

不同造林密度对油用柠檬桉光合特性的影响

贺旺龙¹, 周丽珠², 谷瑶^{2*}, 袁德义³, 杨漓² (1. 广西壮族自治区国有高峰林场, 广西南宁 530002; 2. 广西壮族自治区林业科学研究院, 广西南宁 530002; 3. 中南林业科技大学, 湖南长沙 410004)

摘要 分析在4个密度下[D1(0.7 m×0.8 m, 17 800株/hm²)、D2(1.0 m×1.0 m, 10 000株/hm²)、D3(1.0 m×1.5 m, 6 660株/hm²)、D4(2.0 m×3.0 m, 1 650株/hm²)]柠檬桉光合特性。结果表明:柠檬桉光饱和点为1 636.56~1 963.81 μmol/(m²·s), 密度D3的光饱和点最高, D1的光饱和点最低;光补偿点为43.32~66.25 μmol/(m²·s), 密度D3的光补偿点最高, D1的光补偿点最低;表观量子效率为0.0563~0.0689, 不同密度间差异不显著;最大净光合速率为16.88~24.82 μmol/(m²·s), 密度D3的最大净光合速率最高, D1的最大净光合速率最低;暗呼吸速率为1.63~2.56 μmol/(m²·s), 密度D3的暗呼吸速率最高, D1的暗呼吸速率最低。密度D3最大净光合速率高, 适应强光能力高, 利用弱光能力低, 表观量子效率高, 暗呼吸速率高。

关键词 柠檬桉; 净光合速率; 光补偿点; 光饱和点

中图分类号 S 792.39 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2021)01-0098-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.01.025



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Effects of Different Planting Densities on Photosynthetic Characteristics of *Eucalyptus citriodora*

HE Wang-long¹, ZHOU Li-zhu², GU Yao² et al (1. Guangxi Gaofeng State Owned Forest Farm, Nanning, Guangxi 530002; 2. Guangxi Zhuang Autonomous Region Forestry Research Institute, Nanning, Guangxi 530002)

Abstract Photosynthetic characteristics of *Eucalyptus citriodora* under different planting densities, such as D1 (0.7 m×0.8 m, 17 800 plants /hm²), D2 (1.0 m×1.0 m, 10 000 plants /hm²), D3 (1.0 m×1.5 m, 6 660 plants /hm²) and D4 (2.0 m×3.0 m, 1 650 plants /hm²) were studied. The light saturation point of *E. citriodora* was 1 636.56–1 963.81 μmol/(m²·s). The light saturation point of density D3 was the highest among those four planting densities, while that of D1 was the lowest. The light compensation point of density D3 was 43.32–66.25 μmol/(m²·s). The light compensation point of density D3 was the highest, while that of D1 was the lowest. The apparent quantum efficiency of *E. citriodora* was 0.0563–0.0689, and the difference among different densities was not significant. The maximum net photosynthetic rate was 16.88–24.82 μmol/(m²·s), the maximum net photosynthetic rate of density D3 was the highest, and that of D1 was the lowest. Dark respiration rate was between 1.63–2.56 μmol/(m²·s), density D3 had the highest dark respiration rate and D1 had the lowest dark respiration rate. It was concluded that *E. citriodora* under D3 density had higher net photosynthetic rate, high adaptability to strong light, low utilization ability of weak light, and high apparent quantum efficiency, while *E. citriodora* under D3 density had low dark respiration rate.

Key words *Eucalyptus citriodora*; Net photosynthetic rate; Light compensation point; Light saturation point

柠檬桉(*Eucalyptus citriodora* Hook. f.)是桃金娘科(Myrtaceae)桉属(*Eucalyptus*)树种,是生长适应能力强的材、油两用树种,具有较高的观赏价值。柠檬桉主要在长江以南12个省(区)以内分布,最适生区主要集中在东南沿海地带,主要省份为广东、广西、福建、海南^[1]。柠檬桉之所以具有很高的经济价值和生态价值,成为重要的开发利用对象,主要是它的木材结构细、基本密度较大以及抗压性能好,同时叶油中香茅醛的含量较高。柠檬桉的主要用途有以下几点:柠檬桉制造的浆纸一般可用来印刷书籍、报刊以及包装等产品,具有柔软性好、厚度薄好等特点;柠檬桉作为一种广受欢迎的观赏植物,在澳大利亚和其他国家常种在路边、公园和花园,它不仅树干通直,而且挺拔秀丽;柠檬桉木材性质坚硬且耐用,适合用作薪材、木炭、测杆和锯材以及建筑材料^[2];柠檬桉枝叶提取的柠檬桉油含有大量的香茅醛,它既可以作为一种香料,也是重要的香料合成原料之一,本身又具有驱蚊、杀菌等作用^[3-4]。

密度是植物种群的一种重要选择压力,随着密度的增

加,植物邻体干扰增强,光照、水分和土壤养分等环境资源受到制约,促使植物改变光合策略,通过生态适应机制,提高植物资源利用和竞争能力。桉树的密度研究大多集中在对树高、胸径和蓄积量的影响等方面,集中在为满足制浆造纸、制造纤维板和实木加工领域,分别以培育速生丰产林中小径材和大径材为目标的研究^[5-10]。研究表明,柠檬桉以用材林为目的,造林密度多采用2 m×2 m和2 m×3 m^[11]。但是关于造林密度对广西柠檬桉光合特性影响的相关报道较少。

赵连春等^[12]对秦王川湿地不同密度怪柳枝-叶性状及其光合特性进行研究,发现随着怪柳种群密度的增加,怪柳平均高度、郁闭度、枝长度和叶面积呈逐渐增大趋势,冠幅、基径、分枝角度、叶数量和光合有效辐射呈逐渐减小趋势,叶面积指数、净光合速率、蒸腾速率和气孔导度先增加后减小。骆丹等^[13]通过对不同造林密度的西南桦幼林冠层光合生理特性进行研究,表明,相同冠层条件下,造林密度显著影响西南桦幼林冠层的表观量子效率、最大光合速率及光饱和点,三者均随造林密度的增加呈显著下降趋势,但造林密度对西南桦幼林光补偿点和暗呼吸速率无显著影响。

密度的调整能明显改变植物的生存环境,尤其是光环境改变会对植物生长发育和光合性能产生重要影响^[14]。因此,合理的造林密度是优化种群光合作用的基础。而叶片是主要的光合器官,利用合理的造林密度来增强各叶位间的光合能力,提高单株光合效率,是提高群体高光效和产量的重

基金项目 防城港市科学研究与技术开发计划项目(防科 AB19008012);广西林业科技推广示范项目(gl2020kt10);百色市科学技术开发项目(百科 20184735);广西林业科学研究院基本科研业务费专项(林科 201818)。

作者简介 贺旺龙(1991—),男,湖南湘潭人,工程师,硕士,从事林业资源培育研究。*通信作者,高级工程师,博士,从事林产化工和香精香料研发工作。

收稿日期 2020-06-10

要途径。

1 材料与方法

1.1 材料 试验地位于广西壮族自治区南宁市武鸣区某镇,地处广西南宁市武鸣区东北部,地理坐标为 22°59'~23°33'N,107°49'~108°37'E,属于亚热带季风性气候,该地区年平均气温 20~22℃,年平均日照 1 660.1 h,无霜期平均 333 d,平均相对湿度为 79%,年均降雨量达 1 100~1 700 mm,该地区土壤肥沃,水利条件较好。

选取同一种源实生苗于 2014 年造林,设 4 种造林密度,分别是 D1(0.7 m×0.8 m,17 800 株/hm²)、D2(1.0 m×1.0 m,10 000 株/hm²)、D3(1.0 m×1.5 m,6 660 株/hm²)和 D4(2.0 m×3.0 m,1 650 株/hm²),采用随机区组设计,3 次重复,共 12 个小区,每个小区 667 m² 以上,试验期间进行适当补植,保持林分密度与初始造林密度一致,各处理抚育施肥等管理措施均保持一致。

1.2 方法 从各个重复的各密度处理小区随机挑选长势基本一致的柠檬桉 3 株,每株树选取植株中上部生长状况相对一致、无病虫害的成熟叶片 3 片,利用美国 LI-COR 公司生产的 Li-6400XT 便携式光合作用测量系统测定柠檬桉叶片的光合生理指标。

光响应曲线的测定:在 2017 年 9 月中旬选择晴朗无云的天气,在 09:00—11:00,利用 Li-6400XT 便携式光合作用测量系统自带的 light-curve 曲线程序测定光合-光响应,重复 3 次,所有数据取平均值。在控制参比室 CO₂ 浓度为 400 μmol/L,红蓝光源设定的光通量密度梯度为 3 000、2 600、2 400、2 200、2 000、1 800、1 600、1 400、1 200、1 000、800、600、400、200、100、50、25、0 μmol/(m²·s) 等条件下,测定柠檬桉叶片的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、胞间二氧化碳浓度(C_i)等光合生理参数。

1.3 数据处理与分析 采用 Excel 2007 和 SPSS 软件进行数据处理。

利用非直角双曲线拟合,根据拟合曲线计算光饱和点及光补偿点。非直角双曲线模型的公式为:

$$A = \frac{\varphi Q + A_{\max} - \sqrt{(\varphi Q + A_{\max})^2 - 4k\varphi Q A_{\max}}}{2k} - R_{\text{day}}$$

其中, A 为净光合速率; A_{\max} 为最大净光合速率; φ 为表观量子效率; Q 为光合有效辐射; k 为光响应曲线曲角; R_{day} 为暗呼吸速率。

2 结果与分析

2.1 光响应曲线比较 由图 1 可知,4 个密度的植物叶片光合-光响应曲线变化趋势一致。当光照强度在 0~1 000 μmol/(m²·s) 时,净光合速率以一定斜率随光照强度缓慢升高;当光照强度在 1 000~1 800 μmol/(m²·s) 时,净光合速率以较高的斜率随光照强度增加呈直线升高;当光照强度在 1 800 μmol/(m²·s) 以上,净光合速率随光照强度增加而缓慢升高。由图 1 可知,密度 D3 条件下叶片的净光合速率在光照强度为 1 000~3 000 μmol/(m²·s) 时均高于其他 3 个密度,密度为 D1 条件下净光合速率在光照强度为 0~

1 000 μmol/(m²·s) 时均低于其他 3 个密度,而密度为 D2 条件下与密度为 D3 变化较为接近,说明密度为 D3 条件下较密度为 D2 和密度为 D4 对光利用能力更强。

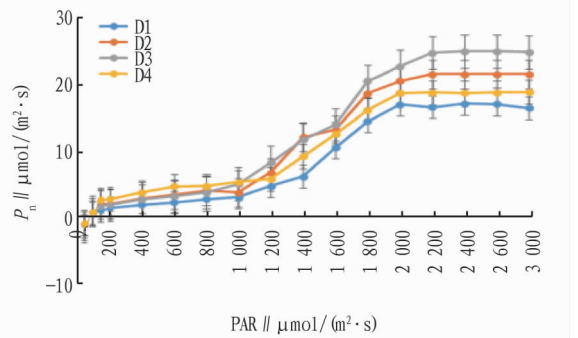


图 1 不同密度柠檬桉的光响应曲线

Fig. 1 P_n -light response curves of *Eucalyptus citriodora* under different planting densities

根据非直角双曲线模型对 4 个密度的植物光响应曲线进行拟合计算,拟合相关系数均大于 0.982 5 ($R^2 > 0.900 0$),拟合得出光补偿点(LCP)、光饱和点(LSP)、暗呼吸速率(R_d)、表观量子效率(AQY)和最大净光合速率(P_{\max}),并对这些光合参数进行方差分析,分析结果如表 1。由表 1 可知,4 个密度植物的光补偿点(LCP)、光饱和点(LSP)、暗呼吸速率(AQY)和最大净光合速率(P_{\max})均存在显著差异($P < 0.05$),其中,光饱和点(LSP)和最大净光合速率(P_{\max})存在极显著差异($P < 0.01$),表观量子效率差异不显著。

2.2 光饱和点(LSP)的比较 光照强度超过光补偿点后,随着光照强度增强,光合速率逐渐提高,这时光合强度就超过呼吸强度,植物体内积累干物质。但达到一定值后,再增加光照强度,光合速率不再增加,此即光饱和现象。达到光饱和时的光照强度,即光饱和点(LSP)。各类植物光饱和点不同,对光的利用范围也不同,所以有阳生植物和阴生植物。

由图 2 可知,4 个密度植物的光饱和点在 1 636.56~1 963.81 μmol/(m²·s),光饱和点大小顺序为 D3 [1 963.81 μmol/(m²·s)] > D2 [1 865.09 μmol/(m²·s)] > D4 [1 799.55 μmol/(m²·s)] > D1 [1 636.56 μmol/(m²·s)];其中密度 D3 条件下光饱和点(LSP)最高,显著($P < 0.05$)高于密度 D2 和 D4,极显著($P < 0.01$)高于密度 D1,分别高 98.72、164.26 和 327.25 μmol/(m²·s),说明密度 D3 条件下较密度 D2、D4 和 D1 更适应强光环境,另外,密度 D2 和密度 D3 光饱和点(LSP)均显著高于密度 D1,分别高出 228.53、162.99 μmol/(m²·s)。

2.3 光补偿点(LCP)的比较 所谓光补偿点是指植物在一定的光照下,光合作用吸收二氧化碳和呼吸作用数量达到平衡状态时的光照强度,即光合作用所固定的二氧化碳与呼吸释放的二氧化碳相等时的光照强度。这时也不发生氧的净交换,叶片没有任何净积累,植物只能勉强维持生命而不能进行生长、结实等生理活动。植物在光补偿点时,有机物的形成和消耗相等,不能累积干物质,植物光合作用的同化产物与呼吸作用所消耗的物质达到平衡时所接受的光照强度

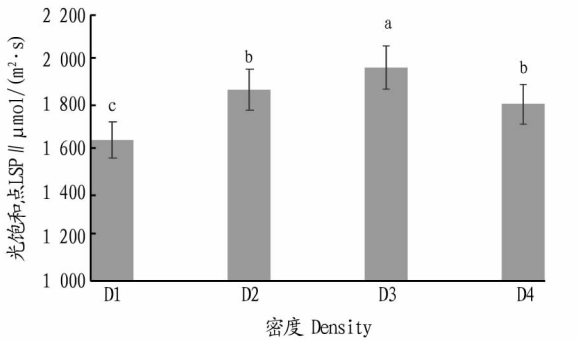
的下限。植物的光合作用随着光照强度的减弱,光合强度不断下降,当光照强度达到光补偿点时,即光合作用过程气体交换中二氧化碳的吸收量和呼吸过程所释放的二氧化碳量完全相等时,就测不出有效光合强度。植物群体的光补偿点

也较单叶高,因为群体内叶子多,相互遮阴,当光照强度弱时,上层叶片还能进行光合作用,但下层叶片呼吸作用强,光合作用弱,所以整个群体的光补偿点上升。

表1 不同密度柠檬桉光响应曲线参数方差分析

Table 1 Variance analysis of light response curve parameters of *Eucalyptus citriodora* under different planting densities

光合参数 Photosynthetic parameters		平方和 Sum of square	df	均方 Mean square	F	显著性 Significance
光补偿点 LCP	组间	842.320	3	315.633	3.562	0.020
	组内	517.630	10	49.751		
	总数	1359.950	13			
光饱和点 LSP	组间	369 652.400	3	153 625.400	36.482	0
	组内	4 852 369.000	10	6 936.39		
	总数	5 222 022.000	13			
暗呼吸速率 R_d	组间	1.289	3	0.541	6.741	0.011
	组内	0.415	10	0.096		
	总数	1.704	13			
表观量子效率 AQY	组间	0.000 5	3	0.000 01	1.880	0.365
	组内	0.000 2	10	0.000 01		
	总数	0.000 7	13			
最大净光合速率 P_{nmax}	组间	21.630	3	4.932	22.360	0
	组内	4.580	10	0.857		
	总数	26.210	13			



注:小写字母不同表示差异显著($P < 0.05$)

Note: Different small letters indicated significant differences ($P < 0.05$)

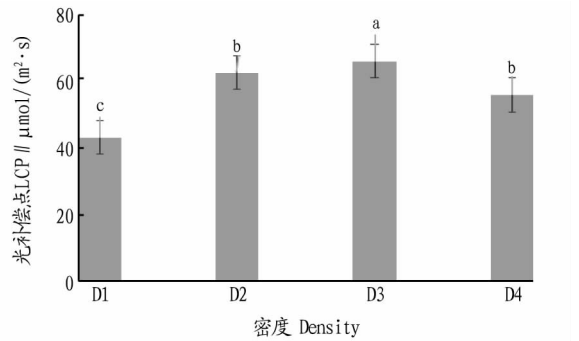
图2 不同密度柠檬桉光饱和点的比较

Fig. 2 Comparison of light saturation point of *Eucalyptus citriodora* under different planting densities

由图3可知,4个密度的光补偿点在 $43.32 \sim 66.25 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,光补偿点大小顺序为D3 [$66.25 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] > D2 [$62.78 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] > D4 [$56.08 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] > D1 [$43.32 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$];其中密度D3条件下光补偿点最高,显著($P < 0.05$)高于密度D2和密度D4,极显著高于密度D1,分别高3.47、10.17和 $23.93 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,说明密度为D3条件下较密度D2和密度D4更适应强光环境,另外密度D2和密度D4光饱和点均显著高于密度D1,分别高19.46、 $12.76 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

综上所述,4个密度的柠檬桉光补偿点和光饱和点存在显著差异,说明利用强光和弱光的能力存在差异,其中密度D2和D4的光饱和点较高,但光补偿点较低,说明D2和D4

既能利用较强光照强度,也能利用较弱光照强度,适应的光照强度范围较广;密度D3的光饱和点和光补偿点均高,说明密度D3对较强光照强度利用能力较高,但对弱光的利用能力较低;密度为D1的光饱和点和光补偿点都较低,说明密度D1利用强光能力较弱,利用弱光能力较强。



注:小写字母不同表示差异显著($P < 0.05$)

Note: Different small letters indicated significant differences ($P < 0.05$)

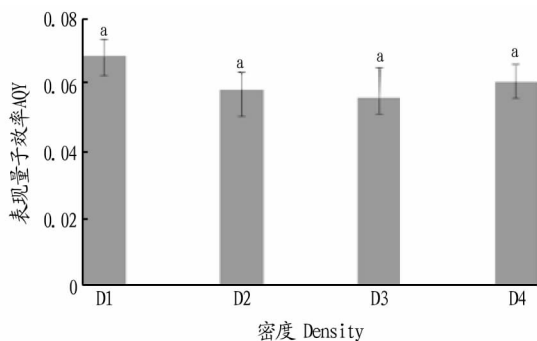
图3 不同密度柠檬桉光补偿点的比较

Fig. 3 Comparison of light compensation point of *Eucalyptus citriodora* under different planting densities

2.4 表观量子效率(AQY)的比较 以光强为自变量,净光合速率为因变量,绘制光强-光合曲线,即光响应曲线。其中在弱光阶段的光响应曲线的斜率即为表观量子效率。在不考虑叶片的光反射和投射损失(一般为15%左右)、不按照光合机构实际吸收的光量子数,而是按照入射的光量子数计算得到的量子效率,即为表观量子效率。表观量子效率反映了植物吸收的光能用于转换光能的色素蛋白复合体的多少,其

值越高表明植物利用弱光的能力越强,是光合生理生态研究中广泛使用的参数。

4个密度的柠檬桉表观量子效率(AQY) LSD法多重比较结果情况如图4。由图4可知,4个密度的表观量子效率为0.0563~0.0689,表观量子效率(AQY)大小顺序为D1(0.0689)>D4(0.0613)>D2(0.0589)>D3(0.0563);密度D1(0.0689)和密度D4(0.0613)的表观量子效率均在0.06以上,其中密度D1表观量子效率(AQY)最高,密度D4次之,二者光补偿点也较低,说明二者光能利用效率高,对弱光利用能力较高,密度D2与密度D3表观量子效率(AQY)较低,表观量子效率均为0.05左右,其光补偿点较高,说明其比密度D1和密度D4的利用光能效率低,对弱光利用能力较低。



注:小写字母不同表示差异显著($P < 0.05$)

Note: Different small letters indicated significant differences ($P < 0.05$)

图4 不同密度柠檬桉表观量子效率的比较

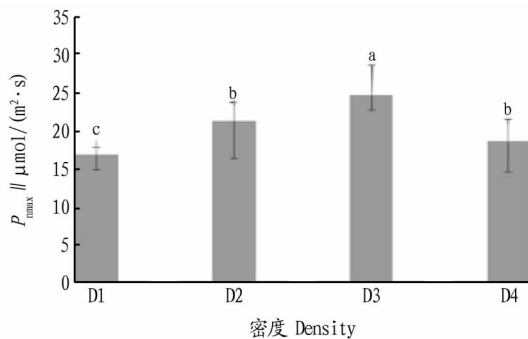
Fig. 4 Comparison of apparent quantum yield of *Eucalyptus citriodora* under different planting densities

2.5 最大净光合速率(P_{\max})的比较 4个密度的柠檬桉最大净光合速率(P_{\max}) LSD法多重比较结果情况如图5。由图5可知,4个密度最大净光合速率(P_{\max})在16.88~24.82 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,其大小顺序为D3[24.82 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] > D2[21.41 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] > D4[18.69 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] > D1[16.88 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$],其中密度D3条件下最大净光合速率(P_{\max})最高,显著高于密度D2、D3和D1($P < 0.05$),分别高3.41、6.13和7.94 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,说明密度D3条件下较密度D2和密度D4更适应强光环境,另外密度D2和密度D4最大净光合速率(P_{\max})均显著高于密度D1,分别高4.53、1.81 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

2.6 暗呼吸速率(R_d)的比较 植物在黑暗条件下不能进行光合作用,只能进行呼吸作用,此时植物只能消耗光合作用生成的氧气和有机物质,植物叶片在光照强度为零时,单位时间、单位叶面积通过呼吸作用消耗氧气和有机物质生成的二氧化碳的量。

4个密度的柠檬桉暗呼吸速率(R_d) LSD法多重比较结果情况如图6。由图6可知,4个密度暗呼吸速率(R_d)在1.63~2.56 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,暗呼吸速率(R_d)的大小顺序为D1[1.63 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] < D4[1.96 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] < D2[2.03 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] < D3[2.56 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$],其中密度

D2,密度D4和密度D1均显著低于密度D3。植物在黑暗条件下不能进行光合作用,只能进行呼吸作用,此时植物只能消耗光合作用生成的氧气和有机物质,暗呼吸速率越低,晚间消耗白天光合作用的碳水化合物越少。密度D2、D4和D1晚间消耗的碳水化合物较密度D3少,但不一定是暗呼吸越小越好,这还与植物自身代谢强度有关。

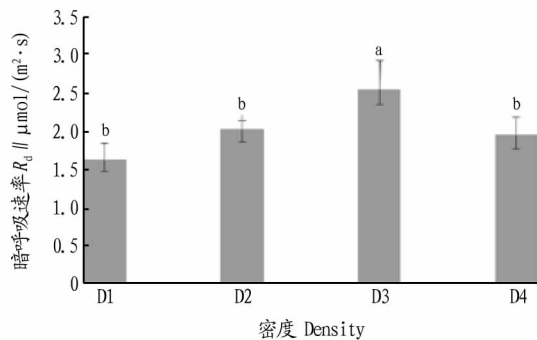


注:小写字母不同表示差异显著($P < 0.05$)

Note: Different small letters indicated significant differences ($P < 0.05$)

图5 不同密度柠檬桉最大净光合速率的比较

Fig. 5 Comparison of maximum net photosynthetic rate of *Eucalyptus citriodora* under different planting densities



注:小写字母不同表示差异显著($P < 0.05$)

Note: Different small letters indicated significant differences ($P < 0.05$)

图6 不同密度柠檬桉暗呼吸速率的比较

Fig. 6 Comparison of dark respiration rate of *Eucalyptus citriodora* under different planting densities

3 小结

4个密度下,柠檬桉光饱和点为1636.56~1963.81 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,密度D3的光饱和点最高,密度D1的光饱和点最低;光补偿点为43.32~66.25 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,密度D3的光补偿点最高,密度D1的光补偿点最低;表观量子效率为0.0563~0.0689,不同密度间差异不显著;最大净光合速率为16.88~24.82 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,D3的最大净光合速率最高,D1的最大净光合速率最低;暗呼吸速率为1.63~2.56 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,D3的暗呼吸速率最高,D1的暗呼吸速率最低。

密度D3最大净光合速率高,光合潜能适应强光能力高,利用弱光能力低,表观量子效率高,但暗呼吸速率高,晚间消

(下转第105页)

完善和发展,将进一步深入对经济林土壤含水量问题、精准灌溉问题和经济林水分的研究。

参考文献

- [1] 汤章城. 植物对水分胁迫的反应和适应性——I. 抗逆性的一般概念和植物的抗涝性[J]. 植物生理学通讯, 1983, 19(3): 24-29.
- [2] 降云峰, 赵晋锋, 马宏斌, 等. 作物干旱研究进展[J]. 中国农学通报, 2013, 29(3): 1-5.
- [3] 何修道, 王立, 党宏忠, 等. ECH2O EC-5 水分传感器测定沙地土壤含水率的可靠性[J]. 水土保持通报, 2016, 36(4): 68-71, 77.
- [4] 王云变, 刘洋, 王成虎, 等. 干旱对山西林业的影响及应对措施[J]. 中国农业资源与区划, 2012, 33(1): 93-96.
- [5] BOGENA H R, HUISMAN J A, OBERDÖRSTER C, et al. Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications[J]. Journal of hydrology, 2007, 344(1/2): 32-42.
- [6] 牛艳东, 龙维, 孙友平, 等. 传感器控制自动灌溉系统的研制及其在油茶苗木生产中的应用[J]. 湖南林业科技, 2018, 45(1): 6-11.
- [7] 闫文清, 任宝君, 马桂珍. 严重干旱对建平县果树生产的影响及应对策略[J]. 现代农业, 2009(12): 13-14.
- [8] 陈永忠, 肖志红, 彭邵锋, 等. 油茶果实生长特性和油脂含量变化的研究[J]. 林业科学研究, 2006, 19(1): 9-14.
- [9] NEMALI K S, VAN IERSEL M W. An automated system for controlling drought stress and irrigation in potted plants[J]. Scientia horticulturae, 2006, 110(3): 292-297.
- [10] 杨鹏辉, 李贵全, 郭丽, 等. 干旱胁迫对不同抗旱大豆品种质膜透性的影响[J]. 山西农业科学, 2003, 31(3): 23-26.
- [11] HADIARTO T, TRAN L S P. Progress studies of drought-responsive genes in rice[J]. Plant cell reports, 2011, 30(3): 297-310.
- [12] ALBACETE A A, MARTÍNEZ-ANDÚJAR C, PÉREZ-ALFOCEA F. Hormonal and metabolic regulation of source-sink relations under salinity and drought: From plant survival to crop yield stability[J]. Biotechnology advances, 2014, 32(1): 12-30.
- [13] DACOSTA M, HUANG B R, RACHMILEVITCH S. Physiological and biochemical indicators for abiotic stress tolerance[M]//HUANG B R. Plant-environment interactions. New York: CRC Press, 2006: 321-356.
- [14] HARFOUCHE A, MEILAN R, ALTMAN A. Molecular and physiological responses to abiotic stress in forest trees and their relevance to tree improvement[J]. Tree physiology, 2014, 34(11): 1181-1198.
- [15] 李晓储, 黄利斌, 张永兵, 等. 四种含笑叶解剖性状与抗旱性的研究[J]. 林业科学研究, 2006, 19(2): 177-181.
- [16] XIONG L M, WANG R G, MAO G H, et al. Identification of drought tolerance determinants by genetic analysis of root response to drought stress and abscisic acid[J]. Plant physiology, 2006, 142(3): 1065-1074.
- [17] 唐承财, 钟全林, 王健. 林木抗旱生理研究进展[J]. 世界林业研究, 2008, 21(1): 20-26.
- [18] 张丽莉, 王庆祥, 石瑛, 等. 干旱胁迫对马铃薯叶肉和茎部细胞超微结构的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2015, 46(1): 91-95.
- [19] YAMAGUCHI-SHINOZAKI K, SHINOZAKI K. A novel cis-acting element in an Arabidopsis gene is involved in responsiveness to drought, low-temperature, or high-salt stress[J]. The plant cell, 1994, 6: 251-264.
- [20] BERGER B, PARENT B, TESTER M. High-throughput shoot imaging to study drought responses[J]. Journal of experimental botany, 2010, 61(13): 3519-3528.
- [21] MUNNS R, JAMES R A, SIRLAULT X R R, et al. New phenotyping methods for screening wheat and barley for beneficial responses to water deficit[J]. Journal of experimental botany, 2010, 61(13): 3499-3507.
- [22] NIU G H, RODRIGUEZ D S, MACKAY W. Growth and physiological responses to drought stress in four oleander clones[J]. Journal of the American society for horticultural science, 2008, 133(2): 188-196.
- [23] 赵永明, 蔡永革, 吕新. 土壤水分实时监测的应用与现状[J]. 江西农业学报, 2007, 19(3): 31-33, 65.
- [24] 王姗姗. 干旱对北方林木的影响[J]. 防护林科技, 2017(21): 8-11, 14.
- [25] 吴芹, 张光灿, 裴斌, 等. 3 个树种对不同程度土壤干旱的生理生化响应[J]. 生态学报, 2013, 33(12): 3648-3656.
- [26] HUANG B, JIANG Y. Physiological and biochemical responses of plants to drought and heat stress[M]//KANG M. Crop improvement in 21st century. New York: Harthrow Press, 2001: 287-300.
- [27] SUN Y P, NIU G H, ZHANG J F, et al. Growth responses of an interspecific cotton breeding line and its parents to controlled drought using an automated irrigation system[J]. Journal of cotton sciences, 2015, 19(2): 290-295.
- [28] BURNETT S E, VAN IERSEL M W. Morphology and irrigation efficiency of *Gaura lindheimeri* grown with capacitance sensor-controlled irrigation[J]. HortScience, 2008, 43(5): 1555-1560.
- [29] 王华田. 我国暖温带经济林木水分管理的实现途径及措施[J]. 经济林研究, 2009, 27(2): 97-103.
- [30] DOOLEY J H, FRIDLEY J L. Near-surface sensing and mapping for site-specific operational decisions in precision forestry[C]//2001ASAE annual meeting. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 1998: 1.
- [31] 李东升, 张文卓, 陈为凤, 等. 植物叶片水分间接柔性测量传感器的研究[J]. 林业科学, 2004, 40(6): 130-133.
- [32] 刘慧婕. 科学、协调、可持续——新时代林业的发展之路[J]. 农家参谋, 2018(16): 81.
- [33] 龙滕周, 项东云, 孟永庆, 等. 桉树人工林栽培密度效应研究进展[J]. 广西林业科学, 2008, 37(2): 71-75.
- [34] 李昌荣, 项东云, 周国福, 等. 栽培密度与施肥对尾巨桉中大径材生长的影响[J]. 广西林业科学, 2007, 36(1): 31-35.
- [35] 李宝琦, 徐建民, 余勇, 等. 栽培密度与施肥对雷州半岛桉树大径材培育效果的中期研究[J]. 广东林业科技, 2009, 25(6): 14-21.
- [36] 林永胜. 柳窿桉丰产栽培关键技术研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2009.
- [37] 朱声管. 桉树丰产栽培配套技术研究: 以广西国有维都林场为例[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2014.
- [38] 彭玉华. 柠檬桉叶材两用林的栽培技术[J]. 广西林业科学, 1996, 25(4): 227-228.
- [39] 赵连春, 赵成章, 陈静, 等. 秦王川湿地不同密度桉柳枝-叶性状及其光合特性[J]. 生态学报, 2018, 38(5): 1722-1730.
- [40] 骆丹, 王春胜, 曾杰. 西南桦幼林冠层光合特征及其对造林密度的响应[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(4): 44-49, 139.
- [41] 李涛. 群体密度对高等植物光合功能的影响及调控机制[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.

(上接第 101 页)

耗碳水化合物较多。综合来说,在密度 D3 条件下,柠檬桉表现出了较强的光合能力,对柠檬桉的生长具有促进作用,增加柠檬桉各项生长指标的提升。

参考文献

- [1] 欧阳林男, 陈少雄, 张维耀, 等. 柠檬桉在中国的适生地理分布及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2019, 38(2): 361-367.
- [2] 刘思汝. 柠檬桉表型和 SSR 标记的遗传多样性研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2016.
- [3] 谷瑶, 周丽珠, 李桂珍, 等. 组培柠檬桉叶绿素和挥发油研究[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(19): 120-122.
- [4] 谷瑶, 周丽珠, 陈健波, 等. 蒸馏时间对柠檬桉叶得油率及主成分的影响[J]. 广西林业科学, 2018, 47(1): 89-93.
- [5] 黄锡泽, 周国福, 李宏伟, 等. 尾巨桉人工林栽培密度研究[J]. 广西林业科学, 2005, 34(1): 5-7, 12.