

施肥对增温促花后‘长寿冠’海棠叶片生长及光合特性的影响

梁文超¹, 步行¹, 罗思谦¹, 谢寅峰^{1*}, 胡加玲², 张往祥¹

(1.南京林业大学, 南方现代林业协同创新中心, 南京林业大学生物与环境学院, 江苏 南京 210037;
2.北京市城市河湖管理处, 北京 100089)

摘要:【目的】探究氮磷钾复合施肥对增温促花后的优质盆栽观赏海棠品种‘长寿冠’(*Chaenomeles speciosa* ‘Changshouguan’)生长和光合特性的影响,为‘长寿冠’增温促花后的复壮栽培提供理论依据。【方法】采用正交设计进行根部施肥试验,设置对照组(CK)和9个处理组(处理1—9)。研究其对生长、叶绿素相对含量、光合气体交换参数和叶绿素荧光参数的影响。【结果】①处理1—9均对‘长寿冠’单株叶片数和叶面积有显著影响。以处理8(N₃P₂K₁)效果最好,分别比对照增加了10.74%、11.13%,均差异显著($P < 0.05$)。②各处理组能显著提高叶片相对叶绿素量、净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)和蒸腾速率(T_r),胞间CO₂浓度(C_i)变化不明显,说明‘长寿冠’叶片净光合能力的提升是由气孔和非气孔两方面因素导致的。③处理1—9均提高了‘长寿冠’PS II光化学淬灭系数(qP)、实际光化学效率(Φ_{PSII})和电子传递速率(ETR),以处理8效果最好。各施肥处理组的非光化学淬灭系数(NPQ)均低于对照,表明施肥处理促进了叶片对光能的转化和利用效率,降低了光化学反应过程中的热耗散。④相关性分析表明, P_n 与相对叶绿素含量、 G_s 、qP、叶面积、ETR、 Φ_{PSII} 呈显著正相关,与NPQ呈负相关。相对叶绿素含量与叶面积、单株叶片数呈显著正相关,表明施肥处理通过提升‘长寿冠’的光合性能促进叶片的生长,叶片光合性能的改善与光能吸收及其转化利用效率的提高有关;叶绿素相对含量可以作为考量促花后施肥复壮效果的有效生理指标。【结论】适当配比的氮磷钾复合肥能有效促进增温促花后盆栽海棠‘长寿冠’叶片的生长,提升光合性能,最佳的氮磷钾肥配施方案为每株1.2 g氮肥、0.2 g磷肥、0.2 g钾肥。

关键词:‘长寿冠’海棠;氮磷钾配方施肥;光合特性;生长特性

中图分类号:S718

文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1000-2006(2023)05-0114-07



Effects of fertilization on the leaf growth and photosynthetic characteristics of *Chaenomeles speciosa* ‘Changshouguan’ after processing of warming in the post floral stage

LIANG Wenchao¹, BU Xing¹, LUO Siqian¹, XIE Yinfeng^{1*}, HU Jialing², ZHANG Wangxiang¹

(1.Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. Beijing Municipal Administration of Rivers and Lakes, Beijing 100089, China)

Abstract: 【Objective】This research aims to explore the effects of combined nitrogen, phosphorus and potassium fertilization on the growth and photosynthetic characteristics of high-quality potted ornamental malus cultivar *Chaenomeles speciosa* ‘Changshouguan’ after a warming and flowering promotion, and to provide a theoretical basis for the rejuvenation cultivation of ‘Changshouguan’ after a warming and flowering promotion. 【Method】The root fertilization experiment was conducted by an orthogonal design, and the control group and nine treatment groups (treatments 1–9) were set up. The effects on growth, relative chlorophyll content, photosynthetic gas exchange, and chlorophyll fluorescence were studied. 【Result】(1) Treatments 1–9 had significant effects on leaf number and leaf area per plant.

收稿日期 Received: 2022-02-28

修回日期 Accepted: 2022-11-18

基金项目: 国家林业和草原局科技发展中心项目(KJZXSP202213)。

第一作者: 梁文超(liangwenchao77@163.com)。*通信作者: 谢寅峰(xyff@njfu.edu.cn), 教授。

引文格式: 梁文超, 步行, 罗思谦, 等. 施肥对增温促花后‘长寿冠’海棠叶片生长及光合特性的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2023, 47(5): 114–120. LIANG W C, BU X, LUO S Q, et al. Effects of fertilization on the leaf growth and photosynthetic characteristics of *Chaenomeles speciosa* ‘Changshouguan’ after processing of warming in the post floral stage [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2023, 47(5): 114–120. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202202016.

Treatment 8 ($N_3P_2K_1$) had the best effect, increasing by 10.74% and 11.13% compared with the control, with significant differences ($P < 0.05$). (2) The relative chlorophyll content, net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s), and transpiration rate (T_r) of the leaves in all treatment groups increased significantly, while the intercellular carbon dioxide concentration (C_i) was not significantly changed, indicating that the increase in net photosynthetic capacity of the ‘Changshouguan’ leaves was caused by stomatal and non-stomatal factors. (3) The photochemical quenching coefficient (qP), photochemical efficiency (Φ_{PSII}), and electron transfer rate (ETR) of PS II were improved in treatments 1–9, with treatment 8 having the best effect. The non-photochemical quenching coefficient (NPQ) of each fertilizer treatment group was lower than that of the control group, indicating that the fertilizer treatment promoted the conversion and utilization efficiency of light energy and reduced heat dissipation during the photochemical reaction. (4) Correlation analysis showed that P_n was positively correlated with relative chlorophyll content, G_s , qP, leaf area, ETR, and Φ_{PSII} , and negatively correlated with NPQ. The relative chlorophyll content was significantly positively correlated with the leaf area and the number of leaves per plant, indicating that fertilization promoted the growth of the leaves by improving the photosynthetic performance of the ‘Changshouguan,’ and the improvement of the photosynthetic performance of the leaves was related to the improvement of the light energy absorption and the conversion and utilization efficiency. The relative chlorophyll content can be used as an effective physiological index to evaluate the effect of fertilization after anthesis. 【Conclusion】 The appropriate ratio of NPK compound fertilizer can effectively promote the growth of potted malus ‘Changshouguan’ leaves after heating and promoting flowering, and improve the photosynthetic performance. The best N, P, and K combined application scheme was 1.2 g N, 0.2 g P, and 0.2 g K per plant.

Keywords: *Chaenomeles speciosa* ‘Changshouguan’; N, P, K formula fertilization; photosynthetic characteristics; growth characteristics

‘长寿冠’海棠(*Chaenomeles speciosa* ‘Changshouguan’)又名红宝石,是蔷薇科(Rosaceae)木瓜属植物,属于贴梗海棠的观赏品种之一^[1-2]。花期3—4月,花为复瓣,花大、深红色,花多而密,倒垂的花蕾似红灯笼,盛开时,花团锦簇,极为艳丽。树型优美耐修剪,易于成型,是盆栽和制作盆景的理想树材,也是目前市场上应用较为广泛的优质木本年宵花卉。

冬季增温是海棠年宵花生产的常用且有效手段,但冬季增温在促进‘长寿冠’海棠提前开花(从自然花期的3月提前至1—2月)的同时,会导致海棠叶片生长及其光合能力的衰退,即营养生长与生理功能的衰退,最终影响来年的生殖生长^[3-4],这是木本年宵花卉生产企业实际生产经营过程中遇到的影响生产效益的关键问题之一。因此,冬季增温促花后营养生长及其生理功能的恢复是海棠年宵花可持续生产的关键问题。

施肥是常用的植物复壮栽培技术之一^[5]。氮(N)、磷(P)、钾(K)是苗木生长发育所必需的大量元素,也是其光合作用中的关键元素^[6-10]。植物营养元素的吸收和利用、干物质积累量、叶片色素含量等均与氮磷钾肥的配比相关^[11-14]。目前关于海棠促花后采用配方施肥处理来进行复壮的研究鲜见报道。因此,本研究在前期海棠花期调控技术研究的基础上^[3],采用正交试验探究配施氮磷钾

肥对‘长寿冠’海棠复壮的影响,寻找适宜氮磷钾肥浓度配比的同时探索施肥对增温促花后‘长寿冠’叶片生长与光合作用的影响机制,旨在为海棠增温促花后的复壮栽培提供理论依据,同时也为其他木本花卉复壮栽培技术的研究与生产应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于南京林业大学下蜀实习林场(119°14'E, 31°59'N),属北亚热带季风气候,年均气温 15.2 °C,年均降水量为 1 104 mm,年均日照 2 018 h,年均无霜期 229 d。试验装盆所用的土壤主要为黄棕壤,土质为重壤。土壤全氮含量 0.704 g/kg、全磷含量 0.146 g/kg、有效磷含量 12.500 mg/kg、速效钾含量 103.700 mg/kg、有机质含量 7.39 g/kg, pH 4.5~5.5。

1.2 供试材料

选用5年生‘长寿冠’海棠为试验材料,株高40~60 cm,冠径50~60 cm,底径1.5~2 cm。在11月上旬选取60株生长旺盛、长势一致的‘长寿冠’海棠装盆,并于12月中旬将移栽好的‘长寿冠’海棠从室外移入玻璃温室中,过渡1周后在玻璃温室中开始进行统一增温处理,增温期间每周浇水1次。玻璃温室中放置美国 WatchDog 公司

Spectrum1000Series, Silicon Pyranometer, External Temperature Sensor-20 ft.温度测定仪,每 15 min 仪器自动记录 1 次环境温度。处理期间,温室的日均温度为 $(18.11\pm1.53)^{\circ}\text{C}$ ^[15]。当植物处于盛花期(花量达到 60%)时停止增温^[16]。

1.3 试验设计

采用氮磷钾复合施肥处理,肥料配比处理按正交试验方法 $L_9(3^4)$ 设计,具体参照文献[17]方法,设置氮、磷、钾及空列 4 因子 3 水平,共 10 个处理,以不施肥处理为对照(CK),每个处理 6 个重复。氮肥为尿素,含 N 46%;磷肥为过磷酸钙,含 P_2O_5 15%;钾肥为氧化钾,含 K_2O 63%。施肥时间为 2021 年 4 月初,采用环施的方法进行 1 次性根部施肥,于当年 7 月中旬进行生长指标和光合特性的测定。具体施肥水平和组合见表 1(表 1 中施肥量均为换算过后有效成分含量)。尿素由西陇化工股份有限公司生产,过磷酸钙和氧化钾均由永华化学科技(江苏)有限公司生产。

表 1 肥料处理浓度设计

试验编号 test No.	试验处理 treatment	施肥量/(g·株 ⁻¹) fertilization		
		尿素 carbamide	P_2O_5	K_2O
CK	$\text{N}_0\text{P}_0\text{K}_0$	0	0	0
1	$\text{N}_1\text{P}_1\text{K}_1$	0.4	0.1	0.2
2	$\text{N}_1\text{P}_2\text{K}_2$	0.4	0.2	0.4
3	$\text{N}_1\text{P}_3\text{K}_3$	0.4	0.3	0.6
4	$\text{N}_2\text{P}_1\text{K}_2$	0.8	0.1	0.4
5	$\text{N}_2\text{P}_2\text{K}_3$	0.8	0.2	0.6
6	$\text{N}_2\text{P}_3\text{K}_1$	0.8	0.3	0.2
7	$\text{N}_3\text{P}_1\text{K}_3$	1.2	0.1	0.6
8	$\text{N}_3\text{P}_2\text{K}_1$	1.2	0.2	0.2
9	$\text{N}_3\text{P}_3\text{K}_2$	1.2	0.3	0.4

1.4 指标测定

1) 叶片生长性状。每个处理随机选取 3 株,统计其叶片数量(NL)。每个处理随机摘取 50 片叶片,采用 Li-3000 型便携式叶面积仪(LI-COR,美国)测定叶片面积(SLA),取其平均值作为该处理组植物的叶面积值加以记录。

2) 相对叶绿素含量和光合特性。采用手持便携式叶绿素仪 SPAD-502(Minolta,日本)对每组随机抽取的 5 株进行相对叶绿素含量的测定。随机采集各组当年生的大小相近、部位(中上层)与叶龄相同的功能叶片进行测定。对所有叶片进行等间距读取 10 个读数以保证数据的可靠性,取其平均值作为该植物的叶绿素相对含量(SPAD)值加

以记录。

于 7 月晴朗无云的上午,在试验地采用 Li-6400 便携式光合测定仪(LI-COR,美国)的标准叶室测定‘长寿冠’叶片的光合参数,测定时间为早上 9:00—10:00。选择各方位受光良好、长势一致的健康成熟叶片作为测定叶片,每个处理 6 株重复。测定的指标包括:光合气体交换参数净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和蒸腾速率(T_r)。

3) 荧光参数。荧光参数的测定与光合参数的测定同天进行。选择与光合参数测定相同方位的叶片,每个处理 6 株重复,叶片充分暗适应 30 min 后使用英国 Technologica 公司的叶绿素荧光快速成像系统 Chlorophyll fluorescence Imager (CFImager)测定其各荧光参数。测定指标包括:PS II 实际光化学效率(Φ_{PSII})、电子传递速率(ETR)、光化学淬灭系数(qP)和非光化学淬灭系数(NPQ)。

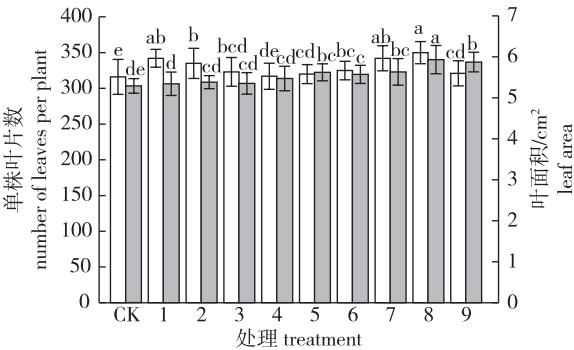
1.5 数据处理

采用 Excel 2016 进行数据整理和作图,用 DPS 7.05 软件进行差异显著性分析(Duncan 新复极法),用 SPSS 26.0 进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对‘长寿冠’叶片生长的影响

不同施肥处理下,各处理组的单株叶片数、叶面积均不同程度高于对照组,并以处理 8($\text{N}_3\text{P}_2\text{K}_1$)效果最好(图 1),分别比对照高出 10.74% 和 11.13%,且差异显著($P<0.05$)(表 2)。



□ 单株叶片数 number of leaves per plant; ■ 叶面积 leaf area。

不同小写字母表示不同处理间差异达显著水平($P<0.05$)。下同。Different lowercase letters indicate that the difference between different treatments is significant ($P<0.05$).The same below.

图 1 不同施肥处理对‘长寿冠’叶片性状的影响
Fig. 1 The effect of different fertilization treatments on the leaf characteristics of ‘Changshouguan’

表 2 不同施肥处理对‘长寿冠’叶片生长及光合生理性状方差分析

Table 2 Variance analysis of different fertilization treatments on leaf traitsand photosynthetic physiological characters of ‘Changshouguan’

指标 index	变异来源 source of variation	Ⅲ型平方和 SS of type Ⅲ	自由度 df	均方 MS	<i>F</i>	<i>P</i>	指标 index	变异来源 source of variation	Ⅲ型平方和 SS of type Ⅲ	自由度 df	均方 MS	<i>F</i>	<i>P</i>
NL	处理	3 252.545	10	325.255	4.919	0.001	SPAD	处理	130.252	10	13.025	13.509	<0.001
	误差	1 322.364	20	66.118				误差	19.284	20	0.964		
	误差总和	3 469 815.000	33					误差总和	131 448.760	33			
	校正总和	306 569.879	32					校正总和	219.639	32			
SLA	处理	0.899	10	0.090	10.176	<0.001	NPQ	处理	0.222	10	0.022	32.352	<0.001
	误差	0.177	20	0.009				误差	0.014	20	0.001		
	误差总和	1 031.343	33					误差总和	30.960	33			
	校正总和	2.949	32					校正总和	0.824	32			
<i>P_n</i>	处理	11.305	10	1.131	11.001	<0.001	qP	处理	0.017	10	0.002	29.070	<0.001
	误差	2.055	20	0.103				误差	0.001	20	5.959×10 ⁻⁵		
	误差总和	4 567.174	33					误差总和	17.462	33			
	校正总和	70.573	32					校正总和	0.098	32			
<i>G_s</i>	处理	0.004	10	<0.001	36.475	<0.001	ETR	处理	351.901	10	35.190	45.825	<0.001
	误差	0.000	20	1.176×10 ⁻⁵				误差	15.358	20	0.768		
	误差总和	2.535	33					误差总和	3 333 531.079	33			
	校正总和	0.050	32					校正总和	897.094	32			
<i>T_r</i>	处理	1.008	10	0.101	5.232	0.001	Φ _{PSⅡ}	处理	0.008	10	0.001	45.825	<0.001
	误差	0.385	20	0.019				误差	0.000	20	1.741×10 ⁻⁵		
	误差总和	518.754	33					误差总和	7.563	33			
	校正总和	37.542	32					校正总和	0.020	32			
<i>C_i</i>	处理	10.077	10	1.008	1.284	0.303	<i>C_i</i>	误差总和	3 731 958.930	33			
	误差	15.691	20	0.785				校正总和	5 484.216	32			

2.2 不同施肥处理对‘长寿冠’叶片光合特性和相对叶绿素含量的影响

不同施肥处理下,各处理组‘长寿冠’的净光合速率(*P_n*)相较对照组(CK)均有不同程度的提高,且以处理 8(N₃P₂K₁)效果最佳(图 2a),较对照组增加 21.58%,差异显著(*P*<0.05)。图 2a 显示,各处理组气孔导度(*G_s*)均显著高于对照组(CK),处理 8(N₃P₂K₁)值最大,达到0.295 8 mol/(m²·s),高于对照组 18.15%且差异显著(*P*<0.05)。图 2b

表明,除处理 3、4 组外,其他处理组的蒸腾速率(*T_r*)与对照(CK)间均差异显著(*P*<0.05),且处理 8(N₃P₂K₁)较对照(CK)高 17.68%。图 2b 还表明,各处理下的胞间 CO₂ 浓度(*C_i*)变化不明显,各处理组间差异不显著(*P*>0.05)。施用不同配比的氮磷钾肥对‘长寿冠’叶片相对叶绿素含量的影响见图 2c,与对照相比,各处理组的相对叶绿素含量均有不同程度提高,且在处理 8(N₃P₂K₁)达到最大值,比对照增加了 9.40%,处理 1、2、6、7、8、9 较对

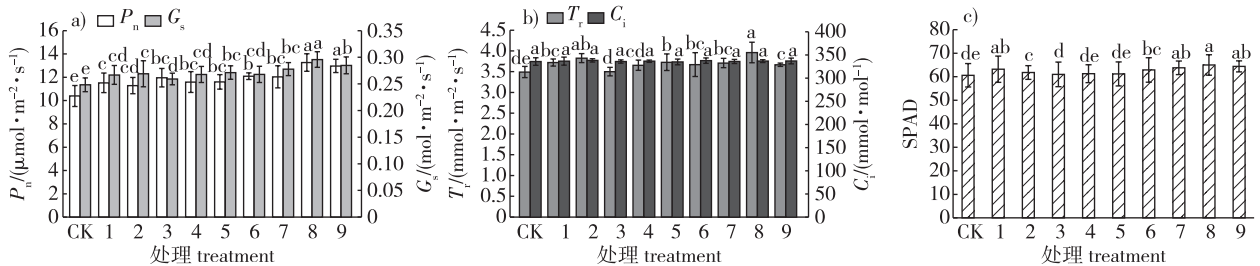


图 2 不同施肥处理对‘长寿冠’光合特性和叶绿素相对含量的影响

Fig. 2 Effects of different fertilization treatments on the photosynthetic characteristics and relative chlorophyll content (SPAD) of ‘Changshouguan’

照差异显著($P<0.05$)。由表2可知,除 C_i 外,处理组 P_n 、 G_s 、 T_r 、SPAD 较对照组均差异显著($P<0.05$)。

2.3 不同施肥处理对‘长寿冠’荧光参数的影响

不同配比氮磷钾肥处理下的‘长寿冠’海棠叶片的qP、NPQ、 Φ_{psII} 、ETR 与对照(CK)相比均存在显著差异($P<0.05$)(表2),部分处理之间也存在显著差异($P<0.05$)(图3)。

由图3可知,各处理组的qP 均高于对照值(CK),处理8 效果最佳,较对照增加11.83%;

Φ_{psII} 、ETR 均在处理8 达到最大值,均较对照增加11.01%,且差异显著($P<0.05$)。说明施肥能提高PS II 反应中心开放部分的比例,增强了参与光合电子的线性传递。图3 还显示,各处理组叶片的NPQ 值与对照组(CK)相比均不同程度下降,处理9 达到最小值,较对照(CK)下降了29.49%,且差异显著($P<0.05$)。表明增温促花导致‘长寿冠’PS II 天线色素吸收的光能中以热能的形式耗散掉的部分增加^[18],而施肥处理减少了非光化学过程耗散的激发能,提升了植株的光合能力。

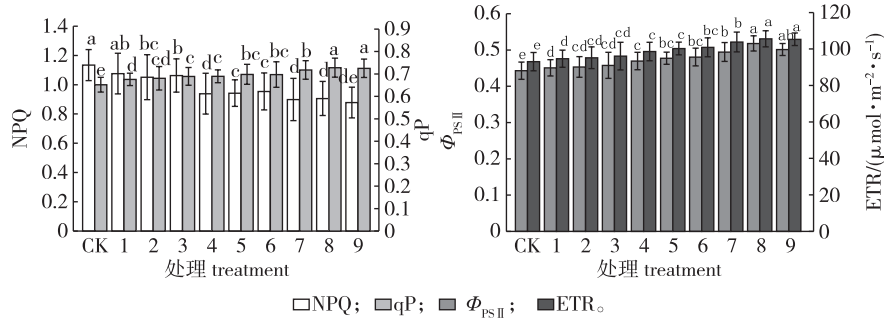


图3 不同施肥处理对‘长寿冠’荧光参数的影响

Fig. 3 Effects of different fertilization treatments on NPQ, qP, Φ_{psII} and ETR of ‘Changshouguan’

2.4 叶片指标的相关性分析

‘长寿冠’叶片各指标相关性分析见表3。由表3可知, P_n 与相对叶绿素含量(SPAD)、 G_s 、qP 呈显著正相关,与叶面积(SLA)、ETR、 Φ_{psII} 呈极显著正相关($P<0.01$),与NPQ 负相关,且相关性达显

著水平($P<0.05$)。叶片数与SPAD 和 T_r 显著正相关($P<0.05$),叶面积(SLA)与相对叶绿素含量显著正相关($P<0.05$),与 P_n 、 G_s 、qP、ETR、 Φ_{psII} 均呈极显著正相关($P<0.01$),与NPQ 负相关且相关性达极显著水平($P<0.01$)。

表3 施肥处理组植株叶片指标间的相关性

Table 3 The correlation among plant indicators in fertilization treatment groups

指标 index	NL	SLA	SPAD	P_n	G_s	T_r	C_i	qP	NPQ	Φ_{psII}	ETR
SLA	0.27	1									
SPAD	0.58 *	0.60 *	1								
P_n	0.36	0.73 **	0.51 *	1							
G_s	0.40	0.86 **	0.64 **	0.60 *	1						
T_r	0.58 *	0.37	0.42	0.11	0.51 *	1					
C_i	0.32	0.15	0.34	0.15	0.29	0.29	1				
qP	0.22	0.95 **	0.55 *	0.77 *	0.82 **	0.33	0.11	1			
NPQ	-0.09	-0.82 **	-0.51 *	-0.55 *	-0.68 **	-0.20	-0.15	-0.778 **	1		
Φ_{psII}	0.27	0.91 **	0.60 *	0.82 **	0.77 **	0.28	0.15	0.95 **	-0.73 **	1	
ETR	0.27	0.91 **	0.60 *	0.82 **	0.77 **	0.28	0.15	0.95 **	-0.73 **	1.00 **	1

注: * . $P<0.01$, * . $P<0.05$ 。

3 讨 论

植物生长发育建立在营养生长的基础之上,其营养器官生长的好坏会直接影响植物的整个生命历程,而叶片作为植物的营养器官在植物体的结构中不仅数量大,还担负着光合作用、制造养料等功能,是植物获取能量最重要的组织结构^[19-20]。叶片数及叶面积的大小被认为是植物“源”是否充足

的依据,是植物重要的营养生长观测指标^[21-23]。叶绿素作为吸收光能的主要色素,将捕获的光能传递到光反应中心产生化学能^[24],并且在一定范围内叶绿素含量与植物的光合能力具有较好的相关性^[25-26]。植物的生理状态与叶片特征紧密相关,主要体现在叶片的光合作用上,光合作用既是植物物质代谢和能量转化的主要途径^[27],也是植物生长发育的生理基础。本研究结果显示,施肥增加了

‘长寿冠’的单株叶片数和叶面积,有效促进叶片的生长。此外,施肥对‘长寿冠’叶片的叶绿素相对含量及气体交换参数影响较为显著。氮是叶绿素的重要组分,高水平的氮在提高植物体内叶绿素合成量的同时,会通过增加与光合作用相关酶的数量来增强植物的光合作用^[28]。通过相关性分析可知,‘长寿冠’海棠叶片叶绿素相对含量与净光合速率呈显著正相关,表明叶绿素的合成与叶片光合能力的变化有关,进一步表明施肥通过促进叶绿素的合成提高叶片的光合能力。除此之外,相对叶绿素含量同时与单株叶片数和叶面积呈显著正相关,这表明相对叶绿素含量的变化会影响植物叶片的生长,因此可以作为衡量海棠增温促花后复壮效果的有效生理指标。

气孔对环境因素(如温度等)和生理因素(如呼吸速率)响应敏感^[29],它通过调节气孔导度控制植物叶片与大气之间的气体交换^[30],气孔调节影响着植物适应外界环境的能力,是植物适应外部环境变化的重要机制之一。而胞间 CO_2 浓度变化可作为判断光合速率变化是由于气孔因素还是非气孔因素引起的重要依据^[31]。本研究发现,施肥处理及增温促花后‘长寿冠’海棠叶片的 P_n 、 G_s 、 T_r 显著增加,而 C_i 变化不明显,相关性分析进一步表明,处理组 P_n 与 C_i 并不相关,但与相对叶绿素含量和气孔导度呈极显著正相关。说明处理组‘长寿冠’叶片光合速率的上升是由气孔和非气孔因素共同作用引起的。施肥处理下‘长寿冠’ P_n 升高的原因可能是由于相对叶绿素含量的升高提高了叶片对光能的吸收,也可能是施肥使 G_s 、 T_r 变大,增强了叶片传导光合底物和吸收运输水分的能力,促进了植株的光合能力。

与气体交换参数相比,叶绿素荧光参数可以从内部反映植物光合系统对于光能的吸收、传递与分配能力^[32]。本试验中,与对照相比,施肥处理后的叶片 qP 、 Φ_{PSII} 、ETR 显著提高,表明施肥处理使植物 PS II 反应中心开放程度变大,并使 PS II 反应中心氧化态 Q_A 的比例增加,加快了电子传递速率^[33],提高了叶片在光下用于电子传递的能量占吸收光能的比例,增强了电子传递速率,进而提高了同化力(ATP、NADPH),有利于增加‘长寿冠’叶片固定 CO_2 及合成有机物质的量,最终提高植物的光合能力。有研究显示, Φ_{PSII} 和 ETR 与热害指数呈显著负相关关系^[34],因此 ETR 的提高也表明了施肥可以缓解增温处理对‘长寿冠’的高温胁迫。除此之外,作为评价植物光合过程中热耗散的指

标,NPQ 的降低表明了适宜的氮磷钾配比施肥减少了由非光化学过程所耗散的光能,使叶片捕获的光能更多地用于推动光合电子传递,从而提高了叶片的光合利用能力,保证光合作用顺利进行^[35]。通过相关性分析可知, P_n 与 qP 呈显著正相关、与 Φ_{PSII} 、ETR 呈极显著正相关,与 NPQ 呈显著负相关,进一步证明了可通过施肥提高‘长寿冠’叶片对吸收光能的利用率、减少热耗散来提高植株净光合能力。

本研究表明,适宜的配方施肥能有效促进促花后‘长寿冠’海棠叶片对光能的吸收、转化和利用,并通过改善气孔性能提升了叶片的光合能力,促进了植物叶片的生长。本研究最佳的复壮施肥配方为 $\text{N}_3\text{P}_2\text{K}_1$,即每株 1.2 g 氮肥、0.2 g 磷肥、0.2 g 钾肥。但此次试验仅探讨了配施氮磷钾肥对‘长寿冠’海棠叶片生长及光合性能的影响,而肥料中氮、磷、钾间的交互作用对‘长寿冠’海棠生理的影响有待进一步研究。

参考文献(reference):

- [1] 冯冰,刘坤良.海棠类植物品种与景观应用[J].中国花卉园艺,2013(14):39-41.FENG B,LIU K L.Species and landscape application of *Begonia* plants[J].China Flowers Horticulture,2013(14):39-41.
- [2] 臧德奎,王关祥,郑林,等.我国木瓜属观赏品种的调查与分类[J].林业科学,2007,43(6):72-76.ZANG D K,WANG G X,ZHENG L,et al.Cultivar classification of *Chaenomeles* in China[J].Sci Silvae Sin,2007,43(6):72-76.DOI: 10.3321/j.issn:1001-7488.2007.06.013.
- [3] 梁文超,步行,罗思谦,等.氮磷钾复合肥对增温促花后‘长寿冠’海棠生理特性的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2022,46(5):81-88.LIANG W C,BU X,LUO S Q,et al.Effects of nitrogen, phosphorus and potassium compound fertilization on the physiological characteristics of *Chaenomeles speciosa* ‘Changshouguan’ after processing of warming in the post floral stage[J].J Nanjing Fore Univ (Nat Sci Ed), 2022, 46(5): 81-88.DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202109025.
- [4] 李彦连,张爱民.植物营养生长与生殖生长辩证关系解析[J].中国园艺文摘,2012,28(2):36-37.LI Y L,ZHANG A M. Analysis of dialectical relationship between plant vegetative growth and reproductive growth[J].Chin Hortic Abstr,2012,28(2):36-37.DOI: 10.3969/j.issn.1672-0873.2012.02.017.
- [5] 何西蒙.盆栽月季花后复壮试验[J].现代农业科技,2019(5):128,133.HE X H. Experiment on rejuvenation after potted Chinese rose flower[J].Mod Agric Sci Technol,2019(5):128,133.DOI: 10.3969/j.issn.1007-5739.2019.05.072.
- [6] 杨志坚,冯金玲,吴小慧,等.氮磷钾施肥对闽楠幼苗营养元素吸收与利用的影响[J].生态学杂志,2021,40(4):998-1011.YANG Z J,FENG J L,WU X H,et al.Effects of N,P,and K fertilization on nutrient uptakes and utilizations of *Phoebe bournei* seedlings[J].Chin J Ecol,2021,40(4):998-1011.DOI: 10.13292/j.1000-4890.202104.017.
- [7] 温旭丁,陈花.海南海桑幼苗氮磷钾施肥量分析[J].森林与环境学报,2021,41(4):351-357.WEN X D,CHEN H.Study on application rates of nitrogen,phosphorus,and potassium fertilizers in *Sonneratia hainanensis* seedling cultivation[J].J For Environ,2021,41(4):351-357.DOI: 10.13324/j.cnki.jfcf.2021.04.003.
- [8] 毕俊国.梗稻植酸磷和矿质元素积累的氮磷肥调控效应研究[D].南京:南京农业大学,2012.BI J G.The effect of nitrogen and phosphorus fertilizer on phosphorus of phytic acid and mineral

- nutrients accumulation in japonica rice grains [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012.
- [9] WAQAS M, FENG S Z, AMJAD H, et al. Protein phosphatase (PP2C9) induces protein expression differentially to mediate nitrogen utilization efficiency in rice under nitrogen-deficient condition [J]. Int J Mol Sci, 2018, 19 (9): 2827. DOI: 10.3390/ijms19092827.
- [10] 康利允, 常高正, 马政华, 等. 不同氮钾肥用量对甜瓜坐果节位叶片生理特性的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2019 (4): 96–104. KANG L Y, CHANG G Z, MA Z H, et al. Effects of different nitrogen and potassium application amounts on physiological characteristics of fruiting node leaf of melon [J]. Soils Fertil Sci China, 2019 (4): 96–104. DOI: 10.11838/sfsc.1673–6257.18387.
- [11] CHIWA M, SHEPPARD L J, LEITH I D, et al. Long-term interactive effects of N addition with P and K availability on N status of *Sphagnum* [J]. Environ Pollut, 2018, 237: 468–472. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.02.076.
- [12] HE Q, HAO Y H, GAO X C, et al. Biomass production of *Moringa oleifera* as affected by N, P, and K fertilization [J]. J Plant Nutr, 2020, 43 (10): 1458–1467. DOI: 10.1080/01904167.2020.1739305.
- [13] 李婷, 刘莉, 武志伟, 等. 氮磷钾肥配施对望天树幼苗生长及生理特性的影响 [J]. 西北林学院学报, 2020, 35 (6): 110–115, 175. LI T, LIU L, WU Z W, et al. Effects of combined application of nitrogen, phosphorus, potassium, and calcium on the growth and physiological characteristics of *Parashorea chinensis* seedlings [J]. J Northwest For Univ, 2020, 35 (6): 110–115, 175. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7461.2020.06.15.
- [14] 宋政凯, 李惠通, 赖慧捷, 等. 二代杉木良种苗木的施肥配方研究 [J]. 森林与环境学报, 2020, 40 (4): 420–427. SONG Z K, LI H T, LAI H J, et al. Study on fertilization formula of second-generation improved variety of Chinese fir seedlings [J]. J For Environ, 2020, 40 (4): 420–427. DOI: 10.13324/j.cnki.jfcf.2020.04.012.
- [15] 孙鑫, 何亚飞, 卢俊芳, 等. 增温促花对盆栽海棠“长寿冠”复栽后光合特性日变化的影响 [J]. 江西农业大学学报, 2017, 39 (1): 64–71. SUN X, HE Y F, LU J F, et al. Effects of increasing temperature to promote flowering on the diurnal variation of photosynthesis in potted *Chaenomeles speciosa* (Sweet) Nakai ‘Changshouguan’ [J]. Acta Agric Univ Jiangxiensis, 2017, 39 (1): 64–71. DOI: 10.13836/j.jia.2017009.
- [16] 詹福麟. 不同浓度多效唑对10种三角梅花期调控效果的影响 [J]. 防护林科技, 2021 (5): 14–17. ZHAN F L. Effect of paclobutrazol in different concentrations on the florescence regulation of ten cultivar seedlings of *Bougainvillea* spp [J]. Prot For Sci Technol, 2021 (5): 14–17. DOI: 10.13601/j.issn.1005–5215.2021.05.004.
- [17] 王钦德, 杨坚. 食品试验设计与统计分析 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2003: 349–361. WANG Q D, YANG J. Food experimental design and statistical analysis [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2003: 349–361.
- [18] 彭予咸, 胡留杰, 邓敏, 等. 植物生长调节剂对茶新梢叶绿素荧光特性的影响 [J]. 西南农业学报, 2013, 26 (2): 514–519. PENG Y X, HU L J, DENG M, et al. Effects of plant growth regulator on characteristics of chlorophyll fluorescence in leaves of new tea shoots [J]. Southwest China J Agric Sci, 2013, 26 (2): 514–519. DOI: 10.16213/j.cnki.scjas.2013.02.049.
- [19] 宋永昌. 植被生态学 [M]. 上海: 华东师范大学出版社, 2001. SONG Y C. Vegetation ecology [M]. Shanghai: East China Normal University Press, 2001.
- [20] MURCHIE E H, LAWSON T. Chlorophyll fluorescence analysis: a guide to good practice and understanding some new applications [J]. J Exp Bot, 2013, 64 (13): 3983–3998. DOI: 10.1093/jxb/ert208.
- [21] 曹栋, 赵小光, 王竹云, 等. 甘蓝型油菜叶面积测定方法的研究 [J]. 江西农业学报, 2018, 30 (8): 33–36, 41. CAO Y, ZHAO X G, WANG Z Y, et al. Study on method for determination of leaf area of *Brassica napus* [J]. Acta Agric Jiangxi, 2018, 30 (8): 33–36, 41. DOI: 10.19386/j.cnki.jxnyxb.2018.08.08.
- [22] 李方一, 黄璜, 官春云. 作物叶面积测量的研究进展 [J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2021, 47 (3): 274–282. LI F Y, HUANG H, GUAN C Y. Review on measurement of crop leaf area [J]. J Hunan Agric Univ (Nat Sci), 2021, 47 (3): 274–282. DOI: 10.13331/j.cnki.jhau.2021.03.005.
- [23] 官春云. 油菜结实器官与产量形成 [M]. 北京: 科学出版社, 2017. GUAN C Y. Seed-bearing organs and yield formation of rape [M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [24] BALEVICIUS V, DUFFY C D P. Excitation quenching in chlorophyll-carotenoid antenna systems: ‘coherent’ or ‘incoherent’ [J]. Photosynth Res, 2020, 144 (3): 301–315. DOI: 10.1007/s11120-020-00737-8.
- [25] 唐延林, 王人潮, 王秀珍, 等. 水稻叶面积指数和叶片生化成分的光谱法研究 [J]. 华南农业大学学报, 2003, 24 (1): 4–7. TANG Y L, WANG R C, WANG X Z, et al. Study on the leaf area index and biochemical contents of rice blade by the spectral method [J]. J South China Agric Univ, 2003, 24 (1): 4–7. DOI: 10.3969/j.issn.1001-411X.2003.01.002.
- [26] 张永贺, 陈文惠, 郭乔影, 等. 桉树叶片光合色素含量高光谱估算模型 [J]. 生态学报, 2013, 33 (3): 876–887. ZHANG Y H, CHEN W H, GUO Q Y, et al. Hyperspectral estimation models for photosynthetic pigment contents in leaves of *Eucalyptus* [J]. Acta Ecol Sin, 2013, 33 (3): 876–887. DOI: 10.5846/stxb201206240889.
- [27] 杨乔乔, 康建宏, 王佳. 氮磷钾肥配施对春玉米迪卡517光合特性的影响 [J]. 浙江农业科学, 2021, 62 (6): 1057–1062, 1070. YANG Q Q, KANG J H, WANG J. Different ratios of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer influenced photosynthetic characteristics of spring maize [J]. J Zhejiang Agric Sci, 2021, 62 (6): 1057–1062, 1070. DOI: 10.16178/j.issn.0528–9017.20210603.
- [28] KOCHSIEK A, CIGANDA V, BRYAN N, et al. Ecophysiological responses of *Schizachyrium scoparium* to water and nitrogen manipulations [J]. Gt Plains Res, 2006, 16 (1): 29–36.
- [29] 袁婷婷, 路远峰, 谢寅峰, 等. 硼钼铜微肥配施对太子参光合特性的影响 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45 (4): 130–136. YUAN T T, LU Y F, XIE Y F, et al. Effects of combined application of boron-molybdenum-copper microfertilizers on photosynthetic characteristics of *Pseudostellaria heterophylla* [J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2021, 45 (4): 130–136.
- [30] 宋述锐, 于华, 黄椰, 等. 不同钾肥对渍水胁迫下紫花苜蓿叶绿素荧光特性的影响 [J]. 草业科学, 2021, 38 (4): 693–702. SONG S R, YU H, HUANG Y, et al. Effects of different potassium fertilizers on chlorophyll fluorescence parameters of alfalfa under waterlogging conditions [J]. Pratacultural Sci, 2021, 38 (4): 693–702. DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2020-0468.
- [31] 王登亮, 吴雪珍, 刘春荣, 等. 高钾胁迫对柑桔果园土壤和叶片营养的影响 [J]. 浙江农业科学, 2020, 61 (1): 49–51. WANG D L, WU X Z, LIU C R, et al. Effects of high potassium stress on soil and leaf nutrition of Ponkan orchard [J]. J Zhejiang Agric Sci, 2020, 61 (1): 49–51. DOI: 10.16178/j.issn.0528–9017.20200117.
- [32] 吴敏, 邓平, 赵英, 等. 喀斯特干旱环境对青冈栎叶片生长及叶绿素荧光动力学参数的影响 [J]. 应用生态学报, 2019, 30 (12): 4071–4081. WU M, DENG P, ZHAO Y, et al. Effects of drought on leaf growth and chlorophyll fluorescence kinetics parameters in *Cyclobalanopsis glauca* seedlings of Karst areas [J]. Chin J Appl Ecol, 2019, 30 (12): 4071–4081. DOI: 10.13287/j.1001-9332.201912.001.
- [33] 杨福孙, 孙爱花, 王燕丹, 等. 生长延缓剂对槟榔苗期叶绿素含量及叶绿素荧光参数的影响 [J]. 中国农学通报, 2009, 25 (2): 255–257. YANG F S, SUN A H, WANG Y D, et al. Effects of plant growth retardants to chlorophyll content and chlorophyll fluorescence parameters of leaves in *Areca* (*Areca catechu* L.) seedling stage [J]. Chin Agric Sci Bull, 2009, 25 (2): 255–257.
- [34] KRAUSE G H. Photoinhibition of photosynthesis. An evaluation of damaging and protective mechanisms [J]. Physiol Plant, 1988, 74 (3): 566–574. DOI: 10.1111/j.1399-3054.1988.tb02020.x.
- [35] 王一承, 李伟才, 石胜友, 等. 冬季喷施多效唑对荔枝叶片叶绿素荧光特征的影响 [J]. 热带作物学报, 2012, 33 (6): 1024–1029. WANG Y C, LI W C, SHI S Y, et al. The chlorophyll fluorescence characteristics change of *Litchi* leaves after sprayed PP333 in winter [J]. Chin J Trop Crops, 2012, 33 (6): 1024–1029. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2012.06.011.