

# 水分胁迫及恢复正常水分供应后兔眼蓝浆果生长及光合特性的变化

韦继光<sup>1</sup>, 曾其龙<sup>1</sup>, 姜燕琴<sup>1</sup>, 刘星凡<sup>1</sup>, 刘梦华<sup>1</sup>, 王天寿<sup>2</sup>

[1. 江苏省·中国科学院植物研究所(南京中山植物园), 江苏 南京 210014; 2. 南京紫玉蓝莓科技有限公司, 江苏 南京 211151]

**摘要:** 以兔眼蓝浆果 (*Vaccinium ashei* Reade) 品种‘粉蓝’(‘Powderblue’)和‘园蓝’(‘Gardenblue’)2年生扦插苗为研究对象,对经干旱或淹水胁迫处理14 d后以及恢复正常水分供应后幼苗的生长指标及光合特性变化进行了分析和比较。结果显示:干旱或淹水胁迫处理14 d,2个品种幼苗的生长均受到严重抑制,根系干质量、茎叶干质量、幼苗的相对生长速率以及叶片净光合速率、气孔导度、胞间CO<sub>2</sub>浓度和蒸腾速率均显著低于对照;而根冠比和气孔限制值则基本上高于对照,且气孔限制值与对照有显著差异。恢复正常水分供应60 d后,2个品种的根系干质量和茎叶干质量仍低于对照,相对生长速率接近或高于对照,根冠比均高于对照。干旱或淹水胁迫处理7和14 d,2个品种叶片的叶绿素含量指数(CCI)、PS II最大光化学效率( $F_v/F_m$ )、PS II有效光量子产量[Y(II)]总体上低于对照;干旱胁迫解除后2个品种叶片的CCI值和 $F_v/F_m$ 值迅速恢复至对照水平,但在淹水胁迫解除7 d后它们的CCI值和 $F_v/F_m$ 值仍保持下降趋势,至淹水胁迫解除14 d后恢复至对照水平;2个品种叶片的Y(II)值在干旱或淹水胁迫解除7 d后仍持续降低,至干旱和淹水胁迫解除14 d后基本恢复至对照水平。综合比较结果表明:干旱或淹水胁迫对兔眼蓝浆果品种‘粉蓝’和‘园蓝’的生长及光合特性均有一定的抑制作用且淹水胁迫的抑制作用较强,但这种抑制作用具有可逆性,在干旱或淹水胁迫解除后二者的生长和光合特性均不同程度恢复。另外,水分胁迫条件下导致2个品种光合能力下降的主导因素是气孔限制因子。

**关键词:** 水分胁迫; 胁迫解除; 兔眼蓝浆果; 气体交换参数; 叶绿素荧光参数; 相对生长速率

中图分类号: Q945.78; S663.9 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2015)03-0077-08

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2015.03.10

**Changes in growth and photosynthetic characteristics of rabbiteye blueberry (*Vaccinium ashei* Reade) during water stress and recovering normal water supplying** WEI Jiguang<sup>1</sup>, ZENG Qilong<sup>1</sup>, JIANG Yanqin<sup>1</sup>, LIU Xingfan<sup>1</sup>, LIU Menghua<sup>1</sup>, WANG Tianshou<sup>2</sup> (1. Institute of Botany, Jiangsu Province and Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210014, China; 2. Nanjing Purple Jade Blueberry Technology Co., Ltd., Nanjing 211151, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2015, 24(3): 77-84

**Abstract:** Taking two-year-old cutting seedlings of cultivar ‘Powderblue’ and ‘Gardenblue’ of rabbiteye blueberry (*Vaccinium ashei* Reade) as research objects, changes in growth indexes and photosynthetic characteristics of seedlings after drought or flooding stressed for 14 d and recovering normal water supplying were analyzed and compared. The results show that after drought or flooding stressed for 14 d, growths of two cultivar seedlings are inhibited severely, and their dry weight of root, dry weight of stem and leaf, seedling relative growth rate and net photosynthetic rate, stomatal conductance, intercellular CO<sub>2</sub> concentration and transpiration rate of leaf all are significantly lower than those of the control, while root/shoot ratio and stomatal limitation value are basically higher than those of the control and there is a significant difference in stomatal limitation value between treatment group and the control. After recovering normal water supplying for 60 d, dry weight of root and dry weight of stem and leaf of two

收稿日期: 2014-07-08

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK20130733); 江苏省科学技术厅产学研联合创新资金项目(前瞻性联合研究项目)(BY2012212); 土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金项目(0812201226)

作者简介: 韦继光(1978—),男,广西都安人,博士,助理研究员,主要从事果树栽培和生理方面的研究。

cultivars are still lower than those of the control, relative growth rate is close to or higher than that of the control, and root/shoot ratio is higher than that of the control. After drought or flooding stressed for 7 and 14 d, chlorophyll content index (CCI), the maximal photochemical efficiency of PS II ( $F_v/F_m$ ) and effective quantum yield of PS II [ $Y(II)$ ] of leaf of two cultivars are generally lower than those of the control. After releasing of drought stress, CCI value and  $F_v/F_m$  value of leaf of two cultivars quickly recover to the control level, while after releasing of flooding stress for 7 d, their CCI value and  $F_v/F_m$  value are still decreased continuously, and recover to the control level until releasing of flooding stress for 14 d. After releasing of drought or flooding stress for 7 d,  $Y(II)$  value of leaf of two cultivars is still decreased continuously, and recover to the control level after releasing of drought or flooding stress for 14 d. The comprehensive comparison result shows that drought or flooding stress has a certain inhibition effect on growth and photosynthetic characteristics of cultivar 'Powderblue' and 'Gardenblue' of *V. ashei* and the inhibition effect of flooding stress is stronger, but the inhibition effect is reversible, and their growth and photosynthetic characteristics are recovered at different degrees after releasing of drought or flooding stress. Moreover, stomatal limitation factor is the dominant factor leading to photosynthetic capacity decreasing of two cultivars under water stress condition.

**Key words:** water stress; stress releasing; rabbiteye blueberry (*Vaccinium ashei* Reade); gas exchange parameters; chlorophyll fluorescence parameters; relative growth rate

近年来,蓝浆果(*Vaccinium* spp.)因其果实具多种营养保健功能,成为最具发展潜力的新兴果树树种之一。蓝浆果为浅根系植物,根系集中分布在0~20 cm深的土层内且水平分布范围也较狭窄,导致其生长极易受土壤干旱的影响;中国的蓝浆果适栽区域属季风气候区,夏季降水量大且较为集中,在这一区域内蓝浆果的生长状况和果实品质常因夏季积水而受到影响<sup>[1-2]</sup>,因而,涝渍和干旱已成为制约中国蓝浆果产业发展的因素之一。鉴于此,有效的解决途径是筛选蓝浆果抗逆品种及开展抗逆栽培研究。目前,国外已有研究者对此开展了相关的研究,包括抗逆品种选育<sup>[3-4]</sup>以及水分胁迫对蓝浆果光合作用、形态解剖结构、生长发育、产量和果实品质的影响等方面<sup>[5-9]</sup>。

由于不同蓝浆果品种间抗逆性差异较大,不同季节蓝浆果对水分逆境的耐受性不同,不同生长发育阶段、不同水分胁迫强度及持续时间对蓝浆果的生长发育、解剖和形态以及生理生化过程等均有不同的影响;加之国外蓝浆果产区的栽培土壤多为排水性能优良的酸性砂土,而中国蓝浆果适栽区仅有少数区域的土壤为砂土,因而,对蓝浆果引进品种的水分逆境适应性进行研究对蓝浆果的推广种植具有重要意义。目前,部分学者对适于中国北方地区栽培的蓝浆果品种已开展了相关研究,涉及抗逆品种筛选、水分逆境下的生理及形态变化等方面<sup>[10-14]</sup>,而对适宜长江以南地区栽培的兔眼蓝浆果(*Vaccinium ashei* Reade)仅进行了耐寒性的相关研究,对淹水条件下蓝浆果的生长和生理变化及耐性的相关研究尚不多见<sup>[15-17]</sup>。

作者以在中国南方推广种植面积较大的2个兔眼蓝浆果品种‘粉蓝’(‘Powderblue’)和‘园蓝’(‘Gardenblue’)<sup>[18]</sup>为实验材料,分别在干旱和淹水胁迫后恢复正常水分供应,对2个品种幼苗的生长及光合作用相关指标的变化进行研究,旨在探明水分胁迫对它们的生长和光合生理的影响及胁迫解除后它们的恢复能力,为蓝浆果耐旱和耐涝品种的选育及抗逆栽培提供参考依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

于2013年4月选取长势一致的兔眼蓝浆果品种‘粉蓝’和‘园蓝’2年生扦插苗,对根系和地上部进行适当修剪,然后栽植于直径30 cm、高30 cm的塑料盆内,每盆1株。盆栽基质为红壤、泥炭和珍珠岩(体积比2:2:1)的混合基质,每盆装混合基质15 L,均施入8.10 g  $NH_4NO_3$ 、5.06 g  $Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$ 和5.25 g  $K_2SO_4$ ,拌匀;定植后浇透水,之后视天气及土壤状况及时浇水,使土壤含水率保持在田间最大持水率的60%~70%。

### 1.2 胁迫处理方法

于2013年7月10日进行水分处理,设3个处理,每处理3次重复,每重复6盆,实验在两面通风的遮雨棚中进行。CK(对照):盆底打孔,每天采用称量补水法补充失去的水分,使土壤含水率保持在田间最大持水率的60%~70%,直至实验结束,持续时间14 d。

DS-RN1(干旱-恢复正常供水):盆底打孔,从处理开始时停止浇水,使土壤自然干旱,持续处理14 d;之后,解除干旱并恢复正常的水分供应,保持与对照一致的水分条件,使幼苗恢复生长。FS-RN2(淹水-恢复正常供水):盆底不打孔,从处理开始时栽培盆中均保持土面以上2 cm的积水,持续淹水处理14 d;之后,解除淹水并恢复正常的水分供应,保持与对照一致的水分条件,使幼苗恢复生长。

### 1.3 指标测定方法

1.3.1 土壤含水率测定 在干旱及淹水处理的第0、第7、第14、第21(即恢复正常供水的第7天)和第28天(即恢复正常供水的第14天),用TZS型土壤水分测量仪(浙江托普仪器有限公司)测定土壤含水率。

1.3.2 根冠比及相对生长速率测定 在上盆前每品种各取6株幼苗,各单株按根、茎和叶片进行分样,分别于105℃下杀青20 min后置于75℃条件下干燥至恒质量,称取干质量。于水分处理的第14天及恢复正常供水后的第60天,每处理分别随机取9株幼苗,按同法分别测定各单株的根、茎和叶片干质量,计算根冠比。相对生长速率(RGR)按照公式“ $RGR = [\ln(DW_2) - \ln(DW_1)] / (t_2 - t_1)$ ”计算。式中, $DW_1$ 和 $DW_2$ 分别为 $t_1$ 和 $t_2$ 时间的单株总干质量; $t_1$ 和 $t_2$ 为取样时间。胁迫期间的相对生长速率为胁迫处理开始时至胁迫处理结束时的相对生长速率;恢复期间的相对生长速率为胁迫处理结束时至恢复正常供水60 d后的相对生长速率。

1.3.3 气体交换参数测定 在胁迫处理的第14天(晴天)上午8:30至11:00,选择各处理组幼苗枝条中部的叶片,每株3片,用LI-6400XT气体交换系统(美国LI-COR公司)测定叶片的净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、胞间CO<sub>2</sub>浓度(Ci)和蒸腾速率(Tr)等气体交换参数。气孔限制值(Ls)根据公式“ $Ls = 1 - Ci/Ca$ ”计算。式中,Ci为胞间CO<sub>2</sub>浓度;Ca为大气CO<sub>2</sub>浓度。测定时由叶室内置的红蓝光源提供光照,光照强度1200 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,大气CO<sub>2</sub>浓度(380±10) μmol·mol<sup>-1</sup>,空气相对湿度50%~60%。每处理随机选3株幼苗进行测定,各3次重复。

1.3.4 叶绿素含量指数及叶绿素荧光参数测定 在干旱及淹水处理的第0、第7、第14、第21(即恢复正常供水的第7天)和第28天(即恢复正常供水的第14天),选择各处理组幼苗枝条中部的叶片进行叶绿素含量指数(CCI)及叶绿素荧光参数测定。采用

CCM-200叶绿素测定仪(美国OPTI-SCIENCES公司)测定叶片CCI值,通过波长940和660 nm处的吸光率计算CCI值。用OS1p便携式调制荧光仪(美国OPTI-SCIENCES公司)测定叶绿素荧光参数。每处理随机选3株幼苗进行测定,各3次重复。

### 1.4 数据处理

采用EXCEL 2003软件对实验数据进行处理,并采用SPSS 16.0统计分析软件进行统计分析;采用Duncan's新复极差法进行差异显著性检验( $P < 0.05$ )。

## 2 结果和分析

### 2.1 水分胁迫及恢复正常供水后土壤含水率的变化

经干旱和淹水处理并恢复正常供水后兔眼蓝浆果品种‘粉蓝’和‘园蓝’栽培土壤的含水率变化见表1。结果显示:在干旱或淹水胁迫过程中,土壤含水率随胁迫时间的延长分别呈逐渐降低或逐渐升高的趋势,且明显小于或大于对照;而在恢复正常水分供应后的第7天(即实验的21 d)土壤含水率即恢复至接近对照的水平。由此可见,实验过程中土壤含水率的变化与各处理组设置的处理过程一致。

### 2.2 水分胁迫及恢复正常供水后兔眼蓝浆果部分生长指标的变化

经干旱或淹水处理14 d后及恢复正常水分供应

表1 水分胁迫及恢复正常水分供应期间兔眼蓝浆果品种‘粉蓝’和‘园蓝’栽培土壤含水率的变化

Table 1 Change of water content in cultivating soil of cultivar 'Powderblue' and 'Gardenblue' of *Vaccinium ashei* Reade during water stress and recovering normal water supplying

处理组 <sup>1)</sup> Treatment group <sup>1)</sup>	不同处理时间土壤含水率/% Soil water content at different treatment times				
	0 d	7 d	14 d	21 d <sup>2)</sup>	28 d <sup>2)</sup>
粉蓝 Powderblue					
CK	27.8	28.4	28.7	28.0	27.3
DS-RN1	28.0	21.2	16.0	28.3	27.5
FS-RN2	27.3	52.7	53.1	28.5	27.6
园蓝 Gardenblue					
CK	27.1	27.4	27.2	27.8	27.2
DS-RN1	27.5	16.8	11.5	28.1	27.4
FS-RN2	27.5	52.0	52.8	28.2	27.4

<sup>1)</sup> CK: 对照 The control; DS-RN1: 干旱胁迫14 d且之后恢复正常水分供应 Drought stressed for 14 d and recovering normal water supplying after drought stressed; FS-RN2: 淹水胁迫14 d且之后恢复正常水分供应 Flooding stressed for 14 d and recovering normal water supplying after flooding stressed.

<sup>2)</sup> 恢复正常水分供应 Recovering normal water supplying.

60 d 后兔眼蓝浆果品种‘粉蓝’和‘园蓝’幼苗部分生长指标的变化分别见表2和表3。

由表2可见:干旱或淹水处理14 d,品种‘粉蓝’和‘园蓝’的根系和茎叶干质量以及相对生长速率均显著降低,且淹水处理后这3项指标降幅更大。经干旱处理14 d后品种‘粉蓝’和‘园蓝’的根冠比分别较

各自的对照提高了14.2%和22.4%,其中品种‘园蓝’的根冠比显著高于其对照。经淹水处理14 d后,品种‘粉蓝’的根冠比与其对照无显著差异,较对照降低了2.6%;而品种‘园蓝’的根冠比较其对照增加了13.3%,但也无显著差异。

表2 经水分胁迫14 d后兔眼蓝浆果品种‘粉蓝’和‘园蓝’部分生长指标的比较( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 2 Comparison on some growth indexes of cultivar ‘Powderblue’ and ‘Gardenblue’ of *Vaccinium ashei* Reade after water stressed for 14 d ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

品种 Cultivar	处理 <sup>2)</sup> Treatment <sup>2)</sup>	干质量/g Dry weight		根冠比 Root/shoot ratio	相对生长速率/ $g \cdot g^{-1} \cdot d^{-1}$ Relative growth rate
		根系 Root	茎叶 Stem and leaf		
粉蓝 Powderblue	CK	6.01±0.69a	25.94±3.78a	0.233±0.020a	0.062±0.009a
	DS	3.85±0.39b	14.49±0.89b	0.266±0.029a	0.023±0.004b
	FS	2.86±0.52b	12.53±1.06b	0.227±0.023a	0.010±0.007b
园蓝 Gardenblue	CK	7.57±0.31a	31.39±1.57a	0.241±0.002b	0.048±0.003a
	DS	5.51±0.22b	18.75±1.43b	0.295±0.032a	0.014±0.004b
	FS	4.59±0.27c	16.80±0.20b	0.273±0.019ab	0.005±0.001c

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写字母表示同一品种不同处理间差异显著( $P < 0.05$ ) Different small letters in the same column indicate the significant difference ( $P < 0.05$ ) among different treatments of the same cultivar.

<sup>2)</sup> CK: 对照 The control; DS: 干旱胁迫14 d Drought stressed for 14 d; FS: 淹水胁迫14 d Flooding stressed for 14 d.

表3 经水分胁迫14 d并恢复正常水分供应60 d后兔眼蓝浆果品种‘粉蓝’和‘园蓝’部分生长指标的比较( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 3 Comparison on some growth indexes of cultivar ‘Powderblue’ and ‘Gardenblue’ of *Vaccinium ashei* Reade after water stressed for 14 d and recovering normal water supplying for 60 d ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

品种 Cultivar	处理 <sup>2)</sup> Treatment <sup>2)</sup>	干质量/g Dry weight		根冠比 Root/shoot ratio	相对生长速率/ $g \cdot g^{-1} \cdot d^{-1}$ Relative growth rate
		根系 Root	茎叶 Stem and leaf		
粉蓝 Powderblue	CK	17.94±3.51a	67.85±3.36a	0.263±0.039a	0.016±0.001b
	RN1	14.60±3.20ab	53.19±0.40b	0.274±0.058a	0.022±0.001a
	RN2	7.52±1.45b	26.99±3.01c	0.277±0.023a	0.013±0.002b
园蓝 Gardenblue	CK	22.29±1.54a	83.21±1.46a	0.268±0.023b	0.017±0.001a
	RN1	18.52±1.36a	62.56±0.12b	0.296±0.022ab	0.020±0.001a
	RN2	17.54±2.73a	51.67±4.90c	0.338±0.021a	0.020±0.002a

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写字母表示同一品种不同处理间差异显著( $P < 0.05$ ) Different small letters in the same column indicate the significant difference ( $P < 0.05$ ) among different treatments of the same cultivar.

<sup>2)</sup> CK: 对照 The control; RN1: 干旱胁迫后恢复正常水分供应60 d Recovering normal water supplying for 60 d after drought stressed; RN2: 淹水胁迫后恢复正常水分供应60 d Recovering normal water supplying for 60 d after flooding stressed.

由表3可见:经过干旱处理并恢复正常水分供应60 d后,品种‘粉蓝’和‘园蓝’的根系干质量分别为对照的81.4%和83.1%,与对照差异不显著;品种‘粉蓝’的相对生长速率显著高于对照,而品种‘园蓝’的相对生长速率也高于对照但差异不显著。经过淹水处理并恢复正常水分供应60 d后,品种‘粉蓝’的根系干质量仅为对照的41.9%且差异显著,其相对生长速率低于对照但无显著差异;而品种‘园蓝’的根系干质量为对照的78.7%,其相对生长速率则高于对照,但差异均不显著。2个处理组各品种的茎叶干质

量均显著低于对照,而根冠比均高于对照但总体上无显著差异。

## 2.3 水分胁迫及恢复正常水分供应后兔眼蓝浆果光合特性的变化

2.3.1 叶片气体交换参数的变化 经干旱或淹水处理14 d后兔眼蓝浆果品种‘粉蓝’和‘园蓝’幼苗叶片气体交换参数的变化见表4。由表4可以看出:经干旱处理后品种‘粉蓝’叶片的净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间 $CO_2$ 浓度( $C_i$ )和蒸腾速率( $T_r$ )分别比对照下降了37.4%、60.8%、20.4%和56.1%,而经

淹水处理后其叶片的上述4项气体交换参数则分别比对照下降了73.0%、83.9%、22.0%和78.4%,均有显著差异;经干旱和淹水处理后‘粉蓝’叶片的气孔限制值(Ls)分别较对照升高了43.1%和45.1%,差

异也达到显著水平。经干旱及淹水处理后,品种‘园蓝’叶片的Pn、Gs、Ci和Tr值也均显著低于对照,而其叶片的Ls值则显著高于对照,其中淹水处理组各项气体交换参数的变幅均大于干旱处理组。

表4 水分胁迫14 d后兔眼蓝浆果品种‘粉蓝’和‘园蓝’叶片气体交换参数的比较( $\bar{X}\pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 4 Comparison on leaf gas exchange parameters of cultivar ‘Powderblue’ and ‘Gardenblue’ of *Vaccinium ashei* Reade after water stressed for 14 d ( $\bar{X}\pm SD$ )<sup>1)</sup>

品种 Cultivar	处理 <sup>2)</sup> Treatment <sup>2)</sup>	Pn/ $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	Gs/ $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	Ci/ $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$	Tr/ $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	Ls
粉蓝 Powderblue	CK	10.89±1.76a	168.45±46.53a	250.95±19.50a	5.83±1.32a	0.346±0.030b
	DS	6.82±1.53b	66.08±23.53b	199.80±19.83b	2.56±0.72b	0.495±0.031a
	FS	2.94±1.25c	27.16±10.45b	195.74±9.53b	1.26±0.46b	0.502±0.013a
园蓝 Gardenblue	CK	9.88±1.06a	157.65±20.92a	257.80±10.25a	5.65±0.58a	0.330±0.016b
	DS	4.91±1.36b	41.15±12.41b	179.89±0.85b	1.81±0.50b	0.547±0.003a
	FS	2.50±0.56c	19.00±4.95b	153.27±29.18b	0.93±0.23b	0.610±0.042a

<sup>1)</sup> Pn: 净光合速率 Net photosynthetic rate; Gs: 气孔导度 Stomatal conductance; Ci: 胞间CO<sub>2</sub>浓度 Intercellular CO<sub>2</sub> concentration; Tr: 蒸腾速率 Transpiration rate; Ls: 气孔限制值 Stomatal limitation value. 同列中不同的小写字母表示同一品种不同处理间差异显著( $P<0.05$ ) Different small letters in the same column indicate the significant difference ( $P<0.05$ ) among different treatments of the same cultivar.

<sup>2)</sup> CK: 对照 The control; DS: 干旱胁迫14 d Drought stressed for 14 d; FS: 淹水胁迫14 d Flooding stressed for 14 d.

2.3.2 叶片叶绿素含量指数的变化 经干旱和淹水处理并恢复正常水分供应期间兔眼蓝浆果品种‘粉蓝’和‘园蓝’叶片的叶绿素含量指数(CCI)的变化见表5。

由表5可以看出:干旱处理7和14 d以及恢复正常水分供应后的7和14 d(即分别为实验的21和28 d),品种‘粉蓝’叶片的CCI值分别为对照的91.2%、97.8%、111.9%和99.4%,差异不显著。而淹水处理7和14 d及恢复正常水分供应后的7 d(即实验的21 d),品种‘粉蓝’叶片的CCI值分别为对照

的67.3%、56.3%和52.6%,差异显著;恢复正常水分供应后的14 d(即实验的28 d)其CCI值有所升高(为对照的80.6%),但与对照则无显著差异。

由表5还可见:干旱处理7和14 d,品种‘园蓝’叶片的CCI值持续下降且显著低于对照,恢复正常水分供应后的7和14 d(即分别为实验的21和28 d)其CCI值迅速回升并略高于对照,但与对照无显著差异。淹水处理7和14 d,品种‘园蓝’叶片的CCI值持续下降且显著低于对照,恢复正常水分供应后的7和14 d其CCI值有所增大但仍低于对照,其中,实验

表5 水分胁迫及恢复正常水分供应期间兔眼蓝浆果品种‘粉蓝’和‘园蓝’叶片叶绿素含量指数(CCI)的变化( $\bar{X}\pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 5 Change in leaf chlorophyll content index (CCI) of cultivar ‘Powderblue’ and ‘Gardenblue’ of *Vaccinium ashei* Reade during water stress and recovering normal water supplying ( $\bar{X}\pm SD$ )<sup>1)</sup>

品种 Cultivar	处理 <sup>2)</sup> Treatment <sup>2)</sup>	不同处理时间叶片的CCI值 CCI value of leaf at different treatment times				
		0 d	7 d	14 d	21 d <sup>3)</sup>	28 d <sup>3)</sup>
粉蓝 Powderblue	CK	16.5±0.7a	15.9±0.7a	18.3±1.4a	19.4±2.1a	17.0±4.3a
	DS-RN1	16.4±0.9a	14.5±1.6a	17.9±3.0a	21.7±2.2a	16.9±0.3a
	FS-RN2	16.6±1.6a	10.7±0.9b	10.3±1.4b	10.2±3.2b	13.7±5.2a
园蓝 Gardenblue	CK	15.5±1.9a	17.2±1.9a	16.2±0.9ab	19.6±0.4a	16.3±0.9a
	DS-RN1	15.9±0.6a	12.1±1.6b	14.3±1.0b	20.0±2.3a	18.4±2.9a
	FS-RN2	15.3±0.5a	11.1±0.2b	9.9±0.8c	10.1±0.3b	14.9±2.1a

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写字母表示同一品种不同处理间差异显著( $P<0.05$ ) Different small letters in the same column indicate the significant difference ( $P<0.05$ ) among different treatments of the same cultivar.

<sup>2)</sup> CK: 对照 The control; DS-RN1: 干旱胁迫14 d且之后恢复正常水分供应 Drought stressed for 14 d and recovering normal water supplying after drought stressed; FS-RN2: 淹水胁迫14 d且之后恢复正常水分供应 Flooding stressed for 14 d and recovering normal water supplying after flooding stressed.

<sup>3)</sup> 恢复正常水分供应 Recovering normal water supplying.

21 d 其 CCI 值与对照差异显著,而实验 28 d 其 CCI 值与对照无显著差异。

2.3.3 叶片叶绿素荧光参数的变化 经干旱和淹水处理并恢复正常水分供应期间兔眼蓝浆果品种‘粉蓝’和‘园蓝’叶片的 PS II 最大光化学效率 ( $F_v/F_m$ ) 和 PS II 有效光量子产量 [ $Y(II)$ ] 的变化分别见表 6 和表 7。

由表 6 可以看出:在实验的 0 ~ 28 d, 随时间延长,品种‘粉蓝’和‘园蓝’叶片的  $F_v/F_m$  值均呈先升高后降低再升高的变化趋势。干旱或淹水处理 7 d, 品种‘粉蓝’和‘园蓝’叶片的  $F_v/F_m$  值均与对照接近或略高于对照;干旱或淹水处理 14 d, 它们的  $F_v/F_m$  值均显著低于对照,且经淹水处理后  $F_v/F_m$  值降幅更大。恢复正常水分供应 7 d(即实验的 21 d), 经过干

旱处理的 2 个品种叶片的  $F_v/F_m$  值迅速升高且显著高于对照,而经过淹水处理的 2 个品种叶片的  $F_v/F_m$  值继续降低且显著低于对照;至恢复正常水分供应 14 d(即实验的 28 d)后各处理组 2 个品种叶片的  $F_v/F_m$  值有所恢复并高于对照。

由表 7 可以看出:在实验的 0 ~ 28 d, 随时间延长,品种‘粉蓝’和‘园蓝’叶片的  $Y(II)$  值与  $F_v/F_m$  值的变化趋势基本一致,也呈先升高后降低再升高的变化趋势。干旱或淹水处理 7 d, 品种‘粉蓝’和‘园蓝’叶片的  $Y(II)$  值均与对照差异不显著;干旱或淹水处理 14 d, 2 个品种叶片的  $Y(II)$  值均显著低于对照,且经过淹水处理的 2 个品种叶片的  $Y(II)$  值降幅更大。恢复正常水分供应 7 d(即实验的 21 d), 品种‘粉蓝’和‘园蓝’叶片的  $Y(II)$  值继续降低且显著低于对照;

表 6 水分胁迫及恢复正常水分供应期间兔眼蓝浆果品种‘粉蓝’和‘园蓝’叶片 PS II 最大光化学效率 ( $F_v/F_m$ ) 的变化 ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>  
Table 6 Change in the maximal photochemical efficiency of PS II ( $F_v/F_m$ ) of leaf of cultivar ‘Powderblue’ and ‘Gardenblue’ of *Vaccinium ashei* Reade during water stress and recovering normal water supplying ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

品种 Cultivar	处理 <sup>2)</sup> Treatment <sup>2)</sup>	不同处理时间叶片的 $F_v/F_m$ 值 $F_v/F_m$ value of leaf at different treatment times				
		0 d	7 d	14 d	21 d <sup>3)</sup>	28 d <sup>3)</sup>
粉蓝 Powderblue	CK	0.683±0.019a	0.785±0.009a	0.772±0.008a	0.735±0.006b	0.709±0.012c
	DS-RN1	0.672±0.021a	0.786±0.016a	0.739±0.016b	0.780±0.013a	0.795±0.006a
	FS-RN2	0.686±0.019a	0.789±0.008a	0.732±0.020b	0.656±0.018c	0.750±0.008b
园蓝 Gardenblue	CK	0.716±0.021a	0.795±0.004a	0.785±0.010a	0.746±0.008b	0.738±0.035a
	DS-RN1	0.721±0.005a	0.795±0.007a	0.759±0.004b	0.788±0.003a	0.804±0.001a
	FS-RN2	0.721±0.007a	0.796±0.006a	0.748±0.010b	0.696±0.005c	0.787±0.003a

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写字母表示同一品种不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different small letters in the same column indicate the significant difference ( $P < 0.05$ ) among different treatments of the same cultivar.

<sup>2)</sup> CK: 对照 The control; DS-RN1: 干旱胁迫 14 d 且之后恢复正常水分供应 Drought stressed for 14 d and recovering normal water supplying after drought stressed; FS-RN2: 淹水胁迫 14 d 且之后恢复正常水分供应 Flooding stressed for 14 d and recovering normal water supplying after flooding stressed.

<sup>3)</sup> 恢复正常水分供应 Recovering normal water supplying.

表 7 水分胁迫及恢复正常水分供应期间兔眼蓝浆果品种‘粉蓝’和‘园蓝’叶片 PS II 有效光量子产量 [ $Y(II)$ ] 的变化 ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>  
Table 7 Change in leaf effective quantum yield of PS II [ $Y(II)$ ] of cultivar ‘Powderblue’ and ‘Gardenblue’ of *Vaccinium ashei* Reade during water stress and recovering normal water supplying ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

品种 Cultivar	处理 <sup>2)</sup> Treatment <sup>2)</sup>	不同处理时间叶片的 $Y(II)$ 值 $Y(II)$ value of leaf at different treatment times				
		0 d	7 d	14 d	21 d <sup>3)</sup>	28 d <sup>3)</sup>
粉蓝 Powderblue	CK	0.640±0.068a	0.707±0.007a	0.680±0.006a	0.652±0.014a	0.572±0.017ab
	DS-RN1	0.663±0.005a	0.706±0.011a	0.657±0.023bc	0.564±0.045b	0.610±0.063a
	FS-RN2	0.657±0.022a	0.711±0.006a	0.613±0.034c	0.484±0.036b	0.511±0.005b
园蓝 Gardenblue	CK	0.656±0.011a	0.722±0.015a	0.687±0.012a	0.674±0.014a	0.629±0.044a
	DS-RN1	0.672±0.013a	0.716±0.007a	0.638±0.017b	0.597±0.015b	0.641±0.064a
	FS-RN2	0.680±0.036a	0.716±0.008a	0.582±0.024c	0.529±0.035c	0.583±0.032a

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写字母表示同一品种不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different small letters in the same column indicate the significant difference ( $P < 0.05$ ) among different treatments of the same cultivar.

<sup>2)</sup> CK: 对照 The control; DS-RN1: 干旱胁迫 14 d 且之后恢复正常水分供应 Drought stressed for 14 d and recovering normal water supplying after drought stressed; FS-RN2: 淹水胁迫 14 d 且之后恢复正常水分供应 Flooding stressed for 14 d and recovering normal water supplying after flooding stressed.

<sup>3)</sup> 恢复正常水分供应 Recovering normal water supplying.

恢复正常水分供应 14 d(即实验的 28 d),2 个品种叶片的  $Y(\text{II})$  值均不同程度升高,但均与对照无显著差异,且经过干旱处理的 2 个品种叶片的  $Y(\text{II})$  值较高。

### 3 讨论和结论

上述研究结果显示:经干旱或淹水处理 14 d 后兔眼蓝浆果品种‘粉蓝’和‘园蓝’的根系干质量、茎叶干质量及相对生长速率均显著降低,这与前人对蓝浆果的相关研究结果一致<sup>[19-21]</sup>。干旱胁迫条件下 2 个品种的根冠比不同程度提高,Cameron 等<sup>[22]</sup>对高丛蓝浆果(*Vaccinium corymbosum* Linn.)的相关研究也得到类似结果;但淹水胁迫条件下其根冠比的变化则因品种而异。在水分胁迫后恢复正常水分供应 60 d,除经过淹水处理的品种‘粉蓝’根系干质量仍显著低于对照外,各处理组品种‘粉蓝’和‘园蓝’的根系干质量均已基本恢复至对照水平,而茎叶干质量仍显著低于对照,表明胁迫解除后兔眼蓝浆果幼苗将较多同化物用于根系生长;2 个品种的植株相对生长速率高于或接近对照水平,说明胁迫解除后幼苗生长迅速,其生长速率已经基本恢复甚至表现出补偿效应。

水分胁迫对植物光合能力的抑制作用包括气孔和非气孔 2 类限制因子<sup>[23]</sup>。在轻度水分胁迫条件下,光合能力下降的主要因子是气孔限制因子;而在中度和重度水分胁迫条件下,叶片叶绿体超微结构受损、PS II 活力降低、电子传递受阻、核酮糖二磷酸羧化酶等光合酶活性下降及叶绿素合成受阻等非气孔限制因子也可导致植物叶片光合性能降低<sup>[24]</sup>。在以往的研究中,部分研究者认为水分逆境下蓝浆果光合速率下降是由气孔限制造成的<sup>[25-27]</sup>;还有一些研究者认为叶绿素合成受阻、光合酶活性下降和光合构件损伤等非气孔限制因子也会导致蓝浆果光合能力降低<sup>[12,16]</sup>;Davies 等<sup>[6]</sup>的研究结果显示:短期淹水条件下高丛蓝浆果碳同化能力下降是由气孔导度降低造成的,而长期淹水条件下叶片羧化效率下降也是光合能力降低的原因之一。本研究中,连续干旱或淹水处理 14 d,兔眼蓝浆果品种‘粉蓝’和‘园蓝’叶片净光合速率( $P_n$ )显著下降,同时其气孔导度( $G_s$ )、胞间  $\text{CO}_2$  浓度( $C_i$ )和蒸腾速率( $T_r$ )也均显著降低,而气孔限制值( $L_s$ )均高于对照。依据  $C_i$  值和  $L_s$  值的变化可以判断叶片光合速率降低的主导因素是气孔还是

非气孔限制因子, $C_i$  值降低且  $L_s$  值升高表明气孔导度降低是主要因素<sup>[28]</sup>,因此,本研究中水分胁迫条件下导致 2 个兔眼蓝浆果品种光合速率下降的主要原因是气孔限制因子。

水分胁迫条件下,随着胁迫程度的增强和胁迫时间的延长,植物叶片叶绿素合成和分解的平衡被破坏,叶绿素快速降解,导致叶绿素含量降低<sup>[29-30]</sup>;经轻度和中度水分胁迫后植物的叶绿素合成能力较易恢复,但经重度水分胁迫胁迫后植物的叶绿素合成能力较难恢复<sup>[31]</sup>。本研究中,干旱和淹水胁迫 7 和 14 d,兔眼蓝浆果品种‘粉蓝’和‘园蓝’叶片的叶绿素含量指数(CCI)均不同程度低于对照,其中经淹水胁迫后叶片 CCI 值的降幅更大;恢复正常的水分供应后,经干旱胁迫后 2 个品种叶片的 CCI 值迅速恢复至对照水平,而经淹水胁迫后在恢复正常水分供应初期叶片 CCI 值仍保持下降的趋势,说明淹水胁迫对光合色素的抑制作用不仅表现在淹水胁迫过程中,而且能延续到淹水胁迫解除之后。

叶绿素荧光测量技术作为“植物生理生态无损研究的微探针”,使人们能够在更微观的层次上了解植物光合系统的光能吸收、转换和利用效率。 $F_v/F_m$  为 PS II 最大光化学效率或 PS II 原初光能转化效率, $F_v/F_m$  值降低表明产生了光抑制; $Y(\text{II})$  代表 PS II 有效光量子产量,该值降低表示电子传递体活性下降,PS II 吸收光能用于光化学反应的比例降低,光能更多的向热耗散途径分配。在本研究中,干旱或淹水处理 14 d,兔眼蓝浆果品种‘粉蓝’和‘园蓝’叶片的  $F_v/F_m$  值和  $Y(\text{II})$  值均显著下降,且经淹水胁迫后这 2 个指标的降幅更大,表明淹水胁迫后的兔眼蓝浆果品种‘粉蓝’和‘园蓝’叶片光抑制程度更大,PS II 反应中心失活或损伤的程度更重。经干旱胁迫并恢复正常水分供应后 2 个品种叶片的  $F_v/F_m$  值迅速升高且显著高于对照,但  $Y(\text{II})$  值回升较慢;而经淹水胁迫并恢复正常水分供应后 2 个品种叶片的  $F_v/F_m$  值和  $Y(\text{II})$  值均回升较缓慢,且呈先降低后升高的变化趋势,说明在本实验设置的水分逆境条件下,因光抑制导致的 PS II 反应中心的失活或损伤是可逆性的,对植物具有一定的光保护作用<sup>[32]</sup>。但因干旱和淹水胁迫机制不同,恢复正常水分供应后 2 个品种叶片的  $F_v/F_m$  值和  $Y(\text{II})$  值的恢复速率和恢复程度均存在差异。

## 参考文献:

- [1] 顾 娟, 贺善安. 蓝浆果与蔓越桔[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001: 419.
- [2] 於 虹, 贺善安, 顾 娟. 我国和世界蓝浆果的发展前景[J]. 植物资源与环境学报, 2001, 10(2): 52-55.
- [3] ERB W A, DRAPER A D, SWARTZ H J. Screening interspecific blueberry seedling populations for drought resistance[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1988, 113: 599-604.
- [4] ERB W A. Improved drought tolerance and root development as components of a scheme to breed blueberries for mineral soil adaptability[J]. Euphytica, 1993, 70: 9-16.
- [5] CRANE J H, DAVIES F S. Responds of rabbiteye blueberries to flooding[J]. Proceedings of the Florida State Horticultural Society, 1985, 98: 153-155.
- [6] DAVIES F S, FLORE J A. Flooding, gas exchange and hydraulic root conductivity of highbush blueberry[J]. Physiologia Plantarum, 1986, 67: 545-551.
- [7] ABBOTT J D, GOUGH R E. Prolonged flooding effects on anatomy of highbush blueberry[J]. HortScience, 1987, 22: 622-625.
- [8] MINGEAU M, PERRIER C, AMÉGLIO T. Evidence of drought-sensitive periods from flowering to maturity on highbush blueberry[J]. Scientia Horticulturae, 2001, 89: 23-40.
- [9] GLASS V M, PERCIVAL D C, PROCTOR J T A. Tolerance of lowbush blueberries (*Vaccinium angustifolium* Ait.) to drought stress. I. Soil water and yield component analysis[J]. Canadian Journal of Plant Science, 2005, 85: 911-917.
- [10] 吴 林, 李亚东, 张志东, 等. 三种类型越桔在淹水逆境下生理及形态反应的比较[J]. 园艺学报, 1997, 24(3): 287-288.
- [11] 吴 林, 李亚东, 张志东, 等. 三种类型越桔对干旱胁迫的生理反应[J]. 吉林农业大学学报, 1998, 20(2): 1-4.
- [12] 吴 林, 李亚东, 张志东, 等. 淹水、干旱条件下北空越桔生理反应的研究[J]. 果树科学, 1998, 15(2): 137-140.
- [13] 吴 林, 张志东, 李亚东, 等. 越桔耐涝品种的筛选[J]. 吉林农业科学, 2002, 27(2): 46-48.
- [14] 马琳娜, 吴 林, 刘海广. 水分胁迫下越橘品种“北陆”和“蓝丰”的生理反应[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(16): 8434-8435, 8461.
- [15] 张德巧, 徐增莱, 褚晓芳, 等. 蓝莓叶片与抗旱性相关的解剖结构指标研究[J]. 果树学报, 2008, 25(6): 864-867.
- [16] 陈文荣, 曾玮玮, 李云霞, 等. 高丛蓝莓对干旱胁迫的生理响应及其抗旱性综合评价[J]. 园艺学报, 2012, 39(4): 637-646.
- [17] 方品武, 王 瑶, 张群英, 等. 干旱胁迫下蓝莓苗木抗旱指标的初步筛选[J]. 中国园艺文摘, 2012(11): 18-19.
- [18] 於 虹, 顾 娟, 贺善安. 我国南方地区越橘栽培现状及发展展望[J]. 中国果树, 2009(3): 68-72.
- [19] DAVIES F S, JOHNSON C R. Water stress, growth, and critical water potentials of rabbiteye[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1982, 107: 6-8.
- [20] ABBOTT J D, GOUGH R E. Growth and survival of the highbush blueberry in response to root zone flooding[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1987, 112: 603-608.
- [21] CRANE J H, DAVIES F S. Flooding duration and seasonal effects on growth and development of young rabbiteye blueberry plants[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1988, 113: 180-184.
- [22] CAMERON J S, BRUN C A, HARTLEY C A. The influence of soil moisture stress on the growth and gas exchange characteristics of young highbush blueberry plants (*Vaccinium corymbosum* L.)[J]. Acta Horticulturae (ISHS), 1989, 241: 254-259.
- [23] FLEXAS J, MEDRANO H. Drought-inhibition of photosynthesis in C<sub>3</sub> plants: stomatal and non-stomatal limitations revisited [J]. Annals of Botany, 2002, 89: 183-189.
- [24] GRASSI G, MAGNANI F. Stomatal, mesophyll conductance and biochemical limitations to photosynthesis as affected by drought and leaf ontogeny in ash and oak trees [J]. Plant, Cell and Environment, 2005, 28: 834-849.
- [25] DAVIES F S, FLORE J A. Short-term flooding effects on gas exchange and quantum yield of rabbiteye blueberry (*Vaccinium ashei* Reade)[J]. Plant Physiology, 1986, 81: 289-292.
- [26] ERB W A, DRAPER A D, SWARTZ H J. Combining ability for canopy growth and gas exchange of interspecific blueberries under moderate water deficit [J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1991, 116: 569-573.
- [27] GLASS V M, PERCIVAL D C, PROCTOR J T A. Influence of decreasing soil moisture on stem water potential, transpiration rate and carbon exchange rate of the lowbush blueberry (*Vaccinium angustifolium* Ait.) in a controlled environment[J]. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 2003, 78: 359-364.
- [28] 许大全. 光合作用气孔限制分析中的一些问题[J]. 植物生理学报, 1997, 33(4): 241-244.
- [29] 曹 慧, 韩振海, 许雪峰. 水分胁迫下苹果属植物叶片叶绿素降解的膜脂过氧化损伤作用[J]. 中国农业科学, 2003, 36(10): 1191-1195.
- [30] 克热木·伊力, 王丽娜, 侯江涛. 水分胁迫对扁桃砧木干物质和叶绿素含量的影响[J]. 经济林研究, 2007, 25(4): 1-5.
- [31] 赵天宏, 沈秀瑛, 杨德光, 等. 水分胁迫及复水对玉米叶片叶绿素含量和光合作用的影响[J]. 杂粮作物, 2003, 23(1): 33-35.
- [32] 梁 芳, 郑成淑, 孙宪芝, 等. 低温弱光胁迫及恢复对切花菊光合作用和叶绿素荧光参数的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(1): 29-35.

(责任编辑: 张明霞)