

研究报告 Original Papers

绣球属品种间光合特性的比较研究

虞秀明, 孙强*, 姚红军, 王焱

上海市林业总站, 上海现代林业技术培训中心, 上海200072

摘要: 为比较绣球属(*Hydrangea*)不同栽培品种的光合特性, 以9个绣球属品种为试材, 对其气体交换、叶绿素荧光及叶片叶绿素含量进行研究。结果表明, ‘Zorro’和‘Lemon Web’叶片的光合速率、反映光能利用率的叶绿素荧光指标和相对叶绿素含量高, 而在‘Murasaki kobai’、‘贝拉安娜’、‘红额’和‘无尽夏’中较低; 相反地, ‘Zorro’和‘Lemon Web’叶片非光化学淬灭均小于其他品种, 而这些指标在‘Murasaki kobai’和‘贝拉安娜’中较大。综合参考这些指标, ‘Zorro’和‘Lemon Web’叶片的光能利用能力较强, 是适合光下载培的耐强光性绣球品种, 而‘Murasaki kobai’、‘红额’和‘贝拉安娜’叶片的光合能力较弱, ‘红额’的耐荫性最强, 适合弱光下载培。

关键词: 绣球属; 光合作用; 叶绿素荧光; 叶绿素含量; 品种差异

绣球属(*Hydrangea*)属绣球花科, 其花型丰满, 花色丰富, 花期较长, 是长江流域以南重要的园林观赏植物, 不仅可用于庭园花境、林缘和基础种植, 也可用作大型花卉装饰和盆花, 具有较高的观赏价值和经济价值(Hufford 2001)。绣球喜半阴环境, 但其花期为光照较强的5~8月, 若其受烈日直晒易患日灼病, 导致叶片泛黄焦灼, 影响其花期观赏价值。因此, 绣球露地栽培时常需栽植于公共绿地的稀疏树荫下及林荫道旁, 设施栽培时则需进行遮荫处理(彭尽晖2010; Nesi等2013)。因此, 研究和掌握绣球属植物的光合作用机制及不同品种的光合特性可为绣球属园林景观植物的合理配置提供理论依据。

目前关于绣球属植物光合特性的研究已有报道。绣球属植物对光的需求因种类不同而有差异(Nesi等2013)。彭尽晖(2010)研究发现湖南省绣球属植物资源中的八仙花(*Hydrangea macrophylla*)、圆锥绣球(*Hydrangea paniculata*)、柔毛绣球(*Hydrangea villosa*)和腊莲绣球(*Hydrangea strigosa*)对光适应的生态幅度均较宽, 且其耐荫性依次递减。邹鸣(2012)通过比较‘Coerulea’八仙花、‘银边八仙花’(‘Silver Hydrangea’)和八仙花花叶变异株(mosaic variant)叶片的净光合速率等光合指标, 发现其光合能力依次递减。绣球属植物光合能力也与内部因素(叶片结构特点、植株发育阶段及营养状况)和外部环境因素(不同遮荫条件和胁迫条件)密切相关(彭尽晖2010; 谭艳2010; Pagter等2008; Nesi等2013)。Pagter等(2008)和彭尽晖(2010)研究发现与圆锥绣球‘Kyushu’相比, 逆境胁迫对八仙花‘Blaumeise’、

‘Coerulea’和‘Kuhnert’的光合速率及叶绿素荧光参数的影响更为显著(彭尽晖2010; Pagter等2008)。由此可见, 目前鲜有关于具较高观赏价值的耐强光性绣球栽培品种筛选及其筛选依据的报道。

本研究以9个绣球属栽培品种为实验试材, 研究其光合与叶绿素荧光特性, 以充分掌握不同品种对光能的利用与耗散及光合保护机制的特性, 为科学管理绣球属植物栽培和繁殖提供可靠的实验依据。

材料与方法

1 材料

实验于上海市林业总站的九亭种质资源圃中进行, 实验材料为9个二年生绣球属(*Hydrangea* L.)品种的扦插苗, 分别为粗齿绣球[*Hydrangea serrata* (Thunb.) Ser.]品种‘Murasaki kobai’和‘蓝鸟’(‘Bluebird’), 八仙花[*Hydrangea macrophylla* (Thunb.) Ser.]品种‘森乃妖精’、‘花手鞠’(‘hanatemari’)、‘无尽夏’(‘Forever Summer’)、‘Zorro’、‘红额’和‘Lemon Web’, 以及乔木绣球(*Hydrangea arborescens* L.)品种‘贝拉安娜’(‘Annabelle’)。供试品种全部采用露地栽培, 并铺设遮阳网(遮荫度70%)进行遮荫处理。资源圃内置温、湿和光感应器用以实时监测温、湿度和光照情况, 每小时记录一次(图1)。6月11~14日8:00~12:00该资源圃内的平

收稿 2016-07-14 修定 2016-07-22

资助 国家林业局植物新品种DUS测试指南专项(2014036)和上海市绿化和市容管理局辰山专项(G142438)。

* 通讯作者(E-mail: sundaysq@126.com)。

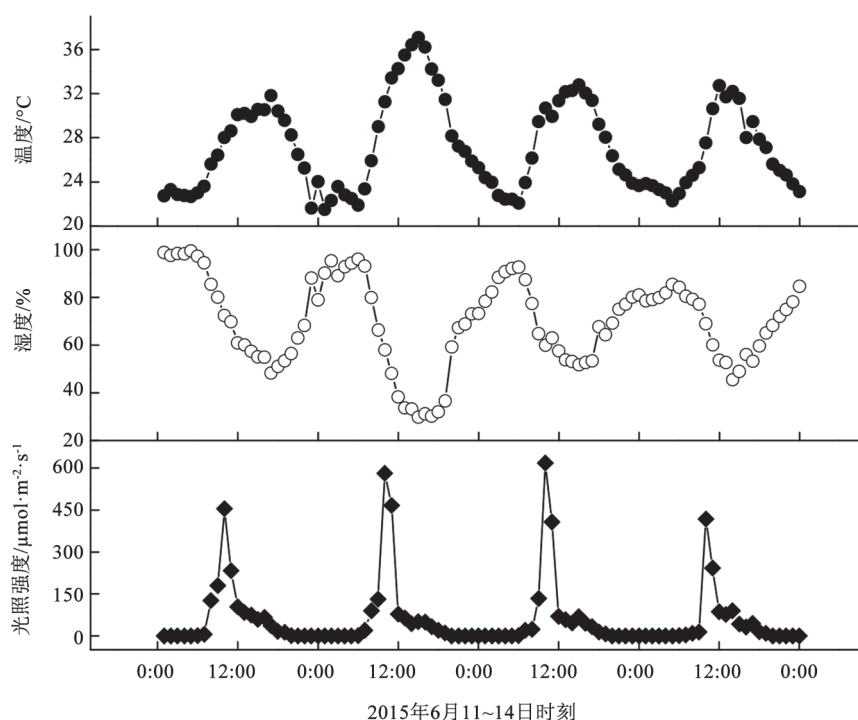


图1 实验期间环境温度、湿度和光照强度的变化

Fig.1 The changes of the temperature, relative humidity and light intensity during the experiment

均气温为30.4°C, 平均空气相对湿度为59.9%, 平均光照强度为128.8 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

2 方法

2.1 叶片气体交换参数测定

利用CIRAS-2便携式光合测定仪(PP System, USA)于2015年6月中旬绣球属植物盛花期, 每个品种随机选取3株, 选择晴朗无云天8:30~11:30, 将光合仪中 A (测定的叶片面积)、 V (设定的气体流量)、 Q (设定的光合有效辐射强度)、 C (设定的 CO_2 浓度)、 H (设定的相对湿度)和 T (设定的叶片温度)参数分别设为 2.5 cm^2 (圆形叶室)、 $200\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 、ambient (自然环境条件下的光合有效辐射强度)、 $0\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ (大气供气)、95%和none (不控温), 测定每株花序以下第2节位叶片的气体交换参数: 净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、胞间二氧化碳浓度(C_i)、参比二氧化碳浓度(C_r)、参比湿度(H_r)、叶室温度(T_c)和光合有效辐射(Q)。

通过控制光照、温度和 CO_2 浓度, 其余条件同上, 测定叶片光响应曲线: CO_2 浓度为 $390\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 叶室温度为 28°C 的条件下, 设置光量子通量密度

(photosynthetic photon flux density, PPF)梯度为0、50、100、200、300、400、600、800、1 200和1 400 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 待数值稳定后记录 P_n 、 T_r 、 G_s 和 C_i 数据。

2.2 叶绿素荧光指标测定

选择晴朗无云天10:00~11:30采用FMS-2便携式脉冲调制式荧光仪(Hansatech Instruments, UK)测定叶片(光合测定对应叶片)的叶绿素荧光参数, 叶片置于暗适应夹中适应30 min后测定初始荧光(F_0), 然后用饱和脉冲光($5\ 000\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)照射0.8 s, 测定最大荧光(F_m)和光合系统II (PSII)最大光化学效率(F_v/F_m)。饱和脉冲光照射以后, 用 $500\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的活化光照射叶片, 测定叶片实际荧光(F_s)。然后再次打开饱和脉冲光, 照射0.8 s后测定最大荧光(F_m'), 关闭活化光同时打开远红光照射0.3 s后测定最小荧光(F_0')。参照Bilger和Björkman (1990)及吴雪霞等(2013)的方法, 由以上所得参数进一步计算得到以下参数: 实际光化学效率(Φ_{PSII})= $(F_m - F_m')/F_m'$; PSII天线转化效率(F_v'/F_m')= $(F_m' - F_0')/F_m'$; 光化学淬灭系数(q_p)= $(F_m' - F_s)/(F_m' - F_0')$; 非光化学淬灭系数(NPQ)= $(F_m - F_m')/F_m'$ 。PSII吸收光能

分配百分率参照Demmig-Adams等(1996)的方法计算: 光化学反应的能量(P)= $F_v'/F_m' \times q_p$; 天线色素耗散的能量(D)= $1-F_v'/F_m'$; 非光化学反应耗散的能量(E)= $(1-q_p) \times (F_v'/F_m')$ 。

2.3 叶绿素含量测定

叶绿素含量用手持叶绿素仪(SPAD-502 PLUS)测定。实验叶片选取同第2.1节所述, 重复6次。

2.4 统计分析

每一数据为3个值的平均值, 表示为平均值 \pm 标准误差。用Photosynthesis软件对 P_n -PPFD响应曲线进行拟合分析, 计算得出各品种的光补偿点(LCP)、光饱和点(LSP)、最大光合速率(A_{max})和表观量子效率(AQE)等参数。使用SPSS 19软件进行参数的Duncan多重比较分析和Pearson相关性分析。

实验结果

1 叶绿素含量的比较

如图2所示, 叶片叶绿素含量最高的品种是‘LemonWeb’, ‘Zorro’次之, 随后为‘森乃妖精’、‘花手鞠’和‘蓝鸟’, 但这3个品种间差异不显著; 之后为‘贝拉安娜’, 而‘Murasaki kobai’、‘无尽夏’和‘红额’叶片的叶绿素含量最低, 仅为‘Lemon Web’的56.0%~59.4%。

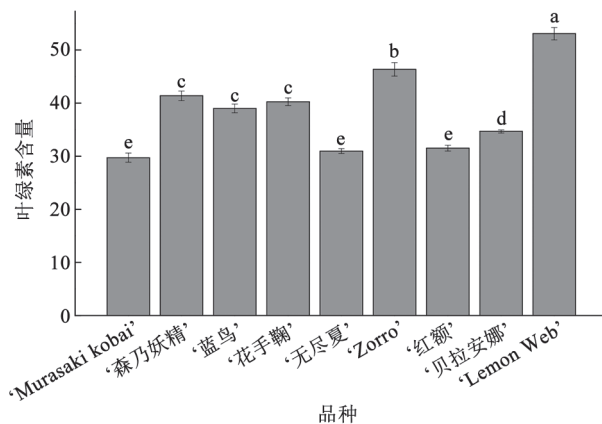


图2 不同绣球属品种的叶片叶绿素含量

Fig.2 Leaf chlorophyll contents of different *Hydrangea* varieties
各柱形上用不同小写字母标识表示数据间差异显著($P < 0.05$), 图3、5和6同。

2 气体交换的比较

实验期间不同品种间的 C_i 、 H_i 、 T_i 和 Q 差异

不显著, 均值分别为 $203.8 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 、 17.87 hPa 、 35.6°C 和 $1722.5 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。不同品种间 P_n 从大到小排列次序为: ‘Lemon Web’和‘Zorro’>‘无尽夏’>‘蓝鸟’>‘森乃妖精’和‘红额’>‘花手鞠’>‘Murasaki kobai’和‘贝拉安娜’。叶片 P_n 最高的‘Lemon Web’和‘Zorro’比最低的‘Murasaki kobai’和‘贝拉安娜’高出1.9~4.0倍(图3-A)。不同品种间 T_i 和 G_s 均表现出与 P_n 相似的变化规律。叶片 T_i 和 G_s 最高和最低的品种分别为‘Zorro’和‘贝拉安娜’, 前者比后者分别高83.5%和172.1% (图3-B和C)。不同品种间 C_i 表现出与 P_n 、 T_i 和 G_s 变化趋势相反的规律, ‘贝拉安娜’叶片 C_i 最高, 比最低的‘Lemon Web’高14.6% (图3-D)。

3 光响应曲线、LCP、LSP、 A_{max} 和AQE的比较

不同绣球属品种的光响应曲线变化趋势基本一致, 即均表现为 P_n 随PPFD的增大而逐渐增大, 直至达到饱和水平。当各品种叶片 P_n 均几乎达到饱和水平($1000 \sim 1400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)时, 这9个品种叶片 P_n 值从高到低依次为: ‘Zorro’>‘Lemon Web’和‘无尽夏’>‘蓝鸟’>‘森乃妖精’>‘Murasaki kobai’>‘花手鞠’>‘贝拉安娜’>‘红额’ (图4)。如表1所示, ‘Lemon Web’的LCP显著高于其余品种, ‘Murasaki kobai’次之, ‘红额’的LCP最低; ‘Lemon Web’叶片的LCP比‘红额’高3.1倍。不同品种间LSP的变化规律为: ‘Zorro’>‘Lemon Web’>‘森乃妖精’和‘蓝鸟’>‘Murasaki kobai’>‘无尽夏’>‘花手鞠’>‘贝拉安娜’>‘红额’; ‘Zorro’的LSP是‘红额’的2.4倍。与LSP相似, A_{max} 最高和最低的品种间差异也非常显著, 前者约为后者的2.3倍。AQE最高的品种是‘花手鞠’, 而该指标在其他各品种间的差异均较小。

4 叶绿素荧光的比较

各品种间 F_o 差异不显著, F_m 差异也较小(图5-A)。各品种的 F_v/F_m 仅在0.737~0.811间波动, F_v/F_m 最高的品种是‘Zorro’, 而‘Murasaki kobai’和‘无尽夏’的 F_v/F_m 最低(图5-B)。 F_v'/F_m' 在‘Zorro’、‘Lemon Web’和‘蓝鸟’中较高, 而在‘Murasaki kobai’中最低(图5-C)。不同品种叶片 q_p 从高到低依次为: ‘Zorro’和‘Lemon Web’>‘森乃妖精’>‘蓝鸟’>‘花手鞠’、‘红额’和‘Murasaki kobai’>‘贝拉安娜’和‘无尽夏’。‘贝拉安娜’和‘无尽夏’叶片 q_p 值仅约为‘Zorro’的55% (图5-D)。 Φ_{PSII} 在各品种间的变化规律与 q_p 相

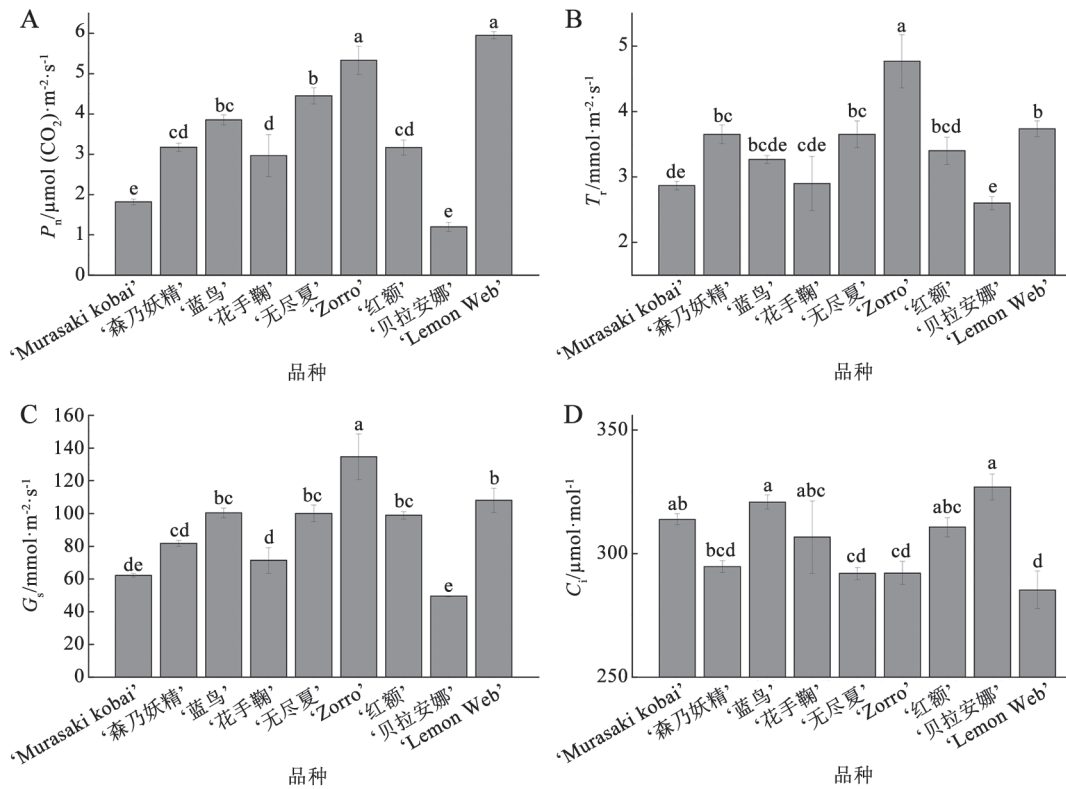


图3 不同绣球属品种叶片的 P_n 、 T_r 、 G_s 和 C_i
 Fig.3 P_n , T_r , G_s and C_i in the leaves of different *Hydrangea* varieties

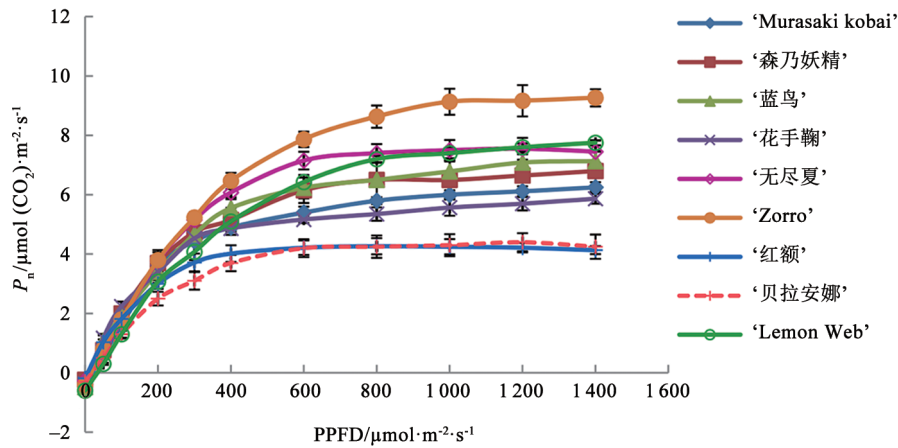


图4 不同绣球属品种的 P_n 对PPFD的响应
 Fig.4 Changes of P_n in response to PPFD in different *Hydrangea* varieties

似(图5-E)。相反地, ‘贝拉安娜’和‘Murasaki kobai’叶片中的NPQ较高, 但其值在‘Zorro’和‘Lemon Web’中均较低(图5-F)。

6 叶片吸收光能分配的比较

不同品种间 P 的变化幅度较大。 P 最高的品种

是‘Zorro’, ‘Lemon Web’次之, ‘Murasaki kobai’、‘无尽夏’和‘贝拉安娜’最低, 但这3个品种间差异不显著。‘无尽夏’的 P 仅为‘Zorro’的43.2% (图6-A)。如图6-B和C所示, 各品种叶片 D 和 E 的变化幅度均较小, 分别分布在0.452~0.619和0.196~0.321区间,

表1 不同绣球属品种的LCP、LSP、 A_{max} 和AQETable 1 LCP, LSP, A_{max} and AQE of different *Hydrangea* varieties

| 品种 | LCP/ $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ | LSP/ $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ | $A_{max}/\mu\text{mol}(\text{CO}_2)\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ | AQE |
|------------------|--|--|--|---------------------------|
| ‘Murasaki kobai’ | 16.80±1.62 ^b | 721.47±3.37 ^c | 6.83±0.19 ^d | 0.029±0.005 ^{bc} |
| ‘森乃妖精’ | 10.27±0.93 ^{cd} | 906.27±64.47 ^b | 8.19±0.67 ^{bc} | 0.026±0.002 ^{cd} |
| ‘蓝鸟’ | 14.00±0.83 ^{bc} | 905.10±22.99 ^b | 7.98±0.11 ^c | 0.032±0.003 ^b |
| ‘花手鞠’ | 12.13±0.93 ^{bc} | 660.80±12.20 ^c | 6.46±0.19 ^d | 0.040±0.002 ^a |
| ‘无尽夏’ | 11.20±0.71 ^{bcd} | 679.47±48.72 ^c | 7.91±0.24 ^{bc} | 0.024±0.002 ^{cd} |
| ‘Zorro’ | 14.93±2.47 ^{bc} | 1 051.87±27.35 ^a | 10.23±0.33 ^a | 0.026±0.001 ^{cd} |
| ‘红额’ | 6.53±0.68 ^d | 434.93±6.53 ^d | 4.45±0.25 ^e | 0.026±0.004 ^{cd} |
| ‘贝拉安娜’ | 14.00±1.54 ^{bc} | 612.27±19.95 ^c | 4.74±0.14 ^e | 0.022±0.001 ^d |
| ‘Lemon Web’ | 27.07±3.37 ^a | 1 005.20±90.92 ^{ab} | 8.75±0.21 ^b | 0.022±0.001 ^d |

同列数据用不同小写字母标识表示差异显著($P<0.05$)。

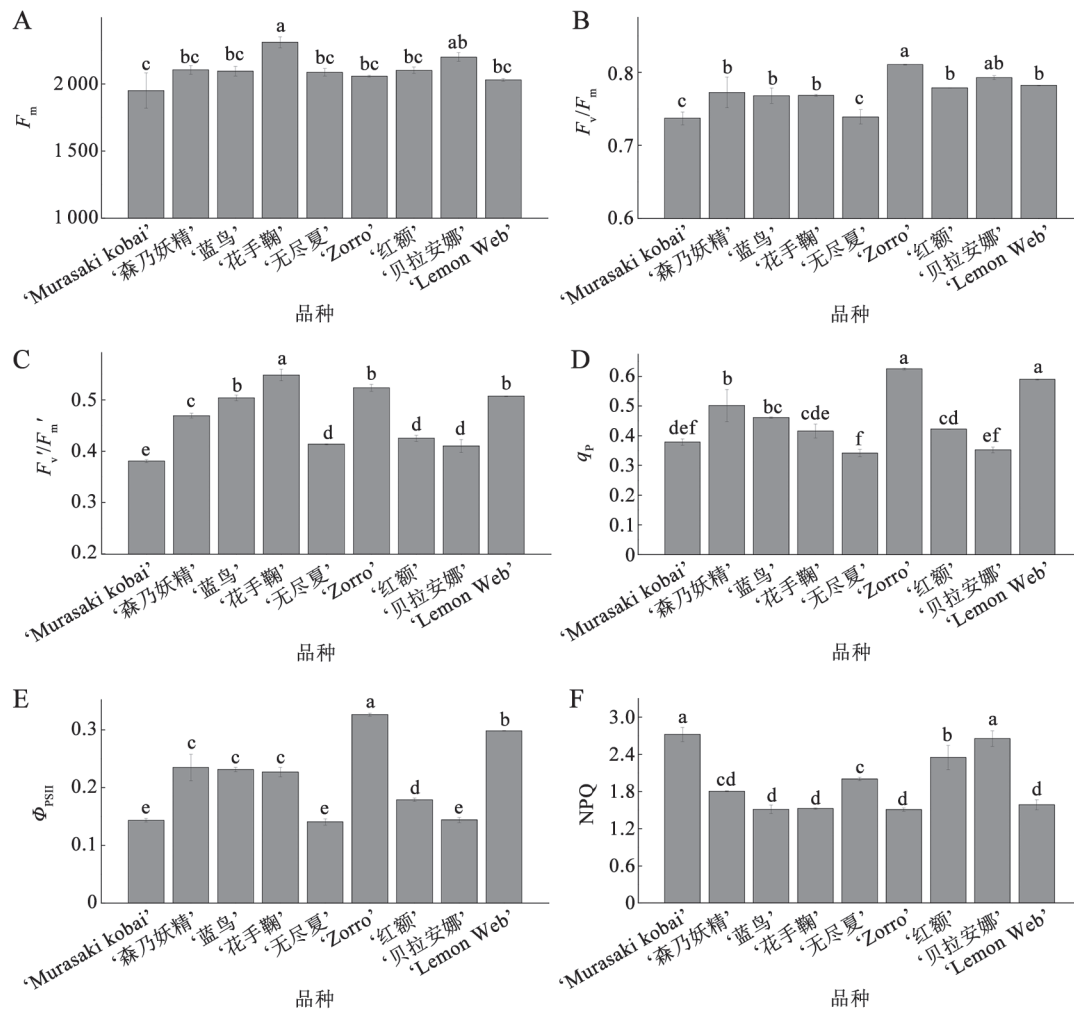


图5 不同绣球属品种的叶片叶绿素荧光参数

Fig.5 Leaf chlorophyll fluorescence parameters of different *Hydrangea* varieties

而且,除‘花手鞠’外, D 和 E 在不同品种间的变化规律几乎与 P 相反,即 D 在‘Murasaki kobai’叶片中较

高,而在‘Zorro’和‘Lemon Web’中却较低;‘贝拉安娜’和‘无尽夏’叶片中 E 较高,而‘Zorro’和‘Lemon

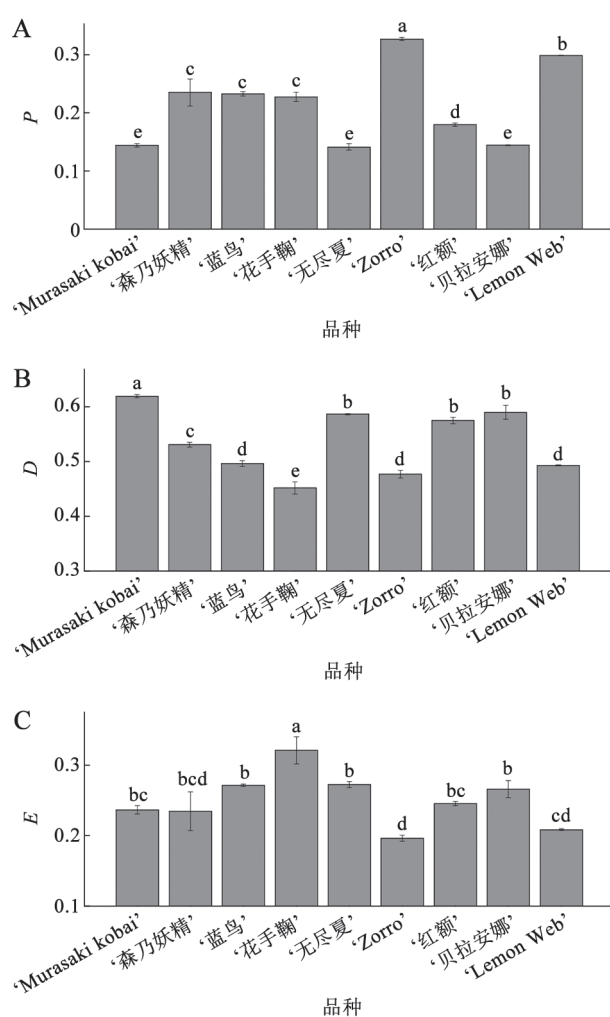


图6 不同绣球属品种的光能分配
Fig.6 The partitioning of absorbed light of different *Hydrangea* varieties

Web'中E较低。不同品种的光能消耗量(D+E)从高到低依次为: 'Murasaki kobai'、'贝拉安娜'和'无尽夏'>'红额'>'花手鞠'、'蓝鸟'和'森乃妖精'>'Lemon Web'>'Zorro'。与'Murasaki kobai'和'贝拉安娜'相比,'Zorro'叶片的D+E总和均下降了21.3%, 'Lemon Web'叶片的D+E总和均下降了18.0%。

讨 论

光合作用是绿色植物最重要和复杂的生理过程,是合成有机物及获取能量的根本来源。植物通过光合作用将光能转换为化学能以维持其生长发育。气孔是植物叶片与外界进行气体(O₂、CO₂和水蒸汽)交换的主要通道。气孔导度表示植物气

孔张开的程度,植物通过改变气孔开度等方式以调节与外界的气体交换,从而影响光合作用和蒸腾作用(彭尽晖2010)。刘孟雨和陈培元(1990)认为影响叶片光合速率的因素主要包括气孔与非气孔因素,前者指逆境条件下叶片G_s和C_i均下降,即因气孔开度下降,CO₂供应受阻导致P_n降低;后者指G_s下降而C_i升高,即因叶肉细胞间隙气相空间与CO₂扩散阻力增大,光合活性下降而导致P_n降低。实验结果表明,'Zorro'和'Lemon Web'的P_n、T_r和G_s均高于其他品种,'贝拉安娜'的这些指标却均低于各品种;然而C_i在品种间却表现出相反的规律(图3),因此,从一定程度上表明,各品种间P_n的差异与非气孔因素有关,至于更具体的原因还有待于更深入的研究。

为提高光能利用率或有效避免强光伤害,植物通常采取生长变化、光合器官结构调整、长期的表型可塑性、生物量分配、抗氧化防御系统和热耗散机制等多种调节措施,以增强光资源截取潜能及实际光资源利用率,同时也为自身提供有效保护机制(Valladares等2000; Duan等2005; Logan和Krotkov 1968; Schneider等2006)。张亚杰和冯玉龙(2004)研究发现喜光的斜叶榕(*Ficus subulata*)主要通过提高光合作用利用光能,而耐荫的假斜叶榕(*Ficus tinctoria*)主要通过增加热耗散来耗散过剩光能,以防御光破坏。光合有关指标变化是PSII反应中心可逆失活的表现,是植物对外界光强变化的适应的结果(李霞等2002)。植物叶片的LCP和LSP可反映植物对光照条件的要求: LCP和LSP均低的植物耐荫性强; LCP低而LSP较高的植物可适应多种光照环境; LCP和LSP均高的植物则为喜光的阳性植物(杨江山2005)。对P_n-PPFD响应曲线进行拟合分析的结果显示,所有绣球属品种中,'Zorro'和'Lemon Web'叶片的LCP、LSP和A_{max}均较高,而'红额'叶片中这些指标的数值却最低(表1),表明'红额'光合能力较弱,对强光比较敏感,而'Zorro'和'Lemon Web'均表现出较高的耐强光特性,这主要归因于阳生植物在对光强响应过程中主要通过提高最大光合速率,从而吸收和转化更多的光能来保护植物光合机构(王博轶和冯玉龙2005)。

叶绿素荧光参数分析可有效反映光能的吸收与转换、能量的传递与分配、反应中心的状态等

主要光合进程,有助于探明不同绣球属品种PSII的活性特征(Georgieva和Lichtenthaler 2006; Ashraf和Harris 2013)。 F_v'/F_m' 的大小意味着植物叶片通过天线色素捕获的光能向PSII反应中心传递效率的高低(Demmig-Adams等1996), q_p 则与PSII原初电子受体(Q_A ,电子传递链中PSII受体侧原初醌受体)的氧化还原状态及PSII反应中心开放的量密切相关(Havaux等1991),因此,‘Zorro’和‘Lemon Web’叶片具有较高 F_v'/F_m' 和 q_p 值表明其天线色素对光能的捕获效率、开放的PSII的激发能捕获效率、氧化态 Q_A 比例与PSII反应中心的开放比例较高,而具有较低的 F_v'/F_m' 和 q_p 值的‘Murasaki kobai’和‘贝拉安娜’则反之。Demmig-Adams等(1996)发现 Φ_{PSII} 值的大小主要取决于 F_v'/F_m' 与 q_p (Demmig-Adams等1996),本文研究结果与上述结论相似,具有较高 F_v'/F_m' 和 q_p 值的‘Zorro’和‘Lemon Web’叶片中 Φ_{PSII} 值也较高。 Φ_{PSII} 反映光下植物叶片所捕获光能中用于电子传递的能量所占的比例(He等2008),且 q_p 值与电子传递活性也呈正相关关系(Demmig-Adams等1996),因而‘Zorro’和‘Lemon Web’叶片具有较高 q_p 和 Φ_{PSII} 值表明其光合电子传递效率较高,而‘Murasaki kobai’和‘贝拉安娜’因其 q_p 和 Φ_{PSII} 值较低则反之。另一方面,NPQ表示以热能形式耗散的那部分光能,在所有品种中,具有最高NPQ值的‘Murasaki kobai’和‘贝拉安娜’叶片的热耗散最多,这可在一定程度上使其在强光条件下起保护光合机构的作用(张亚杰和冯玉龙2004)。

高等植物利用光能的途径由 P 、 D 及 E 这三部分组成(Demmig-Adams等1996)。本文的研究结果表明, D 是各绣球属品种叶片中的主要光能分配途径, P 和 E 所占的比例较小,这可能与实验进行时间为近正午时分叶片发生光抑制现象有关。Johnson等(1993)认为植物是否受到光抑制可参考植物叶片的 F_v/F_m 是否低于正常值(≈ 0.83)。本文研究发现各品种的 F_v/F_m 在0.737~0.811间波动,因此一定程度上意味着光抑制现象的存在。光抑制作为植物防止因光能过剩而致使光合机构光破坏的保护性机制(吴雪霞等2013),常会发生在自然条件下晴天中午(尤其是强光和高温同时存在的夏日中午)的植物上层叶片,从而导致其光合作用的下降及一些防御性激发能热耗散过程的加强。另外,与

F_v'/F_m' 、 q_p 、 Φ_{PSII} 和NPQ在不同品种叶片中的变化规律相似,具有较高 P 值的‘Zorro’和‘Lemon Web’叶片的 D 值和 E 值较低,相反地,‘Murasaki kobai’和贝拉安娜叶片却具有较低的 P 值和较高的 D 值(图6),表明‘Zorro’和‘Lemon Web’叶片用于光化学反应部分的光能比例远高于其他各品种,而用于PSII潜在热耗散部分的光能比例却远低于其他品种;‘Murasaki kobai’和‘贝拉安娜’叶片用于这两部分光能的比例却分别显著低于和高于其他品种。由此可见,在所用供试品种中,‘Zorro’和‘Lemon Web’叶片的光能利用能力仍较强,而‘Murasaki kobai’和‘贝拉安娜’叶片的光能利用能力较弱。

叶绿素是植物叶片的主要光合色素,是叶绿体进行光合作用的基础。叶绿体中的叶绿素在光能的吸收、传递和转换过程中起捕获光能的重要作用(Ashraf和Harris 2013)。叶片中叶绿素含量较高的品种(‘Lemon Web’和‘Zorro’)的 P_n 、LSP、 A_{max} 、 q_p 和 Φ_{PSII} 也均高于其他品种,而NPQ和 D 却较低;然而,叶绿素含量较低品种(‘Murasaki kobai’、‘红额’和‘贝拉安娜’)的这些指标却表现出相反规律(图2~6和表1)。由此可见,本研究中不同品种间叶片叶绿素含量越高,相应地,表征光能利用能力的指标数值越大,而反映光能损耗的指标数值越小。

综上所述, P_n 、 A_{max} 、LCP、LSP、 q_p 、 Φ_{PSII} 和 P 对评价绣球属品种的耐强光特性具有参考意义。在供试品种中,‘Lemon Web’和‘Zorro’叶片的光能利用能力较强,是更为适合光下栽培的耐强光性绣球属品种。

参考文献

- Ashraf M, Harris PJC (2013). Photosynthesis under stressful environments: an overview. *Photosynthetica*, 51 (2): 163–190
- Bilger W, Björkman O (1990). Role of the xanthophyll cycle in photoprotection elucidated by measurements of light-induced absorbance changes, fluorescence and photosynthesis in leaves of *Hedera canariensis*. *Photosynth Res*, 25 (3): 173–185
- Demmig-Adams B, Adams III WW, Barker DH, Logan BA, Bowling DR, Verhoeven AS (1996). Using chlorophyll fluorescence to assess the fraction of absorbed light allocated to thermal dissipation of excess excitation. *Physiol Plant*, 98 (2): 253–264
- Duan B, Lü Y, Yin C, Li C (2005). Morphological and physiological plasticity of woody plant in response to high light and low light. *Chin J Appl Environ Biol*, 11 (2): 238–245
- Georgieva K, Lichtenthaler HK (2006). Photosynthetic response of different pea cultivars to low and high temperature treatments.

- Photosynthetica, 44 (4): 569–578
- Havaux M, Strasser RJ, Greppin H (1991). A theoretical and experimental analysis of the q_p and q_N coefficients of chlorophyll fluorescence quenching and their relation to photochemical and nonphotochemical events. *Photosynth Res*, 27 (1): 41–45
- He JY, Ren YF, Zhu C, Yan YP, Jiang DA (2008). Effect of Cd on growth, photosynthetic gas exchange, and chlorophyll fluorescence of wild and Cd-sensitive mutant rice. *Photosynthetica*, 46 (3): 466–470
- Hufford L (2001). Ontogeny and morphology of the fertile flowers of *Hydrangea* and allied genera of tribe Hydrangeaceae (Hydrangeaceae). *Bot J Linn Soc*, 137: 139–187
- Johnson GN, Young AJ, Scholes JD, Horton P (1993). The dissipation of excess excitation energy in British plant species. *Plant Cell Environ*, 16 (6): 673–679
- Li X, Liu YL, Jiao DM (2002). The Relationship between diurnal variation of fluorescence parameters and characteristics of adaptation to light intensity in leaves of different rice varieties with high yield (*Oryza sativa* L.). *Acta Agron Sin*, 28 (2): 145–153 (in Chinese with English abstract) [李霞, 刘友良, 焦德茂(2002). 不同高产水稻品种叶片的荧光参数的日变化和光适应特性的关系. *作物学报*, 28 (2): 145–153]
- Liu MY, Chen PY (1990). Effects of stomatal and nonstomatal factors on wheat photosynthesis under water stress. *Plant Physiol Commun*, (4): 24–27 (in Chinese with English abstract) [刘孟雨, 陈培元(1990). 水分胁迫条件下气孔与非气孔因素对小麦光合的限制. *植物生理学通讯*, (4): 24–27]
- Logan KT, Krotkov G (1968). Adaptations of the photosynthetic mechanism of sugar maple (*Acer saccharum*) seedlings grown in various light intensities. *Physiol Plant*, 22 (1): 104–116
- Nesi B, Lazzereschi S, Pecchioli S, Grassotti A, Salazar-Orozco G (2013). Effects of colored shade netting on the vegetative development and on the photosynthetic activity in several *Hydrangea* genotypes. *Acta Hort*, 1000 (4): 345–352
- Pagter M, Liu F, Jensen CR, Petersen KK (2008). Effects of chilling temperatures and short photoperiod on PSII function, sugar concentrations and xylem sap ABA concentrations in two *Hydrangea* species. *Plant Sci*, 175 (4): 547–555
- Peng J (2010). Study on resources of *Hydrangea* L. in Hunan Province and characteristics of aluminum tolerance (PhD thesis). Changsha: Hunan Agricultural University (in Chinese with English abstract) [彭尽晖(2010). 湖南省绣球属(*Hydrangea*)植物资源及耐铝特性研究(博士论文). 长沙: 湖南农业大学]
- Schneider S, Ziegler C, Melzer A (2006). Growth towards light as an adaptation to high light conditions in *Chara* branches. *New Phytol*, 172 (1): 83–91
- Tan Y (2010). Effects of soil drought stress on the physiological and biochemical reaction in *Hydrangea macrophylla* (Master's thesis). Changsha: Hunan Agricultural University (in Chinese with English abstract) [谭艳(2010). 土壤干旱胁迫对八仙花生理生化特性的影响(硕士论文). 长沙: 湖南农业大学]
- Valladares F, Martinez-Ferri E, Balaguer L, Perez-Corona E, Manrique E (2000). Low leaf-level response to light and nutrients in Mediterranean evergreen oaks: a conservative resource-use strategy? *New Phytol*, 148 (1): 79–91
- Wang BY, Feng YL (2005). Effects of growth light intensities on photosynthesis in seedlings of two tropical rain forest species. *Acta Ecol Sin*, 25 (1): 23–30 (in Chinese with English abstract) [王博轶, 冯玉龙(2005). 生长环境光强对两种热带雨林树种幼苗光合作用的影响. *生态学报*, 25 (1): 23–30]
- Wu XX, Yang XC, Zhu ZW, Zha DS, Xu S (2013). Effects of exogenous 6-BA on photosynthesis, chlorophyll fluorescence characteristics and the allocation of absorbed light in eggplant seedlings under low temperature stress. *Plant Physiol J*, 49 (11): 1181–1188 (in Chinese with English abstract) [吴雪霞, 杨晓春, 朱宗文, 查丁石, 许爽(2013). 外源6-BA对低温胁迫下茄子幼苗光合作用、叶绿素荧光参数及光能分配的影响. *植物生理学报*, 49 (11): 1181–1188]
- Yang J, Chang Y, Chong P (2005). Comparative studies on photosynthetic characteristics of three sweet cherry cultivars. *Acta Hort*, 32 (5): 773–777 (in Chinese with English abstract) [杨江山, 常永义, 种培芳(2005). 3个樱桃品种光合特性比较研究. *园艺学报*, 32 (5): 773–777]
- Zhang YJ, Feng YL (2004). Difference in light acclimation mechanisms between light-loving and shade-tolerant *Ficus* species. *J Plant Physiol Mol Biol*, 30 (3): 297–304 (in Chinese with English abstract) [张亚杰, 冯玉龙(2004). 喜光榕树和耐荫榕树光适应机制的差异. *植物生理与分子生物学学报*, 30 (3): 297–304]
- Zou M (2012). The research on biological characteristics of *Hydrangea* flower leaf mutant (Master's thesis). Changsha: Hunan Agricultural University (in Chinese with English abstract) [邹鸣(2012). 八仙花花叶变异株系生物学特性研究(硕士论文). 长沙: 湖南农业大学]

Comparative photosynthetic characteristics of different *Hydrangea* L. varieties

YU Xiu-Ming, SUN Qiang*, Yao Hong-Jun, WANG Yan

Shanghai Forestry Station, Shanghai Modern Forestry Technology Training Center, Shanghai 200072

Abstract: To compare the photosynthetic capacities of different varieties of *Hydrangea* L., gas exchange and chlorophyll fluorescence characteristics and chlorophyll contents in the leaves of 9 varieties were investigated. The results show that the photosynthetic rates and chlorophyll fluorescence characteristics related to light utilization efficiency and chlorophyll contents were higher in the leaves of 'Zorro' and 'Lemon Web', while these parameters were much lower in 'Murasaki kobai', 'Annabelle', 'Honger' and 'Forever Summer'. Inversely, the lowest non-photochemical quenching was observed in the leaves of 'Zorro' and 'Lemon Web', however, this parameter was relatively higher in 'Murasaki kobai' and 'Annabelle'. Through a comprehensive reference of these parameters, photosynthetic capacities of 'Zorro' and 'LemonWeb' were stronger, which are *Hydrangea* species suitable for being cultivated under high light intensity, whereas photosynthetic capacities of 'Murasaki-kobai', 'Honger' and 'Annabelle' were relatively lower. 'Honger' is favorable for cultivation under low light condition due to its strong shade-tolerance.

Key words: *Hydrangea*; photosynthesis; chlorophyll fluorescence; chlorophyll content; varietal difference

Received 2016-07-14 Accepted 2016-07-22

This work was supported by the Special Project for DUS Test Guidelines of New Varieties of Plants of the State Forestry Administration (Grant No. 2014036), and Special Project of Chenshan from Shanghai Administration Department of Afforestation and City Appearance (Grant No. G142438).

*Corresponding author (E-mail: sundaysq@126.com).