

韦孟琪. 4 种绣球光合特性及其生态适应性比较[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(9): 180–184.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.09.034

4 种绣球光合特性及其生态适应性比较

韦孟琪^{1,2}

(1. 宁夏回族自治区中卫市林业技术推广服务中心, 宁夏中卫 755000; 2. 浙江农林大学风景园林与建筑学院, 浙江杭州 310000)

摘要:为了探究 4 种绣球品种平瓣绣球(PB)、银边绣球(YB)、粗齿绣球珍贵(CC)、你我的浪漫绣球(NWLM)节水、光适应的差异,对光合特性及水分利用效率进行比较分析,以期为不同品种绣球适应性评价和园林应用提供科学依据。结果表明,4 种绣球的光合速率日变化曲线均呈现双峰型,高峰值出现在 10:00 和 14:00,低谷值出现在 12:00。净光合速率日均值由大到小排序为 PB[$2.81 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] > CC[$2.70 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] > YB[$2.57 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] > NWLM[$2.52 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$];蒸腾速率日均值由大到小排序为 CC[$1.51 \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] > PB[$1.43 \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] > NWLM[$1.18 \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] > YB[$1.07 \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$];水分利用效率均值由大到小排序为 YB($2.40 \mu\text{mol}/\text{mmol}$) > NWLM($2.14 \mu\text{mol}/\text{mmol}$) > PB($1.96 \mu\text{mol}/\text{mmol}$) > CC($1.78 \mu\text{mol}/\text{mmol}$)。NWLM 属于耐阴性相对较低的品种;PB 属于耐阴性相对较高的品种;CC 具有较高的表观量子效率,说明其利用弱光的能力较强;YB 的光补偿点较低,光饱和点较高,表明 YB 可利用的光合有效辐射范围较广。

关键词:绣球;光合特性;水分利用率;生态适应性

中图分类号: S685.990.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2020)09-0180-05

绣球(*Hydrangea macrophylla*)别称八仙花、粉团花,虎耳草科(Saxifragaceae)绣球属(*Hydrangea*)植物,高 1~4 m,常于基部发出多数放射枝而形成一圆形灌丛,叶纸质或近革质,倒卵形或阔椭圆形,花期 6—8 月,属暖温带半耐寒性落叶小灌木^[1]。因其盛开时色彩多变,花团锦簇,花期较长,深受人们喜爱,是园林绿化材料中的重要花灌木。近年来,经过国外育种学家的努力,绣球已繁育出几百个园艺品种,并逐步形成 5 个不同的门类,包括乔木绣球、大花绣球、圆锥绣球、粗齿绣球、栎叶绣球,随着绣球栽培面积的扩大和新品种的培育、推广,其栽培品种也逐渐丰富,因此清楚了解众多品种的生态适应性极为重要。

光合特性及水分利用效率是植物基本的生理生态特性,这些特性往往也是节水、抗旱、光适应的表现^[2],其差异在一定程度上反映了品种之间节水、抗旱、光适应的不同。本研究对 4 个品种绣球花的光合特性及水分利用效率进行比较分析,探讨其

节水、光适应的差异,进而为不同绣球品种选择、栽培管理和适应性评价提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况与供试材料

试验地为浙江农林大学的园林花卉温室。供试材料为平瓣绣球(*Hydrangea macrophylla* ‘Blue Wave’, PB)、银边绣球(*Hydrangea macrophylla* ‘Tricolor’, YB)、粗齿绣球珍贵(*Hydrangea serrata* ‘Preziosa’, CC)、你我的浪漫(*Hydrangea macrophylla* ‘Romantic’, NWLM),来自浙江虹越园艺苗圃,定植于浙江农林大学植物园中,经引种栽培,表现良好,于 2017 年 9 月选取健壮、长势一致的插穗,扦插于清水沙中至生根,10 月选取各品种 60 株健康无病害的生根苗移栽于上口径 15.3 cm、下口径 12.3 cm、高 17 cm 的容器,栽培基质一致。容器苗置于连栋大棚内,进行常规管理。本试验采用随机区组试验,即将受试材料 4 个品种绣球分别随机栽培于 4 个试验小区,共 4 个处理,每处理小区 5 株,株行距各为 20 cm,重复 3 次,共计 12 个小区,肥水管理一致。12 个月后进行光合生理指标测量。

1.2 光合日变化测定

测定时间为第 2 年 10 月上旬,晴天条件下,用 Li-6400 便携式光合作用仪测定各品种绣球健康

收稿日期:2020-01-30

基金项目:浙江省重中之重林学一级学科研究生创新项目(编号:201531)。

作者简介:韦孟琪(1992—),女,宁夏青铜峡人,硕士,助理园林工程师,主要从事园林植物生理生态研究。E-mail:412040857@qq.com。

植株的光合参数日变化,在 08:00—16:00 每隔 2 h 测定绣球中部同向新生叶片的净光合速率(P_n),并同步记录蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)等气体交换参数,主要环境影响因子包括水汽压亏缺(VPD)、大气 CO_2 浓度(C_a)、光合有效

辐射(PAR)、气温(T_a)、叶温(T_l)、相对湿度(RH)等参数。重复 3 次。

1.3 数据处理与分析

对光响应测定结果按非直角双曲线方程^[3]对光响应参数进行估算:

$$P_n = \frac{1}{2\theta}(\alpha PAR + P_{\max}) - \sqrt{(\alpha PAR + P_{\max})^2 - 4\alpha P_{\max} \theta PAR} - R_d$$

式中: P_n 为净光合速率, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; θ 为光响应曲线的曲角; α 为表观量子效率, $\text{mmol}/\text{mol photos}$; P_{\max} 为最大净光合速率, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; PAR 为光合有效辐射, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; R_d 为暗呼吸速率, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。光补偿点 [$LCP, \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] 和光饱和点 [$LSP, \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] 是利用低光条件下 [$PAR \leq 200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] 的 P_n 与 PAR 构建线性方程所得, $P_n = mPAR + n$, $LCP = -n/m$, $LSP = (P_{\max} - n/m)$ 。

利用 Excel 2007 整理原始数据,用 SPSS 22.0 软件进行方差分析,采用 Duncan's 新复极差测验法进行多重比较。用光合计算 4.1.1 软件辅助计算光响应曲线拟合值,利用 Origin 8.0 作图。

2 结果与分析

2.1 主要环境因子日变化

由图 1 可以看出,本研究时段 PAR 、 VPD 和 T_a 日变化呈典型的单峰型, PAR 在 12:00 时达到峰值,约为 $1500 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,随后逐渐减弱;随着太阳辐射的增强,大气温度也逐渐增加,由 08:00 的 19.21°C 上升至 12:00 的最大值 34.01°C , VPD 日变化趋势与 T_a 一致,在 12:00 时达到最大值,此时大气水分亏缺最严重,受 PAR 和 T_a 的影响,相对湿度 RH 呈现先下降后上升的趋势,从 08:00 最大值 75.15% ,逐渐降低至 12:00 的 35.30% ,之后逐渐

回升;大气 CO_2 浓度(C_a)呈现先降后升的变化规律,这是因为午前植物光合作用较强,吸收大气中较多的 CO_2 ,因此在 08:00—12:00 C_a 降低,午后随着植物光合作用减弱, C_a 逐渐升高^[4]。

2.2 光合速率日变化

由图 2 可以看出,4 个品种的绣球在测定时间段内净光合速率(P_n)日变化均呈双峰型曲线。从 08:00 开始,随着太阳辐射增加, P_n 逐渐增大;到 10:00 左右,4 个品种绣球达到第 1 峰值, P_n 值由大到小依次为 $PB > YB > NWLM > CC$ 。4 个品种在 12:00 左右达到低谷,之后逐渐回升,在 14:00 左右达到次高峰,后逐渐降低。4 种绣球均存在典型的光合午休现象。由表 1 可知,净光合速率日均值由大到小排列为 $PB [2.81 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})] > CC [2.70 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})] > YB [2.57 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})] > NWLM [2.52 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ 。

2.3 蒸腾速率日变化

由图 3 可以看出,4 个品种的绣球在测定时间段内 CC 和 PB 的蒸腾速率(T_r)日变化均呈双峰型曲线,峰值出现在 10:00 和 14:00 左右; YB 呈现单峰型曲线,在 10:00 时达到最大值,之后逐渐下降; $NWLM$ 在 12:00 时达到最大值。由表 1 可知, T_r 日均值由大到小依次为 $CC [1.51 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})] > PB [1.43 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})] > NWLM [1.18 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})] > YB [1.07 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ 。

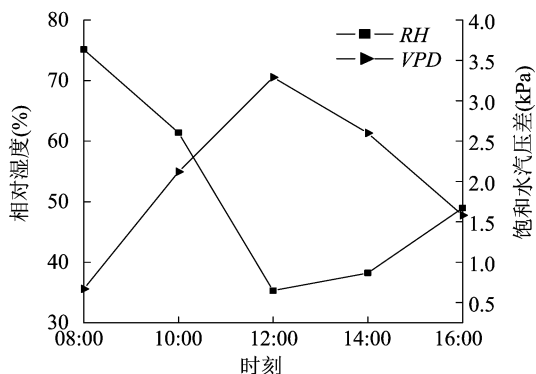
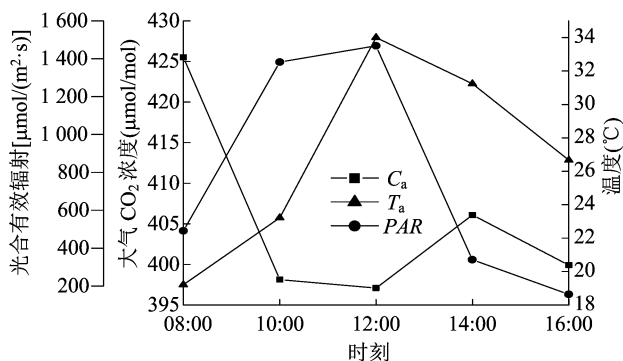


图1 环境因子日变化

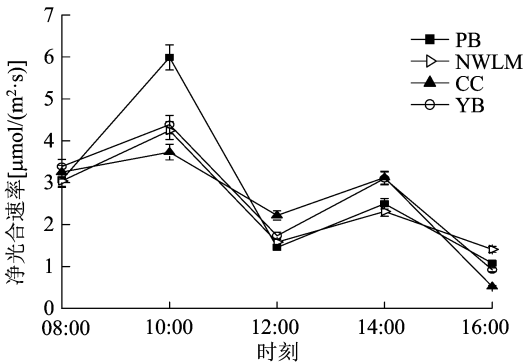


图2 不同绣球品种净光合速率日变化

表 1 不同品种绣球光合生理参数日平均值

品种	净光合速率 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	气孔导度 [$\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	蒸腾速率 [$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	胞间 CO_2 浓度 ($\mu\text{mol}/\text{mol}$)	水分利用效率 ($\mu\text{mol}/\text{mmol}$)
PB	$2.81 \pm 0.14\text{b}$	$0.04 \pm 0.01\text{a}$	$1.43 \pm 0.25\text{b}$	$310.77 \pm 11.48\text{ab}$	$1.96 \pm 0.44\text{b}$
NWLM	$2.52 \pm 0.42\text{a}$	$0.05 \pm 0.01\text{a}$	$1.18 \pm 0.19\text{a}$	$329.27 \pm 22.08\text{ab}$	$2.14 \pm 0.79\text{c}$
CC	$2.70 \pm 0.18\text{ab}$	$0.06 \pm 0.26\text{a}$	$1.51 \pm 0.31\text{b}$	$355.12 \pm 59.28\text{b}$	$1.78 \pm 0.54\text{a}$
YB	$2.57 \pm 0.24\text{a}$	$0.05 \pm 0.27\text{a}$	$1.07 \pm 0.32\text{a}$	$283.46 \pm 26.59\text{a}$	$2.40 \pm 1.57\text{d}$

注:同列数据后标有不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。表 3 同。

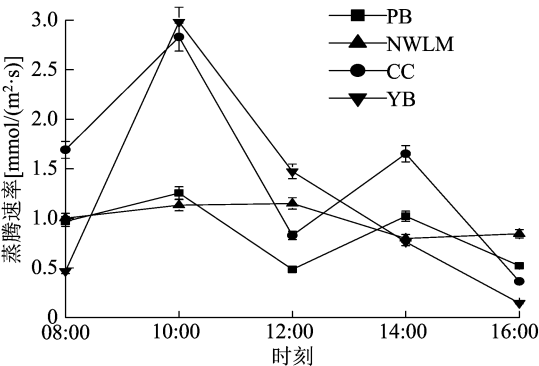


图3 不同绣球品种蒸腾速率日变化

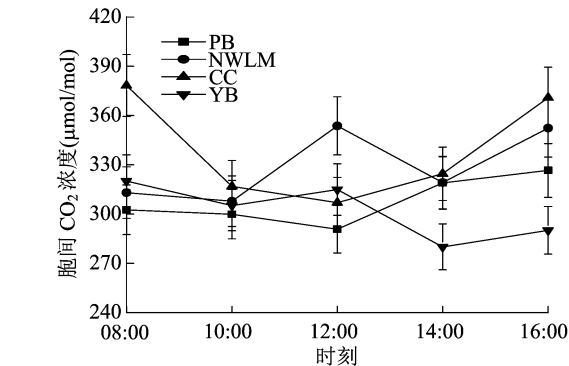
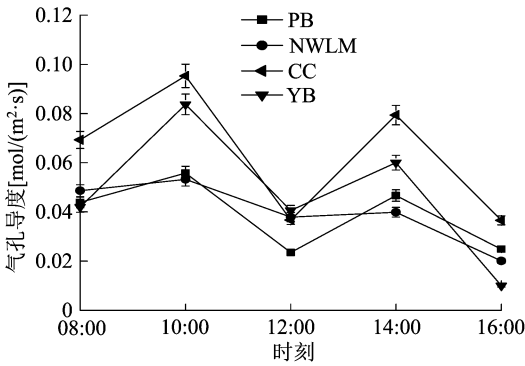


图4 不同绣球品种胞间 CO₂ 浓度和气孔导度日变化

2.4 胞间 CO₂ 浓度和气孔导度日变化

由图 4 可以看出,CC 和 PB 的 G_s 日变化曲线与 P_n 和 T_r 变化趋势一致,呈现双峰型。早晨 C_i 较高, G_s 值相对较低。08:00 之后随着 P_n 升高、 CO_2 同化速率加快而 C_i 逐渐降低,气孔缓慢张开, G_s 随之上升,在 10:00 之后,各品种 C_i 变化呈现差异,NWLM 和 YB 呈现上升趋势,在 12:00 时达到峰值,之后逐渐下降至 14:00,而 PB 和 CC 逐渐下降,在 12:00 达到谷值,之后逐渐上升至 14:00,在 14:00 之后,4 个

品种 C_i 值的变化趋势一致,这时段随着光照减弱、气温下降和气孔导度下降,叶片光合作用减弱,呼吸作用释放的 CO_2 聚集在细胞间隙中,使得 C_i 开始升高^[5]。由表 1 可知,4 个品种的气孔导度日均值由大到小依次为 CC [$0.06 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] > YB [$0.05 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] = NWLM [$0.05 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] > PB [$0.04 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]。胞间 CO_2 浓度日均值由大到小依次为 CC ($355.12 \mu\text{mol}/\text{mol}$) > NWLM ($329.27 \mu\text{mol}/\text{mol}$) > PB ($310.77 \mu\text{mol}/\text{mol}$) > YB ($283.46 \mu\text{mol}/\text{mol}$)。



2.5 光合生理指标与环境因子的关系

光合作用常受到植物内部生理状态和外界环境因子的共同制约^[6],以测定时刻的光合特征参数

平均值进行相关性分析,结果见表 2。由表 2 可知, PB 与 CC 的净光合速率与 G_s 和 T_r 呈显著相关,YB 的净光合速率与 PAR 呈显著相关,NWLM 的净光合

表 2 光合生理指标与环境因子相关性

指标	相关系数											
	净光合速率				蒸腾速率				水分利用效率			
	PB	CC	YB	NWLM	PB	CC	YB	NWLM	PB	CC	YB	NWLM
G_s	0.954 *	0.887 *	0.871	0.903 *	1.000 **	0.995 **	0.822	0.553	0.316	0.977	0.566	0.712
T_r	0.957 *	0.889 *	0.533	0.294	1.000	1.000	1.000	1.000	0.319	-0.369	0.316	-0.157
C_i	-0.334	-0.384	0.194	-0.961 **	-0.096	-0.314	0.240	-0.051	-0.907 *	-0.375	0.319	-0.973 *
T_l	-0.339	-0.057	-0.226	-0.455	-0.275	0.114	0.430	0.258	-0.251	0.416	-0.907 *	-0.533
C_a	0.294	-0.012	0.195	0.421	0.171	0.075	-0.346	-0.046	0.246	-0.339	0.080	0.390
T_a	-0.400	0.078	-0.302	-0.517	-0.714 *	-0.691 *	-0.698 *	0.722 *	-0.192	0.465	-0.161	-0.522
PAR	0.080	0.026	0.721 *	0.865 *	0.016	0.169	0.658	0.482	0.793 *	0.825 *	0.797 *	0.731 *
RH	0.524	0.314	0.524	0.735	0.508	0.471	0.059	0.190	-0.437	-0.458	-0.125	0.605
VPD	-0.309	0.026	-0.207	-0.426	-0.254	-0.103	0.385	0.240	-0.051	0.512	-0.294	-0.475

注：*、** 分别表示在 0.05、0.01 水平显著相关。

速率与 G_s 、 PAR 呈显著相关,与 C_i 呈极显著负相关。从相关系数的大小来看,PB 与 CC 的 T_r 值较大,说明蒸腾速率对其净光合速率影响较强,而 NWLM 的 G_s 和 C_i 值较大,即这种绣球净光合速率主要影响因子为气孔导度和胞间 CO_2 浓度,其次为水分利用效率和太阳辐射,YB 净光合速率的主要影响因子为光合有效辐射。

PB 与 CC 的蒸腾速率与 G_s 呈极显著相关,与 T_a 呈现显著负相关,可知其蒸腾速率的主要影响因子为气孔导度,正午气孔大部分关闭,气孔导度降低使得蒸腾速率减弱,与光合午休的主要原因是气孔限制因素结论一致。影响 YB 和 NWLM 蒸腾速率的主要因子是大气温度,温度越高,蒸腾速率越弱,这是植物自我保护的措施之一。

4 个品种绣球水分利用效率均与 PAR 呈显著正相关,说明随着太阳辐射的增强,单叶水分利用效

率逐渐增加。而 PB 和 NWLM 的 WUE 与 C_i 呈显著负相关,YB 的 WUE 与 T_l 呈显著负相关。从相关系数大小上来看,对 PB、NWLM 水分利用效率影响较大的为胞间 CO_2 浓度,其次为光合有效辐射。影响 CC 水分利用效率的因素仅为光合有效辐射,对 YB 水分利用效率影响较大的为 T_l ,其次为光合有效辐射。

2.6 4 种绣球的光响应曲线参数比较

由表 3 可知,4 种绣球光饱和点均 $< 460 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,光补偿点均 $< 46 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ^[7],说明绣球不喜强光。其中 NWLM 属于耐阴性相对较低的品种,CC 和 PB 属于耐阴性相对较高的品种,结合 CC 具有较高的表观量子效率,说明其利用弱光的能力较强^[8],而 YB 的光补偿点较低,光饱和点较高。这表明,YB 可利用的光合有效辐射范围较广。

表 3 不同品种绣球光响应特性比较

品种	表观量子效率(α) (mmol/mol)	最大净光合速率(P_n) [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	暗呼吸速率(R_d) [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	光补偿点(LCP) [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	光饱和点(LSP) [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	决定系数(R^2)
PB	0.042 ± 0.02b	5.99 ± 0.16a	0.14 ± 0.07b	15.28 ± 0.22b	185.65 ± 31.03b	0.883
NWLM	0.031 ± 0.01c	4.24 ± 0.09b	0.13 ± 0.05b	18.07 ± 0.37a	208.80 ± 24.25a	0.802
YB	0.043 ± 0.03b	4.38 ± 0.18b	0.42 ± 0.06a	13.79 ± 0.27c	204.94 ± 29.78a	0.833
CC	0.054 ± 0.05a	3.71 ± 0.14c	0.12 ± 0.07b	14.22 ± 0.17c	176.51 ± 33.17b	0.881

3 结论与讨论

晴天时,4 个品种的绣球均出现光合午休现象。Farquhar 等将限制光合速率的因素归为 2 类:一是与 CO_2 供应有关的因素,主要包括界面层及气孔对

CO_2 的扩散阻力,其中以气孔阻力影响最大,可简称为气孔因素;二是与光能转化和碳同化有关的叶肉因素,统称为非气孔因素^[9],由许大全等的观点^[10-11]推断,NWLM 和 YB 正午叶片光合速率 P_n 的降低伴随着胞间二氧化碳浓度 C_i 的提高,因此导

致 2 种绣球出现光合午休现象的主要原因是非气孔因素,而 PB 和 CC 的 C_i 在 10:00 之后逐渐下降,在 12:00 到达谷值,因为在干热晴天时,高温和强光会导致叶片温度迅速升高,叶片内外蒸汽压梯度增加, T_r 加快,表皮细胞和保卫细胞直接向大气蒸腾水分,迫使整个叶片水势下降,气孔阻力和叶肉阻力增大,最终导致 P_n 下降,结合 P_n 和 C_i 日变化趋势图,则可推断引起这 2 个品种出现光合午休的原因是气孔因素。4 个品种在 08:00—10:00 的 P_n 变化主要受气孔调节,14:00 之后主要受非气孔因素影响,这可能是由于光合有效辐射降低引起的 ATP 和 NADPH 供应不足,即同化力不足限制了光合碳同化,从而导致 P_n 下降^[12]。

表观量子效率是光合作用中光能转化效率的一种量度,可以正确地反映光合机构的机能变化,值越大,表明植物吸收与转换光能的色素蛋白复合体可能越多^[13],反映叶片对弱光的利用能力越强,一般植物在适宜的生长条件下实测值在 0.03 ~ 0.06 之间^[14]。根据 Boardman 等的观点,耐阴植物的光补偿点小于 20 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,光饱和点为 50 ~ 1 000 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 或更低^[15]。本试验研究得到 4 种绣球光补偿点为 13.79 ~ 18.07 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,光饱和点为 176.51 ~ 208.80 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。因此,绣球属于耐阴栽培 C_3 植物类型。

蒸腾强度影响着植物水分状况,在一定程度上反映了植物调节水分损失能力及适应干旱环境的方式。从蒸腾强度的高低,反映了植物适应环境的能力的大小。本研究中,4 个品种绣球的蒸腾速率高峰期均出现在 10:00 和 14:00 左右,与净光合速率日变化一致,同时还与气孔导度和叶温呈显著相关性,结果表明 CC 和 PB 的蒸腾速率受气孔导度影响较大。这与午后由于气孔因素导致 P_n 下降的结论一致。蒸腾速率由大到小排序为 CC [1.51 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] > PB [1.43 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] > NWLM [1.18 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] > YB [1.07 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]。水分利用效率是表征植物对其本身蒸腾耗水量的利用能力,水分利用率值越大,则表明固定单位质量的 CO_2 所需的水量越小,因而水分利用率越高,植物节水能力越强,在干旱地耐旱能力较强^[16],由大到小排序为 YB (2.40 $\mu\text{mol}/\text{mmol}$) > NWLM (2.14 $\mu\text{mol}/\text{mmol}$) > PB (1.96 $\mu\text{mol}/\text{mmol}$) > CC (1.78 $\mu\text{mol}/\text{mmol}$),这表明,YB 和 NWLM 的抗旱能

力较强,CC 抗旱能力较弱。水分利用效率受胞间 CO_2 浓度、叶温、光合有效辐射影响较大。

综上所述,本研究中 4 个品种的绣球,YB 的光适应范围较广,在密林及疏林下都能生长良好,对环境条件要求较宽松且适应较干燥的土壤。CC 和 PB 耐阴性强于 YB 和 NWLM,不耐强光照,应种植于疏林下。CC 对水分需求较大,栽培期间应保证充足水分,其次为 PB。NWLM 较其他 3 个品种,耐阴能力和对水分需求处于中等水平。受环境条件制约较大,栽培期间要保证充足的光照、水分和温度。

参考文献:

- [1] 黄淑美,卫兆芬,陆玲娣,等. 中国植物志[M]. 北京:科学出版社,1995:226 ~ 227.
- [2] 王力刚,赵岭,许成启,等. 嫩江沙地 4 种针叶树光合特性及生态适应性特征[J]. 东北林业大学学报,2010,38(6):17 ~ 19.
- [3] 刘建锋,杨文娟,江泽平,等. 遮阴对濒危植物崖柏光合作用和叶绿素荧光参数的影响[J]. 生态学报,2011,31(20):5999 ~ 6004.
- [4] 牛翠娟,娄安如,孙儒泳,等. 基础生态学[M]. 北京:高等教育出版社,2007.
- [5] 薛雪,李娟娟,郑云峰,等. 5 个常绿园林树种的夏季光合蒸腾特性[J]. 林业科学,2015,51(9):150 ~ 156.
- [6] 李金鹏,董然. 3 种彩色叶玉簪光合日变化[J]. 东北林业大学学报,2011,39(10):56 ~ 58,70.
- [7] 张聪颖,方炎明,姬红利,等. 遮阴处理对红叶石楠和洒金桃叶珊瑚光合特性的影响[J]. 应用生态学报,2011,22(7):1743 ~ 1749.
- [8] Richardson A D, Berlyn G P. Spectral reflectance and photosynthetic properties of *Betula papyrifera* (Betulaceae) leaves along an elevational gradient on Mt. Mansfield, Vermont, USA[J]. American Journal of Botany, 2002, 89(1):88 ~ 94.
- [9] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1982, 33(3):317 ~ 345.
- [10] 许大全. 光合作用学[M]. 北京:科学出版社,2013:94 ~ 95.
- [11] 黄红英,窦新永,孙蓓育,等. 两种不同生态型麻疯树夏季光合特性的比较[J]. 生态学报,2009,29(6):2861 ~ 2867.
- [12] 冯立国,丰震,赵兰勇,等. 野生玫瑰与玫瑰栽培品种光合特性的比较[J]. 林业科学,2007,43(2):31 ~ 36.
- [13] 王建华,任士福,史宝胜,等. 遮阴对连翘光合特性和叶绿素荧光参数的影响[J]. 生态学报,2011,31(7):1811 ~ 1817.
- [14] 李合生. 现代植物生理学[M]. 北京:高等教育出版社,2002.
- [15] Boardman N K. Comparative photosynthesis of sun and shade plants[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1977, 28(1):355 ~ 377.
- [16] 夏江宝,张淑勇,张光灿,等. 几种北方藤本植物光合作用效率及水分生态特征[M]. 北京:中国林业出版社,2015.