

栾树和无患子净光合速率对光强和 CO₂浓度的响应

林 达,王松杰,许霞玲,徐能叶,陈 丹,张燕红,杜照奎
(台州学院 生命科学学院,浙江 台州 318000)

摘要:以栾树(*Koelreuteria paniculata* Laxm.)和无患子(*Sapindus mukorossi* Gaerth.)为研究对象,比较两者的净光合速率对光强和 CO₂ 浓度响应特性。结果表明:直角双曲线修正模型拟合两种植物的光响应曲线和 CO₂ 响应曲线的决定系数 R² 均在 0.998 6 以上,拟合效果良好;栾树和无患子的最大净光合速率(P_{max})分别为 10.69 和 6.68 μmol·m⁻²·s⁻¹,光饱和点(LSP)分别为 1 526.62 和 1 439.22 μmol·m⁻²·s⁻¹,光补偿点(LCP)分别为 13.61 和 9.57 μmol·m⁻²·s⁻¹,表明栾树的光合作用强于无患子,且两者对弱光有较强的适应能力,都能利用很高的光强;栽培实践中需考虑密度,防止过密导致生长速率下降;栾树和无患子的 CO₂ 饱和点(CSP)分别为 1 438.41 和 1 242.06 μmol·m⁻²·s⁻¹,CO₂ 补偿点(CCP)分别为 65.45 和 70.64 μmol·m⁻²·s⁻¹,高 CSP 意味着在全球 CO₂ 浓度不断升高的背景下,两者均能很好地应对,栾树较无患子有更宽的 CO₂ 利用范围,适应能力更强。

关键词:栾树;无患子;光响应曲线;CO₂ 响应曲线

中图分类号:S792.99

文献标识码:A

文章编号:1002-2767(2012)10-0089-05

光合作用是植物生长发育的基础,其效率与自身因素如叶绿素含量、叶片厚度和叶片成熟程度密切相关,又受外界环境因子如光强度、气温、空气相对湿度和土壤含水量等影响^[1]。光照强度是植物光合作用的能量来源,也是影响光合作用生态生理因子的最根本因素;CO₂ 是光合作用的主要原料,对光合速率高低有着重要的影响。光合作用光响应曲线和 CO₂ 响应曲线分别反映净光合速率随光强和 CO₂ 浓度改变而变化的规律,其中蕴含的一些参数,如最大净光合速率、饱和点和补偿点等可以揭示植物的重要光合特性,了解这些参数对于研究植物光合生产能力具有重要意义。

栾树(*Koelreuteria paniculata* Laxm.)和无患子(*Sapindus mukorossi* Gaerth.)均为无患子科植物。两种植物生长迅速,冠形庞大而美观,观赏价值极高,且对烟尘和有害气体 SO₂ 有较强的耐性,可用作行道树和庭院绿化。前人对栾树和无患子的研究主要集中在繁育特性^[2-3]、药用价

值^[4-5]和污染土壤的修复^[6]等方面,但光合生理特性方面的研究较少,现利用 Li-6400 光合作用测定仪,对栾树和无患子的光照强度和 CO₂ 浓度响应曲线进行了研究,旨在为两种植物在种植或布局中的合理利用提供可靠依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况及试验材料

试验地点设在台州学院生态园内,位于 E121°12',N28°85',温暖湿润、四季分明,全年平均气温 17.1℃,全年积温 5 370℃,无霜期约 241 d,平均蒸发量 1 231.4 mm,属中亚热带湿润季风气候。

盆栽试验采用一年生扦插苗,平均树高为 98.58 cm,平均地径为 0.98 cm,于 2011 年 12 月移栽到内径 22 cm、高 17 cm 的塑料盆中。栽培土壤为黄泥土,与盆栽培养基按体积比 2:1 进行配比混合,其理化性质为:有机质含量 0.16±0.03 mg·g⁻¹、全磷含量 0.21±0.02 g·kg⁻¹、全氮含量 0.73±0.16 g·kg⁻¹、铵态氮含量 6.84±1.17 mg·kg⁻¹、有效磷含量 103.74±9.18 mg·kg⁻¹。试验设 6 个重复,常规水肥管理。

1.2 试验方法

选取树势最相近的 3 株,择树体南侧生长一致的健康倒 3 叶(自顶端数)进行测定,保持叶片

收稿日期:2012-07-16

基金项目:2012 年浙江省大学生科技创新活动计划(新苗人才计划)资助项目(2012R428010);2011 年台州学院资助项目(2011PY15)

第一作者简介:林达(1992-),男,浙江省三门市人,在读学士,从事植物生理生态学研究。E-mail:534636007@qq.com。

的自然生长状态,在不离体的情况下进行。测定时间为 09:00~11:30,于 2012 年 6 月 5~12 日期间择晴天进行。

1.2.1 光响应特性的测定 用 Li-6400 光合仪 LED 红蓝光源叶室控制测定光强,参比室 CO_2 浓度设定为 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$,温度为 25°C ,RH 70%,测定不同光强下的狼尾草叶片的净光合速率。光合有效辐射 PAR 分别设定为 2 000、1 800、1 500、1 200、1 000、800、600、400、200、150、100、50、20 和 $0 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在 $0 \sim 2\,000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 光强范围内制作 Pn-PAR 光响应曲线。光响应曲线采用叶子飘先生提出的直角双曲线修正模型进行拟合。

$$P_n = \alpha \frac{1 - \beta I}{1 + \gamma I} I - R_d \quad (1)$$

其中: P_n 为净光合速率, α 、 β 和 γ 为 3 个与光强无关的系数, I 为光合有效辐射, R_d (Rate of dark respiration) 为暗呼吸速率。

最大净光合速率 P_{\max} (Maximum net photosynthetic rate): $P_{\max} = \alpha \left(\frac{\sqrt{\beta + \gamma} - \sqrt{\beta}}{\gamma} \right) - R_d$

光饱和点 LSP (Light Saturation point): $LSP = \frac{\sqrt{(\beta + \gamma)/\beta} - 1}{\gamma}$

光补偿点 LCP (Light compensation point): $LCP = \frac{\alpha - \gamma R_d - 4\alpha\beta R_d \sqrt{(\alpha - \gamma R_d)^2}}{2\alpha\beta}$

1.2.2 CO_2 响应特性的测定 用 Li-6400 光合仪 LED 红蓝光源叶室控制光强为 $1\,300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,设定叶室温度为 25°C ,RH 70%,外接钢瓶供应 CO_2 ,其浓度梯度分别设定为 1 800、1 500、1 200、1 000、800、600、400、200、150、100、80 和 $50 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。测定最小等待时间为 120 s,最大等待时间为 180 s,每次变换 CO_2 浓度后都进行仪器的匹配操作,以保证所得光合速率数值的准确。在 $0 \sim 2\,000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 光强范围内制作 Pn-PAR 光响应曲线。 CO_2 响应曲线仍采用叶子飘先生提出的直角双曲线修正模型进行拟合。

$$P_n = a \frac{1 - bC_i}{1 + cC_i} (C_i - \Gamma) \quad (2)$$

其中 a 、 b 和 c 为 3 个系数, C_i 为植物叶片的胞间 CO_2 浓度, Γ 为植物的 CO_2 补偿点 (LCP, Light compensation point)。

CO_2 饱和点 CSP (CO_2 Saturation point):

$$CSP = \frac{\sqrt{(b+c)(1+c\Gamma)/b} - 1}{c}$$

最大光合能力 A_{\max} (photosynthetic capacity): $A_{\max} = a \frac{1 - bCSP}{1 + cCSP} (CSP - \Gamma)$

1.3 数据统计

应用统计分析软件 SPSS 11.5 对研究对象的光响应曲线和 CO_2 浓度响应曲线进行拟合,用 Sigmaplot 10.0 绘图。

2 结果与分析

2.1 光响应曲线

光响应曲线反映了植物光合速率随光照强度改变而变化的规律。从图 1 可以看出,二者光响应模型拟合值与实测值符合得很好。光强达到 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 之前,随着光强的增加,光合速率增加迅速, $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以后,光合速率缓慢上升,逐渐趋于与 x 轴平行,之后略有下降趋势,表现出光抑制现象,即植物叶片接受的光能超过了它所能利用的光量时,长时间的强光照射可以引起叶片光合活性的降低,光抑制是植物光合作用非气孔限制因素的主要形式。光强超过 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以后,栎树净光合速率明显较无患子高。

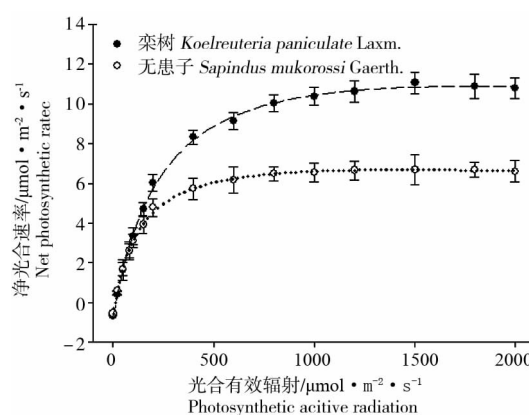


图 1 栎树和无患子光响应曲线

Fig. 1 The photosynthetic light response curve of *K. paniculata* and *S. mukorossi*

从表 1 中可以看出,直角双曲线修正模型拟合曲线的决定系数 R^2 分别为 0.998 6 和 0.999 5,拟合效果较好,这与图 1 相吻合。栎树最大净光合速率、光饱和点、光补偿点和暗呼吸速率分别为 10.69、1 526.62、13.61 和 $0.75 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,明显较无患子的高。

表 1 栾树和无患子光响应曲线参数比较

Table 1 The parameters of photosynthetic light response curve of *K. paniculata* and *S. mukorossi*

光合作用参数 Photosynthetic parameter	拟合值 Fitting value	
	栾树 <i>K. paniculata</i>	无患子 <i>S. mukorossi</i>
最大净光合速率/ $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ P_{max} (Maximum net photosynthetic rate)	10.69	6.68
光饱和点/ $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ LSP (Light Saturation point)	1526.62	1439.22
光补偿点/ $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ LCP (Light compensation point)	13.61	9.57
暗呼吸速率/ $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ R_d (Rate of dark respiration)	0.75	0.59
R^2	0.9986	0.9995

2.2 CO₂ 响应曲线

CO₂响应曲线反映植物净光合速率与外界 CO₂浓度的关系。从图 2 可以看出,二者光响应模型拟合值与实测值吻合程度也很高。当胞间 CO₂浓度达到 800 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 之前,随着 CO₂浓度的增加,光合速率增加迅速,800 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 以后,光合速率缓慢上升,逐渐趋于与 x 轴平行,之后略有下降趋势。从图 2 还可以看出,胞间 CO₂浓度相同时,栾树净光合速率明显高于无患子。

从表 2 中可以看出,直角双曲线修正模型拟合曲线的决定系数 R^2 分别为 0.998 6 和 0.999 5,拟合效果也非常好,这与图 2 相吻合。栾树最大光合能力、CO₂ 饱和点和光呼吸速率分别为 13.94、1 438.41 和 3.76 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,较无患子

分别高出 31.51%、15.80%、168.57%,但无患子 CO₂ 补偿点较栾树高 7.93%。

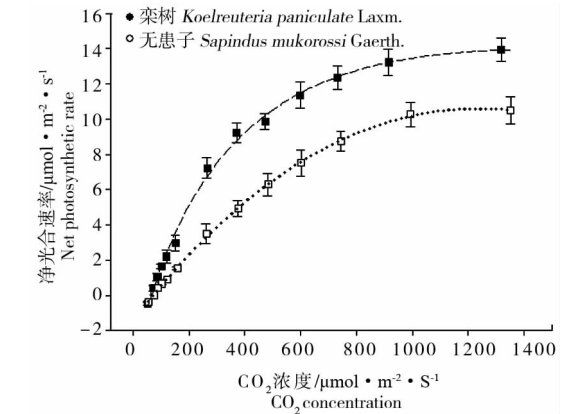


图 2 栾树和无患子 CO₂ 响应曲线

Fig. 2 The photosynthetic CO₂ response curve of *K. paniculata* and *S. mukorossi*

表 2 栾树和无患子 CO₂ 响应曲线参数比较

Table 2 The parameters of photosynthetic CO₂ response curve of *K. paniculata* and *S. mukorossi*

光合作用参数 Photosynthetic parameter	拟合值 Fitting value	
	栾树 <i>K. paniculata</i>	无患子 <i>S. mukorossi</i>
最大光合能力/ $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ A_{max} (Photosynthetic capacity)	13.94	10.60
CO ₂ 饱和点/ $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ CSP (CO ₂ Saturation point)	1438.41	1242.06
CO ₂ 补偿点/ $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ CCP (CO ₂ compensation point)	65.45	70.64
光呼吸速率/ $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ R_p (Rate of photorespiration)	3.76	1.40
R^2	0.9986	0.9995

3 结论与讨论

目前,植物光合作用光响应模型主要有直角双曲线模型、非直角双曲线模型、指数函数模型和二次多项式模型等,其中以非直角双曲线模型和

直角双曲线模型应用最为广泛^[7]。直角双曲线模型和非直角双曲线模型能很好地拟合植物叶片在 LSP 以前的光响应数据,但它们都是一条无限趋近于 P_{max} 的渐近线,没有极值,因此无法求取植物 P_{max} 和 LSP。指数函数模型同样无法拟合光抑制

部分光响应数据,而按照前人经验假定 P_{\max} 的 90% 或 99% 所对应的光强为 LSP,可能拟合值远小于实测值等情况,况且这里的假设具有人为性,求取的 LSP 并不是植物本身具有的,因而这 3 种模型共有的弊端都是无法得到真正的 P_{\max} 和 LSP。二次多项式虽然可以拟合植物光抑制条件下的数据,但可能存在 LCP 为负、 R_d 为正值等问题,这与真实情况显然相悖。修正的直角双曲线模型由国内学者叶子飘先生提出,该模型克服了其它几个模型拟合时出现的上述各种问题,它不但能直接求取 P_{\max} 和 LSP 等参数的解析解,而且求取的参数以及拟合值与实测值吻合得很好^[1],用该模型来拟合光响应和 CO_2 响应曲线在长柄扁桃^[8]、冬小麦^[9]、三叶鬼针草^[10]、丹参^[11]、藏川杨^[12]和小蓬竹^[13]等物种中都得到过验证,拟合效果非常好,从该试验来看,修正的直角双曲线模型在无患子科植物响应曲线拟合中也非常有用,确实是一个非常值得推广的好模型。

P_{\max} 表示植物的最大光合作用能力,它能够反映植物的光合潜能。 R_d 是反应植物本身消耗同化产物快慢的指标, R_d 越低,净光合速率(P_n)越大,干物质积累就越多。望天树(*shorea chinensis*)等 6 种热带雨林木本植物 P_{\max} 在 $2.2 \sim 7.2 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[14],金银花(*Lonicera japonica*)等 7 种藤本植物 P_{\max} 介于 $3.98 \sim 11.49 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[15],单性木兰(*Kmeria septentrionalis*)等 12 种珍稀木本植物 P_{\max} 位于 $6.474 \sim 18.537 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[16]。该试验测得栾树和无患子 P_{\max} 分别为 10.69 和 $6.68 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,表明栾树和无患子光合潜能较大,二者均属深根性树种,且对立地条件要求不高,据观察,栾树或无患子均能在台州地区某些条件较为瘠薄的旷地生长,因而可用作水土保持及荒山绿化先锋树种。从 P_n 与 R_d 方面看,栾树幼苗较无患子生长速率更快。LSP 和 LCP 是植物的两个重要光合生理指标,反映了植物光照条件的要求,是判断植物耐荫性的一个重要指标,LCP 越低的植物利用弱光的能力越强,而 LSP 越高的植物利用光能的效率越高。一般而言,阳生植物 LCP 在 $13 \sim 36 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,LSP 在 $540 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上;而阴生植物的 LSP 在 $90 \sim 180 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,LCP 在 $10 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下^[17]。从该研究结果来看,

栾树属于典型的阳生植物,因此在运用该树种作为行道树或绿化荒山用途时,应考虑合理的密度,切不可密植,否则过于荫蔽的环境可能不利于其生长。

CO_2 浓度与光合速率的关系,也类似于光强与 P_n 的关系,既有 CCP,又有 CSP,植物必须在 CO_2 浓度高于 CCP 的条件下,才有同化产物的积累。 CO_2 响应曲线与光响应曲线变化趋势基本一致,随 CO_2 浓度的增加,净光合速率先是迅速增加,然后增速趋于缓慢甚至下降。通常情况下, C_3 植物 CCP 约为 $30 \sim 70 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, C_4 植物 CCP(小于 $10 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)和 CSP 均较 C_3 植物的低^[18]。该研究表明,栾树和无患子的 CCP 在 $70 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,是一种 C_3 植物,这也暗示,在实际绿化应用中,需考虑适当的密度,以利于植物的快速生长。 CO_2 浓度增加,可以提高植物体内 RuBP 羧化酶的羧化活性,从而提高叶片的光合速率,当超过 CSP 时再增加 CO_2 浓度,光合便受抑制,其可能原因是: CO_2 浓度过高,会引起气孔关闭,阻止 CO_2 向叶内扩散,甚至引起原生质中毒,抑制正常呼吸进行,从而阻碍了光合正常进行。大气中 CO_2 浓度目前约为 $360 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,并以每年 $1 \sim 2 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 的速度递增,预计到 21 世纪末,大气 CO_2 浓度将达到目前的 2 倍^[19]。栾树和无患子 CSP 在 $1300 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,远高于当前及今后较长一段时间内空气中 CO_2 的浓度,意味着在应对全球 CO_2 浓度升高的环境,二者均能较好地适应,且栾树强于无患子。

参考文献:

- [1] 叶子飘,于强. 光合作用光响应模型的比较[J]. 植物生态学报,2008,32(6):1356-1361.
- [2] 苗中芹,张秀省,杨重军. 不同处理方法对栾树种子发芽率的影响[J]. 北方园艺,2008(3):159-160.
- [3] 谢必武,张凤龙. 几种处理方法对无患子种子发芽的影响[J]. 种子,2007,26(5):74-75.
- [4] 翟梅枝,郭景丽,王磊,等. 栾树花黄酮类化合物的提取工艺研究[J]. 西北林学院学报,2010(2):136-139.
- [5] 李锐,周燕,杨永成,等. 无患子皂苷成分的串联质谱分析[J]. 高等学校化学学报,2006,27(1):52-54.
- [6] 朱凡,田大伦,闫文德,等. 栾树对土壤多环芳烃修复机制初探[J]. 西北林学院学报,2011,26(1):52-55.
- [7] 叶子飘. 光合作用对光和 CO_2 响应模型的研究进展[J]. 植物生态学报,2010,34(6):727-740.
- [8] 罗树伟,郭春会,张国庆,等. 沙地植物长柄扁桃光合特性研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2010(1):

- 125-132.
- [9] 叶子飘, 于强. 冬小麦旗叶光合速率对光强度和 CO₂ 浓度的响应[J]. 扬州大学学报: 农业与生命科学版, 2008, 29(3): 33-37.
- [10] 叶子飘, 赵则海. 遮光对三叶鬼针草光合作用和叶绿素含量的影响[J]. 生态学杂志, 2009, 28(1): 19-22.
- [11] 叶子飘, 高峻. 丹参羧化效率在其 CO₂ 补偿点附近的变化[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2008, 36(5): 160-164.
- [12] 王圣杰, 黄大庄, 闫海霞, 等. 4 种经验模型在藏川杨光响应研究中的适用性[J]. 北华大学学报: 自然科学版, 2011, 12(2): 208-212.
- [13] 廖小锋, 刘济明, 张东凯, 等. 野生小蓬竹的光合光响应曲线及其模型拟合[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(3): 124-128.
- [14] 蔡志全, 曹坤芳, 郑丽. 6 种热带雨林木本植物幼苗光合诱导的研究[J]. 植物生态学报, 2004, 27(5): 617-623.
- [15] 王雁, 马武昌. 扶芳藤, 紫藤等 7 种藤本植物光能利用特性及耐荫性比较研究[J]. 林业科学研究, 2004, 17(3): 305-309.
- [16] 王冉, 何茜, 李吉跃, 等. 中国 12 种珍稀树种光合生理特性[J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(11): 15-20.
- [17] 夏江宝, 张光灿, 孙景宽, 等. 山杏叶片光合生理参数对土壤水分和光照强度的阈值效应[J]. 植物生态学报, 2011, 35(3): 322-329.
- [18] 时慧君, 杜峰, 张兴昌. 毛乌素沙地几种主要植物的光合特性[J]. 西北林学院学报, 2010, 25(4): 29-34.
- [19] 王亚萍, 王开运, 张远彬, 等. 川西亚高山森林优势种对 CO₂ 浓度倍增的光合生理响应[J]. 生态环境, 2008, 17(4): 1514-1517.

Response of Net Photosynthetic Rate to Light Intensity and CO₂ Concentration of *Koelreuteria paniculata* Laxm. and *Sapindus mukorossi* Gaerth.

LIN Da, WANG Song-jie, XU Xia-ling, XU Neng-ye, CHEN Dan, ZHANG Yan-hong, DU Zhao-kui
(Life Sciences College of Taizhou University, Taizhou, Zhejiang 318000)

Abstract: The responses of net photosynthetic rate (P_n) to light intensity and CO₂ concentration of *Koelreuteria paniculata* Laxm. and *Sapindus mukorossi* Gaerth. were studied. The results showed that the modified rectangular hyperbola model worked well in curve-fitting, the coefficients of determination of the fitting equation were all more than 0.998 6; The maximum net photosynthetic rate (P_{max}) of *K. paniculata* Laxm. and *S. mukorossi* Gaerth. were 10.69 and 6.68 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ respectively, the light saturation point (LSP) of the two species were 1 526.62 and 1 439.22 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ respectively, and the light compensation point (LCP) of the two species were 13.61 and 9.57 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ respectively, those data indicated that the photosynthetic potential of *K. paniculata* Laxm. was stronger than *S. mukorossi*, and both of the two species could acclimate to low light condition perfectly and utilize high irradiation, in order to prevent from dropping of photosynthesis, the plant intensity must be taken into consideration in cultivation practices. The CO₂ saturation point (CSP) of *K. paniculata* Laxm. and *S. mukorossi* Gaerth. were 1 438.41 and 1 242.06 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ respectively, the CO₂ compensation point (CCP) of the two species were 65.45 and 70.64 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ respectively, high CSP meant that the two species could adjust to the continuous raise of global CO₂ concentration, moreover, *K. paniculata* Laxm. had better adaptability than *S. mukorossi* Gaerth. to the change of CO₂ concentration, for the former had wider range to use CO₂.

Key words: *Koelreuteria paniculata* Laxm.; *Sapindus mukorossi* Gaerth.; light response curve; CO₂ response curve