

土壤干旱胁迫对紫叶矮樱叶片呈色的影响

李云飞^{1,2}, 李彦慧¹, 王中华¹, 关楠¹, 冯晨静¹, 杨建民^{1*}

(1. 河北农业大学园林与旅游学院, 河北保定 071000; 2. 河北省木兰围场国有林场管理局, 河北围场 068450)

摘要:以盆栽 3 a 紫叶矮樱叶片为试材, 采用称重控水法, 设对照(土壤含水量 18.11%)、轻度干旱(土壤含水量 14.72%)、中度干旱(土壤含水量 11.32%)和重度干旱(土壤含水量 7.92%) 4 个处理组, 研究不同土壤干旱条件下紫叶矮樱叶片呈色色素含量、可溶性糖含量、PAL 酶活性的变化规律及其对叶片呈色的影响。结果表明:轻度干旱, 随胁迫时间的延长叶片中花青苷、类黄酮、叶绿素、可溶性糖含量、PAL 酶活性和 a^* 增加, L^* 和 b^* 降低; 中度和重度干旱, 随胁迫时间的延长花青苷、类黄酮、叶绿素、可溶性糖含量、PAL 酶活性和 a^* 先增加再降低, L^* 和 b^* 先减小再增大。短时间的干旱能够提高紫叶矮樱的叶片色泽, 中度干旱 15 d 或重度干旱 12 d, 是紫叶矮樱叶色发生明显转变的关键时期; 花青苷含量的变化是影响紫叶矮樱叶色变化的主要原因。

关键词:土壤干旱胁迫; 叶片呈色; 花青苷; PAL 酶活性; 可溶性糖含量

文章编号: 1000-0933(2009)07-3678-07 中图分类号: Q948; S687 文献标识码: A

Effect of soil drought stress on leaf coloration-emerging of *Prunus cistenena* cv. *Pissardii*

LI Yun-Fei^{1,2}, LI Yan-Hui¹, WANG Zhong-Hua¹, GUAN Nan¹, FENG Chen-Jing¹, YANG Jian-Min^{1,*}

¹ College of Landscape Architecture and Tourism, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China

² Mulan Weichang Forestry Management Bureau of Hebei, Weichang 068450, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(7): 3678 ~ 3684.

Abstract: The three-year-old pot-planted seedlings of *Prunus cistenena* cv. *Pissardii* were used to study the variation of leaf pigments, soluble sugar, activity of PAL, and coloration parameters under soil drought stress condition. The treatment design was control, slight drought stress, medium drought stress, and severe drought stress with relative soil water content of 18.11%, 14.72%, 11.32%, and 7.92%, respectively, which was artificially controlled by weighting. The results showed that the content of anthocyanin, flavonoids, chlorophyll, soluble sugar, activity of PAL, and “ a^* -value” were increased, and “ L^* -value” and “ b^* -value” were decreased under slight drought stress along with prolonged drought stress time. The content of main pigment, soluble sugar, activity of PAL, and “ a^* -value” were increased at first and then decreased, and “ L^* -value” and “ b^* -value” were decreased at first and then increased under medium and severe stress with prolonged drought stress time. The value of leaf coloration-emerging could be enhanced by short time drought stress, in which the key period of leaf coloration conversion was the 15th day under medium stress or the 12th day under severe stress. Anthocyanin was the key factor of leaf coloration-emerging in *Prunus cistenena* cv. *Pissardii*.

Key Words: soil drought stress; leaf coloration-emerging; anthocyanin; activity of PAL; contents of soluble sugar

随着我国城市园林建设步伐的加快, 园林绿化及养护的用水量也急剧增加, 形成了与城市生活用水、工业用水并驾齐驱的第三大城市用水类型^[1]。目前, 我国的城市缺水状况日益严重, 园林绿化的节水灌溉已成为

基金项目: 国家“948”资助项目(2001-40); 河北省农业综合开发办公室资助项目; 河北农业大学科学研究基金资助项目

收稿日期: 2008-04-17; 修订日期: 2008-12-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangjm3706@sina.com

城市节水的重要途径之一。彩叶树木,色彩亮丽,观赏期较长,在园林绿化中得到了广泛的应用^[2],研究彩叶树木的水分生理特别是干旱胁迫下的叶色变化,对于园林建设的节水灌溉及提高园林植物的观赏特性具有重要意义。Sherwin^[3]在研究花青苷对复苏植物的光保护作用时,发现干旱胁迫能够增加复苏植物和黄栌叶片中花青苷含量;孔艳菊^[4]的研究表明,黄栌叶片中的叶绿素含量随干旱胁迫程度的加剧呈上升趋势。曹晶^[5]的研究表明,夏、秋干旱和水淹胁迫均使红叶石楠叶片中叶绿素含量降低,花青苷含量升高。彩叶树木叶片呈色是各种色素综合作用的结果,干旱胁迫下能够引起彩叶树木叶片中的色素含量发生变化,从而引起叶片呈色的变化。而前人的研究大多集中于色素含量的变化,对影响彩叶树木叶色变化的主要色素及各种色素含量的变化对叶色表现的影响还尚未见报道。本文以园林绿化中普遍应用的彩叶树种——紫叶矮樱(*Prunus cistena* cv. *Pissardii*)为试材,研究土壤干旱条件下紫叶矮樱叶片呈色色素含量变化对叶色的影响,以期对园林绿化的节水灌溉及彩叶树木的叶色研究提供理论指导。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验于2006-03~2007-09年在河北农业大学科研基地进行。试材为长势一致、生长良好的3 a紫叶矮樱嫁接苗,砧木为毛桃(*P. davidiana*),苗高40 cm左右。试验盆高40 cm,上、下直径分别为30 cm和26 cm,每盆1株。盆内装7.5 kg基质;基质为草炭土、河沙和园土混和,比例为1:3:4;基质pH为7.3,速效氮6.48 mg/kg,速效磷6.63 mg/kg,速效钾3.55 mg/kg,有机质含量2.12%。盆栽苗木在露地常规管理,至4月中旬左右,将试验盆栽苗移到防雨棚下。

1.2 试验设计

2006年3~6月进行预试验,设置8个水分梯度。根据预试验中紫叶矮樱叶色和生理指标的变化情况,确定3个水分处理,分别为轻度干旱(土壤含水量保持在 $(14.71 \pm 0.5)\%$)、中度干旱(土壤含水量为 $(11.32 \pm 0.5)\%$)、重度干旱(土壤含水量为 $(7.92 \pm 0.5)\%$);以土壤含水量为 $(18.11 \pm 0.5)\%$ 为对照(CK);每个处理重复8盆,随机区组排列。

2007年5月上旬,试验苗进入快速生长期时,采取自然干旱的办法控水,每日18:00用感量0.5 g的电子称称重,并均匀补充当天失去的水分。控水第5天达到预设的水分梯度,在达到预定控水梯度后的第0天、5天、10天、15天、20天的7:00进行取样,取新梢顶部第4~6片叶,然后用冰壶立即带回试验室进行各项生理指标的测定。

1.3 测定方法

叶色色度的测定,采用日本产Minolta CR-400型全自动色差计测定叶片色度。C光源,测色光斑直径为8 mm,以标准白板为标准样校正。每个处理测定10片叶,每片叶测定不同部位3次。记录 L^* 、 a^* 、 b^* 值表示叶片颜色,其中 L^* 表示光泽明亮度, L^* 值越大,亮度越高; a^* 值表示红/绿, a^* 值越大,红色越深, a^* 值越小,绿色越深; b^* 值表示黄/蓝, b^* 值越大,黄色越深, b^* 值越小,蓝色越深。

花青苷和类黄酮的测定参照Pirie^[6]等方法略作修改,取0.1 g叶片,洗净,用5 ml的1% HCl甲醇4℃浸提24 h,测定提取液在530 nm(花青苷)和320 nm(类黄酮)的吸光值。以 $U = OD_{325}/gDW$ 作为一个类黄酮单位;花青苷的计算方法参照徐金瑞^[7]。

光合色素和可溶性糖的测定参照李合生^[8]的方法。

PAL酶活性的测定参照Lister^[9]的方法,测定290 nm的吸光值。以每分钟每g鲜重变化0.1个吸光度为1个酶活单位。

数据处理采用ECXEL 2003和SPSS 11.5,采用Duncan法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 土壤干旱胁迫对色素含量的影响

随着干旱胁迫时间的延长,CK和干旱处理的花青苷含量均是先上升再下降(图1 A),在第5天达到峰

值,然后迅速降低;轻度干旱,紫叶矮樱叶片花青苷含量一直高于 CK;中度和重度干旱,第 0~15 天花青苷含量高于 CK,第 20 天则低于 CK。干旱胁迫到第 5 天时,轻度、中度和重度干旱花青苷含量分别比 CK 增加了 4.74%、31.8% 和 22.0%,中度和重度干旱分别极显著和显著高于 CK;第 20 天时,轻度干旱比 CK 提高了 18.4%,中度和重度干旱胁迫则降低了 22.3% 和 41.4%,中度和重度干旱分别显著和极显著低于 CK。

CK 和干旱胁迫的类黄酮含量在干旱处理期间呈降低趋势(图 1 B);轻度干旱,类黄酮含量一直高于 CK;中度和重度干旱类黄酮含量在第 15 天之前高于 CK,第 20 天时则低于 CK。干旱胁迫第 5 天时,轻度、中度和重度干旱类黄酮含量分别比 CK 增加了 12.5%、17.2% 和 17.3%,极显著高于 CK;第 20 天时,轻度干旱类黄酮含量提高了 13.8%,中度和重度干旱胁迫则降低了 1.1% 和 7.7%,但差异不显著。

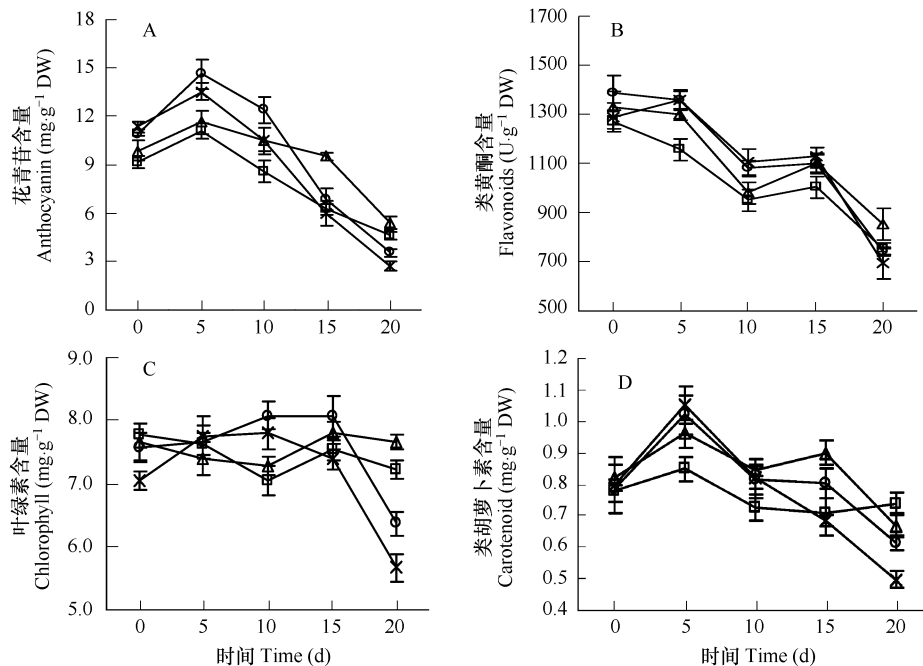


图 1 干旱胁迫下紫叶矮樱色素含量的变化

Fig. 1 The changes of the content of pigment under soil drought stress

□:对照 control; △:轻度干旱 slight stress; ○:中度干旱 medium stress; ×:重度干旱 severe stress

在整个试验期间,CK 和轻度干旱处理紫叶矮樱叶片中的叶绿素含量变化不大,中度和重度干旱则先缓慢上升再迅速下降(图 1 C)。干旱胁迫第 10 天时,轻度、中度和重度干旱叶绿素含量分别比 CK 增加了 3.2%、14.4% 和 10.5%,中度和重度干旱分别极显著和显著高于 CK;第 20 天时,轻度干旱叶绿素含量增加了 5.9%,显著高于 CK,中度和重度干旱则降低了 11.9% 和 21.6%,极显著低于 CK。

CK 的类胡萝卜素含量在整个试验期间变化不大(图 1 D),轻度、中度和重度干旱则先上升再下降;轻度、中度和重度干旱处理类胡萝卜素含量第 15 天之前高于 CK,然后开始降低,第 20 天时均显著低于 CK。干旱胁迫第 5 天时,轻度、中度和重度干旱胁迫类胡萝卜素含量分别比 CK 增加了 13.1%、20.1% 和 23.7%,中度和重度干旱均显著高于 CK;第 20 天时,轻度、中度和重度干旱胁迫分别降低了 9.3%、16.7% 和 32.5%,中度和重度均显著低于 CK。

2.2 土壤干旱胁迫对叶片可溶性糖含量的影响

干旱胁迫能够增加紫叶矮樱叶片中可溶性糖含量(图 2)。轻度干旱,可溶性糖含量呈上升趋势,中度和重度干旱,可溶性糖含量呈先上升再下降的趋势。干旱胁迫第 10 天时,轻度、中度和重度干旱胁迫可溶性糖含量分别比 CK 增加了 12.8%、19.9% 和 16.9%,轻度干旱显著高于 CK,中度和重度干旱极显著高于 CK;第 20 天时,轻度、中度和重度干旱分别比 CK 增加了 22.4%、12.9% 和 1.5%,轻度和中度干旱可溶性糖含量极

显著高于 CK, 重度干旱和 CK 差异不显著。

2.3 土壤干旱胁迫对 PAL 酶活性的影响

由图 3 可以看出, 轻度和中度干旱 PAL 酶活性始终高于 CK; 重度干旱 PAL 酶活性呈先升再降的趋势, 从第 15 天开始酶活性迅速降低至 CK 以下。干旱胁迫第 10 天时, 轻度、中度和重度干旱 PAL 酶活性分别比 CK 增加了 6.0%、13.4% 和 21.7%, 中度干旱显著高于 CK, 重度干旱极显著高于 CK; 第 20 天时, 轻度和中度干旱分别比 CK 降低了 13.2% 和 7.1%, 中度干旱显著高于 CK, 重度干旱 PAL 酶活性下降了 10.7%, 极显著低于 CK。

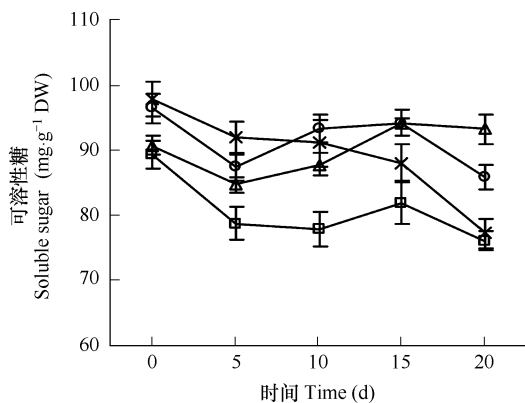


图 2 干旱胁迫下紫叶矮樱可溶性糖含量的变化

Fig. 2 The changes of the content of soluble sugar under soil drought stress

□: 对照 control; △: 轻度干旱 slight stress; ○: 中度干旱 medium stress; ×: 重度干旱 severe stress

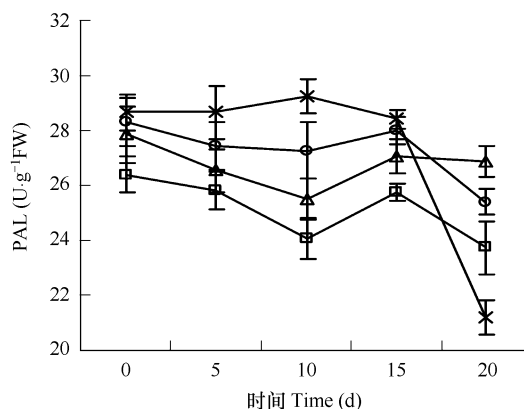


图 3 干旱胁迫对紫叶矮樱 PAL 酶活性的变化

Fig. 3 The changes of the activity of PAL under soil drought stress

□: 对照 control; △: 轻度干旱 slight stress; ○: 中度干旱 medium stress; ×: 重度干旱, severe stress

2.4 土壤干旱胁迫对色差值的影响

干旱胁迫显著影响叶片的色差值(图 4)。随着干旱胁迫时间的延长, 紫叶矮樱的 CK 和轻度干旱 L^* 呈缓慢上升趋势, 中度和重度干旱从第 10 天后开始迅速升高(图 4A); 轻度干旱, L^* 值低于 CK, 中度和重度干旱, 第 15 天之前低于 CK, 之后, 则高于 CK。干旱胁迫第 10 天时, 轻度、中度和重度干旱 L^* 分别比 CK 降低了 7.3%、12.4% 和 17.1%, 极显著低于 CK; 干旱胁迫第 20 天时, 轻度胁迫 L^* 降低了 9.6%, 极显著低于 CK, 中度和重度干旱 L^* 分别比 CK 升高了 6.6% 和 14.6%, 重度干旱极显著高于 CK。

随着干旱胁迫时间的延长, CK 和轻度干旱 a^* 变化不大, 中度和重度干旱 a^* 值呈下降趋势(图 4B); 轻

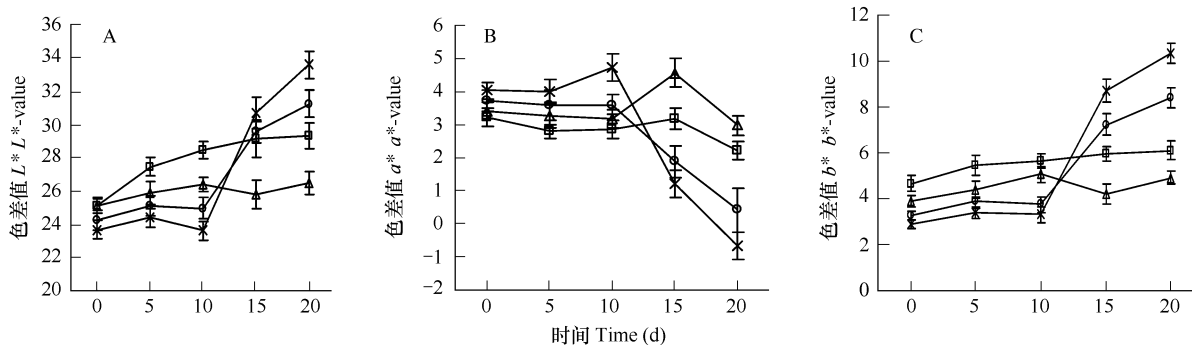


图 4 干旱胁迫下色差值的变化

Fig. 4 The changes of color parameters under soil drought stress

□: 对照 control; △: 轻度干旱 slight stress; ○: 中度干旱 medium stress; ×: 重度干旱 severe stress

度干旱 a^* 高于 CK, 中度和重度干旱第 15 天之前 a^* 高于 CK, 之后开始迅速下降且低于 CK。干旱胁迫第 10 天时, a^* 则分别升高了 11.3%、25.7% 和 65.0%, 中度和重度干旱极显著高于 CK; 干旱胁迫第 20 天时, 轻度干旱 a^* 比 CK 升高了 33.9%, 中度和重度分别比 CK 降低了 81.8% 和 130.0%, 极显著低于 CK。

由图 4 C 可以看出, 随着干旱胁迫时间的延长, CK 和干旱处理 b^* 呈上升趋势; 轻度干旱 b^* 值低于 CK, 中度和重度干旱从第 10 天开始, b^* 迅速升高。干旱胁迫第 10 天时, b^* 则分别下降了 10.8%、34.0% 和 41.6%, 中度和重度干旱极显著低于 CK; 干旱胁迫第 20 天时, 轻度胁迫 b^* 比 CK 降低了 19.4%, 显著低于 CK, 中度和重度胁迫则分别升高了 37.8% 和 69.2%, 差异均达到极显著水平。

3 结论与讨论

彩叶植物的叶色表现是遗传因素和外部环境共同作用的结果^[10], 外部环境因素主要有光照^[11,12]、温度^[13,14]、土壤条件^[15]等。水分是植物生长发育的重要环境因素之一, 土壤含水量的变化影响碳水化合物合成、色素合成相关酶的活性及细胞结构等, 从而影响叶片的色素合成及叶色表现。

色素是彩叶植物叶片呈色的物质基础, 土壤干旱胁迫对植物色素含量产生明显影响。本研究认为随着胁迫时间的延长, 中度和重度干旱胁迫处理, 紫叶矮樱叶片中叶绿素的含量上升再下降, 这与曹慧等^[16]在苹果上和曹晶等^[5]在红叶石楠上的研究不同。胁迫第 0 天, 叶绿素的降低, 可能是由于土壤含水量的降低, 使叶绿素的合成减慢, 分解加快所致; 而随着胁迫时间的延长, 紫叶矮樱通过生理生化的调节来适应干旱环境, 叶绿素升高是紫叶矮樱对干旱的适应, 而长期的重度干旱, 紫叶矮樱的调节能力下降, 叶绿素的降解加快, 叶绿素含量显著低于对照。适当的干旱胁迫能够增加植物叶片中花青苷的含量^[17], 这一点在本试验也得到证明。已有的研究表明, 花青苷在逆境下对植物的细胞和光合机构有保护作用^[18,19], 本研究中, 叶绿素含量的升高是否与花青苷的保护作用有关, 有待于进一步的研究。

叶片的色素含量、细胞结构和环境光线等因素均影响叶片成色。李亚蒙在彩叶植物组织的解剖研究中发现, 花青苷在植物细胞中的分布不同也是造成叶片呈色差异的因素之一^[20]。因此, 对彩叶植物叶色变化的度量, 不能仅用色素的含量来表示。许多学者利用色差仪对观赏植物花色与花色素之间的关系进行了研究^[21,22,23]。本文借鉴花色的研究方法, 用色差值 L^* , a^* , b^* 表示叶色变化情况, 对紫叶矮樱叶色进行精确的定位。轻度干旱, 紫叶矮樱的 L^* 、 b^* 变小, a^* 变大(图 4), 叶片颜色加深, 成暗红色, 观赏价值提高。除轻度干旱第 20 天处理的类胡萝卜素, 紫叶矮樱的花青苷、类黄酮、叶绿素和类胡萝卜素含量均高于 CK, 而叶色加深, 成暗红色, 表明轻度干旱叶色的变化主要是由呈现红色系的花青苷和类黄酮的增加引起的。中度干旱, 色差值 L^* , a^* , b^* 变化的拐点大约在第 15 天, 重度干旱, 色差值 L^* , a^* , b^* 变化的拐点大约在第 12 天(图 4); L^* 、 b^* 由减少变为增加, a^* 则由增加变为减少, 叶色由深红色向浅红色变化。在处理的第 10~15 天时, 中度干旱下, 紫叶矮樱的 4 种主要色素中, 叶绿素、类胡萝卜素和类黄酮含量变化不大, 且一直高于 CK, 而花青苷的含量则是迅速降低, 略高于 CK, 叶色由深红变浅红色; 重度干旱下, 花青苷、叶绿素、类胡萝卜素含量迅速降低, 花青苷则降至 CK 以下, 叶色变成浅绿色。表明, 紫叶矮樱叶色的变淡主要是由呈红色系的花青苷的含量迅速降低所致。因此, 干旱胁迫下, 花青苷含量的变化是引起紫叶矮樱叶色变化的主要原因。

花青苷和类黄酮是植物次生代谢的产物, 其合成途径已非常清楚。PAL 酶催化苯丙氨酸生成肉桂酸是植物次生代谢的起点, 是苯丙烷代谢的关键酶^[24]。本研究中进一步的相关分析表明, PAL 酶与花青苷显著正相关($r=0.777^*$), PAL 酶与类黄酮极显著正相关($r=0.873^{**}$), 因此提高 PAL 酶的活性能够促进花青苷和类黄酮的合成。花青苷是由花青素和糖组成的糖苷, 花青素又是在糖代谢的基础上形成的, 因此, 凡能导致细胞中糖分积累的因素都能在不同程度上促进花青苷的合成^[25]。干旱胁迫能够诱导植物组织中可溶性糖含量的上升, 作为一种渗透调节物质, 维持细胞的膨压, 保护细胞的正常生理功能^[26,27]。本研究中, 紫叶矮樱叶片中可溶性糖含量与花青苷含量呈极显著正相关关系($r=0.910^{**}$), 这表明可溶性糖对花青苷合成有促进作用。因此, 提高紫叶矮樱的 PAL 酶活性与可溶性糖含量有利于花青苷的合成, 也有利于叶色的表现。在整个试验期间, 紫叶矮樱叶片的花青苷含量呈先升高迅速降低的趋势, 可能原因是由于此时正处于新梢速长期, 光

合产物更多的用于初生代谢,所以作为次生代谢的花青苷和类黄酮的含量呈下降趋势;再者可能在试验期间气温的逐渐升高,植物在夜间呼吸作用的加强,导致糖分的消耗,通过分析叶片中可溶性糖的含量可以得到证实(图2),进而也影响到了花青苷的合成。

本研究的试验是在春季紫叶矮樱新梢快速生长期进行的,紫叶矮樱的主要色素含量变化较大。短期的干旱胁迫能够使紫叶矮樱叶色更深、更红,而长期的重度干旱,叶片的颜色变浅,变绿,观赏价值降低。虽然长时间的轻度干旱,紫叶矮樱的叶色加深,但是通过对新梢生长量和叶面积的测定发现紫叶矮樱的生长会明显的变慢,这同样会降低观赏价值,因此,轻度干旱的时间也不能超过 20 d。综合考虑节水、观赏特性及生长等因素,就本试验而言,轻度干旱 18 d、中度干旱 15d 或重度干旱 12 d 后应进行灌溉。本试验只是对春季紫叶矮樱新梢快速生长期的叶色变化进行了相关研究,关于夏季高温和秋季衰老叶片在干旱胁迫下的叶色的变化还有待于进一步的研究。

References:

- [1] Su D R, Han L B, Yin S X, Shi X L. Approaches solving water consumption for urban ecological greenbelt. *Water Saving Irrigation*, 2005, 4: 10—13.
- [2] Zhang Q X, Wu J. Color-ed leaf resource and its application in the landscape. *Journal of Beijing Forestry University*, 1998, 20 (4): 126—127.
- [3] Sherwin H W, Farrant J M. Protection mechanisms against excess light in the resurrection plants *Craterostigma wilmsii* and *Xerophyta viscose*. *Plant Growth Regulation*, 1998, 24: 203—210.
- [4] Kong Y J, Sun M G, Hu X J, Miao H X. Effect of drought stress on several physiological indexes of *Cotinus coggygia* seedlings. *Journal of Center South Forestry University*, 2006, 26(4): 42—46.
- [5] Cao J, Qiang W B, Weng M L, Jiang W. Effects of drought and flooding stress on photosynthetic characteristics of *Photinia fraseri* in summer and autumn. *Acta Horticulturae Sinica*, 2007, 34 (1): 163—172.
- [6] Pirie A, Mullins M G. Changes in anthocyanin and phenolics content of grapevine leaf and fruit tissues treated with sucrose, nitrate abscisic acid. *Plant Physiology*, 1976, 58: 468—472.
- [7] Xu J R, Zhang M W, Liu X H, Liu Z X, *et al.* Correlation Between Antioxidation, and Content of Total Phenolics and Anthocyanin in Black Soybean Accessions. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39 (8): 1545—1552.
- [8] Li H S. The experimental principal and measurement of plant physiology and chemistry. Beijing: Higher Education Press, 2003.
- [9] Lister C E, Lancaster J E. Developmental changes in enzymes of flavonoid biosynthesis in the skins of red and green apple cultivars. *Journal of Science of Food and Agriculture*, 1996, 71: 313—320.
- [10] Jiang W B, Zhuang M, Han H Z, Dai M S, Hua G P. Progress on color emerging mechanism and photosynthetic characteristics of colored-leaf plants. *Acta Horticulturae Sinica*, 2005, 32 (2): 352—358.
- [11] Shi B S, Zhuo L H, Yang J M. Effect of light on leaf color of red leaf Chery Plum. *Journal of Northeast Forestry University*, 2007, 35 (4): 16—18.
- [12] Smith L B, Wasshausen D C. *Begonia soli-mutata*, a new Brazilian species whole leaf color varies with light intensity. *Begonias*, 1990, 57: 151—152.
- [13] Deal D L. Leaf color retention, dark respiration, and growth of red-leafed Japanese maples under high night temperature. *Journal of The America Society for Horticultural Science*, 1990, 115 (1): 135—140.
- [14] Oren S M, Levi N A. Temperature effect on the leaf pigmentation of *Cotinus coggygia* 'Royal Purple'. *Journal of Horticulture Science*, 1997, 72: 425—432.
- [15] Steven A Messenger, Hruby Bett A. Response of interveinally chlorotic red maple trees treated with medicaps or by soil acidification. *Journal of Environmental Horticulture*, 1990, 8(1): 5—9.
- [16] Cao H, Han Z H, Xu X F. Membrane lipid peroxidation damage effect of chlorophyll degradation in malus seedlings under water stress. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36 (10): 1191—1195.
- [17] Sun M X, Wang B Z, Fan H, Zhao K F. Anthocyanin of leaves and their environmental significance in plant stress responses. *Plant Physiology Communications*, 2003, 38(4): 385—393.
- [18] Merzlyak M N, Chivkunova O B. Light-stress-induced pigment changes and evidence for anthocyanin photo protection in apples. *Journal of Photochemistry Photobiology B*, 2000, 55 (3): 155—163.
- [19] Chen J, Chen Q L, Cheng Z H, Xu C H. Protective effect of anthocyanin on photosynthetic apparatus of tomato (*L. esculentum* Mill.) seedling

- leaves exposed to low temperature and low irradiance. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40 (4): 788—793.
- [20] Li Y M, Wang Q J, Shen X. Pigment distribution in fresh shoot tissues of four colored-leaf *Prunus* Taxa. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2006, 37 (4): 489—494.
- [21] Bai X X, Hu K, Dai S L, Wang L S. Components of flower pigments in the petals of different color *Chrysanthemum morifolium* Ranmat. Cultivars. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, 28 (5) 84—89.
- [22] Zhang J J, Wang L S, Shu Q Y. Comparison of anthocyanins in non-blotches and blotches of the petals of Xibei tree peony. *Scientia Horticulturae*, 2007, 114: 104—111.
- [23] Torskangerpoll. Anthocyanin content of tulipa species and cultivars and its impact on petal colors. *Biochemical Systematics and Ecology*, 2005, 33: 499—510.
- [24] Gao S J, Wang S M, Wang J Y. Effect of bagging on anthocyanin biosynthesis and pigmentation in apple skin. *Journal of Fruit Science*, 2006, 23 (5): 750—755.
- [25] Ju Z G. Anthocyanin synthesis and apple pericarp coloring. *Journal of Fruit Science*, 1991, 8 (3): 176—180.
- [26] Shvaleva A L, Silva F C, Breia E, *et al.* Metabolic responses to water deficit in two eucalyptus globulus clones with contrasting drought sensitivity. *Tree Physiology*, 2006, 26(2): 239—248.
- [27] Roman Zweifel, Kathy Steppe, and Frank J. Sterek. Stomatal regulation by Microclimate and tree water relations: interpreting ecophysiological field data with a hydraulic plant model. *Journal of Experimental Botany*, 2007, 58, 2113—2131.

参考文献:

- [1] 苏德荣, 韩烈保, 尹淑霞, 史小丽. 解决城市生态绿地灌溉用水的途径. *节水灌溉*, 2005, 4: 10~13.
- [2] 张启翔, 吴静. 彩叶植物资源及其在园林中的应用. *北京林业大学学报*, 1998, 20 (4): 126~127.
- [4] 孔艳菊, 孙明高, 胡学俭, 苗海霞. 干旱胁迫对黄栌幼苗几个生理指标的影响. *中南林学院学报*, 2006, 26(4): 42~46.
- [5] 曹晶, 姜卫兵, 翁忙玲, 姜武. 夏秋季旱涝胁迫对红叶石楠光合特性的影响. *园艺学报*, 2007, 34 (1): 163~172.
- [7] 徐金瑞, 张名位, 刘兴华, 刘章雄, 等. 黑大豆种质抗氧化能力及其与总酚和花色苷含量的关系. *中国农业科学*, 2006, 39 (8): 1545~1552.
- [8] 李合生. 植物生理生化实验原理和测定技术. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [10] 姜卫兵, 庄猛, 韩浩章, 戴美松, 花国平. 彩叶植物呈色机理及光合机理研究进展. *园艺学报*, 2005, 32 (2): 352~358.
- [11] 史宝胜, 卓丽环, 杨建民. 光照对紫叶李叶色发育的影响. *东北林业大学学报*, 2007, 35 (4): 16~18.
- [16] 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. *中国农业科学*. 2003, 36 (10): 1191~1195.
- [17] 孙明霞, 王宝增, 范海, 赵可夫. 叶片中的花色苷及其对植物适应环境的意义. *植物生理学通讯*, 2003, 38(4): 385~393.
- [19] 陈静, 陈启林, 程智慧, 徐春和. 花青苷对低温弱光处理的番茄 (*L. esculentum* Mill.) 幼苗光合机构的保护作用. *中国农业科学*, 2007, 40 (4): 788~793.
- [20] 李亚蒙, 王庆菊, 沈向. 四种李属彩叶树种枝叶花色苷分布的解剖研究. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2006, 37 (4) 489~494.
- [21] 白新祥, 胡可, 戴思兰, 王亮生. 不同花色菊花品种花色苷成分的初步分析. *北京林业大学学报*, 2006, 28 (5) 84~89.
- [24] 高少君, 王少敏, 王江勇. 套袋对苹果果皮花青苷合成及着色的影响. *果树学报*, 2006, 23 (5): 750~755.
- [25] 鞠志国. 花青苷合成与苹果果皮着色. *果树科学*, 1991, 8 (3): 176~180.