

何梅, 胡玉安, 王涛, 等. 3种北美观赏海棠对夏季高温环境的生理响应[J]. 江西农业大学学报, 2019, 41(4): 664–672.



3种北美观赏海棠对夏季高温环境的生理响应

何梅^{1,2}, 胡玉安², 王涛³, 许军², 曾文昌², 赵安^{1*}

(1. 江西师范大学 地理与环境学院/鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 江西 南昌 330032; 2. 江西省林业科学院, 江西 南昌 330032; 3. 中国科学院 植物研究所(南京中山植物园), 江苏 南京 210014)

摘要: 通过夏季高温环境下彩叶北美海棠‘紫宝石’、‘王族’和绿叶北美海棠‘亚当’的生长情况、生理生化、光合气体交换参数及光响应曲线的研究, 探索3种北美海棠对高温环境的响应策略并初步探讨其与绿叶北美海棠对夏季高温环境的适应性差异。结果表明, 彩叶北美海棠与绿叶北美海棠在夏季高温环境下均能通过维持细胞膜的热稳定性、降低活性氧积累、增加渗透调节物质含量、提高光合速率与叶片内部水分利用效率的方式来适应高温环境, 耐热性由高到低表现为‘紫宝石’、‘亚当’和‘王族’。该研究结果可为南方高温地区彩叶北美海棠的引种驯化、栽培育种以及耐热机理的研究提供依据。

关键词: 彩叶北美海棠; 高温环境; 生理响应

中图分类号: S718.43; S661.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-2286(2019)04-0664-09

Physiological Response of Colored-Leaved North American *Begonia* to High Temperature

HE Mei^{1,2}, HU Yu-an², WANG Tao³, XU Jun², ZENG Wen-chang², ZHAO An^{1*}

(1. Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Ministry of Education, School of Geography and Environmental Sciences, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China; 2. Jiangxi Academy of Forestry, Nanchang 330022, China; 3. Institute of Botany, Jiangsu Province and Chinese Academy of Sciences(Nanjing Botanical Garden Mem.Sun Yat-Sen), Nanjing 210014, China)

Abstract: By studying the growth, physiological and biochemical characteristics, photosynthetic gas exchange parameters and light response curves of colored-leaved north American *Begonia* ‘Purple Gems’, ‘Royal’ and green-leaved north American *Begonia* ‘Adam’ under high temperature environment, the response strategies of colored-leaved north American *Begonia* to high temperature environment were explored, and the differences between colored-leaf north American *Begonia* and green-leaved north American *Begonia* in adaptability

收稿日期: 2018-10-29 **修回日期:** 2019-02-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(31300572)、江西省科技厅重点研发项目(20161BBF60116)和江西省林业科学院重点项目(2016511402)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (31300572), Project Supported by Key Research and Development Project of Jiangxi Provincial Department of Science and Technology(20161BBF60116), Key Research Project of Jiangxi Academy of Forestry(2016511402)

作者简介: 何梅(1986—), 女, 助理研究员, 博士, 主要从事彩叶树种开发及植物生理研究, orcid.org/0000-0003-4527-3371, 505111043@qq.com; *通信作者: 赵安, 教授, 博士生导师, orcid.org/0000-0003-3554-262X, zhaoanzxs@qq.com。

to high temperature environment were discussed. The results showed that both colored-leaved and green-leaved north American *Begonia* could adapt to high temperature environment by maintaining the thermal stability of cell membranes, reducing the accumulation of reactive oxygen species, increasing the content of osmotic regulators, increasing photosynthetic rate and water use efficiency of leaves. Their heat tolerance was in the order of ‘Purple Gems’ > ‘Adam’ > ‘Royal’. The results of this study can provide a basis for the introduction, domestication, cultivation and breeding, and the study of heat tolerance mechanism of north American *Begonia* in high temperature areas.

Keywords: colored-leaved north American *Begonia*; high temperature; physiological response

彩叶植物是在植物正常生长季节里,叶片呈现非常见的绿色的植物,因其丰富的叶色已被广泛运用于园林景观设计中。但由于生长环境的影响,很多彩叶树种在园林景观应用中表现较差,导致国内彩叶树种的应用发展缓慢。北美海棠是美国、加拿大等国家的园艺工作者在从自然杂交的海棠中培育出的一系列观花、观果、观叶等类型的观赏海棠品种类群^[1]。由于北美海棠兼具观花、观叶、观果且环境适应性强,已被广泛应用于各种园林景观中,尤其是叶色独特的彩叶品种,极具推广价值^[2-4]。绝大多数北美海棠品种主要分布于我国北方温带地区,近年来南方地区也开始大量引种和栽培^[5-6]。然而,在彩叶北美海棠“北树南移”引种栽培过程中,过多地关注其色彩的表现,忽略了南方高温环境对苗木的影响,致使引种的彩叶北美海棠色彩效果表现差、生长不良、甚至死亡^[7-9]。同时,温度也是制约植物生长的主要环境因子,随着全球气候的变化,高温成为我国经常出现的异常天气。

因此为使南方高温地区更合理的引种和栽培彩叶北美海棠,以南方地区引种的彩叶北美海棠‘紫宝石’、‘王族’和绿叶北美海棠‘亚当’为试验对象,通过观测其夏季高温环境下(6—9月)形态和生长表现,测定其生理生化、光合特性、光响应曲线特征参数等,探索彩叶北美海棠对南方高温环境的响应策略,并通过与绿叶北美海棠‘亚当’的对比,探讨其与绿叶北美海棠在应对高温环境时的适应性差异。为彩叶植物的引种驯化、栽培育种和耐热机理的研究提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于江西省南昌市江西省林业科学院北美海棠基地,属亚热带湿润季风气候,年平均气温 17~17.7℃,年极端最高气温 40.9℃,极端最低气温-15.2℃。年降雨量 1 600~1 700 mm,年平均相对湿度为 78.5%。年日照时数 1 723~1 820 h,日照率为 40%,无霜期 251~272 d。试验地地势平坦,灌溉条件良好,土壤为黄壤土,土层深厚肥沃,深翻 50 cm。

根据 2017 年 6—9 月南昌市天气预报数据整理试验地 6—9 月气温情况(表 1)。

表 1 试验地 6—9 月气温情况
Tab.1 Temperature in the test site from June to September

时间/月 Time/month	平均高温/℃ Mean maximum temperature	平均低温/℃ Mean minimum temperature	极端高温/℃ Extreme high temperature	极端低温/℃ Extreme low temperature
6	28	22	33	20
7	34	28	39	24
8	34	26	38	24
9	31	23	36	20

1.2 试验材料与试验设计

试验材料为引种自山东省临沂地区的彩叶北美海棠‘紫宝石’、‘王族’和绿叶北美海棠‘亚当’,均为 2 a 生嫁接苗(表 2),其砧木均为 1 a 生湖北海棠(*Malus hupehensis* (Pamp.) Rehder),生长环境一致,无病

虫害。采用田间自然高温条件法,采用完全随机试验设计,设 3 个重复,7—8 月设定为高温期,研究北美海棠的耐热性。

表 2 供试北美海棠品种概况
Tab.2 North American *Begonia* varieties tested in the study

品种 Varieties	品种介绍 Variety introduction
‘紫宝石’ <i>M. ‘Purple Gems’</i>	小乔木,集观叶、观花、观果、观枝与观树形于一体的优良绿化、彩化树种。整个生长季节叶片呈紫红色,蜡质光亮。开出花朵紫红色。坐果后鲜红的果实挂满全树,接近于球形,是优良的彩叶品种。
‘亚当’ <i>M. ‘Adam’</i>	小乔木,树型直立,树冠圆而紧凑。花蕾深红色,深粉红色单瓣大花,后期逐渐褪成粉色—浅粉色,花量大。新叶嫩绿,成熟叶绿革质。果实橄榄形,幼果深紫,果实量极大,经冬不落。
‘王族’ <i>M. ‘Royalty’</i>	小乔木或大灌木,树形直立,树冠半球形。树皮红褐色。幼叶紫红色,老叶暗紫红色,叶缘波浪形。伞形花序,花暗紫红色,单瓣或半重瓣。果倒卵形,深紫色,是最具观赏价值的紫叶品种。

1.3 试验方法

1.3.1 外部形态观测 于 2017 年 6—9 月,每月观察记录各品种的外部形态变化,着重观测叶片、枝干等的变化,记录是否出现高温导致的叶片皱缩、叶斑、灼伤等热害症状产生。

1.3.2 生理生化指标测定 6—9 月中旬采摘 3 种北美海棠当年生枝条上的成熟全展叶片,每次采摘 3 株重复,每株采摘 10 片,放入超低温冰箱内贮存,用于生理生化指标及叶绿素含量的测定。

相对电导率测定参照 Ren 等(2007)的方法,MDA 含量测定采用硫代巴比妥酸法,SOD 活性测定采用 NBT 显色法,POD 活性测定采用改进的薛应龙^[10]的方法,CAT 活性测定参照李玲^[11]的方法,可溶性蛋白含量测定采用考马斯亮蓝法,可溶性糖含量测定采用蒽酮法,游离脯氨酸含量测定采用酸性茚三酮法。叶绿素含量的测定参照 Arnon(1949)的方法。

1.3.3 光合气体交换参数的测定 两个品种北美海棠各随机选取 5 株用于各个阶段气体交换参数的测定,测定时选取当年生枝条上成熟的完整叶片,结果取其平均值。光合气体交换参数的测定采用 Li-6400 便携式光合测定系统(Li-Cor,美国)。

1.3.4 光响应曲线的测定 选取 2017 年 8 月中旬高温天气(38 ℃)的 08:00—11:30,采用 Li-6400 便携式气体交换系统(Li-Cor,美国)的标准叶室测定系统测定各北美海棠光响应曲线。所测叶片皆为生长健康的植株上部向阳面第 3~5 节位正常叶片,每个品种测定 5 株。测定时,参比室 CO₂ 质量浓度控制为 380 μmol/mol,叶温控制为 25 ℃,设置模拟光强梯度为 1 800,1 400,1 000,800,500,200,100,50,20,10,0 μmol/(m²·s),测定其净光合速率 P_n。光响应曲线的拟合选用非直角双曲线模型^[12-13]。

1.4 数据处理

采用 SPSS 19.0 和 Microsoft Excel 2010 程序进行数据处理、统计及绘图。

2 结果与分析

2.1 北美海棠夏季高温环境下的生长情况

据观测,3 种北美海棠品种在南昌地区夏季适应性栽培过程中,植株生长减慢,叶片外观形态出现不同程度的热害症状。从表 3 叶片的观测记录来看,3 种北美海棠品种叶片在夏季高温环境下均出现了不同程度皱缩、卷曲、叶缘枯焦等变化,且新叶较老叶更易发生叶片的皱缩和卷曲,其中‘王族’的症状最为明显。总体来看,6 月品种叶片基本没有变化,7—8 月叶形改变最为明显,9 月有一定程度的缓解,但开始出现脱落情况。其中‘紫宝石’热害症状最轻,长势较好,‘王族’热害症状最为明显,叶形皱缩严重,叶片因高温灼伤脱落严重。

表 3 北美海棠 6—9 月生长情况
Tab.3 North American *Begonia* growth from June to September

品种 Varieties	6 月 June	7 月 July	8 月 August	9 月 September
‘紫宝石’ M. ‘Purple Gems’	基本没有伤害症状	嫩叶叶缘微上卷,中部叶少量微卷,下部叶部分黄化	嫩叶叶缘上卷,中部叶少量微卷,下部叶部分黄化	中部叶微卷,下部叶少量黄化脱落
‘亚当’ M. ‘Adam’	基本没有伤害症状	叶缘微卷,叶尖部分枯焦,极少量黄化脱落	叶片卷曲,中下部少量黄化,并伴有部分脱落	叶片部分微卷,中下部黄化脱落
‘王族’ M. ‘Royalty’	部分嫩叶叶尖上卷,老叶基本无伤害症状	嫩叶灼伤,少量老叶有斑点,部分脱落	嫩叶较少,中下部叶部分卷曲严重,有斑点,部分黄化脱落	上部叶微卷,中下部叶片脱落

2.2 北美海棠夏季生理生化指标分析

3 种北美海棠在南方夏季高温环境下,叶片相对电导率(图 1a)及 MDA 含量(图 1b)均发生了不同程度的变化(图 1)。叶片相对电导率及 MDA 含量变化的总体趋势均为 6 月较低,表明此时温度还比较适宜,3 种北美海棠的生理代谢环境较好,7 月随着温度的升高,叶片相对电导率及 MDA 含量大幅上升,与 6 月相比增幅较大,表明高温已经破坏了北美海棠细胞质膜。植株在适应高温环境后,8 月较 7 月总体下降,9 月较 8 月变化不大。各品种之间叶片相对电导率和 MDA 含量的差异不显著,总体来看,夏季高温环境下叶片相对电导率和 MDA 含量最高的是‘王族’,最低的是‘紫宝石’。

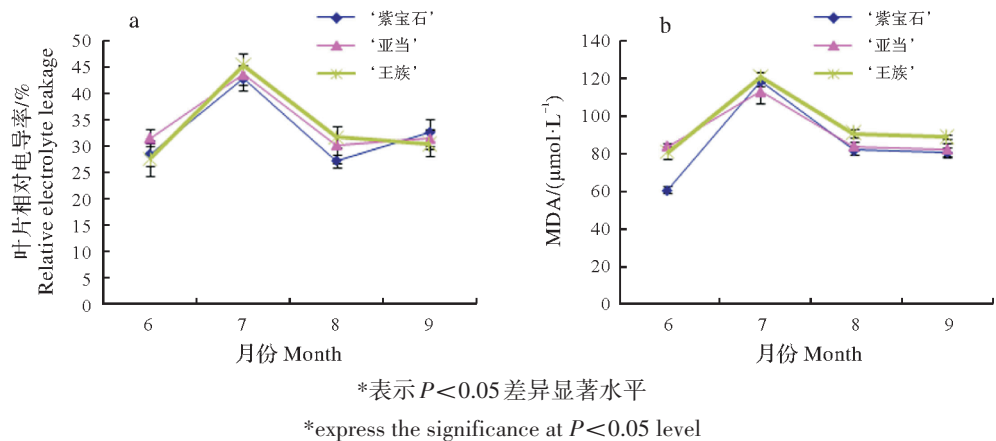


图 1 北美海棠 6—9 月叶片相对含水率(a)和 MDA 含量(b)
Fig.1 Changes of relative electrolyte leakage (a) and concentration of MDA (b) in north American *Begonia* from June to September

6 月,由于不同品种之间的抗氧化系统及不同品种对环境适应性调节共同作用,3 种北美海棠叶片超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性存在差异。7 月,SOD 活性(图 2a)均呈上升趋势,此时 SOD 活性最高,其中‘紫宝石’SOD 最高。8—9 月,SOD 活性均呈现下降的趋势,‘紫宝石’的 SOD 活性依然最高,显示出较强的抗氧化能力。‘王族’在持续高温过程中,SOD 活性最低。POD 活性(图 2b)的变化与 SOD 活性的变化基本一致。CAT 活性(图 2c)的变化与 POD 活性相比,各品种 CAT 活性的最高值出现在 7 月或 8 月,9 月的 CAT 活性依然较高,表明虽然 POD 和 CAT 均为催化分解 H_2O_2 的两种关键酶,但由于在温度和时间范围上的分工合作机制,导致其在不同北美海棠夏季高温环境下的变化趋势并不一致。

在夏季高温环境下,植物体内水分变化明显,植物通常会通过体内脯氨酸(Pro)、可溶性糖、可溶性蛋白等渗透调节物质含量的变化来适应周边环境。从图 3a 结果可以看出,在南方夏季高温环境下,3 种

北美海棠Pro含量出现先上升后下降的趋势,其中受南方地区5—7月梅雨季节的影响,高温的7月Pro含量并未达到最高,8月相比7月空气湿度低,导致植物体内水分亏损更大,植物体内Pro含量更高。‘紫宝石’和‘亚当’品种间Pro含量差异不大,相同温度条件下,‘王族’的Pro含量明显低于其他两种,表明其耐热性更差。可溶性蛋白(图3b)由于受到高温影响产生了变性和凝聚的变化,在南方夏季的持续高温作用下,蛋白质发生不可逆凝聚变化,导致了3种北美海棠体内可溶性蛋白含量变化的无规律升降。可溶性糖含量(图3c)在高温的刺激下,以渗透调节因子的形式,通过积累升高细胞渗透浓度启动ABA的合成,进而诱导蛋白质合成以抵御高温胁迫,从图3c可看出受高温的影响,‘紫宝石’和‘亚当’可溶性糖含量不断增加,品种间差异不大,而‘王族’在持续高温的影响下出现了下降的趋势。

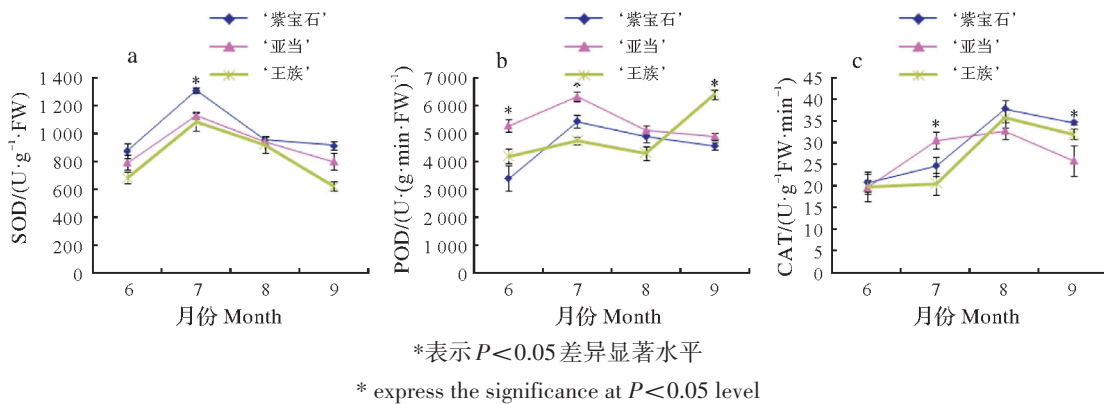


图2 北美海棠6—9月SOD活性(a)、POD活性(b)和CAT活性(c)

Fig.2 Activities of SOD (a)、POD (b) and CAT (c) in north American *Begonia* from June to September

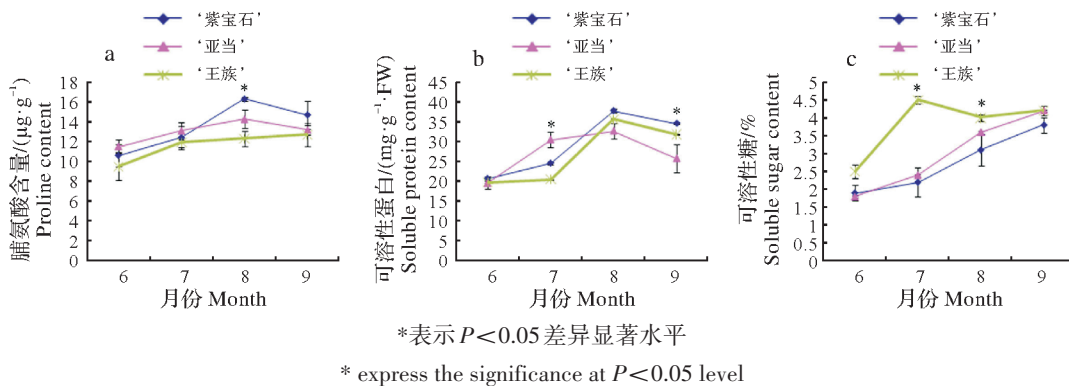


图3 北美海棠6—9月脯氨酸含量(a)、可溶性蛋白含量(b)和可溶性糖含量(c)

Fig.3 Concentration of Pro(a)、soluble protein (b) and soluble sugar (c) in north American *Begonia* from June to September

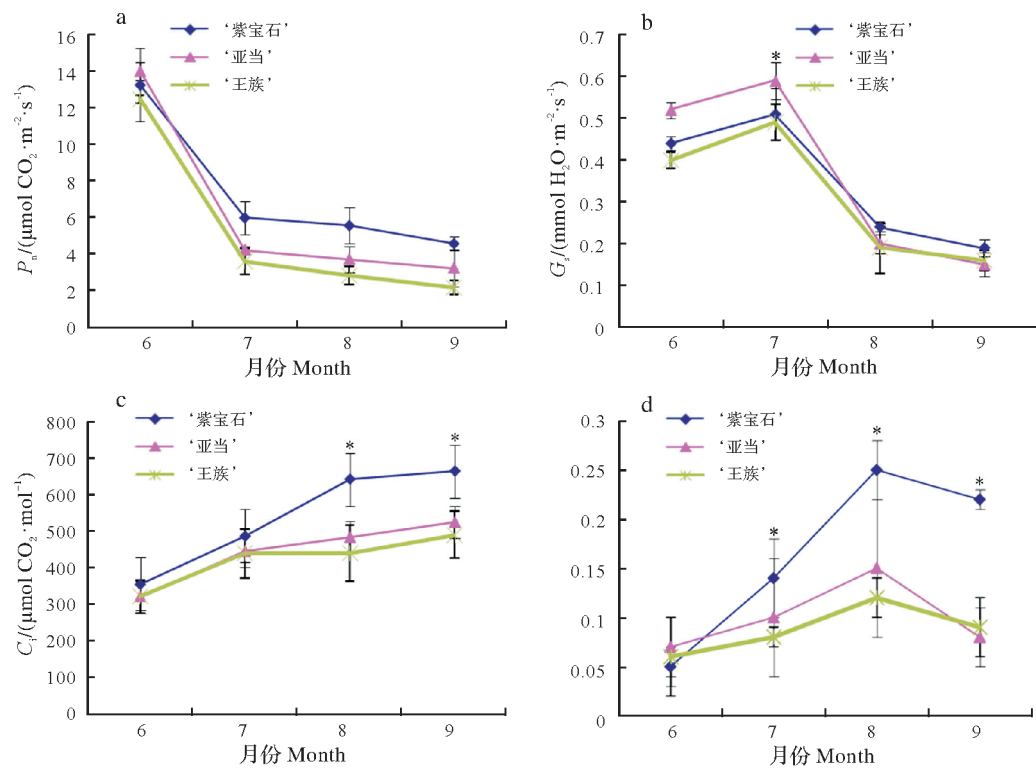
2.3 北美海棠光合气体交换参数

与6月相比,夏季高温环境下(7、8、9月)3种北美海棠净光合速率(P_n)呈下降的趋势(图4a),相同环境下,品种间差异不显著。气孔导度(g_s)的变化趋势与 P_n 基本相同,在气温较高的7月二者出现显著差异(图4b)。与 P_n 和 g_s 相反,在高温环境下,胞间 CO_2 浓度(C_i)呈增加趋势(图4c),在8月、9月二者差异显著。为适应持续的高温环境,保证植株的正常生长,叶片的内在水分利用效率(WUE_i)呈不断上升的趋势(图4d),且‘紫宝石’的内在水分利用效率显著高于其他品种,‘王族’的内在水分利用效率最低,尤其是在持续高温后的8月和9月。在夏季高温环境下‘紫宝石’各项光合气体交换参数均较高,‘王族’基本较低,‘亚当’处于中间水平。

2.4 高温条件下北美海棠光响应曲线特征参数

通过测定得到各北美海棠的光响应曲线特征参数如表4,由表4可以看出,各海棠品种之间的光响应曲线特征参数存在一定的差异性。最大净光合速率($P_{n,max}$)反映了植物单个叶片光合能力的大小,3个海棠品种中,‘紫宝石’的 $P_{n,max}$ ($22.320 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)最大,‘王族’的 $P_{n,max}$ ($14.336 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)最小,说明

在高温环境下紫宝石单个叶片光合作用能力最强,3 个品种的 $P_{n,max}$ 由大到小顺序为‘紫宝石’、‘亚当’、‘王族’。光补偿点(L_{CP})能够用来判断植物耐阴性的强弱,3 个海棠品种差异不显著,‘紫宝石’的 L_{CP} 最小。光饱和点(L_{SP})能够反映植物利用强光的能力强弱,3 个海棠品种差异不显著。表观量子效率(A_{QY})反映了植物对弱光利用能力的大小,3 个海棠品种中,‘紫宝石’的 A_{QY} 最大,‘王族’的 A_{QY} 最小,3 个品种的 A_{QY} 大小顺序为‘紫宝石’、‘亚当’、‘王族’。暗呼吸速率(R_d)能够反映植物维持自身生命活动所消耗有机物的大小,3 个海棠品种中,“亚当”的 R_d ($2.406\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$)最大,‘紫宝石’、王族的 R_d 较小,差异不显著,说明‘亚当’维持自身生命活动消耗有机物的量较多,‘紫宝石’王族维持自身生命活动消耗有机物的量较少。



*表示 $P<0.05$ 差异显著水平
* express the significance at $P<0.05$ level

图 4 北美海棠 6—9 月净光合速率(a)、气孔导度(b)、胞间 CO_2 浓度(c)和叶片内在水分利用效率(d)

Fig.4 Net photosynthetic rate (a), stomatal conductance (b), intercellular CO_2 concentration (c) and intrinsic water use efficiency of leaves (d) in north american *Begonia* from June to September

表 4 高温条件下北美海棠光响应曲线特征参数					
Tab.4 Characteristic parameters of light response curves of north American <i>Begonia</i> under high temperature					
品种 Varieties	$P_{n,max}/$ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	$L_{CP}/$ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	$L_{SP}/$ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	$A_{QY}/$ ($\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)	$R_d/$ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
‘紫宝石’ M. ‘Purple Gems’	21.332±1.104 ^{ABa}	22.997±2.604 ^{Bb}	1 508.2±10.712 ^{Bc}	0.091±0.002 ^{Aa}	1.93±0.045 ^{Cc}
亚当 M. ‘Adam’	22.320±0.675 ^{Aa}	24.861±1.673 ^{Bb}	1 539.987±15.279 ^{Bc}	0.078±0.003 ^{Bb}	2.512±0.112 ^{Dd}
王族 M. ‘Royalty’	17.521±1.122 ^{Cb}	24.718±2.657 ^{Bb}	1 515.5±28.865 ^{Bc}	0.077±0.004 ^{Bb}	1.786±0.056 ^{Cc}

表中数字后不同小写字母表示 $P<0.05$ 差异显著水平,不同大写字母表示 $P<0.01$ 差异显著水平

The different small letters after figures in the table express the significance at $P<0.05$ level and the different capital letters at $P<0.01$ level

3 结论与讨论

夏季高温环境下,3种北美海棠植株在形态和生理上均产生了明显的变化。高温环境影响了植株的形态、生理、光合以及信号转导过程,并最终体现在植物的生长和发育上^[14-15]。从3种北美海棠对高温环境的响应来看,三者在外形形态、生理生化、光合特性方面存在显著的差异。

从外部形态的变化来看,3种北美海棠在夏季高温环境下植株生长发育受阻,具体表现在叶片出现诸如皱缩、叶斑、脱落等伤害症状,且品种间相比,‘王族’的热害症状最为明显,其次是‘亚当’,‘紫宝石’的热害症状相对较轻。

植物应对环境胁迫的生理代谢反应是非常复杂的,在长期的进化过程中,发展和形成了一套维持自身内稳态的生理机制。植物本身都具有一定的耐热性,特别是通过其体内的一些生理和生化机制能够抵御和适应一定程度和时间的高温胁迫。叶片相对电导率是反应植物膜完整性的重要生理生化指标,MDA是质膜过氧化的产物,也是细胞膜被破坏的标志物质^[16]。在夏季高温环境下,北美海棠的相对电导率升高,MDA含量增加,表明质膜受到破坏,导致细胞渗漏,从而增加了叶片的相对电导率及MDA含量。另外,夏季高温环境下,更高的抗氧化酶活性能更加有效防止高温引起的ROS危害,控制有害脂肪酸的积累。夏季高温环境下(7月),3种北美海棠的SOD、POD、CAT活性均呈迅速上升趋势,用于维持体内活性氧的代谢平衡,保持膜结构稳定,减轻有害物质对细胞的破坏。但随着植株体内渗透调节物质游离脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白含量的增加,在持续夏季高温环境下对植株质膜完整性进行保护^[17],因此8月、9月植株叶片相对电导率和MDA含量下降,且趋于稳定。生理生化试验结果表明,3种北美海棠品种可通过细胞膜的热稳定性、抗氧化系统及提高渗透调节物质含量的方式来响应高温环境,且相同温度条件下,‘紫宝石’的耐热性最强,其次是‘亚当’,‘王族’的耐热性最差。

光合作用是植物最重要的生理过程,受温度影响最大,在夏季高温环境下,净光合速率明显降低^[18]。高温条件下,3种北美海棠 C_i 值升高的同时 g_s 下降表明高温对北美海棠光合作用的影响主要是非气孔因素导致的叶肉细胞光合活性下降引起的。植株的内部水分利用效率能够直接的反应逆境下植物的水分特征。在高温条件下,北美海棠的耗水量增大,北美海棠通过 WUE_i 的明显升高用于维持植株体内水分的稳定。光合参数的变化同样表明‘紫宝石’的耐热性最强,‘王族’的耐热性最差,这与光响应曲线特定参数的测定结果基本一致。

彩叶北美海棠与绿叶北美海棠的耐热性比较来看,彩叶北美海棠品种紫宝石耐热性优于绿叶品种亚当,而彩叶北美海棠王族的耐热性却低于绿叶品种亚当。这可能主要是受叶片内复杂的色素组成的影响。一般认为总叶绿素含量高的绿叶品种北美海棠在夏季高温环境下具有更强的光合活性和缓解高温对北美海棠叶片损伤的能力,而且虽然高温会促使叶绿素的降解,但是一般植物叶片的叶绿素含量大大超过光合速率的需求,叶绿素含量减少到某种程度前不会影响光合速率的下降。因此绿叶品种‘亚当’的耐热性优于彩叶品种‘王族’。而彩叶品种‘紫宝石’的耐热性优于绿叶品种‘亚当’可能是受益于紫宝石品种内花青素的保护。花青素是广泛存在于被子植物中的一类重要的类黄酮化合物,它是植物各器官色泽形成的重要物质基础之一^[20-22]。在自然界中,花青素常与不同的糖苷结合,以花色苷的形式存在于植物中。研究表明,花色苷类色素对羟自由基、超氧自由基、DPPH、ABTS等均有很好的清除作用,可防止大分子物质的氧化损伤,同时能激活抗氧化防御体系,对超氧化物歧化酶、谷胱甘肽酶等的活性有明显的促进作用,也能帮助植物抵抗逆境胁迫。因此彩叶北美海棠耐热性的高低可能与植物体内色素的种类、色素含量、植物组织内部或表面构造所形成的物理性状等有关。

综上所述,彩叶北美海棠与绿叶北美海棠同样能够通过维持细胞膜的热稳定性、降低活性氧积累、增加渗透调节物质含量、提高光合速率与叶片内部水分利用效率的方式来适应高温环境,耐热性高低表现为‘紫宝石’、‘亚当’、‘王族’。彩叶北美海棠虽然具有观叶、观花、观果的较高园林观赏价值,但在高温地区引种彩叶北美海棠时应着重考虑其耐热性,避免因盲目引种而造成引种后植株色彩表现差甚至植株死亡的现象,在苗木生产和绿化中也应根据实际景观需要和立地环境条件选择适宜的品种^[23-24]。

参考文献:

- [1] 楚爱香,汤庚国.观赏海棠品种分类研究进展[J].生物学通报,2008,43(7):15-19.
Chu A X, Tang G G, Advances in research on classification of ornamental crabapple[J].Bulletin of Biology, 2008, 43(7): 15-19.
- [2] 张往祥,范俊俊,杨萍,等.‘紫王子’海棠半同胞家系苗期表型特征分析[J].南京林业大学学报(自然科学版),2017,41(6):33-40.
Zhang W X, Fan J J, Yang P, et al. Analysis and evaluation on flower color characteristics of the *Malus* ‘Purple Prince’ half-sib progenies[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2017, 41(6): 33-40.
- [3] 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 Agriculturae universitatis Jiangxiensis. 2017, 39(1): 64-71.
- [4] Iles J K, Romer J P, Haynes C L. Selection preferences for crabapple cultivars and species[J]. Horttechnology, 2003, 13(3): 522-525.
- [5] 王明荣.引进33种欧洲海棠品种繁殖栽培研究及景观应用价值评价[D].南京:南京林业大学,2005.
Wang M R. The breeding and cultivating of 33 Europe *Malus* species or cultivars and their ornamental appraisal [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2005.
- [6] 董仲国,国淑梅,张艳君,等.十一个北美海棠品种在山东地区的生长特性及观赏性状研究[J].北方园艺,2016(5):76-79.
Dong Z G, Guo S M, Zhang Y J, et al. Study on the growth characteristics and ornamental characters of 11 varieties of north American *Begonia* in Shandong region [J]. Northern Horticulture, 2016(5): 76-79.
- [7] 刘春风,张往祥,孙垒,等.高温对观赏海棠生长和光合作用的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2013,37(4):17-22.
Liu C F, Zhang W X, Sun L, et al. Effects of high temperature on photosynthesis and growth of crabapple seedling [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2013, 37(4): 17-22.
- [8] 王新娟.苹果属种质资源光合特性研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2010.
Wang X J. Photosynthetic characteristics of apple germplasm resources [D]. Yangling: North West Agriculture and Forestry University, 2010.
- [9] 杨肖华,郭圣茂,冯美玲,等.干旱胁迫及复水对射干光合作用和叶绿素荧光特性的影响[J].江西农业大学学报,2018,40(3):525-532.
Yang X H, Guo S M, Feng M L, et al. Effects of drought stress and re-watering on the characteristics of photosynthesis and chlorophyll fluorescence of blackberry lily [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2018, 40(3): 525-532.
- [10] 薛应龙.植物生理学试验[M].北京:高等教育出版社,1985:12.
Xue Y L. Plant physiology experiment [M]. Beijing: Higher Education Press, 1985: 12.
- [11] 李玲.植物生理学模块实验指导[M].北京:科学出版社,2009.
Li L. Guide for plant physiology experiment [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [12] 叶子飘,李进省.光合作用对光响应的直角双曲线修正模型和非直角双曲线模型的对比研究[J].井冈山大学学报(自然科学版),2010,31(3):38-44.
Ye Z P, Li J S. Comparative investigation light response of photosynthesis on non-rectangular hyperbola model and modified model of rectangular hyperbola [J]. Journal of Jinggangshan University (Natural Science), 2010, 31(3): 38-44.
- [13] 马迎莉,高雨,袁婷婷,等.重金属铬胁迫对髯毛箬竹光合特性的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2019,43(1):54-60.
Ma Y L, Gao Y, Yuan T T, et al. Effects of heavy metal chromium stress on the photosynthetic characteristics of *Indocalamus barbatus* McClure [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2019, 43(1): 54-60.
- [14] 常青山,张利霞,王建章,等.干旱和复水对4个芍药品种生理指标的影响及品种抗旱性评价[J].南京林业大学学报(自然科学版),2018,42(6):44-50.

- Chang Q S, Zhang L X, Wang J Z, et al. Effects of drought stress and rewatering on physiological indexes of four *Paeonia lactiflora* cultivars and evaluation of their drought resistance[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2018, 42(6): 44-50.
- [15] 宋科, 周强, 杨静慧, 等. 不同种类彩叶植物植株生理特性差异[J]. 天津农学院学报, 2018, 25(3): 20-23.
- Song K, Zhou Q, Yang J H, et al. Differences of physiological characteristics among different species of color-leaf plants[J]. Journal of Tianjin Agricultural University, 2018, 25(3): 20-23.
- [16] 陈燕琼, 沈场, 范佳露, 等. 茉莉酸甲酯对干旱及复水下落叶冬青苗叶片抗氧化水平的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2018, 42(6): 35-43.
- Chen Y Q, Shen Y, Fan J L, et al. The effects of methyl jasmonic acid on leaf antioxidative capacity of *Ilex verticillata* L. seedlings under drought and re-watering[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2018, 42(6): 35-43.
- [17] Sakamoto A, Murata N. The role of glycine betaine in the protection of plants from stress: clues from transgenic plants[J]. Plant Cell Environ, 2002, 25(2): 163-171.
- [18] 钟敏, 张文标, 邹梁峰, 等. 高温下猕猴桃光合作用和叶绿素荧光特性的日变化[J]. 江西农业大学学报, 2018, 40(3): 472-478.
- Zhong M, Zhang W B, Zhou L F, et al. Diurnal variation of photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics in kiwifruit under high temperature condition[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2018, 40(3): 472-478.
- [19] 靳甜甜, 刘国华, 胡婵娟, 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.
- Jin T T, Liu G H, Hu C J, et al. Characteristics of photosynthetic and transpiration of three common afforestation species in the loess plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(11): 5758-5765.
- [20] Joseph M, Erich G, Ronald K. How genes paint flowers and seeds[J]. Trends Plant Science, 1998, 3(6): 212-218.
- [21] Gillian A. Contributions of jeffrey harbome and co-workers to the study of anthocyanins[J]. Phytochemistry, 2001, 56(3): 229-236.
- [22] 浦静, 张晶, 赵聪, 等. ‘紫王子’海棠半同胞家系花色特征分析及选优[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2019, 43(1): 18-24.
- Pu J, Zhang J, Zhao C, et al. Analysis and evaluation on flower color characteristics of the *Malus* ‘Purple Prince’ half-sib progenies[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2019, 43(1): 18-24.
- [23] 何梅, 王华, 胡玉安, 等. 彩叶树种研究与开发利用现状[J]. 江西农业大学学报, 2018, 40(6): 1134-1144.
- He M, Wang H, Hu Y A, et al. Research status, development and utilization of color-leaf trees[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2018, 40(6): 1134-1144.
- [24] 许军, 何梅, 胡玉安, 等. 观赏海棠研究进展[J]. 江西农业大学学报, 2018, 40(3): 553-560.
- Xu J, He M, Hu Y A, et al. Advances in the research on and expectation of ornamental crabapple[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2018, 40(3): 553-560.