

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201408032

柴胜丰, 庄雪影, 王满莲, 等. 濒危植物毛瓣金花茶与其同属广布种茶光合特性的比较[J]. 广西植物, 2015, 35(5): 623—630

Chai SF, Zhuang XY, Wang ML, et al. Comparison of photosynthetic characteristics between an endangered species *Camellia pubipetala* and its widespread congener *C. sinensis* [J]. Guihaia, 2015, 35(5): 623—630

濒危植物毛瓣金花茶与其同属广布种茶光合特性的比较

柴胜丰^{1,2}, 庄雪影², 王满莲¹, 蒋运生¹, 邹蓉¹, 韦霄^{1*}

(1. 广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室, 广西壮族自治区广西植物研究所, 中国科学院

广西桂林 541006; 2. 华南农业大学林学院, 广州 510642)

摘要: 毛瓣金花茶为山茶科山茶属植物, 该研究分别对野生种群和栽培种群的毛瓣金花茶及其同属广布种茶的光合特性进行了测定及差异比较。结果表明: 在野生和栽培环境下, 毛瓣金花茶的光补偿点(*LCP*) (分别为 1.17 和 3.87 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 和光饱和点(*LSP*) (分别为 395.8 和 423.6 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 均较低, 最大净光合速率(*P_{max}*) (分别为 4.25 和 3.91 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 较小, 是典型的阴生植物; 而茶的 *LCP* (分别为 6.57 和 9.09 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 较低, *LSP* (分别为 765.0 和 809.6 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 较高, *P_{max}* (分别为 9.37 和 9.75 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 较大, 为耐荫植物。野生和栽培的毛瓣金花茶的 *P_{max}*、表观量子效率(*AQY*)、最大羧化速率(*V_{cm_{max}}*)、最大电子传递速率(*J_{max}*) 和潜在最大净光合速率(*P_{max}*) 均显著低于茶 ($P < 0.05$), 这表明毛瓣金花茶的光合能力和 CO_2 利用能力都比茶要弱。栽培的毛瓣金花茶叶片的 *Chla*、*Chlb*、*Chl(a+b)* 含量与茶相比无显著差异 ($P > 0.05$), 表明毛瓣金花茶较低的光合能力与其叶绿素含量无关。野生和栽培的毛瓣金花茶的叶面积与茶相比无显著差异 ($P > 0.05$), 而比叶重则显著高于茶 ($P < 0.05$), 与茶相比, 毛瓣金花茶对光强的适应范围狭窄, 光合能力和 CO_2 利用能力低下, 这可能是其分布狭窄的重要生理原因。

关键词: 毛瓣金花茶; 茶; 光合特性; 光响应曲线; CO_2 响应曲线

中图分类号: Q945.79 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2015)05-0623-08

Comparison of photosynthetic characteristics between an endangered species *Camellia pubipetala* and its widespread congener *C. sinensis*

CHAI Sheng-Feng^{1,2}, ZHUANG Xue-Ying², WANG Man-Lian¹,
JIANG Yun-Sheng¹, ZOU Rong¹, WEI Xiao^{1*}

(1. Guangxi Key Laboratory of Plant Conservation and Restoration Ecology in Karst Terrain, Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences, Guilin 541006, China;

2. College of Forestry, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: The photosynthetic characteristics of the endangered species *Camellia pubipetala* and its widespread congener *C. sinensis* in both wild and cultivated populations were studied. The results showed that the wild and cultivated *C. pubipetala* had low light compensation point (*LCP*) (1.17 and 3.87 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively), light saturation point (*LSP*) (395.8 and 423.6 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively), and maximum photosynthetic rate (*P_{max}*)

收稿日期: 2014-10-28 修回日期: 2014-12-16

基金项目: 国家自然科学基金(31160137); 广西自然科学基金(2012GXNSFAA053067); 广西科学研究与技术开发项目(桂科重 1355001-5-4); 广西科技成果转化与推广项目(桂科转 14125003-2-18); 国际植物园保护联盟(BGCI)项目; 广西植物研究所基本业务费项目(桂植业 14004)。

作者简介: 柴胜丰(1980-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事植物保护生物学研究, (E-mail)sfchai@163.com。

*通讯作者: 韦霄, 博士, 研究员, 主要从事生物多样性保育研究, (E-mail)weixiao@gxib.cn。

(4.25 and 3.91 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively) indicating that it was a shade plant, while *C. sinensis* had relatively low LCP (6.57 and 9.09 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively), high LSP (765.0 and 809.6 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively) and P_{max} (9.37 and 9.75 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively) meaning that it was a shade tolerance plant. In comparison with *C. sinensis*, *C. pubipetala* had a significantly lower P_{max} , apparent quantum yield (AQY), maximum carboxylation rate (V_{cmax}), electronic transport rate (J_{max}) and potential maximum photosynthetic rate (P_{max}) in wild and cultivated populations. The photosynthetic and CO_2 utilization capacity of *C. pubipetala* were significantly lower than those of *C. sinensis*. The contents of chlorophyll a, chlorophyll b and chlorophyll (a+b) in leaves of *C. pubipetala* were not significantly different from those of *C. sinensis* in cultivated population, which indicated that the low photosynthetic capacity of *C. pubipetala* had nothing to do with its chlorophyll content. There was no significant difference in single leaf area of the two plant species in both wild and cultivated population, while the leaf mass per area (LMA) of *C. pubipetala* was significantly higher than that of *C. sinensis*. Thus, it is inferred that in comparison with *C. sinensis*, the narrow adaptation range of light, low photosynthetic and CO_2 utilization capacity in *C. pubipetala* may be responsible for its narrow distribution.

Key words: *Camellia pubipetala*; *C. sinensis*; photosynthetic characteristics; light response curves; CO_2 response curves

毛瓣金花茶 (*Camellia pubipetala*) 为山茶科 (Theaceae) 山茶属的常绿灌木或小乔木, 具有较高的观赏 (张宏达, 1998)、科学研究 (陶源等, 1994) 和药用保健价值 (韦霄等, 2011)。仅分布在广西西南部隆安和大新两县的局部生境, 分布区面积不到 100 km^2 , 生于海拔 120~430 m 的北热带石灰岩季雨林。由于人类对其生境的破坏和对资源的掠夺式采挖, 该物种栖息地面积逐渐缩小, 野外种群数量锐减, 资源濒于灭绝。目前, 该物种已列入《广西极小种群野生植物名录》、《广西第一批重点保护野生植物名录》、《中国珍稀濒危保护植物名录》和《IUCN 物种红色名录》。因此, 对毛瓣金花茶开展保护生物学研究, 探寻其致濒因子, 制定合理的保护策略, 对该物种的有效保护具有重要意义。

植物种濒危过程是该物种生活史各个环节及其竞争力、适应力等与环境因子相互作用的生态学过程, 因此有必要从植物生活史的不同侧面探求其濒危的原因 (张文辉等, 1999)。研究濒危植物的生理生态学特征, 并与其广布近缘种进行比较, 从而了解濒危植物与广布近缘种在生理生态特征上的差异, 找出濒危植物可能与环境条件不协调的生理生态特征, 对于揭示濒危植物的濒危机制至关重要 (祖元刚等, 1999)。光合作用决定植物的能量吸收和有机物的积累, 它是其它一切生命活动和生理过程的基础, 与植物的生长、发育密切相关, 因此对植物光合生理生态特性进行研究, 可以为进一步阐明植物生存及其分布的内在机制提供理论依据 (Macarthur *et al.*, 2002)。濒危植物在生理生态学方面一般存在

生存力和适应力较差的共性, 在相同条件下, 多数濒危植物的光合、呼吸和蒸腾等生理代谢速率比其非濒危近缘种要低 (张文辉等, 2002)。如裂叶沙参 (*Adenophora lobophylla*) 的光合速率和水分利用效率在一天中均低于其广布近缘种泡沙参 (*A. potaninii*) (祖元刚等, 1998); 与乳源木莲 (*Manglietia yuyuanensis*) 和巴东木莲 (*M. patungensis*) 相比, 濒危物种华木莲 (*Sinomanglietia glauca*) 的净光合速率、蒸腾速率、表观量子效率、羧化效率、光补偿点等较高, 而水分利用效率、光饱和点、 CO_2 饱和点等较低, 华木莲对水湿条件要求较高, 这与其濒危机制有很大关系 (郭起荣等, 2003); 濒危植物四合木 (*Tetraena mongolica*) 的光合速率和水分利用效率均低于其近缘种霸王 (*Zygophyllum xanthoxylon*), 光合能力和对干旱环境适应能力弱于霸王, 这可能是其濒危的生理方面的重要原因 (石松利等, 2012); 濒危种 *Syringa pinnatifolia* 的净光合速率和对 CO_2 的吸收能力均低于其同属广布种 *S. oblata* (Cui *et al.*, 2004)。这些研究对濒危植物濒危机制的阐明具有重要意义, 并为其迁地保护和种群恢复提供了科学依据。然而, 上述研究只是在野生或栽培两种生境之一下进行比较, 并不能反映植物在变化环境中的适应能力, 如能同时在野生和栽培条件下分别比较濒危种和广布近缘种的光合特性的差异, 研究结果将更有说服力。

毛瓣金花茶仅见于群落保存较好、郁闭度较高 (70% 以上) 的北热带石灰岩季雨林下, 而茶 (*Camellia sinensis*) 的分布范围更为广泛, 野生种遍及

于长江以南各省区,既分布于光照较强的林缘和路边,亦可见于郁闭度较高的林下(张宏达,1998)。这可能与两个物种不同的需光特性有关。为此,本研究拟比较野生种群和栽培种群的毛瓣金花茶与茶的光合特性的差异,探讨毛瓣金花茶分布狭隘的原因,并为其迁地保护和种群恢复提供科学依据。

1 研究地区和研究方法

1.1 研究区自然概况

本研究分别对野生种群和栽培种群的毛瓣金花茶和茶的光合特性进行测定。野生种群位于广西隆安县龙虎山自然保护区内。该地属北热带季风气候,夏热冬暖,冬无严寒,雨量充沛,相对湿度较大。

年均气温 21.8 °C,最热月均温 33.2 °C,最冷月均温 13.2 °C,年降水量 1 500 mm,大多集中在夏秋两季,年均日照时数 1 532 h。毛瓣金花茶分布于岩溶地貌的钙质石灰土上,多见于群落保存较好的山坳或山坡中下部,茶分布于由砂页岩发育而成的酸性土上,一般位于林缘、路边或林下。毛瓣金花茶和茶的高度相近,为 3~5 m。栽培种群位于广西桂林雁山广西植物研究所内。属中亚热带季风气候区,年均气温 19.2 °C,最热月均温 28.4 °C,最冷月均温 7.7 °C,冬季有霜冻,年积温 6 950 °C。年降雨量 1 655.5 mm,多集中于春夏季节,年日照时数为 1 550 h。土壤为砂页岩及第四纪红土发育而成的酸性红壤, pH 值为 5.5~6.5。毛瓣金花茶位于濒危园内,茶位于油茶品种园内。各种群概况见表 1。

表 1 各种群分布地概况

Table 1 General characteristics of populations

| 种群 Population | 分布地 Location | 经纬度 Geographic coordinate | 海拔 Altitude (m) | 群落郁闭度 Canopy | 主要伴生树种 Main associated tree species |
|--|---|---------------------------------|-----------------------|-----------------|---|
| 野生毛瓣金花茶 Wild <i>Camellia pubipetala</i> | 广西龙虎山自然保护区 Longhushan Nature Reserve | 107°37' E, 22°57' N | 140~180 | 0.75~0.90 | 米杨噎 (<i>Streblus tonkinensis</i>)、苹婆 (<i>Sterculia lanceolata</i>)、任豆 (<i>Zenia insignis</i>)、歪叶榕 (<i>Ficus cyrtophylla</i>)。 |
| 野生茶 Wild <i>C. sinensis</i> | | | | 0.6~0.85 | 苹婆、任豆、灰毛浆果楝 (<i>Cipadessa baccifera</i>)、青果榕 (<i>Ficus variegata</i>)。 |
| 栽培毛瓣金花茶 Cultivated <i>C. pubipetala</i> | 广西植物研究所 Guangxi Institute of Botany | 110°12' E, 25°11' N | 170~180 | 0.7 | 枫香 (<i>Liquidambar formosana</i>)、泡桐 (<i>Paulownia tomentosa</i>)、马尾松 (<i>Pinus massoniana</i>)。 |
| 栽培茶 Cultivated <i>C. sinensis</i> | | | | 0.5 | 樟树 (<i>Cinnamomum camphora</i>)、青冈 (<i>Cyclobalanopsis glauca</i>)、桂南木莲 (<i>Manglietia chingii</i>)。 |

1.2 研究方法

试验于 2012 年 8 月底进行,研究材料为毛瓣金花茶和茶的成年植株。在各种群中,分别选取具有代表性的植株进行光合和生理指标的测定。采用 Li-6400 便携式光合系统 (Li-Cor, Inc, 美国) 测定野生种群和栽培种群的毛瓣金花茶和茶的光响应曲线和 CO₂ 响应曲线。取正常生长的植株 4 株,选择树冠中部外层一年生枝的中位叶进行光合测定,每株 1 片叶,测定其叶绿素含量、叶面积和比叶重。

1.2.1 光合—光响应曲线的测定 选择晴朗天气进行,测定时间为上午 9:00—12:00。测量前对待测叶片采用人工光源进行诱导。光合测定时,设定空气流速为 0.5 L · min⁻¹,叶片温度为 28 °C,CO₂ 浓度为 400 μmol · mol⁻¹ (用 CO₂ 钢瓶控制浓度)。光强梯度设定为 1 500、1 200、1 000、800、600、400、200、150、100、50、20、10、0 μmol · m⁻² · s⁻¹,测定时每一光强下平衡 150~180 s,系统自动记录不同光强下

的净光合速率 (P_n)。

1.2.2 光合—CO₂ 响应曲线的测定 在上午 9:00—12:00 进行测定。测量前对待测叶片进行诱导,测定时设定空气流速为 0.5 L · min⁻¹,叶温为 28 °C,依据光响应曲线的测定结果,设定光强为其光饱和点附近光强,毛瓣金花茶为 600 μmol · m⁻² · s⁻¹,茶为 1 000 μmol · m⁻² · s⁻¹。CO₂ 浓度设定为 400、300、200、100、70、40、70、100、200、300、400、600、800、1 000、1 200、1 500 μmol · mol⁻¹ (用 CO₂ 钢瓶控制浓度),测定时在每个 CO₂ 下平衡 150~180 s,系统自动记录不同 CO₂ 浓度下的 P_n 。

1.2.3 叶绿素含量的测定 从进行光合测定的植株上采集 3~5 枚成熟度和方位与光合指标测定时一致的叶片进行叶绿素含量的测定。用打孔器取 20 片 1 cm² 的小叶片,95%乙醇提取叶片叶绿素,测定提取液在波长 665 nm 和 649 nm 下吸光值,计算出叶绿素 a (Chla) 和 b (Chlb) 的含量及叶绿素 a 与 b

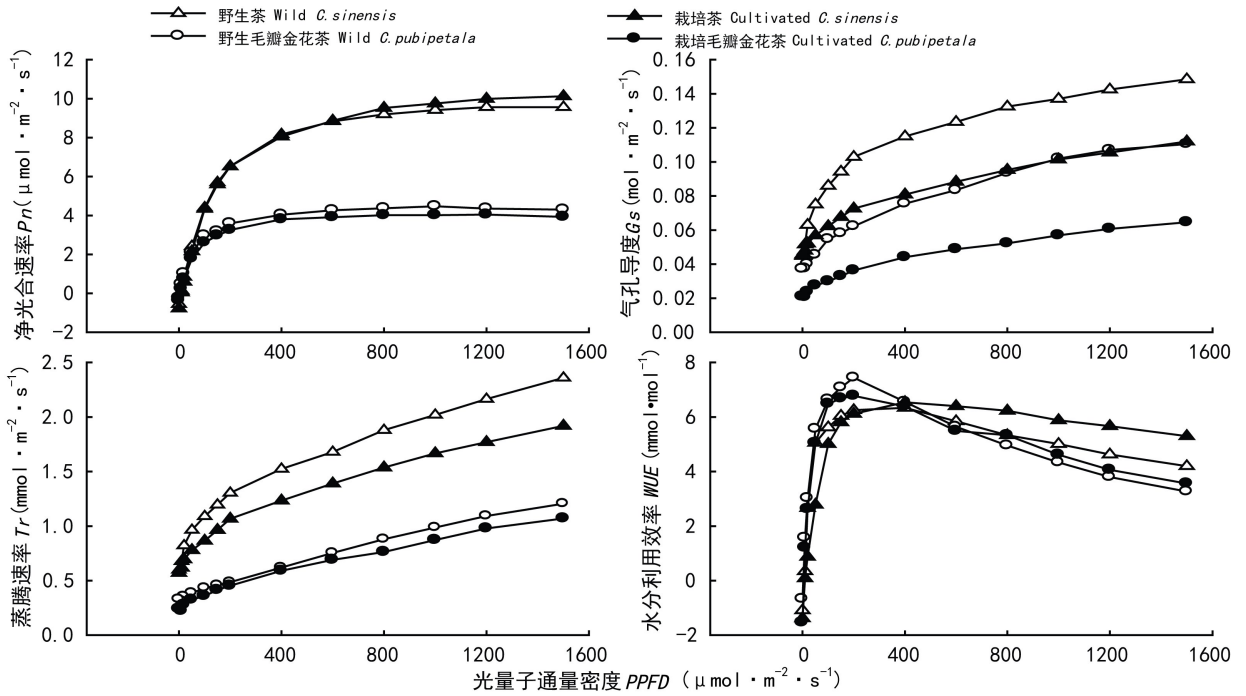


图 1 毛瓣金花茶和茶叶片净光合速率、气孔导度、蒸腾速率和水分利用效率对光强的响应

Fig. 1 Responses of net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s), transpiration rate (T_r) and water use efficiency (WUE) to light intensity ($PPFD$) in leaves of *Camellia pubipetala* and *C. sinensis*

的比值($Chla/Chlb$)(李合生, 2000)。

1.2.4 叶面积和比叶重的测定 取 20 片成熟叶片, 先用 Li-3000 叶面积仪测定其叶面积, 再在 $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下处理 30 min, $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干 24 h 后, 用电子天平称干重, 计算比叶重 (LMA) (单位面积叶干重, $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)。

1.3 数据分析

1.3.1 光合—光响应曲线分析 采用 Bassman *et al.* (1991) 的方法拟合光合—光响应曲线方程为 $P_n = P_{\max}(1 - C_0 e^{\Phi PFD / P_{\max}})$, 式中 P_{\max} 为最大净光合速率, C_0 为度量弱光下净光合速率趋于 0 的指标, Φ 为弱光下光化学量子效率。通过模型的适合性检验, 若拟合效果良好, 光补偿点 (LCP) 的计算公式为 $LCP = P_{\max} \ln(C_0) / \Phi$, 假定 P_n 达到 P_{\max} 的 99% 时的光强为其光饱和点 (LSP), 则 $LSP = P_{\max} \ln(100C_0) / \Phi$ 。表观量子效率 (AQY) 为 $0\sim 100\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光强范围内净光合速率与光强直线的斜率。提取光响应曲线测定过程中不同光强下的气孔导度 (G_s) 和蒸腾速率 (T_r) 进行分析, 并计算水分利用效率 ($WUE = P_n / T_r$) (温达志, 1997)。

1.3.2 光合— CO_2 响应曲线分析 对低胞间 CO_2 浓度 ($0 < C_i < 200\ \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$) 下的光合— CO_2 响应曲线进行直线回归, 计算光呼吸速率、羧化效率和

CO_2 补偿点。

拟合方程: $P_n = -R_p + CE * C_i$

式中, P_n 为净光合速率, R_p 为光呼吸速率, CE 为羧化效率, C_i 为胞间 CO_2 浓度 (Herrick *et al.*, 1999)。当 $P_n = 0$ 时, C_i 即为 CO_2 补偿点 (CCP), 因光下的暗呼吸很小, 把回归直线与 y 轴的交点近似看作光呼吸速率 R_p 。

采用叶子飘 (2010) 的直角双曲线修正模型计算 CO_2 饱和点 (CSP) 和潜在最大净光合速率 (P_m)。

利用 P_n-C_i 曲线计算出 Rubisco 的最大羧化速率 (V_{cmax}) 和最大电子传递速率 (J_{max})。

V_{cmax} 由下面的方程拟合求得:

$$P_n = V_{\text{cmax}} (C_i - \Gamma^*) / [C_i + K_c (1 + O_i / K_o)] - R_d$$

式中, C_i 是胞间 CO_2 浓度, Γ^* 为 CO_2 补偿点, K_c , O_i 和 K_o 分别为 Rubisco 对 CO_2 的米氏常数、空气氧浓度和 Rubisco 对 O_2 的米氏常数, R_d 为截距 (Long *et al.*, 2003)。

J_{max} 由下式求得:

$$J_{\text{max}} = 4(P_{\text{max}}' + R_d)(C_i' + 2\Gamma^*) / (C_i' - \Gamma^*)$$

式中, P_{max}' 和 C_i' 分别为参比室 CO_2 浓度为 $1\ 500\ \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 时的实测值 (Loustau *et al.*, 1999)。

1.3.3 数据处理 采用 SPSS13.0 (SPSS Inc., USA) 软件对测定的参数进行显著性检验 (Duncan 法), 用 Sigmaplot 9.0 (SPSS Inc., USA) 绘图。

2 结果与分析

2.1 毛瓣金花茶和茶光合生理指标对光强的响应

毛瓣金花茶和茶的 P_n 均随光量子通量密度 ($PPFD$) 的升高而增强, 在 $0 \sim 200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内, P_n 随 $PPFD$ 的升高呈直线上升, 此后缓慢上升, 直至达到光饱和点。 $PPFD$ 在 $0 \sim 20 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内, 野生和栽培毛瓣金花茶的 P_n 高于茶, $PPFD$ 大于 $20 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 尤其是大于 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 后, 毛瓣金花茶的 P_n 则大大低于茶 (图 1), 表明毛瓣金花茶的光合能力比茶要弱。毛瓣金花茶和茶的气孔导度 (G_s) 均随光强的升高而增大, 野生和栽培茶的 G_s 均高于毛瓣金花茶, 表明茶有更强的潜在气体交换能力, 从而使其具有较高的光合速率 (图 1)。蒸腾速率 (Δ) 的变化趋势与

G_s 的变化趋势基本一致。在野生种群和栽培种群, 毛瓣金花茶和茶的水分利用效率 (WUE) 均随光强的增强先升高后降低, 毛瓣金花茶的 WUE 在 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时达到峰值, 此后迅速下降; 茶的 WUE 在 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时达到峰值, 此后缓慢下降。当光强超过 $600 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 毛瓣金花茶的 WUE 低于茶 (图 1)。与茶相比, 毛瓣金花茶在低光强下 WUE 较高, 可能与其适应恶劣岩溶生境有关, 而高光强下的 WUE 大幅降低是其不适应强光的一种表现。

2.2 毛瓣金花茶和茶的光合一光响应参数

无论野生种群还是栽培种群, 毛瓣金花茶的 P_{\max} 、 LCP 和 LSP 均显著低于茶 ($P < 0.05$) (表 2), 毛瓣金花茶表现出阴生植物特征, 而茶则为耐荫植物。毛瓣金花茶的 AQY 显著低于茶 ($P < 0.05$), 这表明毛瓣金花茶虽为阴生植物, 但其对弱光的利用能力仍低于茶。与野生种群相比, 栽培种群的毛瓣金花茶和茶的 LCP 显著升高 ($P < 0.05$), 其余指标则无显著变化。

表 2 毛瓣金花茶和茶的光合一光响应参数

Table 2 Photosynthetic parameters derived from P_n -light response curves of *C. pubipetala* and *C. sinensis*

| 种群 Population | P_{\max} ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) | LCP ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) | LSP ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) | AQY ($\mu\text{mol} \cdot \mu\text{mol}^{-1}$) |
|---|---|--|--|---|
| 野生毛瓣金花茶 Wild <i>Camellia pubipetala</i> | 4.25 ± 0.63b | 1.17 ± 0.27d | 395.8 ± 47.2b | 0.035 ± 0.001b |
| 野生茶 Wild <i>C. sinensis</i> | 9.37 ± 0.44a | 6.57 ± 1.38b | 765.0 ± 65.5a | 0.049 ± 0.001a |
| 栽培毛瓣金花茶 Cultivated <i>C. pubipetala</i> | 3.91 ± 0.15b | 3.87 ± 0.32c | 423.6 ± 54.5b | 0.032 ± 0.003b |
| 栽培茶 Cultivated <i>C. sinensis</i> | 9.75 ± 0.27a | 9.09 ± 1.21a | 809.6 ± 30.3a | 0.047 ± 0.002a |

注: 数据以均值 ± 标准差表示, 同列不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

Note: Data represent mean ± SD ($n = 4$), different letters in the same column show significant differences ($P < 0.05$), the same below.

2.3 毛瓣金花茶和茶的光合一 CO_2 响应参数

毛瓣金花茶和茶的 P_n 均随胞间 CO_2 浓度 (C_i) 的升高而升高, C_i 在 $0 \sim 400 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 范围内, P_n 迅速上升, C_i 在 $400 \sim 800 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 范围内, P_n 缓慢上升, C_i 超过 $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 以后, P_n 基本保持稳定 (图 2)。相同 C_i 下野生和栽培的毛瓣金花茶的 P_n 均明显低于茶, 表明毛瓣金花茶对 CO_2 的利用能力较低。毛瓣金花茶的潜在最大净光合速率 (P_{\max})、羧化效率 (CE)、最大羧化速率 (V_{cmax}) 和最大电子传递速率 (J_{max}) 均显著低于茶 ($P < 0.05$) (表 3), 这是其光合能力和 CO_2 利用能力低下的主要原因。野生毛瓣金花茶的 CO_2 补偿点 (CCP) 和 CO_2 饱和点 (CSP) 与茶相比无显著差异 ($P > 0.05$); 栽培毛瓣金花茶的 CCP 显著高于茶 ($P < 0.05$), CSP 无显著差异 ($P > 0.05$)。与野生种群

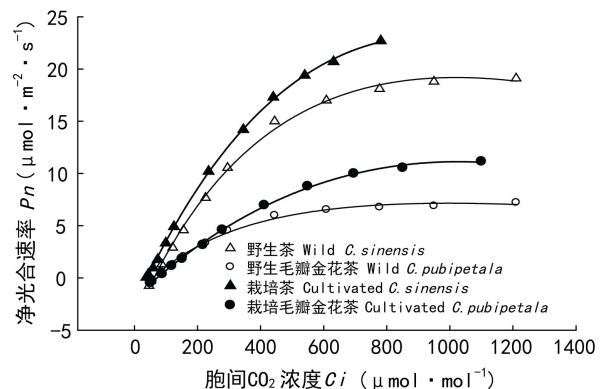


图 2 毛瓣金花茶和茶叶片净光合速率对胞间 CO_2 的响应
Fig. 2 Responses of P_n to C_i in leaves of *C. pubipetala* and *C. sinensis*

相比, 栽培毛瓣金花茶和茶的 P_m 、 CE 、 V_{cmax} 、 J_{max} 均有一定程度的升高。

表 3 毛瓣金花茶和茶的光合—CO₂响应参数Table 3 Photosynthetic parameters derived from Pn -CO₂ response curves of *C. pubipetala* and *C. sinensis*

| 种群 Population | P_m ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) | CSP ($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$) | CCP ($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$) | CE ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) | V_{cmax} ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) | J_{max} ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) |
|--|--|--|--|---|--|---|
| 野生毛瓣金花茶 Wild <i>Camellia pubipetala</i> | 7.37±0.85d | 1138.6±112.3a | 53.7±1.5b | 0.019±0.003c | 16.7±2.8c | 35.2±2.4d |
| 野生茶 Wild <i>C. sinensis</i> | 19.78±1.82b | 1054.8±86.5a | 56.3±5.2b | 0.047±0.001b | 41.1±1.3b | 92.5±3.1b |
| 栽培毛瓣金花茶 Cultivated <i>C. pubipetala</i> | 12.42±1.25c | 1123.7±108.5a | 69.2±3.9a | 0.024±0.001c | 20.6±0.7c | 58.3±7.7c |
| 栽培茶 Cultivated <i>C. sinensis</i> | 24.26±1.88a | 1000.0±76.3a | 40.4±2.2c | 0.063±0.006a | 52.8±5.2a | 111.2±13.8a |

表 4 毛瓣金花茶和茶叶片的叶绿素含量

Table 4 Chlorophyll contents in leaves of *C. pubipetala* and *C. sinensis*

| 种群 Population | Chla (mg · g ⁻¹) | Chlb (mg · g ⁻¹) | Chl (a+b) (mg · g ⁻¹) | Chla/Chlb |
|---|------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|------------|
| 野生毛瓣金花茶 Wild <i>Camellia pubipetala</i> | 4.44±0.74b | 1.92±0.42b | 6.36±1.16b | 2.33±0.11b |
| 野生茶 Wild <i>C. sinensis</i> | 6.93±1.24a | 3.06±0.38a | 10.24±1.15a | 2.28±0.17b |
| 栽培毛瓣金花茶 Cultivated <i>C. pubipetala</i> | 4.04±0.25b | 1.76±0.07b | 5.79±0.31b | 2.29±0.05b |
| 栽培茶 Cultivated <i>C. sinensis</i> | 4.32±0.26b | 1.69±0.16b | 6.01±0.37b | 2.58±0.14a |

2.4 毛瓣金花茶和茶叶片的叶绿素含量

野生毛瓣金花茶叶片的 Chla、Chlb 和 Chl(a+b) 含量均显著低于茶 ($P < 0.05$), Chla/Chlb 无显著差异 ($P > 0.05$) (表 4)。栽培毛瓣金花茶叶片的 Chla、Chlb 和 Chl(a+b) 含量与茶相比无显著差异 ($P > 0.05$), Chla/Chlb 则显著低于茶 ($P < 0.05$)。与野生种群相比,栽培毛瓣金花茶的 Chla、Chlb 和 Chl(a+b) 无显著差异 ($P > 0.05$),栽培茶的 Chla、Chlb 和 Chl(a+b) 显著低于野生茶 ($P < 0.05$)。

2.5 毛瓣金花茶和茶的叶面积和比叶重

无论是野生还是栽培,毛瓣金花茶的叶面积与茶相比无显著差异 ($P > 0.05$),而比叶重 (LMA) 则显著高于茶 ($P < 0.05$)。与野生种群相比,栽培毛瓣金花茶和茶的叶面积均显著降低 ($P < 0.05$),而 LMA 显著升高 ($P < 0.05$) (表 5)。

表 5 毛瓣金花茶和茶的叶面积和比叶重

Table 5 Leaf area and leaf mass per area of *C. pubipetala* and *C. sinensis*

| 种群 Population | 叶面积 Single leaf area (cm ²) | 比叶重 Leaf mass per area (g · m ⁻²) |
|--|--|--|
| 野生毛瓣金花茶 Wild <i>Camellia pubipetala</i> | 76.65±4.95a | 74.41±4.09b |
| 野生茶 Wild <i>C. sinensis</i> | 74.62±13.90a | 60.73±3.16c |
| 栽培毛瓣金花茶 Cultivated <i>C. pubipetala</i> | 65.57±7.21b | 83.09±4.31a |
| 栽培茶 Cultivated <i>C. sinensis</i> | 63.66±5.56b | 73.23±1.13b |

3 讨论与结论

LCP 和 LSP 反映了植物的需光特性,及其对强光和弱光的利用能力,是评价植物耐荫性的一个重要指标。一般认为,LCP 和 LSP 均较低的植物为典型的阴生植物,而 LCP 较低,LSP 较高的植物对光环境的适应性较强(冷平生等,2000;巨关升等,2005)。大体上阴生植物的 LCP 小于 20 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,LSP 为 500~1 000 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 或更低(蒋高明,2004)。本试验中,野生和栽培的毛瓣金花茶的 LCP(分别为 1.17 和 3.87 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 和 LSP(分别为 395.8 和 423.6 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 均较低,说明毛瓣金花茶是典型的阴生植物;而茶相应的 LCP(分别为 6.57 和 9.09 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 较低,LSP(分别为 765.0 和 809.6 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 较高,说明茶对光强的适应范围更广。AQY 反映植物对弱光的利用能力,野生和栽培的毛瓣金花茶的 AQY 均显著低于茶,说明毛瓣金花茶虽为阴生植物,但对弱光的利用能力仍低于茶。野生和栽培的毛瓣金花茶的 P_{max} (分别为 4.25 和 3.91 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 显著低于茶(分别为 9.37 和 9.75 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),说明毛瓣金花茶的光合能力显著低于茶。本研究结果与两个物种在野外的分布状况相一致,毛瓣金花茶一般分布于群落保存较好、郁闭度在 70% 以上的林下,而上层乔木树种较少、郁闭度(50% 以下) 较低的林下则未见有毛瓣金花茶分布;而茶既可分布于光

照较强的林缘和路边,亦可见于郁闭度较高的林下,其对光强的适应范围较宽。与野生种群相比,栽培种群的毛瓣金花茶和茶的 LCP 有一定程度的升高,这可能与栽培种群的光照相对较强有关。

叶片的 P_n 随 CO_2 浓度的升高而增加。一方面 CO_2 浓度升高为植物光合作用提供更多原料;另一方面 CO_2 浓度升高可抑制核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶(Rubisco)的加氧活性,进而抑制光呼吸,两者共同作用促进 P_n 的提高(孙彩霞等,2010)。当 CO_2 浓度提高到 CO_2 饱和点附近, P_n 会趋于稳定,此时叶片的潜在光合能力 P_m 主要受核酮糖-1,5-二磷酸(RUBP)再生速率的影响(黄红英等,2009)。

V_{\max} 是 RUBP 饱和最大羧化速率,其大小主要取决于 Rubisco 的数量和活性; J_{\max} 代表 RUBP 再生能力,其与 RuBP 再生的整个系统有关(孙谷畴等,2001), P_m 为 CO_2 饱和阶段的光合速率,与光合电子传递和光合磷酸化活性有关(Coste *et al.*, 2005)。本研究中野生和栽培毛瓣金花茶的 V_{\max} 、 J_{\max} 和 P_m 均显著低于茶,表明毛瓣金花茶叶片中 Rubisco 的数量和活性较低,RuBP 的再生速率较弱,与茶相比,毛瓣金花茶对 CO_2 利用效率较低。栽培种群毛瓣金花茶的 P_m 可达 $12.42 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,远远高于其 P_{\max} ($3.91 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),表明 CO_2 浓度是光合速率的一个重要限制因子,提高环境中 CO_2 浓度可促进毛瓣金花茶更快生长。

对于不同植物种而言,叶绿素含量的高低并不能作为衡量光合速率高低的指标。在正常情况下,很多植物叶片一般含有充足的甚至过剩的叶绿素,当叶绿素含量超过某一限制值后,其含量的高低与净光合速率大小没有必然联系(EI-Sharkawy *et al.*, 1965)。野生种群的毛瓣金花茶叶片的 Chla、Chlb 和 Chl(a+b) 含量均显著低于茶,而栽培种群 3 个指标与茶相比无显著差异。在这两种生境下,毛瓣金花茶的光合能力均显著低于茶,可见叶片叶绿素的差异并不是引起两者光合能力差异的主要原因。与野生种群相比,栽培种群茶的 Chla、Chlb 和 Chl(a+b) 含量显著降低,Chla/Chlb 显著升高,这是由野生种群和栽培种群光照强度的不同引起的。在野生种群,光照强度较低,茶可通过提高叶片叶绿素的含量,尤其是叶绿素 b 的含量来增强对弱光的吸收,保持较强的光合能力,表明茶可通过自身叶绿素含量的变化适应不同光强。毛瓣金花茶在野生种群和栽培种群的叶绿素含量无显著差异,表明毛瓣

金花茶对不同光强的自我调节能力不如茶,是其适应光强范围较窄的可能原因之一。

与阳生植物相比,阴生植物通常具有较大的叶面积和较低的比叶重(LMA)。本试验中,野生和栽培种群毛瓣金花茶的叶面积与茶相比无显著差异,而 LMA 则显著高于茶。可见本试验研究结果与以往观点并不一致(Wright *et al.*, 2004)。对于某一物种而言,其单叶面积和比叶重与植物长期生长的光环境密切相关。在弱光条件下,其单叶面积增大,LMA 降低,这是植物对弱光环境做出的典型形态学反应。与野生种群相比,栽培种群的毛瓣金花茶和茶的单叶面积减小,LMA 升高,这是植物对光照强度升高的形态学适应。在适度强光下,毛瓣金花茶仍具有一定的形态学适应能力。

本研究表明,与同属广布种茶相比,毛瓣金花茶对光强的适应范围狭窄,光合能力和 CO_2 利用能力低下。在当今生态环境破坏极为严重、适宜生境越来越少的条件下,这可能是其分布狭窄的重要原因。

参考文献:

- Bassman J, Zwier JC. 1991. Gas exchange characteristics of *Populus trichocarpa*, *Populus deltoides* and *P. trichocarpa* × *P. deltoides* clone[J]. *Tree Physiol*, **8**:145-159
- Coste S, Roggy JC, Imbert P. 2005. Leaf photosynthetic traits of 14 tropical rain forest species in relation to leaf nitrogen concentration and shade tolerance[J]. *Tree Physiol*, **25**(9): 1 127-1 137
- Cui HX, Jiang GM, Niu SL, *et al.* 2004. Gas exchanges of an endangered species *Syringa pinnatifolia* and a widespread congener *S. Oblate*[J]. *Photosynthetica*, **42**(4): 529-534
- EI-Sharkawy M, Hesketh J. 1965. Photosynthesis among species in relation to characteristics of leaf anatomy and CO_2 diffusion resistances[J]. *Crop Sci*, **5**:517-521
- Guo QR(郭起荣), Yu ZX(俞志雄), Shi JM(施建敏). 2003. A physio-ecological study on photosynthesis of *Sinomanglietia glauca* and two species in *Manglietia* Bl.(华木莲与木莲属两树种光合生理生态研究)[J]. *Acta Agric Univ Jiangxi*(江西农业大学学报), **25**(5): 645-651
- Herrick JD, Thomas RB. 1999. Effects of CO_2 enrichment on the photosynthetic light response of sun and shade of canopy sweetgum trees (*Liquidambar styraciflua*) in a forest ecosystem[J]. *Tree Physiol*, **19**:779-786
- Huang HY(黄红英), Dou XY(窦新永), Sun BY(孙蓓育), *et al.* 2009. Comparison of photosynthetic characteristics in two ecotypes of *Jatropha curcas* in summer(两种不同生态型麻疯树夏季光合特性的比较)[J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报), **29**(6): 2 861-2 867
- Jiang GM(蒋高明). 2004. Plant Ecophysiology(植物生理生态学)[M]. Beijing(北京): Higher Education Press(高等教育出版社)
- Ju GS(巨关升), Wu JY(武菊英), Zhao JF(赵军锋), *et al.* 2005. Study on the photosynthetic characteristics of the *Pennisetum alopecuroides* L. Spreng(观赏狼草光合特性的研究)

- [J]. *Acta Agric Nucl Sin*(核农学报), **19**(6):451-455
- Leng PS(冷平生), Yang XH(杨晓红), Hu Y(胡悦) *et al.* 2000. Studies on the characteristics of photosynthesis and transpiration of five gardening trees(5种园林树木的光合和蒸腾特性的研究)[J]. *J Beijing Agric Coll*(北京农学院学报), **15**(4):13-18
- Li HS(李合生). 2000. The Experiment Principle and Technique on Plant Physiology and Biochemistry(植物生理生化实验原理和技术)[M]. Beijing(北京): Higher Education Press(高等教育出版社)
- Long SP, Bernacchi CJ. 2003. Gas exchange measurements, what can they tell us about the underlying limitations to photosynthesis? Procedures and sources of error[J]. *J Exp Bot*, **54**:2 393-2 401
- Loustau D, Brahim MB, Gaudillère JP, *et al.* 1999. Photosynthetic responses to phosphorous nutrition in two-year-old maritime pine seedlings[J]. *Tree Physiol*, **19**:707-715
- Macarthur RH, Connell JH. 2000. The Biology of Populations [M]. New York: Wiley and Sons Press
- Shi SL(石松利), Wang YC(王迎春), Zhou HB(周红兵), *et al.* 2012. Comparative analysis of water related parameters and photosynthetic characteristics in the endangered plant *Tetraena mongolica* Maxim. and the closely related *Zygophyllum xanthoxylon* (Bunge) Maxim. (濒危种四合木与其近缘种霸王水关系参数和光合特性的比较)[J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报), **32**(4): 1 163-1 173
- Sun CX(孙彩霞), Hao JJ(郝健均), Wang J(王杰), *et al.* 2010. Responses of photosynthetic physiological characteristics of two transgenic cotton(*Gossypium hirsutum* L.) varieties to CO₂ concentration(两个品种转基因抗虫棉光合生理的 CO₂ 响应)[J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报), **30**(2): 504-510
- Sun GC(孙谷畴), Zhao P(赵平), Zeng XP(曾小平), *et al.* 2001. Influence of UV-B radiation on photosynthesis and nitrogen utilization of *Musa paradisiaca* grown in different nitrogen sources(UV-B辐射对香蕉光合作用和不同氮源利用的影响)[J]. *Acta Phytocool Sin*(植物生态学报), **25**(3): 317-324
- Tao Y(陶源), Deng CZ(邓朝佐). 1994. A primary report on the result of cross breeding of *Camellia pubipetala* and *Camellia polyodonta* (毛瓣金花茶与宛田红花油茶杂交育种成果初报)[J]. *J Beijing For Univ*(北京林业大学学报), **16**(3):112-114
- Wei X(韦霄), Huang XX(黄兴贤), Jiang YS(蒋运生), *et al.* 2011. Comparison of antioxidative activities of extracts from three yellow *Camellia*(3种金花茶组植物提取物的抗氧化活性比较)[J]. *Chin J Chin Mat Med*(中国中药杂志), **36**(5):639-641
- Wen ZD(温达志). 1997. Recent studies on plant water use efficiency under elevated atmospheric concentrations of carbon dioxide(大气二氧化碳浓度增高与植物水分利用效率)[J]. *J Trop Subtrop Bot*(热带亚热带植物学报), **5**(3): 83-90
- Wright IJ, Reich PB, Westoby M, *et al.* 2004. The worldwide leaf economics spectrum[J]. *Nature*, **428**:821-827
- Ye ZP(叶子飘). 2010. A review on modeling of responses of photosynthesis to light and CO₂ (光合作用对光和 CO₂ 响应模型的研究进展)[J]. *Chin J Plant Ecol*(植物生态学报), **34**(6):727-740
- Zhang HD(张宏达), Ren SX(任善湘). 1998. Flora of China, the Third Fascicle in Forty-Ninth Volume(中国植物志, 第49卷第3分册)[M]. Beijing(北京): Science Press(科学出版社)
- Zhang WH(张文辉), Zu YG(祖元刚), Liu GB(刘国彬). 2002. Population ecological characteristics and analysis on endangered cause of ten endangered plant species(十种濒危植物的种群生态学特征及致危因素分析)[J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报), **22**(9):1 512-1 520
- Zhang WH(张文辉), Zu YG(祖元刚), Ma KM(马克明). 1999. Analysis on the fractal characteristics of distribution patterns of *Adenophora lobophylla* and *A. Potaninii*(裂叶沙参与泡沙参种群分布格局分形特征的分析)[J]. *Chin J Plant Ecol*(植物生态学报), **23**(1):31-39
- Zu YG(祖元刚), Zhang WH(张文辉), Yan XF(阎秀峰), *et al.* 1999. Conservation Biology of Endangered Plant *Adenophora lobophylla* (濒危植物裂叶沙参保护生物学)[M]. Beijing(北京): Science Press(科学出版社)

(上接第 662 页 Continue from page 662)

- Yuan JH(袁菊红), Hu MH(胡绵好). 2013. SEM and XRD analyses of the roots and leaves of *Coleus* with selenium supplements under lead stress(铅胁迫下硒处理的彩叶草根系和叶片的 SEM/XRD 光谱学分析)[J]. *Acta Horti Sin*(园艺学报), **40**(3): 562-570
- Zhang ZM(张智猛), Wang SB(万书波), Dai LX(戴良香), *et al.* 2011. Effects of nitrogen application rates on nitrogen metabolism and related enzyme activities of two different peanut cultivars(施氮水平对不同花生品种氮代谢及相关酶活性的影响)[J]. *Sci Agric Sin*(中国农业科学), **44**(2): 280-290
- Zhao D(赵栋), Pan YZ(潘远智), Deng SH(邓仕槐), *et al.* 2010. Effects of simulated acid rain on physiological and ecological characteristics of *Camellia sasanqua* (模拟酸雨对茶梅生理生态特性的影响)[J]. *Sci Agric Sin*(中国农业科学), **43**(15): 3 191-3 198
- Zhao KF(赵可夫), Li FZ(李法曾). 1999. Halophyte of China(中国盐生植物)[M]. Beijing(北京): Science Press(科学出版社):173-177
- Zhao XJ(赵晓军), Liu QH(刘秋惠), Wang FX(王法祥). 2011. The research of *Coleus blumei* drought-tolerant(彩叶草耐旱性研究)[J]. *J Mudanjiang Teach Coll: Nat Sci Ed*(牡丹江师范学院学报·自然科学版), (3): 24-26
- Zhou MH(周满红), Jiang Y(江翌), He XF(何雪峰), *et al.* 2011. The production and cultivation techniques of *Coleus blumei*(彩叶草生产栽培技术)[J]. *Sci & Technol Inform Gansu*(甘肃科技纵横), **40**(1): 62-64