

10个秋菊品种的光合特性及 净光合速率与部分生理生态因子的相关性分析

李永华^①, 张开明, 于红芳

(河南农业大学林学院, 河南 郑州 450002)

摘要: 用 CIRAS-2 便携式光合测定系统测定了 9 月至 10 月 10 个秋菊 (*Dendranthema morifolium* (Ramat.) Tzvel.) 品种叶片的光合特征参数; 在此基础上, 对叶片光响应参数和 CO₂ 响应参数以及部分光合特征参数的日变化进行了比较分析; 此外, 还对净光合速率 (Pn) 与部分生理生态因子的相关性进行了分析。结果表明: 10 个秋菊品种的光补偿点 (LCP) 为 92.83 ~ 167.37 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 光饱和点 (LSP) 为 962.51 ~ 1 077.53 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 说明它们均为喜光植物; 10 个秋菊品种的 CO₂ 饱和点为 1 060.46 ~ 1 485.48 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, CO₂ 补偿点为 77.62 ~ 133.16 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 远大于一般的 C₃ 植物; 各品种 Pn 的日变化呈典型的双峰型曲线, 首峰 (11 ~ 19 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 出现在 10:00 左右, 次峰出现在 16:00 左右, 有明显的“午休”现象。相关分析结果表明: 10 个品种的 Pn 与气孔导度呈极显著正相关, 与蒸腾速率呈显著或极显著正相关 (品种‘关东新侠’、‘云龙凤舞’和‘日本黄’除外), 与胞间 CO₂ 浓度呈显著或极显著负相关, 与光合有效辐射强度和大气温度呈不显著正相关, 与大气相对湿度和大气 CO₂ 浓度呈不显著负相关。早花品种‘太平的小鼓’和‘铜雀春深’具有较高的 LSP 以及较低的 LCP 和表观量子效率 (AQY), 对光照强度的适应范围较大, 可栽培在光照较强的环境中; 品种‘早粉盘’和‘檀香狮子’具有较高的 LCP、AQY 和 LSP, 对强光的利用能力较强; 晚花品种‘关东新侠’、‘绿牡丹’和‘星光灿烂’具有较高的 LCP 和 AQY 以及较低的 LSP, 具有一定的耐阴能力, 可种植在光照较弱的环境中。

关键词: 秋菊; 光合特性; 净光合速率; 生理生态因子; 相关性分析

中图分类号: Q945.11; S682.1⁺10.1 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2012)01-0070-07

Photosynthetic characteristics of ten cultivars of autumn chrysanthemum (*Dendranthema morifolium*) and correlation analysis between net photosynthetic rate and some physio-ecological factors LI Yong-hua^①, ZHANG Kai-ming, YU Hong-fang (College of Forestry, He'nan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2012, 21(1): 70-76

Abstract: Parameters of photosynthetic characteristics of leaves of ten cultivars of autumn chrysanthemum [*Dendranthema morifolium* (Ramat.) Tzvel.] from September to October were determined by CIRAS-2 portable photosynthesis system. On this basis, light and CO₂ response parameters and daily change of parameters of some photosynthetic characteristics were analyzed comparatively, and the correlation between net photosynthetic rate (Pn) and some physio-ecological factors was also analyzed. The results show that light compensation point (LCP) of ten cultivars is 92.83-167.37 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ and light saturation point (LSP) is 962.51-1 077.53 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, meaning that they are heliophyte. Their CO₂ saturation point is 1 060.46-1 485.48 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ and CO₂ compensation point is 77.62-133.16 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, which are extremely higher than those of normal C₃-plants. The daily change curve of Pn of ten cultivars is a typical double peak type curve, the first peak (11-19 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) and the second peak appear at about 10:00 and 16:00, respectively, and there is obvious “midday depression” phenomenon. The results of correlation analysis show that Pn very significantly positively correlates with stomatal conductance, significantly or very significantly positively correlates with transpiration rate

收稿日期: 2010-12-03

基金项目: 河南省重大科技专项 (091100110200)

作者简介: 李永华 (1974—), 男, 河南西华人, 博士, 副教授, 主要从事观赏植物的生理生化研究。

^①通信作者 E-mail: liyhhy@163.com

(except cultivars ‘Guandongxinxia’, ‘Yunlongfengwu’ and ‘Ribenuang’), significantly or very significantly negatively correlates with intercellular CO_2 concentration, and un-significantly positive correlates with photosynthetically active radiation intensity and atmospheric temperature, un-significantly negative correlates with atmospheric relative humidity and atmospheric CO_2 concentration. Early flowering cultivars ‘Taipingdexiaogu’ and ‘Tongquechunshen’ possess higher LSP and lower LCP and apparent quantum yield (AQY), indicating that both of them can adapt to wider light intensity and are suitable to be planted in stronger light intensity environment. While cultivars ‘Zaofenpan’ and ‘Tanxiangshizi’ possess higher LCP, AQY and LSP, indicating that they have stronger ability to use strong light intensity. Late flowering cultivars ‘Guandongxinxia’, ‘Lümulan’ and ‘Xingguancanlan’ all possess higher LCP and AQY and lower LSP, indicating that they have certain shade tolerance and can be planted in weaker light intensity environment.

Key words: autumn chrysanthemum [*Dendranthema morifolium* (Ramat.) Tsvet.]; photosynthetic characteristics; net photosynthetic rate; physio-ecological factor; correlation analysis

在园林绿化实践中,园林植物的选择和应用不但要考虑其美学需要,更要考虑其光合生理特性。众多学者对园林植物的光合特性进行了研究^[1-2],并探讨了园林植物对环境的适应性及其光合作用机制,为园林植物的合理配置及科学管理提供了重要的理论依据和指导。

菊花 [*Dendranthema morifolium* (Ramat.) Tsvet.] 为菊科 (Compositae) 菊属 [*Dendranthema* (DC.) Des Moul.] 多年生草本植物,是重要的园林观赏花卉之一,以秋菊盆栽观赏为主。目前,国内学者对菊花的起源、品种分类、花期调控及栽培生理等^[3-6]方面均进行了较为深入的研究,但对其光合特性方面的研究较少,且主要集中在逆境胁迫下菊花光合生理指标的变化等^[7-8]方面,对不同秋菊品种的光合特性则缺少系统的比较分析。

作者以常见的秋菊5个早花品种及5个晚花品种为研究对象,对它们的光合参数进行了测定,以揭示其光合生理特征;并分析了不同品种的光合生理特性差异及其与环境因子之间的相互关系,以了解不同秋菊品种的光合作用基本规律,为秋菊的栽培管理和合理配置提供理论依据和技术指导。

1 材料和方法

1.1 材料

供试材料为秋菊早花品种‘早粉盘’、‘铜雀春深’、‘檀香狮子’、‘太平的小鼓’和‘日出东方’以及晚花品种‘关东新侠’、‘云龙凤舞’、‘绿牡丹’、‘星光灿烂’和‘日本黄’,均由河南省开封市禹王台公园提供。

于2009年5月在河南农业大学实验基地进行扦插育苗,7月上盆。花盆选择透气性好的瓦盆,栽培基质为堆肥土、园土、草木灰和细沙的混合基质,按照体积比2:2:1:1的比例混合均匀,每盆1株,采用常规管理。

1.2 方法

于2009年9月至10月,分别选取生长旺盛且长势一致的健壮植株(株高30 cm、约有20片叶),采用CIRAS-2便携式光合测定系统(英国PP-SYSTEM公司)测定顶芽下第3至第4片完全展开的功能叶的各项光合指标值。测定期间实验地日间最大光照强度约 $1\,500\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,最高气温 $35\ ^\circ\text{C}$,大气相对湿度约30%。每品种选取3株,各指标分别重复测定5次,结果取平均值。

1.2.1 净光合速率的光响应曲线绘制 于晴天上午9:00至10:00分别在光合有效辐射强度(PAR)为0、50、100、150、200、250、300、400、500、600、700、800、900、1 000、1 100、1 200、1 300、1 400和 $1\,500\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的条件下测定叶片净光合速率(P_n)。将 P_n 和PAR进行二元回归分析,并计算各品种的光补偿点(LCP)、光饱和点(LSP)、最大净光合速率($P_{n_{\max}}$)及相关性, P_n 和PAR的直线回归方程的初始斜率即为光合作用的表观量子效率(AQY)。测定时,设定光合测定系统的叶室温度为 $(25 \pm 1)\ ^\circ\text{C}$, CO_2 浓度为 $(380 \pm 5)\ \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$,大气相对湿度为70%。

1.2.2 净光合速率的 CO_2 响应曲线绘制 于晴天上午9:00至10:00分别在胞间 CO_2 浓度(C_i)为0、50、100、150、200、250、300、400、500、600、700、800、900、1 000、1 100、1 200、1 300、1 400和1 500

$\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的条件下测定叶片 P_n 。将 P_n 和 C_i 进行二元回归分析,并计算各品种的 CO_2 补偿点 (CCP)、 CO_2 饱和点 (CSP)、最大净光合速率 ($P_{n_{\max}}$) 及相关性, P_n 和 C_i 的直线回归方程的初始斜率即为光合作用的羧化效率 (CE)。测定时,设定光合测定系统的叶室光照强度为 $900 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,温度为 $(25 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$,大气相对湿度为 70%。

1.2.3 光合特性参数日变化的测定 于晴天的 6:00 至 18:00 分别选取各植株同一部位叶片测定 P_n ,每隔 2 h 测定 1 次。同时,记录叶片的蒸腾速率 (T_r)、气孔导度 (G_s)、胞间 CO_2 浓度 (C_i)、光合有效辐射强度 (PAR)、大气 CO_2 浓度 (C_a)、大气温度 (T_a) 和大气相对湿度 (RH)。其中,PAR、 C_a 、 T_a 和 RH 以外界条件为准;为了消除时间上的误差,重复测定时各品种随机排序。

1.3 数据处理

采用 Excel 2003 软件进行数据处理和制表,并采用 SPSS 17.0 软件 (中文版) 进行数据的相关性分析、线性回归分析及其他统计分析。

2 结果和分析

2.1 叶片光响应参数的比较

净光合速率 (P_n) 的光响应曲线能够反映植物叶片的光合速率随光合有效辐射强度 (PAR) 改变的变化规律。由供试 10 个秋菊品种 P_n 的光响应曲线 (图略) 可知:各品种的 P_n 变化趋势均呈相似的二次

曲线。在 PAR 低于 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的条件下,随 PAR 的增加, P_n 迅速增大;随 PAR 的继续增加, P_n 上升幅度减小,达到最大值后渐渐趋于平衡。以 PAR 为自变量 x 、 P_n 为因变量 y 进行线性回归分析,获得的各秋菊品种的回归方程较相似 (表 1)。

由表 1 可看出:10 个秋菊品种的光饱和点 (LSP) 存在极显著差异,多数品种的光补偿点 (LCP)、最大净光合速率 ($P_{n_{\max}}$) 和表观量子效率 (AQY) 也存在极显著差异。10 个秋菊品种的 LSP 为 $962.51 \sim 1\,077.53 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, LCP 为 $92.83 \sim 167.37 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。可见,秋菊属喜光植物,对光照的需求较高。品种‘日本黄’的 LSP 和 LCP 均最低,分别为 962.51 和 $92.83 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,表明其耐阴性较强,但对弱光的利用能力不强;品种‘云龙凤舞’的 LSP 和 LCP 也均较低,但极显著高于品种‘日本黄’的 LSP 和 LCP;而品种‘早粉盘’及‘檀香狮子’的 LSP 和 LCP 均较高,其中,品种‘早粉盘’的 LSP 和 LCP 分别为 $1\,077.53$ 和 $141.17 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,品种‘檀香狮子’的 LSP 和 LCP 分别为 $1\,035.44$ 和 $134.28 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,表明二者的耐阴性较强;品种‘太平的小鼓’和‘铜雀春深’具有较高的 LSP 和较低的 LCP,说明二者对光照的适应能力较强;品种‘日出东方’、‘关东新侠’、‘绿牡丹’及‘星光灿烂’均具有较高的 LCP 和较低的 LSP,说明它们对光照的适应范围较窄;品种‘云龙凤舞’的 LSP、LCP 和 AQY 也较低,表明其耐阴能力也较强,但对弱光的利用能力则较弱。

表 1 10 个秋菊品种叶片光响应参数的比较 ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

Table 1 Comparison of light response parameters of leaves of ten cultivars of autumn chrysanthemum [*Dendranthema morifolium* (Ramat.) Tsvzel.] ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

品种 Cultivar	LSP/ $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	LCP/ $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	$P_{n_{\max}}/\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	AQY	回归方程 Regression equation
早粉盘 Zaofenpan	1 077.53±40.72Aa	141.17±5.56Bb	17.53±0.75Aa	0.044 5±0.002 0Aa	$y=0.044 5x-6.081$
铜雀春深 Tongquechunshen	1 045.34±39.81Bb	120.19±4.98Ee	17.10±0.69Bb	0.031 9±0.001 5Gh	$y=0.031 9x-4.175$
檀香狮子 Tanxiangshizi	1 035.44±33.14Cc	134.28±5.66Cc	16.22±0.73Cc	0.042 1±0.002 0Ccd	$y=0.042 1x-5.597$
太平的小鼓 Taipingdexiaogu	1 030.13±35.53Dd	103.72±4.10Ff	17.16±0.58Bb	0.039 2±0.001 8De	$y=0.039 2x-4.163$
日出东方 Richudongfang	1 022.52±40.14Ee	167.37±5.98Aa	14.62±0.66Gg	0.043 2±0.002 0Bb	$y=0.043 2x-6.780$
关东新侠 Guandongxinxia	1 017.53±31.53Ff	141.53±3.98Bb	15.35±0.61Ee	0.042 4±0.001 9Cc	$y=0.042 4x-5.724$
云龙凤舞 Yunlongfengwu	1 010.24±39.42Gg	120.23±3.76Ee	15.83±0.64Dd	0.038 6±0.001 7Ef	$y=0.038 6x-4.703$
绿牡丹 Liumudan	1 000.35±32.14Hh	128.61±5.10Dd	15.19±0.59Eef	0.039 2±0.001 8De	$y=0.039 2x-4.960$
星光灿烂 Xingguangcanlan	985.42±29.93Ii	128.04±4.62Dd	14.69±0.57Gg	0.041 9±0.002 1Cd	$y=0.041 9x-5.219$
日本黄 Ribenuang	962.51±30.21Jj	92.83±3.92Gg	15.13±0.65Ff	0.036 2±0.001 5Fg	$y=0.036 2x-3.436$

¹⁾ 同列中不同的大写和小写字母分别表示差异极显著 ($P < 0.01$) 或显著 ($P < 0.05$) Different capitals and small letters in the same column indicate extremely significant difference ($P < 0.01$) or significant difference ($P < 0.05$), respectively. LSP: 光饱和点 Light saturation point; LCP: 光补偿点 Light compensation point; $P_{n_{\max}}$: 最大净光合速率 Maximum net photosynthetic rate; AQY: 表观量子效率 Apparent quantum yield.

2.2 叶片 CO₂ 响应参数的比较

供试的 10 个秋菊品种叶片的 CO₂ 饱和点 (CSP)、CO₂ 补偿点 (CCP)、最大净光合速率 (Pn_{max}) 以及净光合速率 (Pn) 与胞间 CO₂ 浓度 (Ci) 的回归方程见表 2。各品种 Pn 的 CO₂ 响应曲线 (图略) 的变化趋势基本相同; 以 Ci 为自变量 x 、净光合速率为因变量 y 进行线性回归分析, 获得的 10 个品种的回归方程 (表 2) 也较为相似。在 Ci 低于 400 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 的条件下, 随 Ci 的增加, Pn 呈直线增长趋势; 随 Ci 的继续增加, Pn 增幅减小, 并逐渐达到最大值, 之后趋于平稳。当 Ci 为 300 ~ 800 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 时, 10 个秋菊品种的 Pn 为 6.75 ~ 24.43 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 可见, Ci 增加可显著

提高菊花的 Pn 值。

从表 2 可见: 10 个品种的 CSP 差异极显著, 多数品种的 CCP 及 Pn_{max} 有极显著差异。10 个品种的 CCP 为 77.62 ~ 133.16 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 表明它们为典型的 C₃ 植物。10 个品种的 CSP 为 1 060.46 ~ 1 485.48 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 其中, 品种‘关东新侠’和‘绿牡丹’的 CSP 分别为 1 485.48 和 1 456.25 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 极显著高于其他品种; 品种‘檀香狮子’和‘早粉盘’的 CSP 则较低, 极显著低于其他品种。而品种‘星光灿烂’和‘绿牡丹’的 CCP 分别为 77.62 和 87.83 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 极显著低于其他品种, 表明这 2 个品种对低浓度胞间 CO₂ 的利用能力较强。

表 2 10 个秋菊品种叶片 CO₂ 响应参数的比较 ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

Table 2 Comparison of CO₂ response parameters of leaves of ten cultivars of autumn chrysanthemum [*Dendranthema morifolium* (Ramat.) Tsvzel.] ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

品种 Cultivar	CSP/ $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$	CCP/ $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$	Pn _{max} / $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	CE	回归方程 Regression equation
早粉盘 Zaofenpan	1 100.46±41.24li	100.31±4.02De	19.99±0.76Dd	0.042 3±0.002 0Bb	$y=0.042 3x-4.217$
铜雀春深 Tongquechunshen	1 285.31±47.43Ff	100.15±4.06De	28.07±1.36Aa	0.052 6±0.002 5Aa	$y=0.052 6x-5.244$
檀香狮子 Tanxiangshizi	1 060.46±40.41Jj	133.16±5.46Aa	19.18±0.61Fg	0.040 3±0.001 9Cc	$y=0.040 3x-5.237$
太平的小鼓 Taipingdexiaogu	1 212.54±42.54Gg	107.85±4.54Cd	24.43±0.95Bb	0.038 1±0.001 6Dd	$y=0.038 1x-4.257$
日出东方 Richudongfang	1 132.53±43.32Hh	102.75±3.88De	21.21±0.69Cc	0.040 4±0.002 0Cc	$y=0.040 4x-4.311$
关东新侠 Guandongxinxia	1 485.48±51.43Aa	111.21±4.21Cc	18.87±0.81Ee	0.034 3±0.001 6Ff	$y=0.034 3x-3.677$
云龙凤舞 Yunlongfengwu	1 361.11±50.31Dd	122.91±4.93Bb	13.82±0.58Hj	0.022 5±0.001 3li	$y=0.022 5x-2.839$
绿牡丹 Lümudan	1 456.25±54.14Bb	87.83±3.21Fg	14.98±0.63Gh	0.027 2±0.001 2Hh	$y=0.027 2x-2.473$
星光灿烂 Xingguangcanlan	1 400.36±48.32Cc	77.62±3.98Gh	17.49±0.66Ff	0.028 8±0.001 5Ee	$y=0.028 8x-3.008$
日本黄 Ribenhuang	1 305.28±49.84Ee	93.64±3.69Ef	14.67±0.42Gi	0.028 3±0.001 1Gg	$y=0.028 3x-2.687$

¹⁾ 同列中不同的大写和小写字母分别表示差异极显著 ($P < 0.01$) 或显著 ($P < 0.05$) Different capitals and small letters in the same column indicate extremely significant difference ($P < 0.01$) or significant difference ($P < 0.05$), respectively. CSP: CO₂ 饱和点 CO₂ saturation point; CCP: CO₂ 补偿点 CO₂ compensation point; Pn_{max}: 最大净光合速率 Maximum net photosynthetic rate; CE: 羧化效率 Carboxylation efficiency.

2.3 叶片光合参数日变化的比较

供试的 10 个秋菊品种叶片光合参数的日变化见表 3。由表 3 可以看出: 在 6:00 至 10:00, 10 个品种的净光合速率 (Pn) 均呈快速上升的趋势, 于 10:00 左右达到峰值 (11 ~ 19 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); 在 10:00 至 14:00, Pn 迅速下降, 至 14:00 左右降到低谷值 (1 ~ 6 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); 然后 Pn 又缓慢上升, 在 16:00 前后达到次峰值; 之后 Pn 开始下降, 18:00 左右降到最低值 (1 ~ 3 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。10 个秋菊品种光合参数的日变化均表现出“上升-下降-再上升-再下降”的趋势, 说明这些品种的光合作用存在明显的“午休”现象。然而, 10 个秋菊品种的光合能力有一定差异, 品种‘早粉盘’和‘铜雀春深’对午前上升的光照

强度较敏感, Pn 快速增加, 能充分利用上午的有利环境条件进行光合作用; 而品种‘檀香狮子’则从“午休”状态中恢复较快, 可以利用午后较长的时间进行相对较强的光合作用。

由表 3 还可见: 10 个品种的气孔导度 (Gs) 和蒸腾速率 (Tr) 的日变化趋势与 Pn 相似, 区别在于 Gs 的峰值出现在 10:00 左右, 与 Pn 的最大值同步出现; 而 Tr 的峰值则出现在 12:00 左右; Gs 与 Tr 的低谷值均出现在 14:00 左右; Gs 与 Tr 的次峰值均出现在 16:00 前后。胞间 CO₂ 浓度 (Ci) 的日变化趋势与 Pn 基本相反, Ci 在 6:00、14:00 及 18:00 左右较高, 在 10:00 及 16:00 出现低谷值, 2 个 Ci 低谷值出现的时间与 Pn 的 2 个峰值一致。

表3 10个秋菊品种叶片光合参数日变化的比较 ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾Table 3 Comparison of daily changes of photosynthetic parameters of leaves of ten cultivars of autumn chrysanthemum [*Dendranthema morifolium* (Ramat.) Tvel.] ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

时间 Time	Pn	Gs	Ci	Tr	时间 Time	Pn	Gs	Ci	Tr
早粉盘 Zaofenpan					关东新侠 Guandongxinxia				
6:00	4.21±0.29	204.3±9.4	346.6±18.9	2.11±0.15	6:00	3.01±0.17	196.0±10.4	321.4±18.6	2.23±0.13
8:00	10.98±0.67	298.2±14.8	287.5±13.2	3.01±0.16	8:00	8.06±0.52	268.6±15.7	306.7±17.3	3.37±0.21
10:00	18.96±1.14	356.7±17.3	225.2±11.4	4.80±0.26	10:00	15.41±0.86	414.0±23.5	248.6±13.5	4.57±0.27
12:00	11.30±0.58	204.6±10.7	239.4±16.4	5.01±0.24	12:00	7.09±0.41	208.3±11.9	261.8±17.8	6.37±0.45
14:00	3.82±0.16	113.8±6.9	270.6±15.8	2.28±0.18	14:00	3.68±1.23	155.0±8.3	300.0±14.3	3.12±0.16
16:00	7.93±0.37	192.1±10.4	259.8±13.7	3.63±0.19	16:00	5.45±0.36	210.4±11.2	268.7±12.6	4.32±0.22
18:00	2.98±0.14	78.8±4.2	283.6±15.6	2.64±0.12	18:00	2.64±0.17	113.9±6.7	319.6±21.4	2.89±0.18
铜雀春深 Tongquechunshen					云龙凤舞 Yunlongfengwu				
6:00	5.70±0.24	196.0±10.3	372.3±19.7	2.39±0.14	6:00	4.90±0.31	213.4±12.6	314.2±16.4	2.68±0.18
8:00	9.98±0.51	263.5±14.5	305.5±16.8	3.64±0.19	8:00	9.98±0.54	281.0±15.9	283.9±20.7	3.29±0.21
10:00	17.45±0.94	412.7±23.3	258.4±14.3	4.82±0.27	10:00	14.79±0.86	331.7±18.2	238.3±13.9	3.69±0.23
12:00	12.17±0.75	261.6±14.2	280.7±15.2	5.25±0.31	12:00	7.59±0.35	195.8±10.3	268.5±14.6	4.48±0.27
14:00	5.99±0.34	121.9±7.6	300.6±14.5	2.98±0.21	14:00	2.86±0.17	112.7±6.5	295.6±17.8	2.84±0.17
16:00	7.15±0.38	204.1±11.6	258.7±13.1	3.03±0.19	16:00	5.98±0.32	187.6±10.1	251.7±14.3	3.17±0.22
18:00	2.73±0.14	121.9±7.8	320.4±17.6	2.01±0.13	18:00	2.02±0.09	84.5±5.7	300.4±16.2	2.33±0.15
檀香狮子 Tanxiangshizi					绿牡丹 Lümudan				
6:00	5.29±0.31	230.2±14.8	301.5±18.4	2.76±0.18	6:00	3.61±0.19	193.3±10.4	330.6±17.6	2.26±0.13
8:00	7.71±0.38	315.1±17.3	271.5±16.3	3.17±0.21	8:00	6.52±0.42	224.7±13.5	274.1±14.6	3.74±0.21
10:00	16.44±0.91	393.4±21.6	243.7±17.1	4.28±0.29	10:00	13.32±0.81	314.2±17.4	230.4±13.7	4.28±0.23
12:00	8.07±0.52	255.3±17.3	250.8±13.5	5.10±0.34	12:00	8.88±0.53	189.1±10.4	253.4±12.2	4.91±0.31
14:00	2.02±0.13	144.3±8.5	290.7±17.9	2.31±0.15	14:00	2.53±0.15	130.3±6.7	283.6±13.8	2.90±0.17
16:00	6.72±0.37	186.6±10.7	252.5±14.2	2.88±0.16	16:00	4.25±0.34	164.9±9.3	248.7±11.4	3.77±0.24
18:00	2.41±0.14	114.8±7.2	295.5±16.8	2.19±0.17	18:00	1.94±0.08	90.3±5.1	322.7±17.4	1.84±0.12
太平的小鼓 Taipingdexiaogu					星光灿烂 Xingguangcanlan				
6:00	3.45±0.21	179.7±10.1	325.3±21.5	2.85±0.19	6:00	3.31±0.17	228.5±13.6	300.6±16.2	2.45±0.14
8:00	6.82±0.39	221.5±13.4	289.0±16.8	3.87±0.24	8:00	5.93±0.34	252.1±14.8	256.5±13.6	3.55±0.17
10:00	15.02±0.87	321.0±17.5	260.4±15.7	4.87±0.31	10:00	12.58±0.75	371.6±25.3	214.4±12.7	4.52±0.28
12:00	9.83±0.53	193.9±9.4	290.3±17.4	5.42±0.37	12:00	7.01±0.42	226.4±13.2	232.4±12.3	5.24±0.26
14:00	3.12±0.24	99.0±5.8	306.9±20.7	2.58±0.16	14:00	1.91±0.11	106.3±6.4	279.2±15.2	3.13±0.13
16:00	6.22±0.37	164.0±9.4	262.4±14.6	3.43±0.24	16:00	3.98±0.26	175.8±9.5	253.5±14.8	3.92±0.19
18:00	2.31±0.17	76.4±4.3	308.4±16.9	2.36±0.14	18:00	1.73±0.07	108.2±5.7	298.5±15.3	2.25±0.12
日出东方 Richudongfang					日本黄 Ribenhuang				
6:00	3.03±0.16	129.8±8.9	352.8±21.3	1.91±0.11	6:00	2.92±0.15	179.4±9.4	335.8±17.2	2.03±0.11
8:00	6.02±0.34	174.4±9.6	312.3±17.4	3.24±0.21	8:00	5.09±0.31	243.8±13.8	308.7±16.8	3.10±0.17
10:00	14.27±0.86	299.5±16.2	283.0±16.9	4.14±0.25	10:00	11.81±0.64	303.3±16.7	251.2±13.4	3.83±0.23
12:00	7.08±0.42	184.6±10.4	296.3±18.2	4.70±0.28	12:00	6.15±0.41	207.6±11.2	270.7±15.3	5.21±0.32
14:00	3.12±0.18	100.1±6.8	326.5±21.6	2.23±0.17	14:00	1.67±0.09	123.6±7.1	292.4±16.7	2.48±0.16
16:00	5.18±0.36	140.9±8.3	283.8±17.4	3.20±0.21	16:00	4.82±0.27	195.1±10.3	235.7±14.5	2.91±0.14
18:00	2.12±0.14	88.0±5.6	336.2±19.3	1.98±0.09	18:00	1.47±0.08	98.7±5.6	341.8±18.6	1.85±0.09

¹⁾ Pn: 净光合速率 Net photosynthetic rate; Gs: 气孔导度 Stomatal conductance; Ci: 胞间 CO₂ 浓度 Intercellular CO₂ concentration; Tr: 蒸腾速率 Transpiration rate.

2.4 净光合速率与主要生理生态因子的相关性分析

供试 10 个秋菊品种叶片的净光合速率(Pn)与气孔导度(Gs)、蒸腾速率(Tr)、胞间 CO₂ 浓度(Ci)、光合有效辐射强度(PAR)、大气温度(Ta)、大气相对湿度

(RH)和大气 CO₂ 浓度(Ca)的相关系数见表 4。由表 4 可见:10 个品种的 Pn 与 Gs 的相关系数为 0.892 ~ 0.987,均表现为极显著的正相关关系; Pn 与 Tr 的相关系数为 0.652 ~ 0.906,其中品种‘早粉盘’、‘铜雀

春深’及‘太平的小鼓’的 Pn 与 Tr 极显著正相关,品种‘檀香狮子’、‘日出东方’、‘绿牡丹’及‘星光灿烂’的 Pn 与 Tr 显著正相关,其他品种的 Pn 与 Tr 呈不显著的正相关关系;10个品种 Pn 与 Ci 的相关系数为 $-0.898 \sim -0.759$,其中品种‘早粉盘’、‘铜雀春深’、‘檀香狮子’、‘星光灿烂’及‘日本黄’的 Pn 与 Ci 极显著负相关,其他品种的 Pn 与 Ci 均呈显著的负相关

关系。此外,10个品种的 Pn 与 PAR 和 Ta 正相关,与 RH 和 Ca 负相关,但相关性均不显著。

实验结果表明:10个秋菊品种叶片的净光合速率主要受气孔导度和胞间 CO₂ 浓度的影响,与蒸腾速率、光合有效辐射强度、大气温度、大气相对湿度和大气 CO₂ 浓度也有一定的相关性。

表4 10个秋菊品种叶片的净光合速率(Pn)与主要生理生态因子的相关系数¹⁾

Table 4 Correlation coefficients between net photosynthetic rate (Pn) and main physio-ecological factors in leaves of ten cultivars of autumn chrysanthemum [*Dendranthema morifolium* (Ramat.) Tsvet.]¹⁾

品种 Cultivar	Pn 与不同因子的相关系数 Correlation coefficient between Pn and different factors						
	Gs	Tr	Ci	PAR	Ta	RH	Ca
早粉盘 Zaofenpan	0.892 **	0.864 **	-0.864 **	0.428	0.026	-0.184	-0.383
铜雀春深 Tongquechunshen	0.957 **	0.906 **	-0.898 **	0.534	0.508	-0.250	-0.456
檀香狮子 Tanxiangshizi	0.922 **	0.787 *	-0.878 **	0.316	0.233	-0.047	-0.204
太平的小鼓 Taipingdexiaogou	0.902 **	0.885 **	-0.767 *	0.531	0.467	-0.278	-0.449
日出东方 Richudongfang	0.987 **	0.764 *	-0.785 *	0.464	0.391	-0.217	-0.378
关东新侠 Guandongxinxia	0.964 **	0.692	-0.759 *	0.433	0.354	-0.162	-0.351
云龙凤舞 Yunlongfengwu	0.949 **	0.664	-0.779 *	0.330	0.240	0.014	-0.200
绿牡丹 Lümudan	0.899 **	0.782 *	-0.790 *	0.478	0.425	-0.186	-0.398
星光灿烂 Xingguangcanlan	0.934 **	0.774 *	-0.884 **	0.409	0.343	-0.123	-0.321
日本黄 Ribenhuang	0.925 **	0.652	-0.895 **	0.416	0.337	-0.162	-0.316

¹⁾ Gs: 气孔导度 Stomatal conductance; Tr: 蒸腾速率 Transpiration rate; Ci: 胞间 CO₂ 浓度 Intercellular CO₂ concentration; PAR: 光合有效辐射强度 Photosynthetically active radiation intensity; Ta: 大气温度 Atmospheric temperature; RH: 大气相对湿度 Atmospheric relative humidity; Ca: 大气 CO₂ 浓度 Atmospheric CO₂ concentration. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

3 讨论和结论

植物叶片光合能力的强弱在一定程度上取决于物种的遗传特性^[1-2,9]。光饱和点和光补偿点可用来衡量植物对强光或弱光的利用能力,光饱和点较高的种类对强光环境较为适应,而较高的光补偿点可导致产物消耗量增加^[9-10]。植物的表观量子效率越低,其对光能的利用能力越弱。供试 10 个秋菊品种的光饱和点为 $962.51 \sim 1077.53 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,光补偿点为 $92.83 \sim 167.37 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,表明这些秋菊品种均属于喜光植物。秋菊不同品种对光照条件的利用能力不同,各品种之间差异显著。早花品种中,品种‘早粉盘’及‘檀香狮子’的光饱和点、光补偿点和表观量子效率均较高,表明这 2 个品种在强光环境下能够有效进行光合作用,但产物消耗量较多;品种‘太平的小鼓’和‘铜雀春深’具有较高的光饱和点以及较低的光补偿点和表观量子效率,表明这 2 个品种对光照条件的适应范围较大,适宜在光照较强的环境下

栽培;品种‘日出东方’具有较高的光补偿点和表观量子效率以及较低的光饱和点,表明其适应的光照条件范围较窄,但利用光能的能力较强且能在相对较弱的光照环境中生长。晚花品种中,品种‘关东新侠’、‘绿牡丹’和‘星光灿烂’具有较高的光补偿点和表观量子效率以及较低的光饱和点,能够在相对较弱的光照条件下利用光能,可以在树阴下等光照条件相对较弱的环境中进行栽植;品种‘日本黄’和‘云龙凤舞’的光饱和点、光补偿点和表观量子效率均较低,表明这 2 个品种具有一定的耐阴性,但其利用弱光的能力相对较弱。

CO₂ 是光合作用的重要原料,其浓度直接影响植物的光合作用。CO₂ 浓度升高,一方面增加了 CO₂ 对 Rubisco 酶结合位点的竞争能力,进而提高羧化效率;另一方面可抑制光呼吸作用,进而提高光合效率^[11]。供试的 10 个秋菊品种的 CO₂ 补偿点 ($77.62 \sim 133.16 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$) 远大于一般常见的 C₃ 植物 ($30 \sim 70 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$),说明这些秋菊品种均为典型的 C₃ 植物;它们的羧化效率为 $0.0225 \sim 0.0526$,均明显低于

常见的 C_3 植物 (0.06 ~ 0.12)。与美丽异木棉 (*Chorisia speciosa* St.)^[12] 相比,供试的 10 个秋菊品种的 CO_2 补偿点和 CO_2 饱和点 (1 060.46 ~ 1 485.48 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$) 均较高,表明秋菊对低浓度 CO_2 的利用能力不强。但是,不同秋菊品种对 CO_2 的利用能力差异显著,其中品种‘绿牡丹’、‘星光灿烂’及‘日本黄’的 CO_2 补偿点均较低, CO_2 饱和点均较高,表明这 3 个品种对低浓度及高浓度 CO_2 的利用能力均较强。作者的研究结果显示:当胞间 CO_2 浓度为 300 ~ 800 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 时, 10 个秋菊品种的净光合速率为 6.75 ~ 24.43 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 可见,适当增加 CO_2 浓度可显著提高秋菊的净光合速率。在实际生产中,可以通过增施 CO_2 肥料等措施来提高菊花的光合速率。

供试的 10 个秋菊品种净光合速率 (P_n) 的日变化趋势与许多植物^[13-18] 相似,呈典型的双峰型曲线,首峰均出现在 10:00 左右,次峰均出现在 16:00 左右,并有明显的光合“午休”现象;早花品种的 P_n 普遍高于晚花品种,在 10:00,早花品种的 P_n 为 14.27 ~ 18.96 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 而晚花品种的 P_n 为 11.81 ~ 15.41 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。10 个秋菊品种的气孔导度和蒸腾速率的日变化规律与净光合速率相似,也均呈双峰型曲线;而胞间 CO_2 浓度的日变化趋势基本上与净光合速率相反。

相关性分析结果表明:供试的 10 个秋菊品种的净光合速率与气孔导度呈极显著正相关,与胞间 CO_2 浓度呈显著或极显著的负相关,与光合有效辐射强度和大气温度呈不显著正相关,与大气相对湿度和大气 CO_2 浓度呈不显著负相关;除品种‘关东新侠’、‘云龙凤舞’和‘日本黄’外,其他 7 个品种的净光合速率均与蒸腾速率有显著或极显著的正相关关系。上述结果表明:秋菊叶片的光合作用受气孔导度、胞间 CO_2 浓度、蒸腾速率和光合有效辐射强度等生理生态因子的综合影响,其中气孔导度和胞间 CO_2 浓度的影响较大。其他生理生态因子与菊花光合作用的关系及其作用机制有待进一步研究。

综合上述研究结果,建议在秋菊的生产中,在强光、高温及低湿的夏季对菊花进行适当遮阳和喷灌,以降低空气温度、增加空气相对湿度,从而减少植株的水分蒸腾消耗,避免由于强光照射而引起的叶片光

合结构的破坏,进而减弱光合作用的“午休”现象,提高菊花的光合作用生产力。

参考文献:

- [1] 张友焱,周泽福,党宏忠,等. 毛乌素沙地油蒿不同生长期的枝条水势和叶片气体交换特性[J]. 植物资源与环境学报, 2010, 19(3): 17-22.
- [2] 于晓霞,阮成江. 曼陀罗光合特性研究[J]. 植物资源与环境学报, 2011, 20(1): 40-45.
- [3] 戴思兰,王文奎,黄家平. 菊属系统学及菊花起源的研究进展[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(5/6): 230-234.
- [4] 张树林. 菊花品种分类的研究[J]. 园艺学报, 1965, 4(1): 35-46.
- [5] 杨娜,郭维明,陈发棣,等. 光周期对秋菊品种‘神马’花芽分化和开花的影响[J]. 园艺学报, 2007, 34(4): 965-972.
- [6] 许瑛,陈发棣. 菊花 8 个品种的低温半致死温度及其抗寒适应性[J]. 园艺学报, 2008, 35(4): 559-564.
- [7] 孙宪芝,郑成淑,王秀峰. 高温胁迫对切花菊‘神马’光合作用与叶绿素荧光的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(10): 2149-2154.
- [8] 贾思振,房伟民,陈发棣,等. 高温下 5 个夏菊品种开花特性、叶片组织结构与光合特性的比较[J]. 南京农业大学学报, 2009, 32(3): 151-156.
- [9] 靳甜甜,刘国华,胡娟娟,等. 黄土高原常见造林树种光合蒸腾特征[J]. 生态学报, 2008, 28(11): 5758-5765.
- [10] 傅松玲,黄成林. 黄山松更新特性与光因子关系的研究[J]. 应用生态学报, 2000, 11(6): 801-804.
- [11] 蒋跃林,张庆国,杨书运,等. 28 种园林植物对大气 CO_2 浓度增加的生理生态反应[J]. 植物资源与环境学报, 2006, 15(2): 1-6.
- [12] 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.
- [13] 靳忠英,彭正松,李育明,等. 半夏的光合特性[J]. 作物学报, 2006, 32(10): 1542-1548.
- [14] 侯小改. 4 个牡丹品种光合特性的比较研究[J]. 河南农业大学学报, 2007, 41(5): 527-530.
- [15] 吴彦琼,胡玉佳. 外来植物南美鳢葵、裂叶牵牛和五爪金龙的光合特性[J]. 生态学报, 2004, 24(10): 2334-2339.
- [16] 黄成林,傅松玲,梁淑云,等. 五种攀缘植物光合作用与光因子关系的初步研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(7): 1131-1134.
- [17] 陶俊,陈鹏. 银杏光合特性的研究[J]. 园艺学报, 1999, 26(3): 157-160.
- [18] 杨江山,常永义,种培芳. 樱桃不同节位叶片光合特性与解剖特征比较研究[J]. 果树学报, 2005, 22(4): 323-326.

(责任编辑:佟金凤)