

4种幼苗对低温胁迫的光合生理响应

郭淑红, 薛立, 张柔, 杨振意

(华南农业大学林学院, 广东广州510642)

摘要:对海南红豆 *Ormosia pinnata*、南五味子 *Kadsura longipedunculata*、蒲桃 *Syzygium jambos* 和灰木莲 *Magnoliaceae glanca* 幼苗进行 3 ℃ 的低温处理后, 研究其叶片气体交换参数的变化, 了解低温下这 4 种树种的光合生理. 结果表明, 随着低温时间的延长, 4 种幼苗的净光合速率 (Pn)、气孔导度 (Gs)、蒸腾速率 (Tr) 不断下降; 海南红豆、南五味子和灰木莲幼苗叶片的细胞间隙 CO₂ 的摩尔分数 (x_{CO_2}) 持续上升, 气孔限制值 (Ls) 持续下降; 蒲桃的 x_{CO_2} 先降后升, Ls 先升后降. 低温胁迫 6 d 时, 海南红豆、南五味子、蒲桃和灰木莲的 Pn 分别为 -0.17、-0.21、0.27 和 0.15 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, Gs 分别为 0.005、0.017、0.003 和 0.006 $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, x_{CO_2} 分别为 440.8、439.6、309.8 和 404.8 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, Tr 分别为 0.11、0.39、0.09 和 0.11 $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, Ls 分别为 0.046、0.047、0.268 和 0.103. 主成分分析表明, 低温下幼苗的光合能力为蒲桃 > 灰木莲 > 南五味子 > 海南红豆.

关键词:低温胁迫; 幼苗; 光合生理; 主成分分析

中图分类号: S511; Q945.78

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2012)03-0373-05

Photosynthetic Response of Four Species Seedlings to Low Temperature Stress

GUO Shu-hong, XUE Li, ZHANG Rou, YANG Zhen-yi

(College of Forestry, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: In order to understand the photosynthetic physiology of seedlings of *Ormosia pinnata* and *Kadsura longipedunculata*, *Syzygium jambos* and *Magnoliaceae glanca* at low temperature, gas exchange parameters of the four species seedlings were studied. Results showed that net photosynthetic rate (Pn), stomatal conductance (Gs) and transpiration rate (Tr) continuously decreased with increasing low temperature time for the four species seedlings. Intercellular mole fraction of CO₂ (x_{CO_2}) continuously increased and stomata limitation (Ls) continuously decreased with increasing low temperature time for *O. pinnata*, *K. longipedunculata* and *M. glanca* seedlings, whereas x_{CO_2} decreased followed by an increase, and Ls increased and then decreased for *S. jambos* seedlings. When treated six days under low temperature, Pn of *O. pinnata*, *K. longipedunculata*, *S. jambos* and *M. glanca* was -0.17, -0.21, 0.27 and 0.15 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively; and their Gs was 0.005, 0.017, 0.003 and 0.006 $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively; x_{CO_2} was 440.8, 439.6, 309.8 and 404.8 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, respectively; Tr was 0.11, 0.39, 0.09 and 0.11 $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively; and Ls was 0.046, 0.047, 0.268 and 0.103, respectively. The photosynthetic ability of the four species seedlings under low temperature was evaluated by using principal component analysis, and its order was *S. jambos* > *M. glauca* > *K. longipedunculata* > *O. pinnata*.

Key words: low temperature stress; seedling; photosynthetic physiology; principal component analysis

光合作用是植物最基本的生命活动,也是植物合成有机物和获得能量的根本源泉^[1]. 光合过程中

的暗反应是由酶所催化的化学反应,因而受温度影响,所以温度是植物进行光合作用的必要条件. 然而

收稿日期: 2011-06-27

作者简介: 郭淑红 (1986—), 女, 硕士研究生; 通信作者: 薛立 (1958—), 教授, 博士, E-mail: forxue@scau.edu.cn

基金项目: 广东省林业局资助项目“林分改造优良乡土阔叶树种筛选”(F09054); 广东省林业科技创新专项资金项目 (2010KJCX013-01)

低温能直接影响光合机构的性能和活性^[2-3],降低植物利用光能的能力. 叶片是进行光合作用的主要器官^[4],也是植物的冷敏感部位^[5],许多热带和亚热带树种在低温胁迫下很容易受到伤害甚至死亡. 因而低温成为限制植物生长和地理分布的一项主要环境因子^[6],也影响热带和亚热带树种向北扩大栽移^[7-8]. 当植物的低温伤害症状出现时,光合速率明显降低. 气孔控制叶的蒸腾,也影响叶细胞内的 CO₂ 浓度,因而影响着光合速率^[9]. 因此,低温胁迫对植物光合特性的影响受到国内外的广泛关注^[10-13]. 然而,我国南方园林绿化树种的低温胁迫机理研究鲜有报道.

海南红豆 *Ormosia pinnata* 属蝶形花科红豆树属,主产中国海南岛临高、琼中、三亚一线以西一带的丘陵地区^[14],是热带和亚热带地区的重要用材和绿化树种,近年来引入广东,低温是其北移栽培育引种的首要限制因子. 南五味子 *Kadsura longipedunculata* 为五味子科南五味子属的常绿藤本植物^[15],分布于江苏、安徽等长江流域以南各省区^[16],是园林造景用的优良垂直绿化材料,还具有很高的药用价值. 蒲桃 *Syzygium jambos* 为桃金娘科常绿乔木,分布于我国东南部、华南至西南部;中南半岛和马来群岛亦有,喜温暖多湿气候^[17]. 灰木莲 *Magnoliaceae glanca* 属木兰科常绿阔叶大乔木,原产越南、印度尼西亚爪哇等地,现我国广东、广西、云南、福建等地均有栽培,且生长表现良好^[18]. 目前,鲜有低温胁迫对这4种树种光合生理特性影响的报道. 本研究以海南红豆、南五味子、蒲桃和灰木莲幼苗为材料,对比分析其光合生理特性对低温胁迫的响应,以期从光合生理角度了解这4种树种的抗寒生理机制,为其向北引种与栽培提供参考.

1 材料与方法

1.1 试验材料

以1年生海南红豆、南五味子、蒲桃和灰木莲的实生容器苗(购于广东省林木种苗示范基地)为材料,幼苗的基本情况见表1. 营养袋直径12 cm,高10 cm,袋内基质为林下表土与黄心土混合而成.

1.2 试验方法

每树种选6株生长良好和形态长势基本一致的幼苗为材料,移入RXZ智能型人工气候箱(宁波江南仪器厂)中. 光照设置为白天12 h,光照强度为109 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,夜间12 h,相对湿度保持在75%~85%. 以25 $^{\circ}\text{C}$ 为对照,进行第0 d测定. 将气候箱温度调到24 $^{\circ}\text{C}$,放入幼苗,以6 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$ 降温,幼苗在气候箱内经历约3.5 h降至(3.0 \pm 0.5) $^{\circ}\text{C}$,保持该温度为处理温度,分别在第2、4、6天进行测定.

表1 4种幼苗的基本情况¹⁾

Tab. 1 General characteristics of four species seedlings

树种	地径/cm	苗高/cm	冠幅/cm
海南红豆	0.775 \pm 0.15	14 \pm 1.91	8 \pm 0.82
南五味子	0.675 \pm 0.05	18 \pm 2.75	6 \pm 0.82
蒲桃	0.540 \pm 0.09	36 \pm 6.84	22 \pm 5.03
灰木莲	0.700 \pm 0.10	36 \pm 4.92	18 \pm 2.51

1) 表中数据为平均值 \pm 标准差.

在每株幼苗的第3~8位功能叶间选取3枚叶片挂牌标记,于早晨09:00—12:00采用美国LI-COR公司生产的Li-6400便携式光合系统分析仪测定幼苗叶片的净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、细胞间隙CO₂的摩尔分数(x_{CO_2})、蒸腾速率(Tr),每枚叶片测定3次. 测定条件:叶室温度控制在20~25 $^{\circ}\text{C}$,光照强度为1 000 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,CO₂的摩尔分数为400 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$,流速为500 $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$. 气孔限制值(Ls)计算公式如下^[19]:

$$Ls = (1 - x_{\text{CO}_2}/x_a), \quad (1)$$

式中 x_a 为大气CO₂摩尔分数.

2 结果与分析

2.1 低温胁迫对幼苗外部形态的影响

低温胁迫后,4种幼苗的外部形态出现明显差异. 低温胁迫2 d时,海南红豆叶片低垂,出现轻微卷曲,灰木莲叶片变软,南五味子、蒲桃外部形态无明显变化. 低温胁迫4 d时,海南红豆叶片变软发黄,少许老叶干枯,南五味子叶柄下垂,叶片变薄、内向卷曲且发黄,灰木莲叶片卷曲变黄,蒲桃叶片轻微变软. 胁迫6 d时,海南红豆、灰木莲半数叶片干枯脱落,南五味子小部分叶片枯黄,蒲桃变化不明显,仅部分叶片低垂. 由外部形态观察,蒲桃和南五味子的耐寒性较海南红豆和灰木莲强.

2.2 低温胁迫对净光合速率(Pn)的影响

Pn是光合系统功能的直接体现,也是植株光合系统工作正常与否的指标^[20]. 低温胁迫后,海南红豆、南五味子、蒲桃和灰木莲幼苗的Pn均明显下降,说明低温抑制这4种幼苗的Pn(图1). 0 d时,海南红豆、南五味子、蒲桃和灰木莲幼苗的Pn分别为2.99、5.06、6.71和4.49 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,可见,常温下蒲桃的净光合速率最大,海南红豆最小. 低温胁迫2 d时,海南红豆、南五味子、蒲桃和灰木莲幼苗的Pn急剧下降,分别比0 d降低89.25%、88.13%、93.49%和80.60%;低温胁迫4 d时,海南红豆、南五味子、蒲桃和灰木莲幼苗的Pn接近于0,说明此时这4种幼苗的光合作用受到明显的低温抑制,其光合速率略大于呼吸速率;低温胁迫6 d时,海南红豆和南五味子的Pn分别为-0.17和-0.21 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,表明此时幼苗的呼吸速率大于光

合速率,而蒲桃和灰木莲的 P_n 仍为正值,分别为 0.27 和 0.15 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,与 0 d 相比,降幅分别为 95.89% 和 96.55%,较海南红豆和南五味子的适应性强。

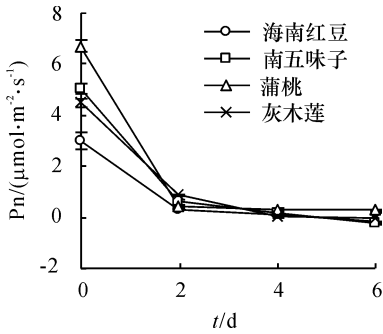


图1 低温胁迫下净光合速率的变化

Fig. 1 Changes in net photosynthetic rate under low temperature stress

2.3 低温胁迫对气孔导度 (G_s) 的影响

G_s 是影响光合速率的一个重要因素. 本试验中海南红豆、南五味子和蒲桃幼苗叶片的 G_s 均急剧下降后保持稳定,灰木莲则是下降后保持稳定,接着又下降(图2). 0 d 时,海南红豆、南五味子、蒲桃和灰木莲幼苗的 G_s 分别为 0.04、0.14、0.09 和 0.06 $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,即南五味子的 G_s 最大,海南红豆最小. 与 0 d 相比,海南红豆、南五味子、蒲桃和灰木莲幼苗的 G_s 在低温胁迫 2 d 时分别下降 88.24%、85.74%、96.19% 和 59.23%,此时灰木莲下降最小;低温胁迫 4 d 时,海南红豆、南五味子、蒲桃和灰木莲幼苗的 G_s 分别为 0.005、0.017、0.003 和 0.006 $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,与 0 d 相比,分别下降 88.81%、87.16%、96.33% 和 90.46%,灰木莲在 6 d 时仍较大幅度下降,而其他树种的 G_s 与 4 d 时相差不大。

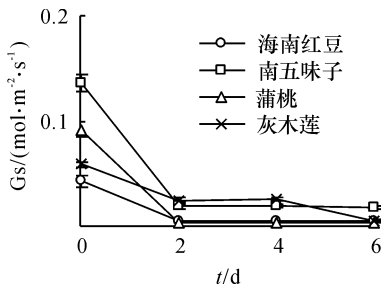


图2 低温胁迫下气孔导度的变化

Fig. 2 Changes in stomatal conductance under low temperature stress

2.4 低温胁迫对细胞间隙 CO_2 摩尔分数 (x_{CO_2}) 的影响

x_{CO_2} 是影响植物光合作用的一个重要因素,它为光合作用提供直接的合成碳源. 低温胁迫后,海南红豆、南五味子、灰木莲幼苗的 x_{CO_2} 均持续上升,而蒲桃幼苗先降后升(图3). 0 d 时,海南红豆、南五味子、

蒲桃和灰木莲幼苗的 x_{CO_2} 分别为 216.6、314.0、239.5 和 240.4 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$,南五味子最大,海南红豆最小. 与 0 d 相比,低温胁迫 2 d 时,海南红豆、南五味子和灰木莲幼苗的 x_{CO_2} 分别上升 30.11%、1.84% 和 14.78%,而蒲桃下降 18.59%;低温胁迫 4 d 时,蒲桃幼苗的 x_{CO_2} 较 0 d 上升;与 0 d 相比,低温胁迫 6 d 时,海南红豆、南五味子、蒲桃和灰木莲幼苗的 x_{CO_2} 分别为 440.8、439.6、309.8 和 404.8 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$,上升幅度分别达 50.85%、28.56%、29.33% 和 68.38%,南五味子和蒲桃的变动幅度比海南红豆和灰木莲小,说明此时 4 种幼苗吸收的 CO_2 减少,导致光合作用减弱,而南五味子和蒲桃较海南红豆和灰木莲的适应性强。

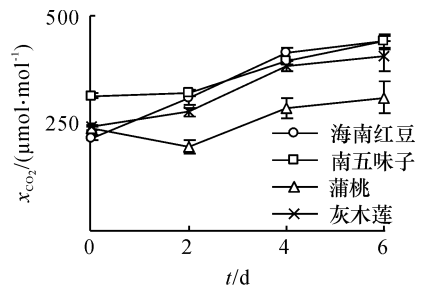


图3 低温胁迫下胞间 CO_2 摩尔分数的变化

Fig. 3 Changes in intercellular mole fraction of CO_2 under low temperature stress

2.5 低温胁迫对叶片蒸腾速率 (Tr) 的影响

蒸腾可降低叶片温度,加强对矿质元素的吸收,是植物自身保护与适应的一种措施. 低温胁迫后海南红豆、南五味子、蒲桃和灰木莲幼苗的叶片 Tr 明显下降,变化规律与 G_s 相似(图4). 0 d 时,海南红豆、南五味子、蒲桃和灰木莲幼苗的 Tr 分别为 0.82、2.0、1.98 和 1.25 $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. 以 0 d 为对照,低温胁迫 2 d 时,海南红豆、南五味子和蒲桃幼苗的 Tr 分别急剧下降 86.20%、79.59% 和 95.23%,之后变化和缓,而灰木莲在低温胁迫 2 d 时, Tr 急剧下降 55.99%,保持平稳后,第 4 d 又急剧下降;至低温胁迫 6 d 时,海南红豆、南五味子、蒲桃和灰木莲幼苗的 Tr 分别为 0.11、0.39、0.09 和 0.11 $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,比

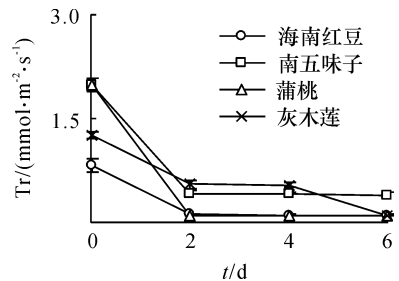


图4 低温胁迫下蒸腾速率的变化

Fig. 4 Changes in transpiration rate under low temperature stress

0 d 分别下降 86.91%、80.53%、95.23% 和 91.51%，4 个树种差异不明显。

2.6 低温胁迫对气孔限制值(Ls)的影响

Ls 是反映植物叶片对大气 CO₂ 相对利用效率大小的参数^[18]。低温胁迫后海南红豆、南五味子和灰木莲幼苗的 Ls 连续下降,而蒲桃的 Ls 则是先升后降(图 5)。0 d 时,海南红豆、南五味子、蒲桃和灰木莲幼苗的 Ls 分别为 0.448、0.200、0.366、0.367。低温胁迫 2 d 时,海南红豆、南五味子和灰木莲幼苗的 Ls 分别比对照下降 43.00%、1.59% 和 21.97%,而蒲桃上升 46.12%,之后开始下降;低温胁迫 4 d 时,海南红豆、南五味子和灰木莲的 Ls 继续下降,此时蒲桃的 Ls 仅比 0 d 时下降 6.09%;低温胁迫 6 d 时,海南红豆、南五味子、蒲桃和灰木莲的 Ls 分别为 0.046、0.047、0.268 和 0.103,较 0 d 时分别下降 89.78%、76.56%、26.79% 和 71.83%。蒲桃的 Ls 降幅明显小于其他树种,说明适应性较强。

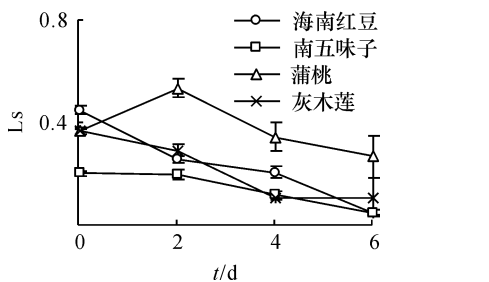


图 5 低温胁迫下气孔限制值的变化

Fig. 5 Changes in stomatal limit under low temperature stress

2.7 主成分分析法对 4 个树种抗寒性的综合评价

主成分综合评价具有全面性、可比性、合理性和可行性的优点^[21]。为了研究影响 4 个树种抗寒性的主导因素,采用主成分分析方法综合分析抗寒指标,以累积贡献率达 85% 以上为参考值,确定主成分个数^[22]。由于主成分之间相互独立且有着不同的贡献率,因此,每个主成分得分就是其加权值,其中权重就是主成分对应的贡献率。根据光合生理指标的数据,由主成分的特征向量计算出每种幼苗的主成分得分(表 2),4 种幼苗低温下的光合能力为蒲桃 > 灰木莲 > 南五味子 > 海南红豆。

表 2 低温胁迫下 4 种幼苗的抗寒性得分

Tab. 2 Cold resistance scores of four species seedlings under low temperature

幼苗	主成分得分	抗寒位次
蒲桃	1.66	1
灰木莲	1.58	2
南五味子	1.56	3
海南红豆	1.37	4

3 讨论

低温能破坏所有光合作用的组成成分,不仅可以引起光合机构的异常,同时也影响气孔的关闭^[23]。很多研究^[24-26]的结果表明,低温胁迫使大多数植物的 Pn 显著降低,与本研究的结果相同。低温可以降低 Gs,限制外界 CO₂ 通过气孔进入细胞间隙,导致光合速率下降^[24],也可以造成光合器官损伤,引起 x_{co₂} 升高,导致气孔关闭^[27]。通常认为引起光合速率下降的因素包括气孔限制因素和非气孔限制因素^[28]。判定引起 Pn 降低主要因素是通过 x_{co₂} 和 Ls 的变化方向:当 Pn 和 Gs 下降时,若 Ls 增大和 x_{co₂} 降低,则为气孔限制;若 Ls 减小和 x_{co₂} 增大或不变,则为非气孔限制^[29]。周建等^[20]在研究广玉兰 *Magnolia grandiflora* 幼苗时发现,在低温胁迫下光合速率、气孔导度和蒸腾速率下降的同时,叶片 x_{co₂} 也显著下降,说明低温胁迫下叶片气孔抑制影响了植株气体交换与 CO₂ 吸收,减少了 CO₂ 供应,进而影响植株的光合速率。本研究中,低温胁迫 2 d 时,蒲桃的 Pn、Gs 和 Tr 下降的同时, x_{co₂} 降低, Ls 升高,说明此时 Pn 下降主要是由于气孔因素引起的,低温胁迫 4 d 之后,蒲桃的 Pn、Gs、Ls 下降, x_{co₂} 上升,说明导致此时 Pn 下降的主要原因是非气孔因素,受低温伤害严重;海南红豆、南五味子和灰木莲在整个试验阶段的 Pn、Gs、Tr 和 Ls 持续下降, x_{co₂} 不断上升,说明其 Pn 下降主要由非气孔因素引起,气孔限制因素也会起一定的作用^[30],所以抗寒能力比蒲桃弱。非气孔限制情况下幼苗受到的低温胁迫严重,会直接引发光合机构的损伤,例如叶绿体类囊体膜的组分、透性和流动性等、叶绿体的亚显微结构^[9]和光合电子传递和光合磷酸化以及光合作用的相关酶系^[5],限制和阻碍了 CO₂ 的利用,从而造成细胞间隙 CO₂ 积累,使叶肉细胞光合活性下降^[31]。低温胁迫下 4 种幼苗的 Gs 与 Ts 变化趋势相似,说明 Ts 的降低与 Gs 的降低密切相关。

探索低温下植物的光合生理在生产上具有广泛的应用价值^[32]。根据主成分分析的得分可知,低温下 4 种幼苗中,蒲桃幼苗的光合能力最强。光合作用 Pn 的下降可以由气孔限制和非气孔限制引起。气孔限制引起的叶片 Pn 降低主要是气孔的部分关闭引起 x_{co₂} 降低所致,而非气孔限制引起的叶片 Pn 降低主要是叶肉细胞光合活性下降而导致的 x_{co₂} 增高。本研究中,低温胁迫 2 d 时,蒲桃的叶片 Pn 降低主要由气孔限制引起,而其他 3 种幼苗的叶片 Pn 降低主要由非气孔限制所致,表明低温下蒲桃比其他幼苗的光合能力强,这与主成分分析的结果一致,因此蒲桃比其他 3 种幼苗更适合作向北引种与栽培。何跃君等^[33]和冯慧芳等^[34]在研究幼苗抗寒生理和抗旱生理时也应用主成分方

法成功地分析了幼苗的抗逆性,说明主成分分析是评价植物抗逆的一个有效方法。

植物抗寒研究有2种方法:一种方法是野外试验,试验时间长,温度条件不容易控制,幼苗容易冻死;另一种方法是将幼苗放入人工气候箱研究其低温下的生理变化.幼苗在人工气候箱的环境封闭,所能忍受的胁迫时间较短,但是能通过比较不同幼苗低温下生理指标的差异,为选择耐低温树种提供参考。

参考文献:

- [1] 宋祥春. 2种沙冬青幼苗对低温的光合生理响应[D]. 乌鲁木齐:新疆大学,2009.
- [2] SRNIE R M. A method for chilling tolerance using chlorophyll fluorescence *in vivo* [M]. New York: Academic Press, 1984: 471-474.
- [3] 刘慧英,朱祝军,史庆华. 低温胁迫下嫁接对西瓜光合特性及叶绿素荧光参数影响的研究[J]. 石河子大学学报:自然科学版,2007,25(2):163-167.
- [4] 潘瑞炽. 植物生理学[M]. 北京:高等教育出版社,2004.
- [5] 刘菲菲,魏亦农,李志博,等. 低温胁迫对棉花幼苗叶片光合特性的影响[J]. 石河子大学学报:自然科学版,2011,29(1):11-14.
- [6] 任向荣,薛立,王相娥,等. 低温对6种绿化树种幼苗生理过程的影响[J]. 中南林业科技大学学报,2008,28(6):56-60.
- [7] 巫光宏,詹福建,黄卓烈,等. 低温胁迫对马占相思树代谢的影响研究[J]. 林业科学研究,2001,14(6):633-640.
- [8] 孙清鹏,许煌灿,张方秋,等. 低温胁迫对大叶相思和马占相思某些生理特性的影响[J]. 林业科学研究,2002,15(1):34-40.
- [9] 何洁,刘鸿先,王以柔,等. 低温与植物的光合作用[J]. 植物生理学通讯,1986(2):1-6.
- [10] HUND A, FRACHEBOUD Y, SOLDATI A, et al. Cold tolerance of maize seedlings as determined by root morphology and photosynthetic traits[J]. European Journal of Agronomy,2008,28(3):178-185.
- [11] LEE E A, STAEBLER M A, TOLLENAAR M. Genetic variation and physiological discrimination for cold tolerance in maize (*Zea mays* L.) during an early autotrophic phase of development[J]. Crop Science,2002,42(6):1919-1929.
- [12] WANG Xiang, PENG Yan-hui, SINGER J W, et al. Seasonal changes in photosynthesis, antioxidant systems and ELIP expression in a thermonastic and non-thermonastic *Rhododendron* species: A comparison of photoprotective strategies in overwintering plants [J]. Plant Science, 2009,177(6):607-617.
- [13] RUBIO-CASAL A E, LEIRA-DOCE P, FIGUEROA M E, et al. Contrasted tolerance to low and high temperatures of three tree taxa co-occurring on coastal dune forests under Mediterranean climate[J]. Journal of Arid Environments, 2010,74(4):429-439.
- [14] 梁文彪,段左俊. 海南红豆的特性及其园林应用[J]. 热带林业,2007,35(3):36-38.
- [15] 康廷国. 中药鉴定学[M]. 北京:中国中医药出版社,2004:328.
- [16] 钟泰林,李根有,石柏林. 遮荫对南五味子光合特性的影响[J]. 中草药,2009,40(3):466-469.
- [17] 陈定如. 水翁、海南蒲桃、蒲桃、洋蒲桃[J]. 广东园林,2007,29(3):79-80.
- [18] 曾冀,卢立华,贾宏炎. 灰木莲生物学特性及引种栽培[J]. 林业实用技术,2010(10):20-21.
- [19] LONG S P, HUMPHRIE S, FAKLKOWSKI P G. Photoinhibition of photosynthesis in nature[J]. Annual Review of Plant,1994,45:633-662.
- [20] 周建,杨立峰,郝峰鸽,等. 低温胁迫对广玉兰幼苗光合及叶绿素荧光特性的影响[J]. 西北植物学报,2009,29(1):136-142.
- [21] 何晓群. 现代统计分析方法与应用[M]. 北京:中国人民大学出版社,1998.
- [22] 区靖祥,邱健德. 多元数据的统计分析方法[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2002.
- [23] ALLEN D J, ORT D R. Impact of chilling temperatures on photosynthesis in warm climate plants[J]. Trends in Plant Science, 2001,6(1):36-42.
- [24] FARQUHAR G D, SHARKEY T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Annual Review Plant Physiology, 1982,33:317-345.
- [25] BERRY J A, DOWNTON W J S. Environmental regulation of photosynthesis[M]. New York: Academia Press, 1982:263-343.
- [26] 杨盛昌,林鹏,中须贺常雄. 5℃夜间低温对红树幼苗光合速率和蒸腾速率的影响[J]. 植物研究,2001,21(4):587-591.
- [27] 刘辉,郭延平,胡美君. 杨梅光合作用的低温光抑制[J]. 热带亚热带植物学报,2005,13(14):338-342.
- [28] 许大全. 光合作用气孔限制分析中一些问题[J]. 植物生理学通讯,1997,33(4):241-244.
- [29] 丁友芳,张晓霞,史玲玲,等. 葛根净光合速率日变化及其与环境因子的关系[J]. 北京林业大学学报,2010,32(5):132-137.
- [30] 刘建,叶露,周坚,等. 夜间低温对2种桉树幼苗光合特性的影响[J]. 西北植物学报,2007,27(10):2024-2028.
- [31] 睦晓蕾,毛胜利,王立浩,等. 低温对弱光影响甜椒光合作用的胁迫效应[J]. 核农学报,2008,22(6):880-886.
- [32] 徐燕,薛立,屈明. 植物抗寒性的生理生态学机制研究进展[J]. 林业科学,2007,43(4):88-94.
- [33] 何跃君,薛立,任向荣,等. 低温胁迫对6种幼苗生理特性的影响[J]. 生态学杂志,2008,27(4):524-531
- [34] 冯慧芳,薛立,任向荣,等. 4种阔叶苗木对PEG模拟干旱的生理响应[J]. 生态学报,2011,31(2):371-382.