

DOI:10.11913/PSJ.2095-0837.2018.60879

王玥琳, 徐大平, 杨曾奖, 刘小金, 洪舟, 张宁南. 移植和钾肥对降香黄檀光合特性与叶绿素含量的影响[J]. 植物科学学报, 2018, 36(6): 879-887

Wang YL, Xu DP, Yang ZJ, Liu XJ, Hong Z, Zhang NN. Effects of transplantation and potassium fertilizer on the photosynthetic characteristics and chlorophyll content of *Dalbergia odorifera*[J]. *Plant Science Journal*, 2018, 36(6): 879-887

移植和钾肥对降香黄檀光合特性与叶绿素含量的影响

王玥琳, 徐大平*, 杨曾奖, 刘小金, 洪舟, 张宁南

(中国林业科学研究院热带林业研究所, 广州 510520)

摘要: 以降香黄檀(*Dalbergia odorifera* T. Chen)为材料, 分析不同移植方式和外施钾肥等培育措施对其光合参数和叶绿素(Chl)含量的影响。结果显示, 断根处理后植物的最大净光合速率(P_{nmax})比去冠、全冠移、对照(CK)和去冠移4种处理方式分别提高了19.25%、34.79%、40.88%和219.86%。光合参数分析结果显示, 光饱和点(LSP)最高的为去冠处理, 光补偿点(LCP)最高的为断根处理。断根处理后植物的净光合速率(P_n)和蒸腾速率(T_r)最大。断根、去冠、全冠移3种处理的Chla、Chlb、Chl(a+b)含量及胡萝卜素均高于CK, 且断根处理后上述各指标达到最高值。外施钾肥处理中, 降香黄檀最大净光合速率随钾肥用量的增加而增加, K_2 处理下的LSP值最大。随着钾肥施用量的增加, 植物叶片的 P_n 、气孔导度呈上升的趋势, 且植株的Chla、Chlb和Chl(a+b)含量均随钾肥用量的增加而增加, CK处理下Chla/Chlb比值显著高于 K_1 、 K_2 处理。研究结果表明断根、去冠、施用钾肥等处理均可显著提升降香黄檀叶片的叶绿素含量, 有利于植株进行光合作用, 促进生长发育。

关键词: 降香黄檀; 移植; 钾肥; 光合特性; 叶绿素

中图分类号: Q945.11

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2018)06-0879-09

Effects of transplantation and potassium fertilizer on the photosynthetic characteristics and chlorophyll content of *Dalbergia odorifera*

Wang Yue-Lin, Xu Da-Ping*, Yang Zeng-Jiang, Liu Xiao-Jin, Hong Zhou, Zhang Ning-Nan

(Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou 510520, China)

Abstract: *Dalbergia odorifera* T. Chen was used to analyze the effects of transplantation and potassium fertilizer on its photosynthetic characteristics and chlorophyll content. Results showed that the maximum net photosynthetic rate of plants after root pruning was 19.25%, 34.79%, 40.88%, and 219.86% higher than that of de-crowning, full-crown transplantation, CK, and de-crown transplantation. The maximum light saturation point(LSP) occurred under de-crowning treatment, and the maximum light compensation point(LCP) occurred under root pruning. The net photosynthetic rate(P_n) and transpiration rate(T_r) were highest under root pruning treatment. Compared with CK, the contents of Chla, Chlb, Chl(a+b), and Car were all higher under root pruning, de-crowning, and full-crown transplantation. Chla, Chlb, and Chl(a+b) all increased with the increase in potash fertilizer. The maximum net photosynthetic

收稿日期: 2018-04-15, 退修日期: 2018-05-16。

基金项目: “十三五”国家重点研发计划(2016YFD0600601); 广东省林业科技创新项目专项资金(2016KJ CX009)。

This work was supported by grants from the National Key R & D Projects in 13th Five-Year(2016YFD0600601) and Guangdong Forestry Science and Technology Innovation Special Fund(2016KJ CX009)。

作者简介: 王玥琳(1990-), 女, 博士研究生, 研究方向为森林培育(E-mail: wangyuelin001@163.com)。

* 通讯作者(Author for correspondence. E-mail: gzfsrd@163.com)。

rate increased with the increase in potassium fertilizer dosage. The *LSP* value was largest under K_2 treatment. As the amount of potash fertilizer increased, P_n and Cond showed a tendency to increase. The *Chla/Chlb* ratio under CK treatment was significantly higher than that under K_1 and K_2 . Root pruning, de-crowning, and applying potash fertilizer significantly increased the chlorophyll content of *D. odorifera*, which was beneficial for photosynthesis and the promotion of plant growth.

Key words: *Dalbergia odorifera*; Transplant; Potash fertilizer; Photosynthetic characteristics; Chlorophyll

降香黄檀(*Dalbergia odorifera* T. Chen)属于蝶形花科黄檀属,为国家二级保护植物,其心材具有极高的经济价值,是红木家具的珍贵用材,从心材中提取的降香油也是一种定香剂,具有重要的药用价值。同时,降香黄檀也适用于城市绿化和山地造林^[1, 2]。

降香黄檀的人工培育措施主要包括水分调整、密度控制、施用生长调节剂及养分管理等^[3-6]。光合作用是绿色植物基本的生理活动,受到植物自身品种特性、叶绿素含量、叶龄等因素以及温度、光强、CO₂浓度等外界因素的影响^[7]。

植物功能叶片的叶绿素含量是光合作用强弱和光合产物形成的重要指标,同时也影响植物与外界环境物质和能量的交换^[8, 9]。研究发现,经过移植保活技术处理后,油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)、白杆(*Picea meyeri* Rehd. et Wils.)、樟子松(*Pinus sylvestris* L. var. *mongholica* Litv.)的日均光合速率和叶绿素含量均显著增加^[10]。钾能维持植物细胞渗透压平衡、优化光合性能、改善气孔运动、维持酶活性、提高植物对逆境的抵抗力。研究表明,钾素供应不足会导致植物光合速率下降^[11-14]。目前,关于降香黄檀心材形成、病虫害防治及苗期营养等^[15-18]的研究较多,而对不同栽培措施下树木光合生理状况方面的研究较少。本研究以幼龄降香黄檀为研究对象,探讨不同移植方式与外施钾肥等培育措施对降香黄檀光合参数和叶绿素含量的影响,分析在不同培育措施下植物的光合指标、叶绿素 *a*、*b* 及总量的变化规律,以期为降香黄檀的人工林培育提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区金龙珍贵树研究基地,位于广东省肇庆市

高要区(112°11′ ~ 112°50′ E, 22°47′ ~ 23°26′ N),行政区面积 2071 km²。高要区地势以丘陵和山地为主,属亚热带季风气候,年均降水量 1647.8 mm,年均温 22℃,年均日照时数 1801.6 h。

1.2 研究方法

1.2.1 移植处理

于 2017 年 5 月,选取胸径为 6 ~ 8 cm 的降香黄檀为材料,选择向南坡、地形平整、长势健康一致的林分,每木检尺。实验设 5 个处理:(1)去冠移(修掉树冠的 1/2 枝叶 + 移植);(2)全冠移(不修枝 + 移植);(3)断根;(4)去冠(修掉树冠的 1/2 枝叶);(5)对照(CK)。每处理 15 棵,共 75 棵树。

1.2.2 钾肥处理

于 2017 年 5 月,选取胸径 6 ~ 8 cm,树势均匀一致的降香黄檀,设 3 个处理(K_1 、 K_2 、CK),每处理 15 棵,共 45 棵树(每木检尺)。各重复间设隔离树,随机区组排列,施肥方式为环状施肥法(表 1)。

表 1 施肥处理
Table 1 Fertilizing measures

处理 Treatment	尿素 Urea (g)	过磷酸钙 Calcium superphosphate (g)	氯化钾 Potassium chloride (g)
CK	1000	1500	0
K_1	1000	1500	1000
K_2	1000	1500	2000

1.2.3 光响应曲线测定

于 2017 年 7 月,晴天时利用便携式光合测定仪 Li-6400 于 9:00 - 11:00 时对降香黄檀叶片进行光响应曲线测定。每个处理选取 3 株优势木,采用高枝剪取样,各优势木选取 1 个标准枝,每个标准枝选取 3 ~ 5 片生长状况良好的叶片进行离体光响应曲线测定,测定时保持标准枝切口浸于水中。

叶室为 $2 \times 3 \text{ cm}^2$ ，采用 Led 红蓝光源设置光合有效辐射梯度，分别为 2000、1800、1600、1400、1200、1000、800、600、400、200、150、100、80、60、40、20、0 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。测量前叶片需经 0.5 h 的光诱导，各辐射强度的停留时间为 2 ~ 3 min， CO_2 浓度为 390 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ ，设定温度为 25℃。采用直角双曲线修正模型^[19]进行光响应曲线拟合，得出最大净光合速率 ($P_{n\text{max}}$)、光饱和点 (LSP)、光补偿点 (LCP) 和暗呼吸速率 (R_d) 等光合参数。

1.2.4 样品采集与叶绿素含量测定

于 2017 年 8 月，随机选 3 株优势木作为样株，用高枝剪取树冠阳面中上部枝叶，手工摘取饱满无病害叶片 20 ~ 30 片混合均匀，分别编号，装入密封袋，干冰保温带回。用干净纱布擦净，储藏在 -40℃ 冰箱中。采用丙酮法^[20]测定叶绿素含量，使用紫外可见分光光度计 (UV-2550) 进行测定。

1.2.5 数据分析

采用 Excel 2007 和 SPSS 16.0 软件对数据进行计算和处理。

2 结果与分析

2.1 移植对降香黄檀光合特性的影响

研究表明，不同移植处理对降香黄檀叶片的光响应曲线影响明显不同 (图 1)。在光强低于 200 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时，各处理下植株的净光合速率 (P_n) 依次排序为：断根 > 全冠移 > CK > 去冠 > 去冠移处理。随着光强的增加，去冠处理下叶片的

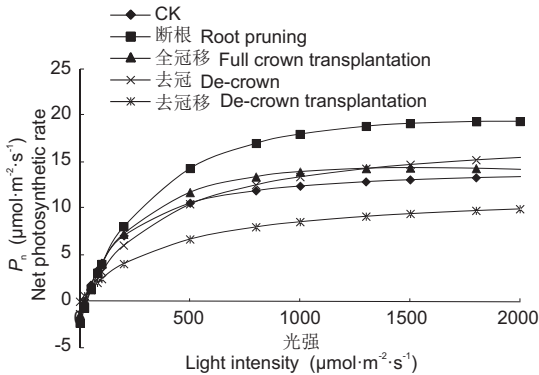


图 1 移植处理下降香黄檀叶片的净光合速率光响应曲线
Fig. 1 Light response curve of *D. odorifera* leaves under transplantation treatment

P_n 增加速度明显大于去冠移，当光强达到 1500 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时，各处理下的 P_n 基本达到光饱和。

移植各处理后降香黄檀叶片的光响应曲线拟合良好且差异明显 (表 2)。断根处理下的 $P_{n\text{max}}$ 分别比去冠、全冠移、CK、去冠移处理高 19.25%、34.79%、40.88% 和 219.86%，说明断根处理后，叶片可以较好的适应强光有效辐射。光饱和点和光补偿点可以反映植物叶片在弱光和强光条件下对光照环境的适应能力^[21]。本研究结果显示，去冠处理的光饱和点最高达到 2371.43 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，表明该处理下植物的光合潜力较大，且随着光强的增加，叶片对光照的利用率也随之加强。断根、全冠移、CK、去冠移 4 个处理下的 LSP 值依次比去冠处理降低了 17.77%、35.37%、37.46% 和 8.44%。各处理中， LCP 值依次排序为：断根 > 去冠 > CK > 全冠移 > 去冠移；暗呼吸速率依次排序为：断根 > CK > 全冠移 > 去冠 > 去冠移。

表 2 移植处理下降香黄檀叶片的光合参数

Table 2 Characteristic parameters of light response curves of *D. odorifera* under transplantation treatment

处理 Treatment	斜率 Slope (α)	$P_{n\text{max}}$ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	LSP ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	LCP ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	R_d ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	决定系数 Determination coefficient (R^2)
对照 CK	0.097	13.773	1483.138	23.097	1.971	1.000
断根 Root pruning	0.082	19.403	1950.128	30.761	2.315	1.000
全冠移 Full crown transplantation	0.075	14.395	1532.540	20.366	1.422	0.999
去冠 De-crown	0.060	16.270	2371.429	24.055	1.339	0.998
去冠移 De-crown transplantation	0.041	6.066	2171.253	17.567	0.655	0.970

注： $P_{n\text{max}}$ ，最大净光合速率； LSP ，光饱和点； LCP ，光补偿点； R_d ，暗呼吸速率。下同。
Notes: $P_{n\text{max}}$ ， maximum net photosynthetic rate; LSP ， light saturation point; LCP ， light compensation point; R_d ， dark respiration rate. Same below.

本研究发现,当光强为 $1800\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,断根处理 P_n 值最大,为 $19.47\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,比 CK、全冠移、去冠、去冠移处理分别高出 46.48%、34.65%、24.06%和 94.52%;各处理中去冠处理的气孔导度最大,为 $1.54\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,去冠移值最小为 $0.30\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$;各处理的胞间 CO_2 浓度(C_i)依次排序为:去冠 > CK > 断根 > 去冠移 > 全冠移,最大值为 $366.16\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$;蒸腾速率(T_r)在各处理间依次排序为:断根 > CK > 去冠 > 全冠移 > 去冠移,断根处理 T_r 值最大为 $3.52\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,分别比其他处理高 21.39%、32.2%、53.76%和 141.21%(图 2)。

2.2 钾肥对降香黄檀光合特性的影响

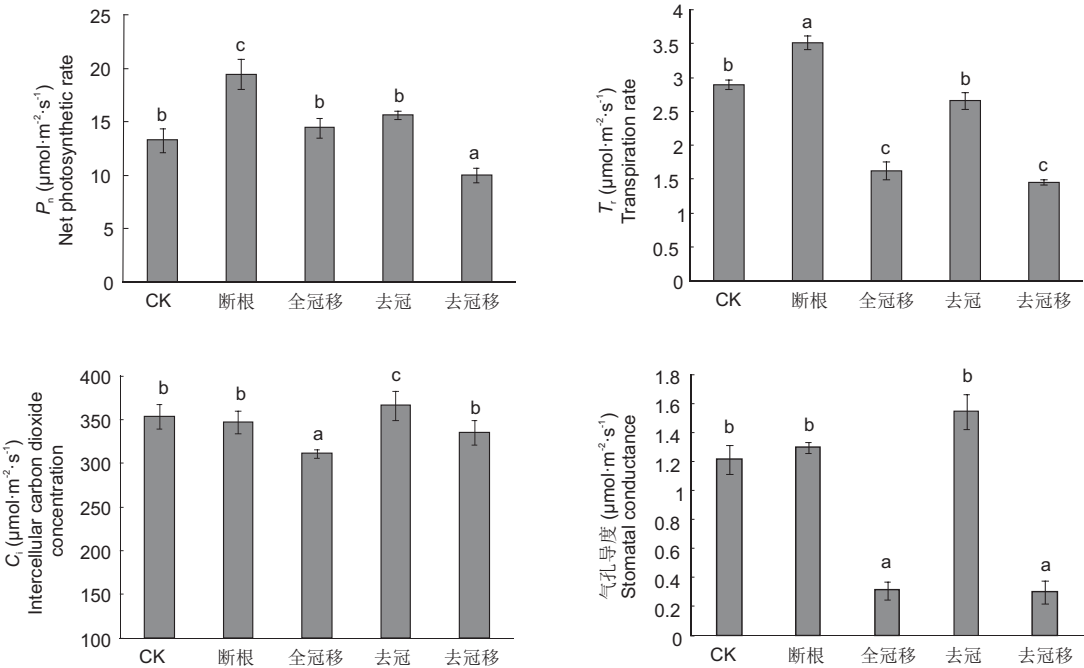
本研究发现,当光照强度为 $0\sim380\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,外施钾肥可使降香黄檀叶片的净光合速率 P_n 迅速升高。当光强为 $380\sim800\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,各处理 P_n 值上升平缓,之后逐渐趋于稳定(图 3)。 $P_{n\text{max}}$ 随钾肥用量的增加而增加,最大值为 K_2 处理,分别比 K_1 和 CK 处理增加了 56.49%和 132.35%;此外, K_2 处理下的 LSP 值最大,但 LCP 、 R_d 值均在 CK 处理时达到最大值, K_2 次之, K_1 最小(表 3)。

本研究发现,当光强为 $1800\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,随着钾肥用量的增加,降香黄檀叶片 P_n 呈上升的趋势,最大值达到 $12.287\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,分别比 CK 和 K_1 处理升高了 107.25%和 42.02%;各处理的 $Cond$ 值变化趋势和 P_n 一致,最大值为 K_2 处理,分别比 CK 和 K_1 处理高出 593.11%和 114.31%; K_1 处理的 T_r 最低为 $1.583\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, K_2 处理最高; C_i 值随钾肥用量的增加而增加,随后略有降低, K_1 处理的 C_i 最大值达到 $310.033\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,分别比 CK 和 K_2 处理增加了 19.85%和 2%(图 4)。

2.3 不同培育措施对降香黄檀叶绿素含量的影响

研究结果显示,断根、去冠和全冠移 3 种处理下,叶绿素(Chl) a 、 b 、叶绿素总量($a+b$)及类胡萝卜素(Car)均高于 CK,且断根处理下上述各指标达到最高(图 5: A)。去冠、去冠移处理下 $Chla/Chlb$ 值明显低于断根、全冠移和 CK 处理,其中断根处理比值最大,去冠移最小(图 5: B)。

外施钾肥处理中, $Chla$ 、 $Chlb$ 和 $Chl(a+b)$ 值均随钾肥用量的增加呈递增趋势, K_2 、 K_1 处理下 $Chla$ 含量分别比 CK 高 27.82%和 7.56%, $Chlb$ 高 44.7%和 22.17%,而 $Chl(a+b)$ 分别是 CK 的 1.33



不同小写字母表示差异极显著 ($P < 0.05$), 下同。
Different lowercase letters indicate significant difference at the 0.05 level. Same below.

图 2 移植对降香黄檀叶片光合气体参数的影响

Fig. 2 Effect of transplantation on photosynthetic gas parameters of *D. odorifera*

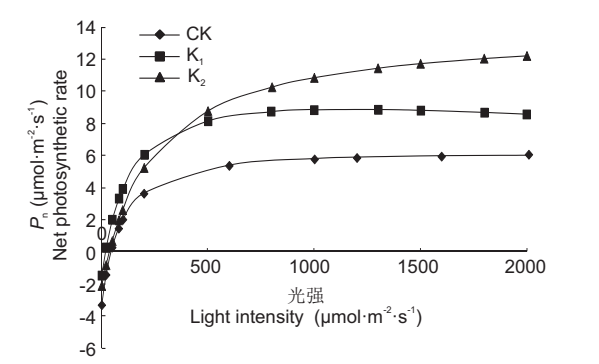


图3 钾肥处理下降香黄檀叶片净光合速率光响应曲线
Fig.3 Light response curve of *D. odorifera* leaves under potash fertilizer application

表3 钾肥处理下降香黄檀叶片的光合参数
Table 3 Characteristic parameters of light response curves of *D. odorifera* under potash fertilizer application

处理 Treatment	斜率 (α) Slope	P_{nmax} ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	LSP ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
CK	0.115	5.982	2066.124
K ₁	0.097	8.882	1186.838
K ₂	0.068	13.899	2463.205

处理 Treatment	LCP ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	R_d ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	R^2
CK	43.725	3.357	0.999
K ₁	17.392	1.486	0.999
K ₂	35.908	2.128	0.999

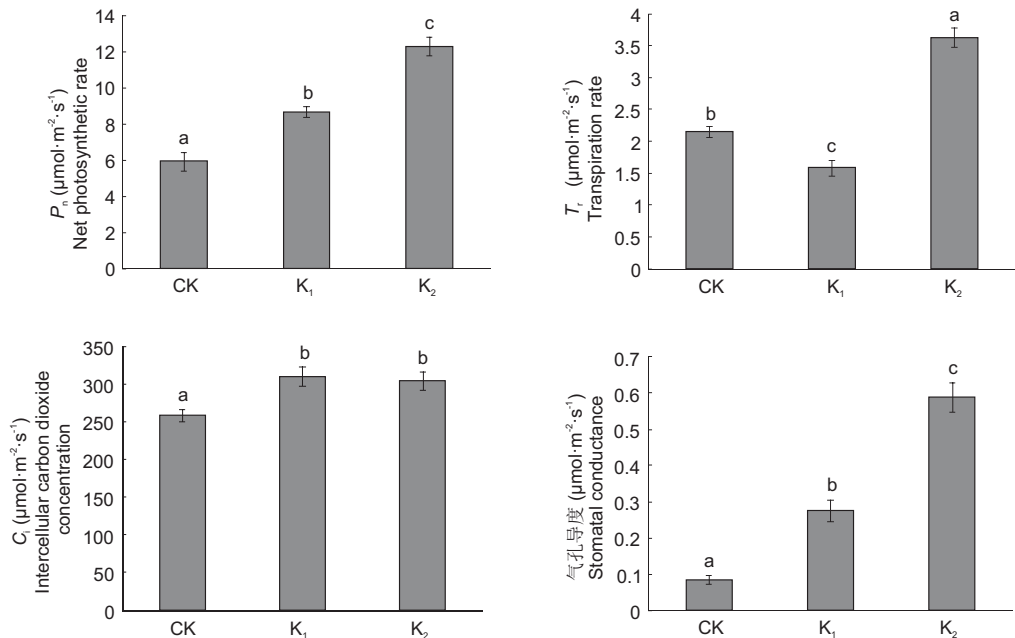


图4 钾肥对降香黄檀叶片光合气体参数的影响
Fig.4 Effect of potash fertilizer on photosynthetic gas parameters of *D. odorifera*

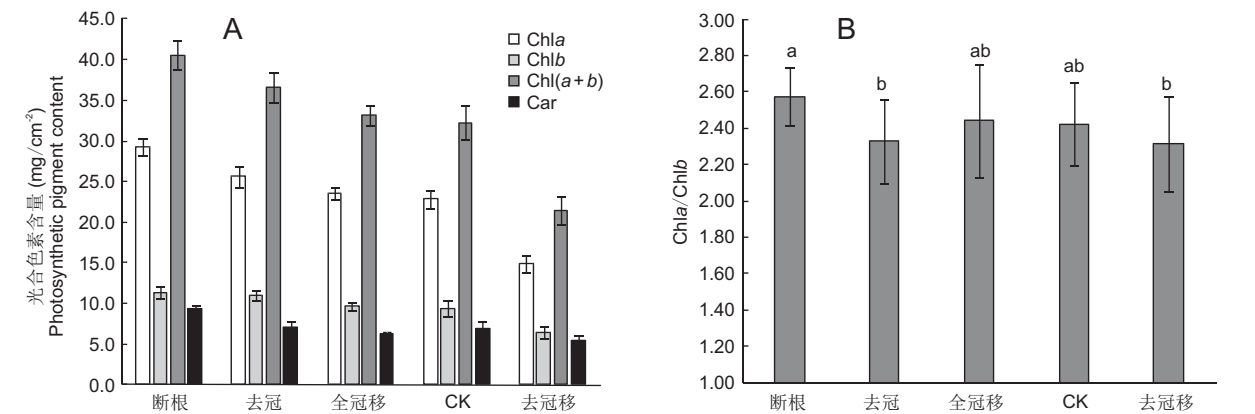


图5 移植对降香黄檀叶绿素含量的影响
Fig.5 Effect of transplantation on chlorophyll content of *D. odorifera*

和 1.12 倍；但各处理 Car 含量无显著差异 ($P > 0.05$)。CK 处理时 Chla/Chlb 显著高于 K_1 、 K_2 处理，而两者间无显著差异 (图 6)。

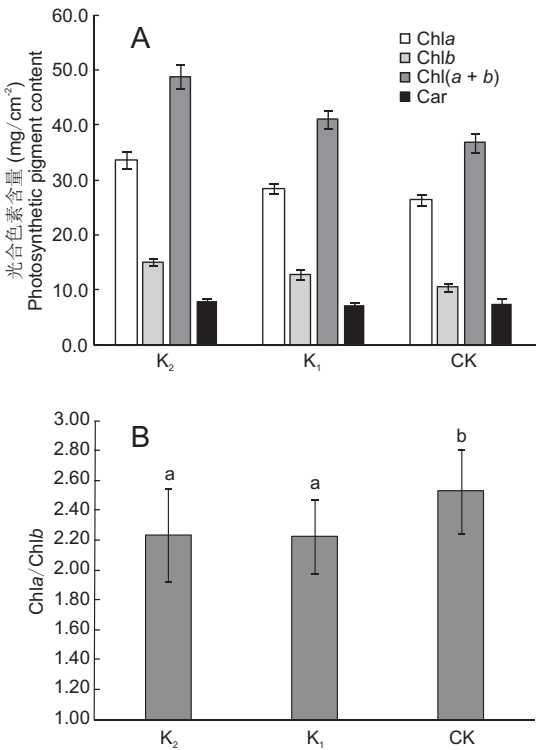


图 6 钾肥对降香黄檀叶绿素含量的影响
Fig. 6 Effect of potash fertilizer on chlorophyll content of *D. odorifera*

3 讨论

在树木的人工培育过程中，移植需进行起挖、调运、定植等操作，易造成树木根冠比的改变，因此移植初期植物的光合作用会显著下降。随后，由于新的根系和叶的萌发光合作用逐渐恢复，光合产物、光合速率会快速增加以满足生长的需求。修枝后由于叶片减少，余下叶片的光合作用会显著加强^[22-24]。研究发现，钾元素能激活植物体内多种酶的活性^[25, 26]，调节叶片气孔的开合^[27]、叶肉阻抗力的发生^[28]，明显提高植物的光合速率和光合化学活性^[27, 29]，调控光合同化产物的合成、运输及转化^[30]。

光响应曲线能反映光量子通量密度和植物净光合速率之间的关系，同时确定最大净光合速率、光饱和点、暗呼吸速率和光补偿点等指标^[31]。本研究结果表明，移植各处理下降香黄檀叶片的光响应曲线差异明显，光合参数特征显示， P_{nmax} 值依次排

序为：断根 > 去冠 > 全冠移 > CK > 去冠移处理，说明通过断根、去冠处理能提高降香黄檀叶片对强光的适应能力。植物暗呼吸速率能在一定程度上反映其对有机质的消耗情况^[32]，去冠移处理的暗呼吸速率最低，说明该处理造成了光合产物的大量累积。光饱和点和光补偿点分别表示光合作用和光强相互作用的上、下限值^[33]，分别体现植物对弱光和强光的利用能力^[21]。移植各处理后 LSP 、 LCP 大小变化明显，去冠处理 LSP 值最大， LCP 值最大的为断根，说明去冠对弱光的利用能力强，而断根对强光的利用能力最强。这与薄一览^[10]对油松、樟子松、白杆移植过程中光合和蒸腾速率变化的研究结果基本一致。本研究也发现，施用钾肥能够提高降香黄檀的光合能力，有利于植株通过光合作用合成更多有机物质。这和田晓飞^[34]对棉花 (*Anemone vitifolia* Buch.) 控施钾肥的研究及孙哲等^[35]对甘薯 (*Ipomoea batatas* Lam.) 的研究结论一致。

本研究在移植处理中发现，全冠移和去冠移处理下植株的蒸腾速率、净光合速率、气孔导度和胞间二氧化碳浓度基本均为组内最低；钾肥各处理中的气孔导度、净光合速率均随钾肥施用量的增加而增加。Farquhar 和 Sharkey^[36]的研究认为，净光合速率下降的原因主要包括气孔限制和非气孔限制 2 个因素，气孔限制导致光合速率降低是由叶片气孔导度降低引起；非气孔限制导致的光合速率降低是由于叶肉细胞光合能力下降，致使其对 CO_2 的利用能力降低，从而造成胞间二氧化碳浓度的升高。本研究在移植处理中，植株净光合速率的高低顺序几乎与气孔导度大小一致，因此降香黄檀光合能力的强弱主要取决于气孔因素的限制；钾肥实验中， K_1 、 K_2 处理的净光合速率降低时，其胞间二氧化碳浓度升高，表明降香黄檀光合能力的强弱主要由非气孔因素限制决定。

叶绿素 a、b 是叶绿素的重要组成部分，具有吸收、传递和转化光能的功能，在光合作用中占重要地位^[37]，Chla/Chlb 比值能反映植物对弱光的利用能力和光能过剩诱导的自由基对色素分子的光氧化程度^[38]。本研究中，移植各处理的 Chla、Chlb、Chl(a+b) 及 Car 均高于 CK，其中断根处理含量最高。薄一览^[10]的研究也发现，移植保活技术处理后油松叶绿素含量明显提高。本研究结果

表明, 降香黄檀叶绿素含量随钾肥施用量的增加呈递增趋势, K_1 、 K_2 处理的 $Chla/Chlb$ 比值显著低于对照。齐豫川等^[39]对桂花品种‘金玉台阁’(*Osmanthus fragrans* ‘Jinyu Taige’)的研究发现, 单株施用 KCl 可提高叶片中的叶绿素含量, 与本研究结果一致。由此说明, 断根、去冠和施用钾肥处理可显著提升降香黄檀叶片的叶绿素含量, 有利于其进行光合作用, 促进植物的生长发育。

参考文献:

- [1] 高兆蔚. 中国特有珍贵用材树种降香黄檀及其木材利用[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 2014.
- [2] 崔之益, 徐太平, 杨曾奖, 张宁南, 刘小金, 洪舟. 土壤含水量对降香黄檀树干呼吸速率、生长和氮含量的影响[J]. 华南农业大学学报, 2018, 39(2): 54–61.
Cui ZY, Xu DP, Yang ZJ, Zhang NN, Liu XJ, Hong Z. Effects of soil moisture content on stem respiration rate, stem growth and sapwood nitrogen content in *Dalbergia odorifera*[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2018, 39(2): 54–61.
- [3] 邱明红, 黄丹慙, 刘盛波, 张伟, 陈国德, 杜尚嘉. 干旱胁迫对降香黄檀(*Dalbergia odorifera*)种子发芽及幼苗生长的影响研究[J]. 中国野生植物资源, 2016, 35(4): 14–18, 36.
Qiu MH, Huang DM, Liu SB, Zhang W, Chen GD, Du SJ. Research on the germinating and growing of *Dalbergia odorifera* seedling under drought stress[J]. *Chinese Wild Plant Resources*, 2016, 35(4): 14–18, 36.
- [4] Yeshitela T, Robbertse PJ, Stassen PJ. Paclobutrazol suppressed vegetative growth and improved yield as well as fruit quality of ‘Tommy Atkins’ mango(*Mangifera indica*) in Ethiopia[J]. *New Zeal J Crop Hort Sci*, 2004, 32(3): 281–293.
- [5] Ghosh A, Chikara J, Chaudhary DR, Prakash AR, Boricha G. Paclobutrazol arrests vegetative growth and unveils unexpressed yield potential of *Jatropha curcas*[J]. *J Plant Growth Regul*, 2010, 29(3): 307–315.
- [6] Ghosh A, Chikara J, Chaudhary DR. Diminution of economic yield as affected by pruning and chemical manipulation of *Jatropha curcas* L. [J]. *Biomass Bioenerg*, 2011, 35(3): 1021–1029.
- [7] 刘红明, 李进学, 杜玉霞, 龙春瑞, 周先艳, 等. 不同专用肥施肥水平对柠檬幼树光合生理特性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017, (4): 112–117.
Liu MH, Li JX, Du YX, Long CR, Zhou XY, et al. Effects of different special fertilizer levels on photosynthetic physiological characteristics of young lemon trees[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017, (4): 112–117.
- [8] Broge NH, Mortensen JV. Deriving green crop area index and canopy chlorophyll density of winter wheat from spectral reflectance data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(1): 45–57.
- [9] Daughtry CST, Walthall CL, Kim MS, Colstoun EBD, Iii MM. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 74(2): 229–239.
- [10] 薄一宽. 油松、樟子松与白杆大树移植中光合与蒸腾变化及其移植保活技术研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2012.
- [11] Battie-Laclau P, Laclau JP, Beri C, Mietton L, Muniz MRA, et al. Photosynthetic and anatomical responses of *Eucalyptus grandis* leaves to potassium and sodium supply in a field experiment[J]. *Plant Cell Environ*, 2014, 37: 70–81.
- [12] Erel R, Yermiyahu U, Ben-Gal A, Dag A, Shapira O, Amnon S. Modification of non-stomatal limitation and photo-protection due to K and Na nutrition of olive trees[J]. *J Plant Physiol*, 2015, 177: 1–10.
- [13] Wang M, Zheng QS, Shen QR, Guo SW. The critical role of potassium in plant stress response[J]. *Int J Mol Sci*, 2013, 14: 7370–7390.
- [14] 陆志峰, 鲁剑巍, 潘勇辉, 鲁飘飘, 李小坤, 等. 钾素调控植物光合作用的生理机制[J]. 植物生理学报, 2016, 52(12): 1773–1784.
Lu ZF, Lu JW, Pan YH, Lu PP, Li XK, et al. Potassium regulates the physiological mechanism of plant photosynthesis[J]. *Plant Physiology Journal*, 2016, 52(12): 1773–1784.
- [15] 贾瑞丰. 降香黄檀人工促进心材形成的研究[D]. 中国林业科学研究院, 2014.
- [16] 王丽云, 刘小金, 徐太平, 杨曾奖, 张宁南, 等. 生长调节剂对降香黄檀营养生长与生殖生长的影响[J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(5): 86–90.
Wang LY, Liu XJ, Xu DP, Yang ZJ, Zhang NN, et al. Effects of plant growth regulators on vegetative and reproductive growth of *Dalbergia odorifera*[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2017, 38(5): 86–90.
- [17] 董文统, 刘君昂, 周国英, 张茜, 何苑峰, 苏圣淞. 降香黄檀炭疽病药剂筛选及林间防效[J]. 植物保护, 2017, 43(3): 222–227.
Dong WT, Liu JA, Zhou GY, Zhang X, He YH, Su SS. The screening and efficacy of effective fungicides against anthracnose of *Dalbergia odorifera*[J]. *Plant Protection*, 2017, 43(3): 222–227.
- [18] 郑坚, 吴朝辉, 陈秋夏, 马晓华, 夏海涛, 王金旺. 遮荫对降香黄檀幼苗生长和生理的影响[J]. 林业科学, 2016, 52(12): 50–57.
Zheng J, Wu CH, Chen QX, Ma XH, Xia HT, Wang JW. Effect of shading on the growth and physiology of *Dalber-*

- gia odorifera*[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2016, 52(12): 50–57.
- [19] 叶子飘, 李进省. 光合作用对光响应的直角双曲线修正模型和非直角双曲线模型的对比研究[J]. 井冈山大学学报: 自然科学版, 2010, 31(3): 38–44.
Ye ZP, Li JS. Comparative investigation light response of photosynthesis on non-rectangular hyperbola model and modified model of rectangular hyperbola[J]. *Journal of Jinggangshan University: Natural Science Edition*, 2010, 31(3): 38–44.
- [20] 杨丽芝, 潘春霞, 邵珊瑚, 陶晨悦, 王威, 应叶青. 多效唑和干旱胁迫对毛竹实生苗活力、光合能力及非结构性碳水化合物影响[J]. 生态学报, 2018, 38(6): 2082–2091.
Yang LZ, Pan CX, Shao SL, Tao CY, Wang W, Ying YQ. Effects of PP₃₃₃ and drought stress on the activity, photosynthetic characteristics, and non-structural carbohydrates of *Phyllostachys edulis* seedlings[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(6): 2082–2091.
- [21] 叶子飘. 光合作用对光和 CO₂ 响应模型的研究进展[J]. 植物生态学报, 2010, 34(6): 727–740.
Ye ZP. A review on modeling of responses of photosynthesis to light and CO₂[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(6): 727–740.
- [22] Pinkard EA, Beadle CL. Effects of green pruning on growth and stem shape of *Eucalyptus nitens* (Deane and Maiden) Maiden[J]. *New Forests*, 1998, 15(2): 107–126.
- [23] Ovaska J, Walls M, Mutikainen P. Changes in leaf gas exchange properties of cloned *Betula pendula* saplings after partial defoliation[J]. *J Exp Bot*, 1992, 43(255): 1301–1307.
- [24] Layne DR, Flore JA. End-product inhibition of photosynthesis in *Prunus cerasus* L. in response to whole-plant source-sink manipulation[J]. *J Am Soc Hort Sci*, 1995, 120: 583–599.
- [25] Suelter CH. Enzymes activated by monovalent cations[J]. *Science*, 1970, 168: 789–795.
- [26] 郑炳松, 程晓建, 蒋德安, 翁晓燕. 钾元素对植物光合速率、Rubisco 和 RCA 的影响[J]. 浙江林学院学报, 2002, 19(1): 104–108.
Zhen BS, Cheng XJ, Jiang DA, Wong XY. Effects of potassium on Rubisco, RCA and photosynthetic rate of plant[J]. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2002, 19(1): 104–108.
- [27] Bednarz CW, Oosterhuis DM, Evans RD. Leaf photosynthesis and carbon isotope discrimination of cotton in response to potassium deficiency[J]. *Environ Exp Bot*, 1998, 39: 131–139.
- [28] Longstreth DJ, Nobel PS. Nutrient influences on leaf photosynthesis: Effects of nitrogen, phosphorus and potassium for *Gossypium hirsutum* L. [J]. *Plant Physiol*, 1980, 65: 541–543.
- [29] Dekov J, Velichkov D. Ultrastructural and functional changes in chloroplasts of maize plants at various levels of potassium nutrition and water stress[J]. *Plant Physiol*, 1992, 18: 3–9.
- [30] 梁晓芳, 于振文. 施钾时期对冬小麦旗叶光合特性和籽粒淀粉积累的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(8): 1349–1352.
Liang XF, Yu ZW. Effect of potassium application stage on photosynthetic characteristics of winter wheat flag leaves and on starch accumulation in wheat grain[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(8): 1349–1352.
- [31] 周多多, 蒋少伟, 吴桂林, 李君. 不同水分条件下胡杨光响应曲线拟合模型比较[J]. 植物科学学报, 2017, 35(3): 406–412.
Zhou DD, Jiang SW, Wu GL, Li J. Comparison of light response models of photosynthesis in *Populus euphratica* Oliv. grown under contrasting groundwater conditions[J]. *Plant Science Journal*, 2017, 35(3): 406–412.
- [32] 刘思祝. 不同光照条件下红鳞蒲桃幼苗生长特性研究[D]. 南宁: 广西大学, 2012.
- [33] 段伟, 赵阳, 王保平, 冯延芝, 乔杰, 等. 基于光响应曲线特征参数的楸叶泡桐优良无性系选择[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(6): 107–112, 118.
Duan W, Zhao Y, Wang BP, Feng YZ, Qiao J, et al. Selection of *Paulownia catalpifolia* clones based on photosynthetic light-response curve parameters[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2017, 32(6): 107–112, 118.
- [34] 田晓飞. 控释氮肥、钾肥及生物炭对棉花生长和土壤养分状况的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017.
- [35] 孙哲, 史春余, 刘桂玲, 高俊杰, 柳洪鹏, 等. 干旱胁迫与正常供水钾肥影响甘薯光合特性及块根产量的差异[J]. 植物营养与肥料科学, 2016, 22(4): 1071–1078.
Sun Z, Shi CY, Liu GL, Gao JJ, Liu HJ, et al. Effects of potassium fertilizer and drought stress on photosynthetic characteristics and tuber yield of sweet potato[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(4): 1071–1078.
- [36] Farquhar GD, Sharkey TD. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. *Annu Rev Plant Physiol*, 1982, 33(3): 317–345.
- [37] 李辛, 赵文智. 荒漠区植物雾冰藜光合特性对混合盐碱胁迫的响应[J]. 生态学报, 2018, 38(4): 1183–1193.
Li X, Zhao WZ. Response of various salt-alkaline mixed stresses on the photosynthetic characteristics of *Bassia dasyphylla* in a desert region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(4): 1183–1193.
- [38] 闫萌萌, 王铭伦, 王洪波, 王月福, 赵长星. 光质对花生幼苗叶片光合色素含量及光合特性的影响[J]. 应用生态学报,

2014, 25(2): 483–487.

Yan MM, Wang ML, Wang HB, Wang YF, Zhao CX. Effects of light quality on photosynthetic pigment contents and photosynthetic characteristics of peanut seedling leaves[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(2): 483–487.

- [39] 齐豫川, 潘远智, 杨亚男, 鲜小林, 陈睿, 刘柿良. 氮、磷、钾肥配施对桂花品种‘金玉台阁’开花性状及叶片中叶绿素

和营养元素含量的影响[J]. *植物资源与环境学报*, 2017, 26(2): 35–45.

Qi YC, Pan YZ, Yang YN, Xian XL, Chen R, Liu SL. Effects of combined application of nitrogen, phosphorous and potassium fertilizers on flowering traits and contents of chlorophyll and nutrient elements in leaves of *Osmanthus fragrans* ‘Jinyu Taige’ [J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2017, 26(2): 35–45.

(责任编辑: 周 媛)

《植物科学学报》订阅方式

订阅方式一: 全国各地邮局均可订阅(邮发代号: 38–103);

订阅方式二: 科学出版社期刊发行部: 联系电话 010–64017032, 64017539;

订阅方式三: 网上购买。搜淘宝店、微店店铺名称: 中科期刊(订阅及销售过刊)。

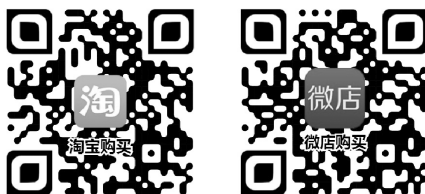
淘宝购买链接:

<https://item.taobao.com/item.htm?spm=a1z38n.10677092.0.0.11891debphcQKC&id=563435510476>

微店购买链接:

<https://weidian.com/item.html?itemID=2566716607>

或扫描下方二维码:



订阅方式四: 直接与本刊编辑部联系订阅(免收邮挂费)。

编辑部通讯地址: 武汉市东湖高新区九峰一路201号(九峰一路与光谷七路路口以北)中科院武汉植物园内《植物科学学报》编辑部

邮编: 430074, 电话: 027-87700820

E-mail: editor@wbpcas.cn; zwkxbjb@wbpcas.cn

《植物科学学报》编辑部

2018. 12. 20