm)>康定杨(44.69 cm)>三脉青杨(43.22 cm)>德钦杨(32.12 cm)>大叶杨(31.18 cm)>昌都杨(24.93 cm)>西南杨(20.71 cm),且滇杨苗高与藏川杨和乡城杨差异不显著,但极显著地高于其他 6 种杨树。地径从大到小依次为滇杨(2.33 cm)>藏川杨(2.15 cm)>西南杨(1.64 cm)>乡城杨(1.61 cm)>康定杨(1.51 cm)>大叶杨(1.48 cm)>昌都杨(1.20 cm)>三脉青杨(1.14 cm)>德钦杨(0.70 cm),滇杨苗木地径与藏川杨、西南杨和乡城杨差异不显著,但极显著地大于其他 5 种杨树。由此可见,苗木高生长量与粗生长量并不完全协同,苗高最小值为西南杨,而地径最小值为德钦杨,该 2 种杨树的苗高差异不显著,但地径差异却达到极显著水平。

2.2 9 种杨树不同光合参数的日变化特征

2.2.1 净光合速率(P_n)日变化特征 P_n 是最直接反应植物光合作用强弱的指标,一般情况下,植物的净光合速率日变化有“单峰”型和“双峰”型 2 种类

型^[13]。由图 1 可见,9 种杨树的 P_n 日变化曲线分别表现为“单峰”和“双峰”2 种不同曲线。其中,乡城杨净光合速率日变化呈现不对称的双峰曲线,第 1 次高峰出现在 10:00($11.311\ 7\ \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$),随后净光合速率呈下降趋势,在 12:00 出现峰谷,即表现光合“午休”现象,12:00 之后 P_n 呈上升趋势,14:00 出现第 2 次高峰($11.500\ 2\ \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$),且峰值的差值较小。其余 8 种杨树均表现为单峰曲线,但峰值出现时间不同,德钦杨 P_n 最大值出现在 10:00,滇杨 P_n 峰值出现在 14:00,其他 6 种杨树的 P_n 峰值均出现在 12:00。9 种杨树 P_n 日均值从大到小依次为西南杨($10.302\ 7\ \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$)>康定杨($10.194\ 7\ \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$)>昌都杨($9.772\ 1\ \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$)>三脉青杨($9.022\ 2\ \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$)>德钦杨($9.017\ 3\ \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$)>大叶杨($8.714\ 2\ \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$)>乡城杨($8.462\ 8\ \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$)>滇杨($7.418\ 2\ \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$)>藏川杨($6.549\ 7\ \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$),但差异不显著($P=0.707>0.05$)。

2.2.2 蒸腾速率(T_r)日变化特征 T_r 是植物蒸腾作用强弱的衡量指标^[14]。由图 2 可知,9 种杨树的蒸腾速率日变化规律均表现为“单峰”曲线,其中大叶杨 T_r 峰值出现在 12:00,其他 8 种杨树的 T_r 峰值均出现在 14:00。9 种杨树 T_r 值较高的时间与一天中温度和光照强度最高的时间相一致,主要在 12:00—14:00,之后 T_r 值迅速下降。从 T_r 日均值大小来看,昌都杨($5.839\ 8\ \text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)>

大叶杨($5.259\ 2\ \text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)>三脉青杨($4.767\ 0\ \text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)>西南杨($4.530\ 7\ \text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)>康定杨($4.501\ 6\ \text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)>乡城杨($4.160\ 7\ \text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)>德钦杨($3.810\ 6\ \text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)>藏川杨($3.753\ 1\ \text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)>滇杨($3.431\ 0\ \text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)。方差分析结果表明,9种杨树的 T_r 日均值差异不显著($P=0.059>0.05$)。

表 2 9 种杨树苗木生长指标

Table 2 Seedling growth index of nine poplar species cm

树种	苗高	地径
德钦杨	$32.12\pm 32.15^{\text{CDE}}$	$0.70\pm 0.56^{\text{D}}$
乡城杨	$49.23\pm 14.94^{\text{ABC}}$	$1.61\pm 0.75^{\text{ABC}}$
滇杨	$68.63\pm 17.84^{\text{A}}$	$2.33\pm 0.76^{\text{A}}$
三脉青杨	$43.22\pm 15.43^{\text{BCD}}$	$1.14\pm 0.64^{\text{CD}}$
藏川杨	$58.56\pm 36.22^{\text{AB}}$	$2.15\pm 1.35^{\text{AB}}$
昌都杨	$24.93\pm 20.41^{\text{DE}}$	$1.20\pm 0.33^{\text{CD}}$
康定杨	$44.69\pm 16.98^{\text{BCD}}$	$1.51\pm 0.89^{\text{BC}}$
西南杨	$20.71\pm 12.80^{\text{E}}$	$1.64\pm 0.43^{\text{ABC}}$
大叶杨	$31.18\pm 13.06^{\text{CDE}}$	$1.48\pm 0.85^{\text{BC}}$

注:同列不同大写字母表示在 $P=0.01$ 水平上的差异极显著。下同。

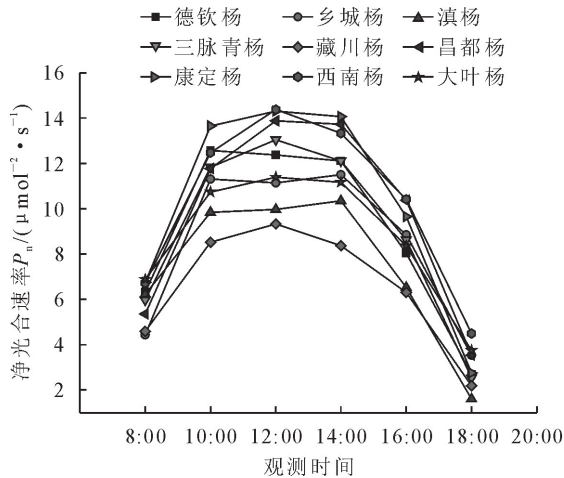


图 1 9 种杨树净光合速率日变化

Fig. 1 The diurnal variation of photosynthetic rate of nine poplar species

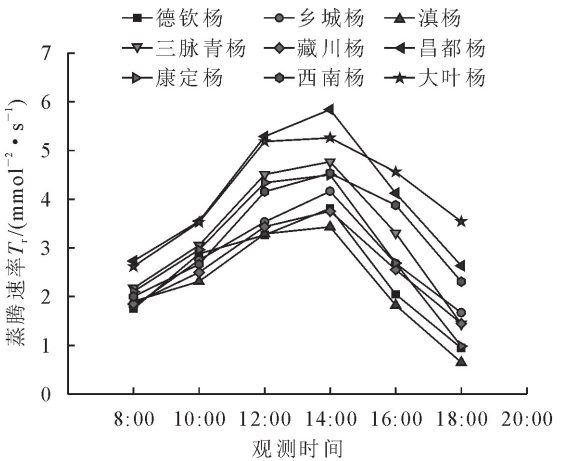


图 2 9 种杨树蒸腾速率日变化

Fig. 2 The diurnal variation of transpiration rate of nine poplar species

2.2.3 气孔导度(G_s)日变化特征 G_s 表示植物叶片内气孔在不同时间张开程度,植物通过调节气孔的开度来控制体内 CO_2 和水汽的交换,直接影响植物光合、呼吸及蒸腾作用^[15]。如表 3 所示,9 种杨树气孔导度日变化平均值由大到小依次为昌都杨($0.37\ \text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)>大叶杨($0.35\ \text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)>西南杨($0.27\ \text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)=三脉青杨($0.27\ \text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)>德钦杨($0.26\ \text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)=乡城杨($0.26\ \text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)>康定杨($0.21\ \text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)>藏川杨($0.20\ \text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)>滇杨($0.18\ \text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)。方差分析结果显示,9 种杨树 G_s 日均值存在极显著差异,其中昌都杨、大叶杨极显著地大于藏川杨、康定杨和滇杨,其他 4 种杨树介于中间。分别对 9 种杨树气孔导度日变化进行比较发现,9 种杨树均在 12:00 或 14:00 出现 1 次峰值,该结果与上述不同树种的净光合速率和蒸腾速率表现基本一致。

2.2.4 胞间 CO_2 浓度(C_i)日变化特征 胞间 CO_2 浓度是反映外界 CO_2 进入植物叶片细胞的浓度,可

表 3 9 种杨树气孔导度(G_s)比较分析

Table 3 Comparative analysis of G_s of nine poplar species $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$

树种	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	平均值
德钦杨	0.18	0.18	0.26	0.27	0.18	0.49	0.26^{AB}
乡城杨	0.24	0.18	0.27	0.28	0.22	0.38	0.26^{AB}
滇杨	0.21	0.14	0.24	0.20	0.14	0.12	0.18^{B}
三脉青杨	0.21	0.19	0.29	0.28	0.24	0.40	0.27^{AB}
藏川杨	0.19	0.14	0.19	0.19	0.16	0.35	0.20^{B}
昌都杨	0.33	0.24	0.36	0.37	0.33	0.61	0.37^{A}
康定杨	0.19	0.18	0.26	0.25	0.19	0.21	0.21^{B}
西南杨	0.18	0.15	0.24	0.24	0.27	0.53	0.27^{AB}
大叶杨	0.22	0.22	0.34	0.32	0.35	0.68	0.35^{A}

用作衡量叶片净光合速率大小的重要指标^[16]。9 种杨树胞间 CO₂ 浓度日均值从大到小依次为:大叶杨(329.883 9 μmol·mol⁻¹)>昌都杨(328.531 5 μmol·mol⁻¹)>藏川杨(327.926 4 μmol·mol⁻¹)>乡城杨(318.357 7 μmol·mol⁻¹)>三脉青杨(314.490 8 μmol·mol⁻¹)>滇杨(300.918 2 μmol·mol⁻¹)>西南杨(296.237 2 μmol·mol⁻¹)>德钦杨(293.582 1 μmol·mol⁻¹)>康定杨(284.222 4 μmol·mol⁻¹)(表 4)。方差分析结果显示,9 种不同杨树胞间 CO₂ 浓度存在极显著差异,其中大叶杨与德钦杨、康定杨及西南杨存在极显著差异,而大叶杨、昌都杨、藏川杨、乡城杨、三脉青杨及滇杨之间差异不显著。由表 4 可见,随着光合速率的增强,消耗大量 CO₂,9 种杨树胞间 CO₂ 浓度在 10:00 均达到最低值。

2.2.5 水分利用率(W_{UE})日变化特征 W_{UE} 反映植物水量之间关系,是植物的净光合速率与蒸腾速率的比值^[17]。由图 3 可见,9 种杨树水分利用率日变化趋势基本一致,均在 10:00 出现最大峰值,且表现为康定杨(4.996 6 μmol·mmol⁻¹)>德钦杨

(4.988 4 μmol·mmol⁻¹)>西南杨(4.932 6 μmol·mmol⁻¹)>滇杨(4.497 4 μmol·mmol⁻¹)>乡城杨(4.327 6 μmol·mmol⁻¹)>三脉青杨(4.183 9 μmol·mmol⁻¹)>昌都杨(3.503 2 μmol·mmol⁻¹)>藏川杨(3.470 5 μmol·mmol⁻¹)>大叶杨(3.114 2 μmol·mmol⁻¹)。之后,西南杨和大叶杨 W_{UE} 持续下降,其余 7 种杨树 W_{UE} 在 16:00 再次出现 1 个峰值,从大到小依次为康定杨(3.882 1 μmol·mmol⁻¹)>滇杨(3.690 7 μmol·mmol⁻¹)>德钦杨(3.565 4 μmol·mmol⁻¹)>乡城杨(3.503 2 μmol·mmol⁻¹)>三脉青杨(2.994 5 μmol·mmol⁻¹)>昌都杨(2.952 4 μmol·mmol⁻¹)>藏川杨(2.618 7 μmol·mmol⁻¹)。可见,康定杨对水分具有较高的利用效率,能更好地进行光合作用,而大叶杨对水分的利用效率最低。方差分析结果显示(表 5),9 种杨树水分利用效率存在极显著差异(P<0.01),其中康定杨与乡城杨、三脉青杨、藏川杨、昌都杨和大叶杨均存在极显著差异,而德钦杨、乡城杨、滇杨、三脉青杨和西南杨之间差异不显著。

表 4 不同杨树品种胞间 CO₂ 浓度(C_i)比较分析

Table 4 Comparative analysis of C _i of different poplar species							μmol·mol ⁻¹
树种	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	平均值
德钦杨	315.630 6	260.712 2	292.591 5	293.227 6	280.190 6	319.140 2	293.582 1 ^{CD}
乡城杨	349.649 5	280.675 1	304.906 4	299.736 4	310.803 3	364.375 5	318.357 7 ^{ABCD}
滇杨	334.472 3	266.667 9	299.923 5	288.533 2	294.056 3	321.855 9	300.918 2 ^{ABCD}
三脉青杨	330.278 9	281.951 2	301.409 5	297.876 9	317.799 0	357.629 1	314.490 8 ^{ABCD}
藏川杨	343.992 2	296.523 2	303.272 1	310.907 9	327.799 7	385.063 2	327.926 4 ^{ABC}
昌都杨	357.890 2	306.768 3	312.359 4	309.927 3	328.507 4	355.736 6	328.531 5 ^{AB}
康定杨	321.741 1	253.617 9	282.320 8	275.800 9	282.618 8	289.234 6	284.222 4 ^D
西南杨	318.629 8	246.377 3	272.366 3	289.496 8	317.765 4	332.787 8	296.237 2 ^{BCD}
大叶杨	327.817 3	301.573 5	321.514 5	311.957 5	345.232 9	371.207 7	329.883 9 ^A

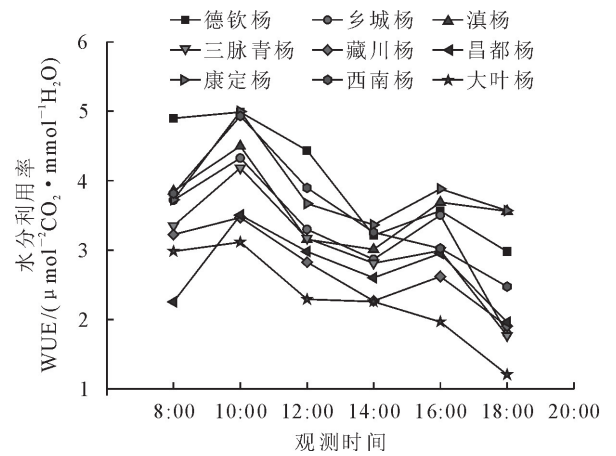


图 3 9 种杨树水分利用效率日变化

Fig. 3 The diurnal variation of water use of efficiency of nine poplar species

3 结论与讨论

植物的光合作用强弱对植物生长、产量及抗逆性等具有十分重要的影响,因此可以作为植物生长和抗逆性强弱的判定指标^[18]。自然条件下,叶片净光合速率(P_n)日变化趋势常表现为“单峰”或“双峰”曲线^[19]。王兴胜等^[20]对杨属不同派系品种光合特性研究发现,青杨派 5 种杨树的 P_n 日变化规律不同,且不同种的 P_n 峰值出现时间略有差异。本研究结果表明,乡城杨净光合速率日变化呈现不对称的双峰曲线,而德钦杨、康定杨、三脉青杨、藏川杨、昌都杨、西南杨、大叶杨和滇杨 P_n 日变化均为单峰曲线,但不同树种出现峰值时间存在差异,这与王兴胜等^[17]研究结果一致。净光合速率(P_n)越大,光合作用越强^[21]。本研究中,引种于青藏高原及其

表 5 9 种杨树水分利用效率(W_{UE})比较分析Table 5 Comparative analysis of W_{UE} of nine poplar species $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$

树种	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	平均值
德钦杨	4.899 0	4.988 4	4.435 8	3.211 7	3.565 4	2.979 9	4.013 4 ^{AB}
乡城杨	3.719 0	4.327 6	3.299 1	2.866 2	3.503 2	1.795 3	3.251 7 ^{BCD}
滇杨	3.853 2	4.497 4	3.152 9	3.009 3	3.690 7	3.561 3	3.627 5 ^{ABC}
三脉青杨	3.350 7	4.183 9	3.169 8	2.811 6	2.994 5	1.769 7	3.046 7 ^{BCD}
藏川杨	3.223 8	3.470 5	2.826 8	2.270 0	2.618 7	1.904 6	2.719 1 ^{CD}
昌都杨	2.253 7	3.503 2	2.979 8	2.601 3	2.952 4	1.958 8	2.708 2 ^{CD}
康定杨	3.726 7	4.996 6	3.670 8	3.364 4	3.882 1	8.168 5	4.634 9 ^A
西南杨	3.817 2	4.932 6	3.897 7	3.258 5	3.023 4	2.474 0	3.567 2 ^{ABC}
大叶杨	2.983 0	3.114 2	2.290 3	2.257 0	1.965 8	1.205 7	2.302 7 ^D

邻近地区的 8 种乡土杨树 P_n 均高于昆明本地滇杨。该结果与夏黎等^[22]对 7 种引种杨树和 4 个本地杨树光合特性比较分析结果一致,其研究结果显示,引种杨树无性系 P_n 普遍高于本地杨树 P_n 。

蒸腾速率(T_r)是衡量植物水分平衡的一个重要生理指标,可反映植物调节水分损失及对逆境条件适应的能力^[23-24]。本研究中,9 种杨树 T_r 日变化曲线均表现为单峰曲线,但大叶杨(属于大叶杨派)与其他 8 种杨树(均属于青杨派)出现峰值时间存在差异。王兴胜等^[20]研究结果也表明,杨树不同派系(品种) T_r 日变化趋势存在差异。昌都杨和大叶杨 T_r 日均值较大,表明该 2 种杨树的耗水量较大,适宜种植在水源较为丰富的区域^[25]。此外,植物 W_{UE} 是评价植物水分生产力和干旱气候环境下筛选抗旱物种的重要指标,同时也是植物是否能更好适应某一区域环境的重要评判标准^[26],即在相同生境条件下, W_{UE} 越大,在消耗相同水分时制造的有机物越多,抗旱能力越强^[27]。本研究中,9 种杨树 W_{UE} 日变化趋势基本一致, W_{UE} 日均值比较显示,康定杨对水分具有较高的利用效率,大叶杨对水分的利用效率最差,表明引种至昆明地区后康定杨的抗旱能力更强,而大叶杨则需要充足的水源。水分利用效率是评估植物光合碳固定与水分耗散之间权衡关系的重要生理参数,气孔导度(G_s)亦是水分利用效率的关键因素^[28]。王兴胜等^[20]对青杨派 14 个品种(系)光合特性日变化比较显示,14 个品种(系) G_s 日变化趋势与其 P_n 不完全相同,认为造成这种差异的原因是所选青杨派树种的原生地不同。本研究 9 种杨树均来源于我国西南高原地区,属于低纬度高海拔杨树, G_s 日变化趋势与 P_n 及 T_r 日变化趋势基本一致,但 9 种杨树 G_s 出现峰值的时间存在差异,且昌都杨 G_s 日均值最大,极显著地高于藏川杨、滇杨和康定杨。

季节对植物光合特性具有较明显的影响,而树

木秋季光合作用能够为次年生长储备营养物质,也是林木育种的重要指标^[29]。对 9 种杨树苗木生长指标分析表明,滇杨苗木高生长和粗生长均最大,而藏川杨和乡城杨苗木高和地径均与滇杨差异不显著,表明该 3 种杨树苗木具有突出的早期生长优势。但比较 9 种杨树秋季生长期的光合特性参数显示,引种杨树的 P_n 和 T_r 普遍高于本地滇杨,结合参数 C_i 、 G_s 和 W_{UE} 可以看出,西南杨和康定杨具有较高的 P_n 和 W_{UE} 日均值,较低的 C_i 日均值,且 T_r 日均值介于中间水平,因此,具有较强的后续生长潜力。大叶杨和昌都杨 T_r 日均值较高, W_{UE} 日均值较低,在后续推广应用中,二者适宜种植在水分条件较好的区域。

参考文献:

- [1] 安文明,师庆东,张毓涛,等. 克拉玛依人工林俄罗斯杨(*Populus russkii*)与新疆杨(*P. alba* var. *pyramidalis*)光合特性分析[J]. 干旱区资源与环境,2012,26(9):67-72.
AN W M, SHI Q D, ZHANG Y T, et al. Comparison of photosynthesis feature between *Populus russkii* and *P. alba* var. *pyramidalis* in the Karamay plantation [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(9): 67-72. (in Chinese)
- [2] 孙安安,智颖,姜平平,等. 西鄂尔多斯 4 种荒漠植物光合作用特征与差异性[J]. 生态学报,2019,39(13):4944-4952.
SUN A A, ZHI Y B, JIANG P P, et al. Characteristics of and differences in photosynthesis in four desert plant in Western Ordos [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(13): 4944-4952. (in Chinese)
- [3] HAWORTH M, MARINO G, CENTRITTO M. An introductory guide to gas exchange analysis of photosynthesis and its application to plant phenotyping and precision irrigation to enhance water use efficiency [J]. Journal of Water and Climate Change, 2018, 9(4): 786-808.
- [4] MENG C, LIU X, CHAI Y, et al. Another choice for measuring tree photosynthesis in *vitro* [J]. Peer. J., 2019, 7(1): e5933.
- [5] XIN P, LI B, ZHANG H, et al. Optimization and control of the light environment for greenhouse crop production [J]. Scientific Reports, 2019, 9: 8650.

- [6] 刘文国,张旭东,黄玲玲,等.我国杨树生理生态研究进展[J].世界林业研究,2010,23(1):50-55.
LIU W G,ZHANG X D,HUANG L L,*et al.* Research progress on physiologic and ecologic characteristics of poplar [J]. World Forestry Research,2010,23(1):50-55. (in Chinese)
- [7] 龚固堂.杨属地理分布与起源初探[J].四川林业科技,2004,25(2):25-30.
- [8] 余树全,刘军,付达荣,等.川西高原青杨派基因资源特点[J].浙江林学院学报,2003,20(1):27-31.
- [9] 尤扬,杨立峰,周建,等.白兰花秋季光合特性研究[J].西北林学院学报,2009,24(6):24-27.
YOU Y,YANG L F,ZHOU J,*et al.* The photosynthetic characteristics of *Michelia alba* in autumn [J]. Journal of Northwest Forestry University,2009,24(6):24-27. (in Chinese)
- [10] 盛思敏.三种樟科植物光合生理生态特性的研究[J].合肥:安徽农业大学,2018,22-53.
- [11] 文强,韩炜,马霄华,等.乌鲁木齐市秋季夏橡净光合速率日变化特征与生理生态因子的关系[J].新疆师范大学学报:自然科学版,2019,38(1):6-12.
WEN Q,HAN W,MA X H,*et al.* Diurnal variation of net photosynthetic rate of *Quercus* in autumn in Urumqi city and its relationship with physio-ecological factors [J]. Journal of Xinjiang Normal University:Natural Science Edition,2019,38(1):6-12. (in Chinese)
- [12] 宋鹏,张懿琳,辜云杰,等.红椿半同胞家系苗期特性分析[J].浙江林业科技,2013,33(4):74-78.
- [13] 吴泽民,黄成林,韦朝领,等.黄山松群落林隙光能效应与黄山松的更新[J].应用生态学报,2000,11(1):13-18.
WU Z M,HUANG C L,WEI C L,*et al.* Light effect of gaps in Huangshan pine community and regeneration of Huangshan pine [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2000,11(1):13-18. (in Chinese)
- [14] 潘瑞炽.植物生理学[M].北京:高等教育出版社,2004:56-57.
- [15] 刘红云,梁宗锁,舒志明,等.施肥对丹参叶片光合光响应特性的影响[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2011,39(6):110-114,121.
LIU H Y,LIANG Z S,SHU Z M,*et al.* Effect of fertilization treatment on the photosynthetic light-response characteristics of *Salvia miltiorrhiza* Bunge[J]. Journal of Northwest A&F University:Nat. Sci. Ed.,2011,39(6):110-114,121. (in Chinese)
- [16] 丁之恩,徐迎碧,刘韶,等.6个石榴品种的光合和蒸腾特性[J].经济林研究,2008,26(1):15-19.
DING Z E,XU Y B,LIU S,*et al.* Photosynthetic and transpiration characteristics of 6 cultivars in pomegranate [J]. Non-wood Forest Research,2008,26(1):15-19. (in Chinese)
- [17] 李荣生,许煌灿,尹光天,等.植物水分利用效率的研究进展[J].林业科学研究,2003,16(3):366-371.
LI R S,XU H C,YIN G T,*et al.* Advances in the water use efficiency [J]. Forestry Research,2003,16(3):366-371. (in Chinese)
- [18] 许大全.光合作用效率[M].上海:上海科学技术出版社,2002.
- [19] YANG J D,LIU Z M. Study on field-grown maize introduced into Tibetan plateau:some characteristics of diurnal variation of photosynthesis [J]. Acta Agronomica Sinica,2002,28(14):475-479.
- [20] 王兴胜,李斌,陈勇,等.不同派系杨树品种(系)光合特性评价[J].南方农业学报,2018,49(12):2476-2485.
WANG X S,LI B,CHEN Y,*et al.* Evaluation on photosynthetic characteristics of different factions of poplar species (clones) [J]. Journal of Southern Agriculture,2018,49(12):2476-2485. (in Chinese)
- [21] HAO J Q,ZHANG L,ZHENG C X,*et al.* Differences in chlorophyll fluorescence parameters and water content in heteromorphic leaves of *Populus euphratica* from Inner Mongolia, China[J]. Forestry Studies in China,2011,13(1):52-56.
- [22] 夏黎,李宏,程平,等.引种杨树无性系的光合特性比较[J].南方农业学报,2017,48(10):1870-1877.
XIA L,LI H,CHENG P,*et al.* Comparison on photosynthetic characteristics of introduced poplar clones [J]. Journal of Southern Agriculture,2017,48(10):1870-1877. (in Chinese)
- [23] 陈安强,房用,慕宗昭,等.杨树无性系蒸腾速率及其影响因子的研究[J].水土保持研究,2008,15(4):157-160,164.
CHEN A Q,FANG Y,MU Z Z,*et al.* Studies on transpiration rate and its influencing factors of seven poplar clones [J]. Research of Soil and Water Conservation,2008,15(4):157-160,164. (in Chinese)
- [24] 高苗琴,赵瑜琦,宗毓铮,等.2025杨及其3种芽变红叶杨光合生理和生态适应性研究[J].西北林学院学报,2020,35(2):102-107.
GAO M Q,ZHAO Y Q,ZONG Y Z,*et al.* Photosynthetic traits and ecological adaptability of poplar 2025 and its 3 bud sporting color-leafed cultivars [J]. Journal of Northwest Forestry University,2020,35(2):102-107. (in Chinese)
- [25] 江锡兵,李博,张志毅,等.美洲黑杨与大青杨杂种无性系苗期光合特性研究[J].北京林业大学学报,2009,31(5):151-154.
JIANG X B,LI B,ZHANG Z Y,*et al.* Photosynthetic characteristics of hybrid clones of *Populus deltoides* and *P. ussuriensis* [J]. Journal of Beijing Forestry University,2009,31(5):151-154. (in Chinese)
- [26] 巴合提牙尔·克热木,郭靖,徐业勇,等.南疆地区2个引种大樱桃品种光合特性比对研究[J].西北林学院学报,2016,31(2):86-91.
BAHETIYAER·KEREMU,GUO J,XU Y Y,*et al.* Comparative studies on photosynthetic characteristics of two cherry cultivars in Southern Xinjiang [J]. Journal of Northwest Forestry University,2016,31(2):86-91. (in Chinese)
- [27] 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.
CAO S K,FENG Q,SI J H,*et al.* Summary on the plant water use efficiency at leaf level [J]. Acta Ecologica Sinica,2009,29(7):3882-3892. (in Chinese)
- [28] MA W T,TCHERKEZ G,WANG X M,*et al.* Accounting for mesophyll conductance substantially improves ¹³C-based estimates of intrinsic water-use efficiency [J]. New Phytologist,2021,229(3):1326-1338.
- [29] 李润,苏春花,姜霞.白云岩石漠区2种落叶树种秋季光合特性比较[J].西部林业科学,2020,49(2):121-127.