

4个美国紫菀品种光合生理特征比较

蒋文伟¹, 陈娅琼¹, 黄建荣², 孙 垒²

(1. 浙江农林大学 园林学院, 浙江 临安 311300; 2. 上房园艺有限公司, 上海 201114)

摘要: 以4个美国紫菀*Aster novae-angliae*品种1年生扦插苗为研究对象, 研究了美国紫菀的光合生理特性。结果表明: 4个美国紫菀品种的光补偿点与光饱和点各不相同, 但光适应能力均较强。4个品种的光适应能力为紫球‘Purple Dome’>香叶‘Herbstschnee’>粉花‘Barr’s Pink’>安德‘Andenken an Alma Potschke’; 表观量子效率为香叶>安德>紫球>粉花; 暗呼吸速率为安德>紫球>香叶>粉花。在春秋两季4个品种净光合速率日变化曲线均表现为单峰型, 在夏季均为双峰型, 春季峰值出现时间明显比夏、秋两季提前, 夏季第1峰值均大于第2峰值, 且有明显的光合“午休”现象。多元逐步回归分析表明, 影响净光合速率的关键环境因子随花卉品种和生长季节不同而变化, 主要包括光合有效辐射、空气温度及叶面温度。图3表3参21

关键词: 森林生物学; 光合特征; 环境因子; 美国紫菀; 多元逐步回归分析

中图分类号: Q945 文献标志码: A 文章编号: 1000-5692(2010)06-0865-07

Photosynthetic characteristics with four cultivars of *Aster novae-angliae*

JIANG Wen-wei¹, CHEN Ya-qiong¹, HUANG Jian-rong², SUN Lei²

(1. School of Landscape Architecture, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China;

2. Shangfang Horticulture Company Limited, Shanghai 201114, China)

Abstract: One-year-old cuttings of four cultivars of *Aster novae-angliae*, ‘Purple Dome’, ‘Herbstschnee’, ‘Barr’s Pink’, and ‘Andenken an Alma Potschke’, were studied to determine their photosynthetic physio-ecological characteristics using a multivariate stepwise regression analysis. Results indicated that the light adaptive capacity was high and in the order: ‘Purple Dome’ > ‘Herbstschnee’ > ‘Barr’s Pink’ > ‘Andenken an Alma Potschke’ with light compensation and saturation points differing. For apparent quantum yield, the order was: ‘Herbstschnee’ > ‘Andenken an Alma Potschke’ > ‘Purple Dome’ > ‘Barr’s Pink’; and for the dark respiration rate it was: ‘Andenken an Alma Potschke’ > ‘Purple Dome’ > ‘Herbstschnee’ > ‘Barr’s Pink’. These four cultivars had strong diurnal changes in the net photosynthetic rate with single-peaked curves at midday in spring and autumn, but double-peaked curves in summer. These peak net photosynthetic rates were earlier in spring than in summer or winter. Double-peaked curves had greater initial peaks, and the photosynthetic noon break was strong at midday in summer (midday depression of photosynthesis). A multivariate stepwise regression showed that the key environmental factors influencing the net photosynthetic rate included photosynthetically active radiation (PAR), air temperature, and leaf temperature; however, these differed for each cultivar. [Ch, 3 fig. 3 tab. 21 ref.]

Key words: forest biology; photosynthetic characteristics; environmental factors; *Aster novae-angliae*; multivariate stepwise regression analysis

收稿日期: 2010-01-18; 修回日期: 2010-03-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30972342)

作者简介: 蒋文伟, 副教授, 博士, 从事植物生理生态学与景观生态学研究。E-mail: wenweijiang@zafu.edu.cn

美国紫菀 *Aster novae-angliae* 为菊科 Compositae 紫菀属 *Aster* 多年生宿根花卉, 原产于北美东北部, 是欧美等国夏秋园林中最重要的栽培品种^[1]。它株高 60~150 cm, 叶披针形至广线型, 全缘, 具黏性茸毛; 头状花序聚伞状排列, 径 4~5 cm; 舌状花 40~60 个, 长 1.5 cm; 管状花带黄色、红、白或紫色^[2], 于近几年引入中国上海地区。美国紫菀生长迅速, 花色十分丰富, 而且花量极大, 盛花期时繁密的花朵可以将植株完全覆盖, 栽植于上海地区露地花坛和野生花境^[3]。以往的研究着重于紫菀属系统学、形态分类学等方面^[4-7], 但对紫菀属植物的生物学特性研究相对较少, 对该植物光能利用特性的研究鲜见报道, 是限制其合理开发利用的主要原因之一。本研究拟通过对不同美国紫菀品种光合特性及其环境影响因子的研究, 为它进一步在华东地区推广和应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料及试验地概况

试验于 2008 年 1~11 月在浙江农林大学(30°14'N, 119°42'E)进行。试验材料为上房园艺有限公司近年从美国引进的, 适合于华东地区园林栽培的 4 个美国紫菀品种: 紫球 (*Aster novae-angliae* ‘Purple Dome’), 香叶 (*Aster novae-angliae* ‘Herbstschnee’), 安德 (*Aster novae-angliae* ‘Andenken an Alma Potschke’) 和粉花(*Aster novae-angliae* ‘Barr’s Pink’)。2008 年 1 月初在温室苗床扦插繁育, 3 月上旬移入塑料盆, 1 株·盆⁻¹。塑料盆口径 25 cm, 高 30 cm, 盆土按黄壤土:泥炭:珍珠岩 = 3:1:1 混合, 各盆土量相同, 日光温室常规育苗。3 月下旬移出温室, 盆栽露地培育, 正常抚育管理。于 4 月下旬开始紫菀品种光合作用测定。选择大小均匀、长势基本一致的植株作为供试材料, 测定部位为叶片长度的 1/3 处。

试验地为亚热带季风气候区, 全年平均降水量为 1 424 mm, 多年平均气温为 15.9 °C, 历年平均日照时数为 1 939 h, 无霜期约 236 d。

1.2 方法

1.2.1 光响应曲线测定 7 月下旬选择晴天上午 9:00~11:00, 采用便携式光合测定仪(LI-6400, LI-COR, NE, USA), 在 0~2 000 μmol·m⁻²·s⁻¹ 范围内设定光合有效辐射 (photosynthetically active radiation, PAR) 梯度: 2 000, 1 800, 1 500, 1 200, 800, 500, 300, 100, 50, 0 μmol·m⁻²·s⁻¹, 从最高光强开始测定。测定时采用该光合测定仪自带的红蓝光源。二氧化碳浓度和气温、湿度均为自然状态。3 株重复, 用光合小助手软件 Photosyn Assistant 1.1.2 获取以下参数^[8]: 最大净光合速率 (maximum net photosynthetic rate, $P_{n\max}$), 光饱和点 (light saturation point, P_{ls}), 光补偿点 (light compensation point, P_{lc}), 表观量子效率 (apparent quantum yield, E_{AQ} 或 Φ), 暗呼吸速率 (dark respiration rate, R_d), 净光合速率 (net photosynthetic rate, P_n)。拟合计算采用非直角双曲线拟合方程^[9]:

$$P_n = \frac{\Phi \cdot P_{AR} + P_{n\max} - \sqrt{(\Phi \cdot P_{AR} + P_{n\max})^2 - 4 \cdot \Phi \cdot P_{AR} \cdot K \cdot P_{n\max}}}{2K} - R_d$$

其中: K 代表光合曲线的曲率, 大小为(0, 1)。

1.2.2 光合速率日变化和季节变化 分别于 4 月下旬、7 月下旬及 10 月下旬, 选择 3 个晴天从 7:00~17:00, 选择供试植株中上部同一叶位成熟叶片, 测定净光合速率, 每 1 h 测定 1 次, 上述供试样叶与光响应曲线测定样叶一致。同时, 读取光合有效辐射(P_{AR}), 空气相对湿度(R_h), 空气温度(T_a)和叶面温度(T_l)等指标, 黑暗条件下测定暗呼吸速率(R_d)。重复测定 3 片叶, 每叶片重复记录 3 组数据, 结果取平均值。用日均净光合速率分析光合作用的季节变化。

用 Excel 2003 和 DPS V7.0 统计软件进行数据处理和制图。采用多元逐步回归方程对测定数据进行分析。

2 结果与分析

2.1 4 种美国紫菀品种的光响应特征

4 种美国紫菀品种叶片净光合速率(P_n)对光强的响应如图 1 所示, 呈现出相似的变化趋势。在光

合有效辐射(P_{AR}) $0 \sim 600 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内, 随着 P_{AR} 增强, P_n 迅速增加; P_{AR} 超过 $600 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 后, P_n 缓慢上升; P_{AR} 为 $1200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, P_n 逐渐与 x 轴平行, 不同紫菀品种的 P_n 顺序为: 紫球>香叶>安德>粉花, 反映品种间 P_n 的光响应能力存在着差异。其中, 紫球 P_n 较高, 香叶和安德 P_n 相差不明显, 只有粉花 P_n 相对较低且上升趋势减缓。总体上, 美国紫菀品种 P_n 光响应与山麦冬 *Liriope spicata* 草本植物光响应规律基本一致^[10]。从表 1 可以看出, 粉花叶片光补偿点 P_{LC} 和光饱和点 P_{LS} 为 4 个品种最低; 安德叶片 P_{LC} 为 4 个品种最高而 P_{LS} 较低; 紫球叶片 P_{LC} 相对较低而 P_{LS} 为 4 个品种最高; 香叶叶片 P_{LC} 与 P_{LS} 居中, 说明不同紫菀品种的 P_{LC} 与 P_{LS} 具有一定的差异。在 4 个紫菀品种中, 紫球具有相对较低的 P_{LC} , 又具有最高的 P_{LS} 和最大 $P_{n\text{max}}$, 说明它对光辐射适应范围相对最广, 光合适应能力也最强。同时, 也可看出紫菀品种 $P_{n\text{max}}$ 与 P_{LS} 呈一致的变化趋势, 即 P_{LS} 越高的品种 $P_{n\text{max}}$ 也相对较高。

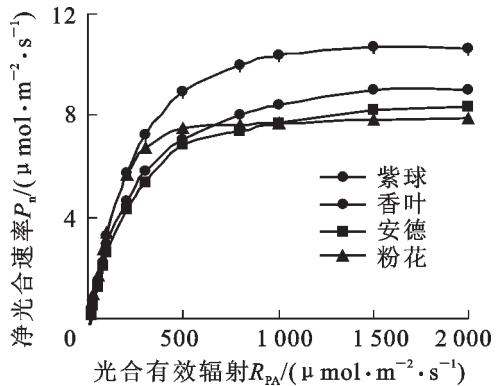


图 1 4 种美国紫菀品种叶片的光响应曲线

Figure 1 Response curve of photosynthesis to light intensity in leaves of four cultivars of *Aster novae-angliae*

表 1 4 种美国紫菀品种的光合参数

Table 1 Photosynthetic parameters of four cultivars of *Aster novae-angliae*

品种	光补偿点/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	光饱和点/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	暗呼吸速率/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	表观量子效率	最大净光合速率/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
紫球	14.3	302	0.595	0.0415	11.9
香叶	11.0	244	0.498	0.0452	10.5
安德	15.8	222	0.765	0.0485	10.0
粉花	3.1	215	0.119	0.0382	8.1

2.2 4 种美国紫菀品种净光合速率的变化规律

2.2.1 净光合速率日变化 由图 2-A 所示, 春季(4 月下旬)4 种美国紫菀品种 P_n 日变化都呈单峰曲线。从 7:00~10:00, P_n 呈快速上升趋势, 于 10:00 左右紫球、香叶、粉花出现最高峰, 而安德于 11:00 出现最高峰。随后 P_n 都逐渐下降并没有出现光合“午休”现象, 17:00 左右 4 个品种 P_n 下降到 $0.98 \sim 1.64 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。紫球在生长初期表现出较强的光合能力, P_n 最高约为 $10.27 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由图 2-B 所示, 夏季(7 月下旬)4 种美国紫菀品种 P_n 日变化都呈典型的双峰曲线, 且都在 15:00 出现光合“午休”现象。与 4 月下旬相比, 紫球和粉花 P_n 峰值由 10:00 推迟到 11:00, 香叶 P_n 峰值由 10:00 推迟到 12:00, 安德 P_n 峰值由 11:00 推迟到 12:00。4 个美国紫菀品种 P_n 第 1 峰值出现时间不同, 但第 2 峰值出现时间基本相同, 都出现在 16:00 左右。4 个美国紫菀品种 P_n 日变化幅度与 4 月下旬相比有明显提高, 紫球、香叶、安德及粉花第 1 峰值 P_n 上升幅度分别提高了 41.28%, 42.0%, 38.7% 和 48.7%。由图 2-C 所示, 秋季(10 月下旬)4 个美国紫菀品种 P_n 日变化基本一致, 都呈单峰曲线, 在 12:00 时出现最高峰, 随后 P_n 都快速下降。紫球、香叶、安德及粉花峰值 P_n 小于夏季, 分别为 13.10 , 12.65 , 12.00 和 $11.00 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 下降值分别为 1.41 , 0.84 , 0.70 , $0.98 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2.2.2 净光合速率季节变化 从 4~10 月 P_n 季节变化可以看出(表 2), 4 个美国紫菀品种均表现为夏季 P_n 最大, 秋季次之, 春季最小。同一生长季品种间 P_n 进行比较, 3 个生长季紫球 P_n 均为最大。春、秋两季粉花 P_n 均为最小, 而夏季香叶 P_n 最小。经方差分析, 同一品种在不同生长季节 P_n 差异性检验表明: 紫球差异不显著, 香叶与安德差异显著, 而粉花差异极显著。同时, 对相同生长季不同品种间 P_n 进行差异性检验, 均表现为不显著。而品种间 P_n 差异显著水平($P < 0.05$), 说明紫菀各个品种的光

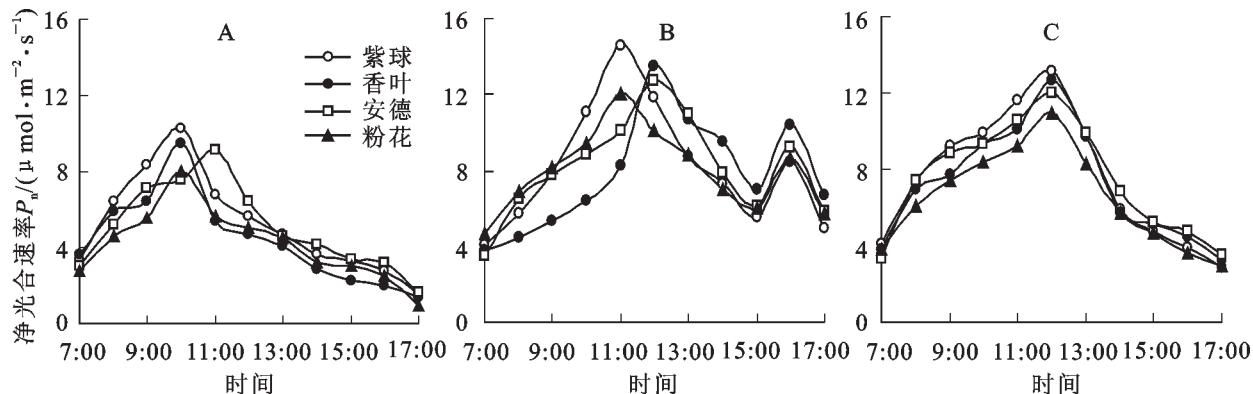


图2 美国紫菀品种净光合速率日变化

Figure 2 Diurnal change of P_n for four cultivars of *Aster novae-angliae* (A. spring; B. summer; C. autumn)

表2 美国紫菀品种净光合速率季节变化

Table 2 Seasonal change of P_n for four cultivars of *Aster novae-angliae*

品种	春季日均 P_n / ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	夏季日均 P_n / ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	秋季日均 P_n / ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
紫球	5.169 1 ± 0.790 2	8.177 3 ± 0.968 4	7.505 5 ± 1.032 8
香叶	4.371 8 ± 0.711 7	7.816 4 ± 0.894 0	7.162 7 ± 0.910 0
安德	5.051 8 ± 0.687 0	8.120 9 ± 0.787 9	7.439 1 ± 2.941 5
粉花	4.180 9 ± 0.579 2	7.941 8 ± 0.643 3	6.467 3 ± 0.785 3

合生理反应，在生长环境相同条件下主要是受到品种本身遗传性状的影响。

2.3 环境因子的日、季变化及与 P_n 的相关性分析

2.3.1 环境因子的日、季变化 影响紫菀光合作用的主要环境因子有光合有效辐射 P_{AR} ，空气相对湿度 R_h ，空气温度 T_a ，及叶面温度 T_l 等。图 3 为不同季节环境因子的日变化进程。如图 3-A 所示，春季 P_{AR} , R_h , T_a 及 T_l 日变化幅度分别为 $230 \sim 1400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $28.33\% \sim 72.60\%$, $20.0 \sim 36.3^\circ\text{C}$ 和 $19.9 \sim 36.2^\circ\text{C}$ ；如图 3-B 所示，夏季 P_{AR} , R_h , T_a 及 T_l 日变化幅度分别为 $400 \sim 1680 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $29.71\% \sim 64.91\%$, $28.0 \sim 42.6^\circ\text{C}$ 和 $27.0 \sim 42.3^\circ\text{C}$ ；如图 3-C 所示，秋季 P_{AR} , R_h , T_a 及 T_l 日变化幅度分别为 $80 \sim 1300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $23.00\% \sim 40.47\%$ 和 $9.6 \sim 23.5^\circ\text{C}$, $9.5 \sim 23.2^\circ\text{C}$ 。

2.3.2 环境因子与 P_n 的相关性分析 P_n 的变化是由生理生态因子综合作用的结果^[11]，而生理因

子的变化又受到环境因子的影响。不同阶段各个环境因子的影响存在着差异性，甚至效应相反^[12]。通过对 3 个生长季(春季、夏季及秋季)典型测定日影响叶片净光合速率的 4 个环境因子(P_{AR} , R_h , T_a 及 T_l)进行相关性分析(表 3)发现。在春季，安德 P_n 与 T_a , R_h 及 T_l 的相关性均显著，粉花 P_n 与 T_a , R_h 相关性均显著；在秋季，4 个紫菀品种 P_n 与 P_{AR} , R_h 的相关性均显著；而在夏季，4 个紫菀品种 P_n 与环境因子(P_{AR} , R_h , T_a 及 T_l)的相关性均达不同程度($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$)的显著水平。

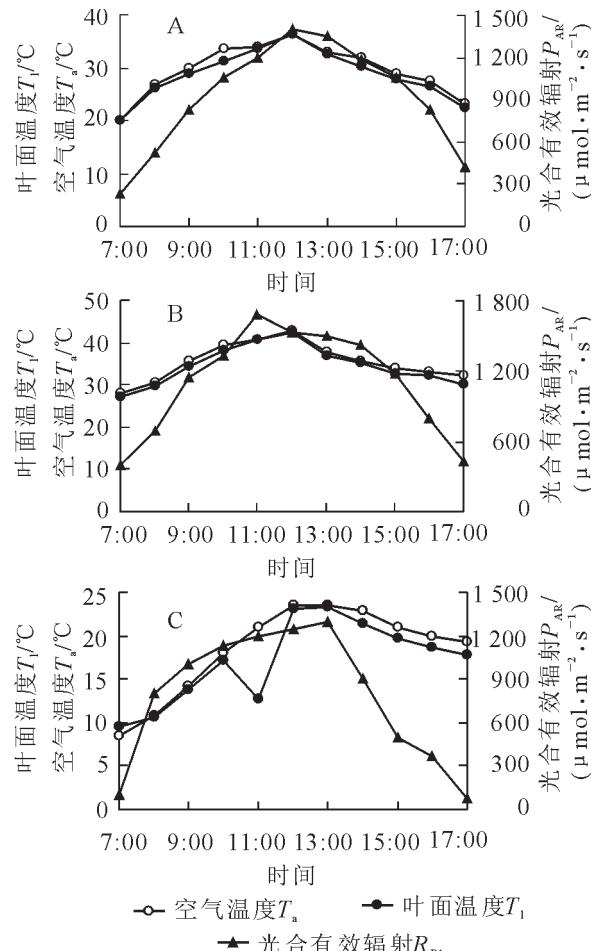


图3 环境因子的日、季变化

Figure 3 Diurnal and seasonal change of environmental factors
(A. spring; B. summer; C. autumn)

在实际研究中, 采用逐步回归分析法, 可以从大量可供选择的变量中选择那些对建立回归方程比较重要的变量, 剔除因子间可能存在的多重共线性, 从而得到“最优”方程^[13], 找出关键性的影响因子。利用 4 个紫菀品种在春季、夏季和秋季不同生长阶段所观测的 P_n 及环境因子参数, 通过 P_n 与 P_{AR} , R_h , T_a , T_l 等环境因子间的多元逐步回归分析(表 3), 建立在不同生长季节时每个紫菀品种的逐步回归方程, 并进行差异显著性检验。在回归方程式中, 各个影响因子与 P_n 之间的偏相关系数大小, 决定着它们对该紫菀品种 P_n 的影响贡献率, 同时也确定了影响 P_n 的关键性因子。4 个美国紫菀品种紫球、香叶、安德、粉花的关键性影响因子, 在春季分别为 T_a (0.828), T_a (0.815), T_a (0.815), T_a (0.795), 在夏季分别为 T_l (0.766), T_l (0.683), T_l (0.687), T_l (0.707), 在秋季分别为 P_{AR} (0.932), T_l (0.923), T_l (0.965), P_{AR} (0.943)。

表 3 环境因子与净光合速率相关性及其逐步回归方程

Table 3 Relation of P_n and environmental factors and its multivariable stepping regulation analysis

生长期	品种	环境因子				逐步回归方程
		P_{AR}	R_h	T_a	T_l	
春季	紫球	0.293	- 0.520	0.536	0.486	$y = - 20.520 - 0.014x_1 + 1.290x_3, F = 9.923^{**}, R = 0.844$ $r(y, x_1) = - 0.773^{**}, r(y, x_3) = 0.828^{**}$
	香叶	0.186	- 0.385	0.437	0.386	$y = - 18.402 - 0.013x_1 + 1.175x_3, F = 8.315^*, R = 0.822$ $r(y, x_1) = - 0.774^*, r(y, x_3) = 0.815^{**}$
	安德	0.510	- 0.701*	0.711*	0.698*	$y = - 16.059 - 0.009x_1 + 0.992x_3, F = 12.073^{**}, R = 0.867$ $r(y, x_1) = - 0.705^*, r(y, x_3) = 0.815^{**}$
	粉花	0.473	- 0.615*	0.676*	0.636	$y = - 13.450 - 0.008x_1 + 0.837x_3, F = 10.015^{**}, R = 0.845$ $r(y, x_1) = - 0.689^*, r(y, x_3) = 0.795^{**}$
	紫球	0.798*	- 0.438	0.904**	0.916**	$y = - 16.493 - 0.002x_1 + 0.770x_4, F = 22.595^{**}, R = 0.922$ $r(y, x_1) = - 0.247, r(y, x_4) = 0.766^{**}$
	香叶	0.602*	- 0.626*	0.674*	0.683*	$y = - 6.883 + 0.426x_4, F = 7.855^*, R = 0.683$ $r(y, x_4) = 0.683^*$
	安德	0.783*	- 0.686*	0.888**	0.891**	$y = - 6.157 - 0.001x_1 - 0.058x_2 + 0.525x_4, F = 12.222^{**}, R = 0.916$ $r(y, x_1) = - 0.230, r(y, x_2) = - 0.450, r(y, x_4) = 0.687^*$
	粉花	0.778*	- 0.424	0.875**	0.884**	$y = - 9.785 - 0.0008x_1 + 0.028x_2 + 0.504x_4, F = 9.477^{**}, R = 0.896$ $r(y, x_1) = - 0.147, r(y, x_2) = 0.262, r(y, x_4) = 0.707^*$
	紫球	0.921*	- 0.622*	0.158	0.166	$y = 3.722 + 0.007x_1 - 0.114x_3, F = 27.289^{**}, R = 0.934$ $r(y, x_1) = 0.932^{**}, r(y, x_3) = - 0.398$
	香叶	0.923*	- 0.676*	0.292	0.298	$y = 2.341 + 0.006x_4, F = 51.382^{**}, R = 0.922$ $r(y, x_4) = 0.923^{**}$
	安德	0.965*	- 0.711*	0.284	0.286	$y = 2.521 + 0.006x_4, F = 123.250^{**}, R = 0.965$ $r(y, x_4) = 0.965^{**}$
	粉花	0.930*	- 0.664*	0.238	0.246	$y = 3.240 + 0.006x_1 - 0.688x_3 + 0.652x_4, F = 20.053^{**}, R = 0.946$ $r(y, x_1) = 0.943^{**}, r(y, x_3) = - 0.454, r(y, x_4) = - 0.431$

说明: ** 表示相关置信度水平小于 0.01; * 表示相关置信水平小于 0.05, 其他为不相关; x_1 为光合有效辐射, x_2 为空气相对湿度, x_3 为空气温度, x_4 为叶面温度。

3 讨论

光饱和点和光补偿点是植物的 2 个重要的光合生理指标。植物的光饱和点和光补偿点反映了植物对光照条件的要求, 是判断植物耐阴性的一个重要指标。一般认为, 光补偿点和光饱和点均较低的植物是典型的耐荫植物, 而光补偿点低并且光饱和点高的植物对环境适应性较强^[14]。4 个美国紫菀品种的光饱和点为 $215 \sim 302 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 光补偿点为 $3.13 \sim 15.8 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 与耐荫植物山麦冬^[10], 荚果蕨 *Mattescia struthiopteris*, 宽叶麦冬 *Liriope platyphylla* 和萱草 *Hemerocallis fulva*^[15] 光合生理参数相

近, 对弱光量子通量密度的环境表现出了极强的适应性; 4个紫菀品种的表观量子效率为0.038~0.0485, 与自然条件下, 叶片光合的最大表观量子效率通常在0.02~0.05范围相符合^[16]。

4个紫菀品种光合生理参数高低不同, 光补偿点排序为安德>紫球>香叶>粉花, 光饱和点排序为紫球>香叶>安德>粉花, 暗呼吸速率排序为安德>紫球>香叶>粉花。由于耐荫植物低光补偿点, 也存在着最大表观量子效率、最大净光合速率不变或减少的情况^[17]。如粉花的光补偿点为4个紫菀品种最低, 其最大表观量子效率、最大净光合速率分别为也同样是4个紫菀品种最低, 此实验结果也证实了植物光合作用曲线变化不同是不同植物所具有的特性, 光饱和点和光补偿点的变化具有一定物种的遗传稳定性^[18]。综合评判4个紫菀品种的光适应能力为: 紫球>香叶>粉花>安德。

4个美国紫菀净光合速率日变化类型在春季和秋季均为典型的“单峰型”曲线, 而在夏季为典型的“双峰型”曲线, 第1峰值大于第2峰值, 并出现光合“午休”现象。在整个生长季节中, 春季的第1峰值明显比夏秋两季提前, 而夏季第1峰值明显大于秋季与春季的峰值。夏季净光合速率迅速增加可能与2个因素有关: 一是随着叶片的展开, 与叶片自身形态建成相关的呼吸作用减弱, 二是光合机构逐渐完善, 特别是一些关键酶如Rubisco(1, 5二磷酸核酮糖羧化酶/加氧酶)等活性增加^[19]。夏季中午出现“午休”的原因, 可能是午间水分亏缺较为严重, 特别是气温、或叶温过高引起了气孔的部分关闭, 导致午后恢复缓慢所引起^[20]。

植物的生长受多个生理生态因子的综合影响, 各影响因子间相互制约, 不同时期起主导作用的因子对净光合速率的影响有所差异^[19]。因此, 为了辨析影响4个紫菀品种的关键性环境因子, 采用逐步回归分析法, 筛选出了不同品种不同生长时期的关键性影响因子。当然, 对净光合速率的影响也存在着因子间的互作^[21], 因此, 生理生态因子与光合作用的关系还有待今后进一步研究。

参考文献:

- [1] NESOM G L. Generic concepts of the tribe Astereae (Asteraceae) in North America, Central America, the Antilles and Hawaii [J]. *Sida Bot Misc*, 2000, **20**: 1~100.
- [2] 林鎔, 陈艺林. 中国植物志: 第74卷[M]. 北京: 科学出版社, 1985, **74**: 73~295.
- [3] 王小德, 马进. 园林地被植物研究进展和展望[J]. 浙江林学院学报, 2003, **20**(4): 419~423.
WANG Xiaode, MA Jin. Progress and outlook of landscape cover plants [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2003, **20**(4): 419~423.
- [4] NESOM G L. Review of the taxonomy of *Aster sensulato* (Astereae: Astereae), emphasizing the new world species [J]. *Phytologia*, 1994, **77**(3): 141~297.
- [5] 黎维平, 刘胜祥. 湖南菊科紫菀属一新种——吉首紫菀[J]. 植物分类学报, 2002, **40**(5): 455~457.
LI Weiping, LIU Shengxiang. *Aster jishouensis* (Asteraceae): a new species from Hunan, China [J]. *Acta Phytotaxon Sin*, 2002, **40**(5): 455~457.
- [6] 黎维平, 陈三茂. 广义紫菀属(菊科紫菀族)系统学研究的现状[J]. 生命科学研究, 2004, **8**(4): 93~96.
LI Weiping, CHEN Sanmao. Present status of systematical studies on *Aster* s.l. (Astereae, Asteraceae)[J]. *Life Sci Res*, 2004, **8**(4): 93~96.
- [7] 黎维平, 陈功锡. 湖南紫菀属(菊科)一新变种——垂茎三脉紫菀[J]. 植物分类学报, 2006, **44**(3): 348~350.
LI Weiping, CHEN Gongxi. *Aster ageratoides* var. *pendulus* W. P. Li & G. X. Chen; a new variety of *Aster* (Asteraceae) from Hunan, China [J]. *Acta Phytotaxon Sin*, 2006, **44**(3): 348~350.
- [8] 蒋馥蔚, 江洪, 李巍, 等. 不同起源时期的3种被子植物对酸雨胁迫响应的光合生理生态特征[J]. 植物生态学报, 2009, **33**(1): 125~133.
JIANG Fuwei, JIANG Hong, LI Wei, et al. Photosynthetic and physiological characteristics of three angiosperms of different evolutionary ages under acid rain [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2009, **3**(1): 125~133.
- [9] HERRICK J D, THOMAS R B. Effects of CO₂ enrichment on the photosynthetic light response of sun and shade leaves of canopy sweetgum trees (*Liquidambar styraciflua*) in a forest ecosystem [J]. *Tree Physiol*, 1999, **19**: 779~786.
- [10] 杨学军, 韩蕾, 孙振元, 等. 耐荫地被植物山麦冬光合特性研究[J]. 草地学报, 2008, **16**(4): 370~373.
YANG Xuejun, HAN Lei, SUN Zhenyuan, et al. Study on the photosynthetic characteristics of shade-tolerant ground

- cover plant *Liriope spicata* Lour [J]. *Acta Agrestia Sin*, 2008, **16** (4): 370 – 373.
- [11] 肖生鸿, 刘金祥, 林保花. 热研 3 号俯仰臂形草光合日动态的研究[J]. 湛江师范学院学报, 2007, **28** (3): 100 – 103.
XIAO Shenghong, LIU Jinxiang, LIN Baohua. Diurnal photosynthetic changes of *Brachiaria decumbens* ‘Reyan No. 3’ [J]. *J Zhanjiang Norm Coll*, 2007, **28** (3): 100 – 103.
- [12] 郭天财, 王之杰, 王永华. 不同穗型小麦品种旗叶光合作用日变化的研究[J]. 西北植物学报, 2002, **22** (3): 554 – 560.
GUO Tiancai, WANG Zhijie, WANG Yonghua. Study on diurnal changes of flag leaf photosynthetic rate for two spike-type cultivars of wheat [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 2002, **22** (3): 554 – 560.
- [13] 唐启义, 冯明光. 实用统计分析及其 DPS 数据处理系统[M]. 北京: 科学出版社, 2002, 304 – 311.
- [14] 冷平生, 杨晓红, 胡悦, 等. 5 种园林树木的光合和蒸腾特性的研究[J]. 北京农学院学报, 2000, **15** (4): 13 – 18.
LENG Pingsheng, YANG Xiaohong, HU Yue, et al. Studies on the characteristics of photosynthesis and transpiration of five gardening trees [J]. *J Beijing Agric Coll*, 2000, **15** (4): 13 – 18.
- [15] 王燕. 14 种地被植物光能利用特性及耐阴性比较[J]. 浙江林学院学报, 2005, **22** (1): 6 – 11.
WANG Yan. Comparative studies on light utilization characteristics and shade tolerance of 14 ground cover plants [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2005, **22** (1): 6 – 11.
- [16] 余叔文. 植物生理与分子生理学[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [17] 王燕, 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, 2004, **17** (3): 305 – 309.
WANG Yan, MA Wuchang. Comparative studies on light utilization characteristics and shade tolerance of 7 climbing shrub species [J]. *For Res*, 2004, **17** (3): 305 – 309.
- [18] BJORKMAN O, HOLMGREN P. Adaptability of the photosynthetic apparatus to light intensity in ecotypes from exposed and shaded habitat [J]. *Physiol Plant*, 1963, **16** (4): 889 – 914.
- [19] 许大全. 光合作用效率[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2002: 39 – 52.
- [20] 沈允刚, 施教耐, 许大全. 动态光合作用[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 134 – 135.
- [21] 吴吉林, 李永华, 叶庆生. 美丽异木棉光合特性的研究[J]. 园艺学报, 2005, **32** (6): 1061 – 1064.
WU Jilin, LI Yonghua, YE Qingsheng. Studies on photosynthesis characteristics of *Chorisia speciosa* [J]. *Acta Hortic Sin*, 2005, **32** (6): 1061 – 1064.