

# 不同遮荫度对‘红叶’南天竹叶色变化及矿质营养积累的影响

于伟, 潘远智\*, 任文, 孙泽晨

(四川农业大学风景园林学院, 成都 611130)

**摘要:** 为探讨遮荫对‘红叶’南天竹(*Nandina domestica* ‘Hongye’)叶色及矿质营养积累的影响, 对不同遮荫处理下其生理生化指标的变化进行了研究。结果表明, 随遮荫度增加, 叶绿素、类胡萝卜素含量增加, 花色素苷相对含量减少, 可溶性糖含量差异不明显。随处理时间的延长, 不同遮荫度的花色素苷相对含量都明显增加, 可溶性糖含量与花色素苷后期变化相似, 叶绿素和类胡萝卜素含量在全光照(CK)及 30%遮荫度(C1)有所增加, 55%遮荫度(C2)下变化比较平稳, 而 75%遮荫度(C3)呈先减少后增加的变化趋势。叶片中氮含量在较大遮荫度时较高, 磷、钾含量在中度遮荫时较高, 钙含量随遮荫度的增高而减少, 镁和铁在不同遮荫度间差异不显著。相关性分析表明, 花色素苷含量与可溶性糖、钙含量呈显著正相关( $P < 0.05$ ), 与氮含量呈显著负相关( $P < 0.05$ ); 而叶绿素含量与氮含量呈显著正相关( $P < 0.05$ ), 与钾、钙含量呈显著负相关( $P < 0.05$ )。因此, 遮荫可以影响‘红叶’南天竹叶片色素、可溶性糖及矿质元素的含量, 适宜摆放或种植在 30%遮荫度的疏荫环境中, 不仅生长表现良好, 而且呈色最佳。

**关键词:** ‘红叶’南天竹; 遮荫; 色素; 可溶性糖; 矿质元素

doi: 10.11926/jtsb.3700

## Effect of Shading on Changes in Leaf Color and Nutrient Accumulation of *Nandina domestica* ‘Hongye’

YU Wei, PAN Yuan-zhi\*, REN Wen, SUN Ze-chen

(College of Landscape Architecture, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

**Abstract:** In order to understand the effect of shading on leaf color and nutrient accumulation of *Nandina domestica* ‘Hongye’, the changes in physiological and biochemistry indexes were studied under different shading treatments, such as full light, 30%, 55%, and 70% shading. The results showed that the contents of chlorophyll and carotenoids increased with increment of shading, whereas relative content of anthocyanin decreased, and the content of soluble sugar had no difference. Along the prolonging of shading treatment, the relative content of anthocyanin and soluble sugar content increased, while the contents of chlorophyll and carotenoids increased in full light or 30% shading, fluctuated smoothly in 55% shading, and increased at first and then decreased in 75% shading. The content of leaf N was high under 75% shading, and those of P, K were high under 50% shading. The content of Ca decreased with the increment of shading. However, the contents of Mg, Fe had no differences among shading treatments. The correlation analysis showed that anthocyanin content had positive correlation with contents of soluble sugar or Ca ( $P < 0.05$ ), and negative correlation with content of N ( $P < 0.05$ ). The content of chlorophyll had positive correlation with the content of N ( $P < 0.05$ ), and negative correlation with contents of K

收稿日期: 2016-11-21

接受日期: 2017-02-22

基金项目: 2016 年学科建设“双支”计划项目(03571933)资助

This work was supported by the “Double Support” Plan Project for Discipline Construction in 2016 (Grant No. 03571933).

作者简介: 于伟(1990~), 女, 硕士, 主要从事园林植物栽培与应用研究。E-mail: stuworu@126.com

\* 通信作者 Corresponding author. E-mail: scpyzls@163.com

or Ca ( $P < 0.05$ ). Therefore, shading environment could affect the contents of pigments, soluble sugar and mineral elements in *N. domestica* 'Hongye', and 30% shading was reasonable for a tradeoff between better growth and nice color.

**Key words:** *Nandina domestica* 'Hongye'; Shading; Pigment; Soluble sugar; Mineral element

彩叶植物因在生长期能呈现鲜艳的色彩而备受人们的欢迎,在现代园林植物造景中的地位也越来越重要。彩叶植物叶色的呈现与环境因子密切相关。其中,光照是重要的影响因子,它主要通过调节叶片内色素含量及其比例影响叶片呈色<sup>[1]</sup>。研究表明,遮荫使宽叶山月桂(*Kalmia latifolia*)叶绿素含量增高<sup>[2]</sup>,降低紫叶李(*Prunus cerasifera* 'Atropurpurea')叶片花色素苷含量<sup>[3]</sup>。一般地,糖类、苯丙氨酸等有机物质都是通过光合作用合成的,光合作用为花色素苷的合成提供了物质基础;另一方面,光通过调节花色素苷合成相关酶活性,来调节植物花色素苷的合成<sup>[4-5]</sup>。而叶片内不同矿质元素对植物的色彩呈现也有一定影响, $Mg^{2+}$ 、 $Fe^{2+}$ 、 $Al^{3+}$ 等金属离子可通过与花色素苷形成络合物或其他方式来影响花色素苷含量及稳定性<sup>[6]</sup>。

南天竹(*Nandina domestica*)是小檗科(Berberidaceae)南天竹属单种植物。目前,对南天竹的研究主要集中在药用方面<sup>[7-9]</sup>,而在其园林观赏应用方面的研究相对较少。唐丽等<sup>[10]</sup>研究了南天竹果实的变色机理;Shin 等<sup>[11]</sup>对其抗旱性进行了鉴定。'红叶'南天竹(*N. domestica* 'Hongye')是南天竹的新栽培品种<sup>[12]</sup>,常绿直立小灌木,冬季叶色鲜红,较普通南天竹植株更低矮,观赏价值更高。但有关'红叶'南天竹叶色呈现的影响因素及相关机理的研究还少见报道。本研究以'红叶'南天竹 2 年生盆栽苗为试验材料,探讨了不同遮荫度对其叶色呈现及其叶片内矿质元素积累的影响,以期进一步理解彩叶植物的呈色机理,同时为其在园林中的应用提供一定的理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

选用生长健壮、长势一致的 2 年生'红叶'南天竹(*Nandina domestica* 'Hongye')盆栽苗,苗高 15~20 cm,栽植于直径为 15 cm 的花盆中,土壤为肥沃、排水良好的沙质壤土,栽种后统一喷施 1 次  $CO(NH_2)_2$  与  $KH_2PO_4$  的混合液,夏秋 2~3 d 浇 1 次水,冬季 1 周左右浇 1 次,统一栽培管理。

### 1.2 试验设计

搭建 3 个长×宽×高=60 cm×100 cm×100 cm 的铁架,选用市售 2 针、加密 2 针遮阳网,固定在铁架四周及顶部。用 ZR-1010 型照度计测定后,进行 4 个遮荫度处理:CK (全光照)、C1 (1 层 2 针遮阳网, 30% 遮荫度)、C2 (2 层 2 针遮阳网, 55% 遮荫度)和 C3 (1 层 2 针和 1 层加密 2 针遮阳网, 75% 遮荫度)。每处理小区设 3 个重复,20 盆为 1 个重复。每个处理间距 1.5 m,避免交叉遮光。2015 年 6 月将材料放置于不同处理区内,从 8 月下旬开始每 30 d 采样 1 次,共采样 6 次,每次随机取植株上部枝条 3 片成熟叶片进行指标测定,重复 3 次。

### 1.3 测定方法

**叶色** 随机取'红叶'南天竹的新鲜叶片,放置于光线良好的室内,避免日光直射,用英国皇家园艺学会比色卡 RHSCC 法进行颜色比对。RHSCC 将颜色从黄绿色到黑褐色分为 203 个数量级(1, 2, ..., 202, 203),并将每个数量级依色彩明度的深浅分为 4 个等级(A、B、C、D)。重复 9 次,取出现频率最高的结果。

**叶绿素(Chl a+b)和类胡萝卜素(Car)含量的测定** 参照波钦诺克<sup>[13]</sup>的方法,略有改动。称取新鲜叶片 0.10 g,剪碎,置于试管中,用体积分数 80% 丙酮和无水乙醇等体积混合液定容至 10 mL,黑暗放置至叶片变白,取上清液,用 756 型紫外分光光度计(上海光学仪器厂)测定 440、645 和 663 nm 处的吸光度(OD),计算 Chl a+b 和 Car 含量。

**花色素苷含量的测定** 参照 Pire 等<sup>[14]</sup>的方法,略作修改。称取新鲜叶片 0.10 g,剪碎,置于试管中,加入 10 mL 体积分数为 0.10% 的盐酸甲醇溶液,32℃ 恒温箱中提取 4 h,取上清液,用 756 型紫外可见分光光度计测定 535 nm 处的吸光度(OD)。以每克鲜重在 10 mL 提取液中,吸光度  $OD_{535}$  为 0.1 时的花色素苷浓度为 1 个色素单位,则花色素苷相对含量= $OD_{535}/0.1$ (色素单位),1 个色素单位= $0.01 OD_{535} g^{-1} mL^{-1}$ 。

**可溶性糖含量的测定** 采用蒽酮比色法<sup>[15]</sup>

测定样品 620 nm 下的吸光度。根据标准曲线和所测得 620 nm 下的吸光度值计算可溶性糖的百分含量,即为可溶性糖含量。

**矿质元素的测定** 将叶片用蒸馏水洗净,擦干,105℃杀青 15 min,80℃烘干至恒重,采用凯氏定氮法<sup>[16]</sup>测定叶片全氮含量;钼锑抗比色法<sup>[17]</sup>测定叶片全磷含量,用 SP9-400 原子吸收分光光度计测定钾、钙、镁、铁元素含量。

## 1.4 数据分析

使用 Microsoft Excel 2003 处理数据,以 3 次重复的平均值 ± 标准差表示,采用 SPSS 19.0 分析不同处理间的差异性,用 R 软件进行数据的相关性分析。

表 1 ‘红叶’南天竹不同遮荫处理下叶色的 RHSCC 监测值

Table 1 RHSCC monitor value of leaf color of *Nandina domestica* ‘Hongye’ under different shading treatments

	2015-08	2015-09	2015-10	2015-11	2015-12	2016-01
CK	N34A	N34A	46B	46A	46A	185A,183A
C1	N34A	46A,42B	46B	46A	46A	185A
C2	N34A,146B	146A	146A	N34A,172A,185A	N34A,183A,146A	185A
C3	143A	146A	137A	143A	146A,143A	146A

数字代表 RHSCC 划分的颜色数量级,字母代表该数量级下的等级,字母由 A 到 D,色彩明度依次递减。

Number represent the order of magnitudes of color in RHSCC, the letter represent the level under the magnitude order, from A to D, color brightness descends successively.

处理一直都属程度不同的绿色系,说明遮荫很大程度上影响‘红叶’南天竹叶片的外观颜色体现。

## 2.2 不同遮荫度下色素含量的变化

从图 1 可以看出,随遮荫度的增加,叶绿素与类胡萝卜素含量都逐渐升高,C3 处理的含量显著高于其他处理( $P<0.05$ );而花色素苷含量的变化与之相反,随遮荫度的增大,含量逐渐减少。随处理时间的延长,4 个处理下叶片花色素苷含量都有明显上升趋势,尤其是在 1 月份,增幅达 40%以上;叶绿素与类胡萝卜素含量变化趋势相似,CK 与 C1 处理的含量稍有提高,C2 处理的含量整体变化比较平稳,但这 3 组处理的含量一直很低( $<0.5 \text{ mg g}^{-1}$ ),C3 处理则表现为先减少后增加的趋势。整体来看,3 种色素的 CK 与 C1 处理差异都不显著。

由表 2 可以看出,除 CK 外,类胡萝卜素/叶绿素与花色素苷/叶绿素的比值均随遮荫度的增大而减小,CK 及 C1 处理的叶片中类胡萝卜素/叶绿

## 2 结果和分析

### 2.1 不同遮荫度对叶色的影响

RHSCC 的监测值(表 1)表明,‘红叶’南天竹叶色在不同的遮荫处理下存在较大差异。其中,CK 及 C1 处理中叶色监测值多为红色系,但 CK 处理叶片出现焦灼现象,C2 处理既有红色系又有绿色系,而 C3 处理的监测值全属绿色系。同一处理,不同采样时间叶色监测值也有所不同,CK 及 C1 的叶片在红色范围内由深-较浅-更深转化;C2 处理颜色变化较大,在 11 和 12 月份时监测值最多,包括绿色、红色和红灰 3 种色系,说明 C2 处理在这两个时期处于变色期,叶色丰富。CK 及 C1、C2 处理在 1 月份时最终都变为颜色更深沉的红灰色系,C3

素和花色素苷/叶绿素的比值显著高于 C2、C3 处理( $P<0.05$ )。4 个处理的类胡萝卜素/叶绿素的比值在整个试验期间的变化趋势相似,呈先增大后减小的动态变化;花色素苷/叶绿素的比值在后期尤其是 1 月份时显著大于前期( $P<0.05$ ),1 月份 C3 处理花色素苷/叶绿素的比值虽也超过了 100,但仍明显小于另外 3 组处理,是其它处理的 1/5~1/4。

### 2.3 不同遮荫度下可溶性糖含量变化

从表 3 可见,不同遮荫处理的可溶性糖含量的差异不显著,但 4 个处理的可溶性糖含量后期都显著高于前期( $P<0.05$ ),1 月份 4 个处理的可溶性糖含量都比最初 8 月份的至少提高 1.5 倍,这与花色素苷含量后期变化十分相似。

### 2.4 不同遮荫度对叶内矿质元素积累的影响

由表 4 可知,N 含量在 C2、C3 处理下显著高于 CK 和 C1 处理( $P<0.05$ ),说明遮荫程度较大时

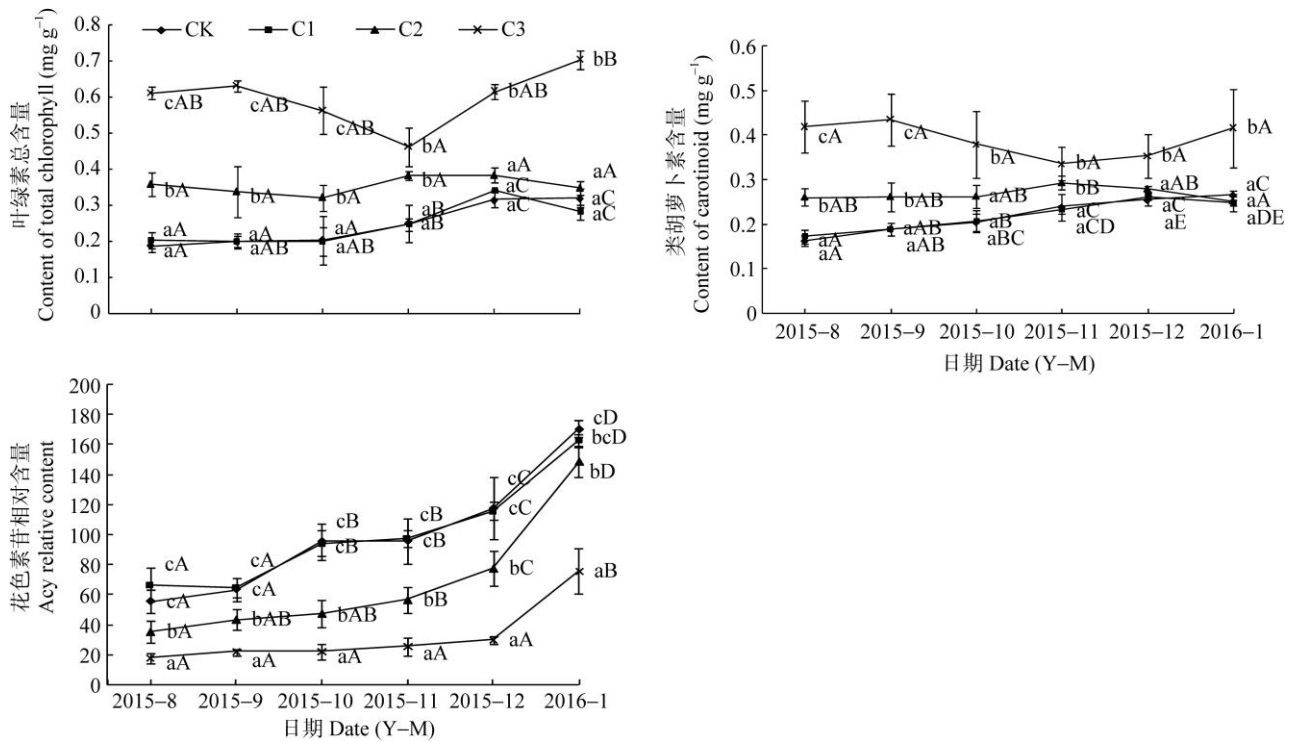


图 1 不同遮荫度处理对‘红叶’南天竹叶片色素的影响。不同小写字母表示同一时期不同处理间差异显著( $P < 0.05$ ), 不同大写字母表示同一处理不同时期差异显著( $P < 0.05$ )。

Fig. 1 Effect of shading on pigment contents of *Nandina domestica* ‘Hongye’. Different small letter indicate significant difference among different treatments in the same date at 0.05 level, and the different capital letters indicate significant difference among different date with the same treatments at 0.05 level.

表 2 不同遮荫度处理下‘红叶’南天竹叶片色素比值变化

Table 2 Changes in ratio of pigments of *Nandina domestica* ‘Hongye’ under different shading treatments

		2015-08	2015-09	2015-10	2015-11	2015-12	2016-01
类胡萝卜素 / 叶绿素 Car / Chl	CK	0.868 ± 0.014bA	0.949 ± 0.014cBC	1.010 ± 0.063bC	0.945 ± 0.041bBC	0.808 ± 0.041cA	0.885 ± 0.035cAB
	C1	0.848 ± 0.043bAB	0.943 ± 0.040cB	1.049 ± 0.103bC	0.970 ± 0.099bB	0.774 ± 0.027bcA	0.815 ± 0.082cA
	C2	0.727 ± 0.016aA	0.784 ± 0.061bBC	0.815 ± 0.009aC	0.766 ± 0.023aAB	0.729 ± 0.024bA	0.764 ± 0.016bAB
	C3	0.688 ± 0.025aB	0.689 ± 0.016aB	0.707 ± 0.078aB	0.729 ± 0.042aB	0.576 ± 0.038aA	0.596 ± 0.024aA
花色素苷 / 叶绿素 Acy / Chl	CK	298.1 ± 53.9cA	318.5 ± 13.5cA	474.9 ± 80.6bBC	400.3 ± 113.2bABC	377.9 ± 93.3cAB	537.1 ± 57.6cC
	C1	316.2 ± 20.1cA	332.2 ± 23.6cA	488.2 ± 111.1bB	397.0 ± 31.4bAB	341.7 ± 19.2cA	583.0 ± 41.7cC
	C2	99.5 ± 28.3bA	134.2 ± 42.3bA	149.0 ± 37.1aAB	147.6 ± 11.7aAB	201.9 ± 32.0bB	428.4 ± 21.5bC
	C3	29.5 ± 10.4aA	34.2 ± 3.8aAB	38.7 ± 7.9aAB	56.0 ± 20.0aB	49.1 ± 11.6aAB	108.2 ± 17.8aC

同列数据后不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ ), 同行数据后不同大写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )(Duncan 新复极差法)。下同。

Data are analyzed by Duncan method. Data followed different small letters within column and different capital letters within line indicate significant difference at 0.05 level Duncan new multiple range method. The same is following Tables.

表 3 不同遮荫度处理下‘红叶’南天竹叶片可溶性糖含量变化

Table 3 Changes in soluble sugar content of *Nandina domestica* ‘Hongye’ under different shading treatments

	2015-08	2015-09	2015-10	2015-11	2015-12	2016-01
CK	0.313 ± 0.013bAB	0.317 ± 0.009aAB	0.287 ± 0.029aA	0.320 ± 0.021abB	0.366 ± 0.012aC	0.493 ± 0.009aD
C1	0.319 ± 0.017bAB	0.292 ± 0.024aA	0.295 ± 0.020aA	0.311 ± 0.022abAB	0.352 ± 0.021aB	0.560 ± 0.042bC
C2	0.291 ± 0.017bA	0.286 ± 0.010aA	0.333 ± 0.002bB	0.339 ± 0.009bB	0.344 ± 0.015aB	0.579 ± 0.038bC
C3	0.258 ± 0.021aA	0.293 ± 0.018aAB	0.286 ± 0.008aAB	0.281 ± 0.032aAB	0.329 ± 0.024aB	0.597 ± 0.037bC

表4 不同遮荫度处理下矿质元素积累量(mg g<sup>-1</sup>)Table 4 Accumulation (mg g<sup>-1</sup>) of mineral element under different shading treatments

	N	P	K	Ca	Mg	Fe
CK	11.894 ±0.126b	0.956 ±0.041a	4.029 ±0.087a	7.468 ±1.263b	0.724 ±0.067a	0.460 ±0.044b
C1	11.090 ±0.100a	1.247 ±0.045b	4.532 ±0.087b	6.410 ±1.055b	0.686 ±0.033a	0.320 ±0.044a
C2	13.056 ±0.218c	1.397 ±0.012c	4.884 ±0.151c	4.157 ±0.946a	0.685 ±0.013a	0.353 ±0.059ab
C3	12.838 ±0.003c	1.023 ±0.051a	3.879 ±0.087a	3.358 ±0.903a	0.658 ±0.049a	0.343 ±0.110ab

氮含量较高; P 和 K 含量在 CK 与 C3 处理下显著低于 C1 和 C2 处理( $P<0.05$ ), 说明光照较强或遮荫程度较大, 都不利于叶片 P 积累; Ca 含量随遮荫度的增加逐渐减少, 说明光照有利于钙的积累; 而 Fe、Mg 含量在 4 个处理间无显著差异, 说明遮荫可能对这两种元素在叶片中的积累影响不大。

## 2.5 相关性分析

相关分析表明(表 5), 色素含量与可溶性糖和矿

质元素含量间有很大的相关性。其中, 花色素苷含量与可溶性糖、Ca 含量间呈显著正相关( $P<0.05$ ), 与 N 含量呈显著负相关( $P<0.05$ ), 与 P、K、Fe、Mg 含量间呈正相关关系, 但未达显著水平; 叶绿素含量与 N 含量间呈显著正相关( $P<0.05$ ), 与 K、Ca 含量呈显著负相关( $P<0.05$ ), 与 P、Fe、Mg 含量呈负相关, 但不显著; 类胡萝卜素含量只与 K 含量存在显著负相关( $P<0.05$ ); 类胡萝卜素/叶绿素与花色素苷/叶绿素均与 N 含量呈显著负相关, 与 Ca 含量呈显著正相关。

表5 色素含量与可溶性糖和矿质元素含量的相关性

Table 5 Correlation between pigment content and contents of soluble sugar, mineral elements

	叶绿素 Chl	类胡萝卜素 Car	花色素苷 Acy	类胡萝卜素/叶绿素 Car/Chl	花色素苷/叶绿素 Acy/Chl
可溶性糖 Soluble sugar	0.151	0.105	0.671*	0.503	0.713*
氮 N	0.536*	0.397	-0.560*	-0.805*	-0.682*
磷 P	-0.323	-0.395	0.256	0.144	0.266
钾 K	-0.558*	-0.600*	0.463	0.329	0.463
钙 Ca	-0.612*	-0.466	0.689*	0.746*	0.732*
镁 Mg	-0.296	-0.174	0.465	0.505	0.471
铁 Fe	-0.313	-0.318	0.189	0.158	0.170

\*:  $P<0.05$

## 3 讨论和结论

叶片色素含量和比例直接影响叶色的表达<sup>[18-20]</sup>。本研究表明, 遮荫对‘红叶’南天竹叶片的色素含量及比例有明显影响。叶绿素及类胡萝卜素含量随遮荫度增加而增高, 表明‘红叶’南天竹为进行正常的光合作用有逐渐适应弱光环境的能力。而花色素苷含量的变化与叶绿素的相反, 这与于晓南等<sup>[21]</sup>对‘美人’梅(*Prunus ×blireiana*)的研究结果相似。色素比例在 4 种遮荫度下也存在明显差异, 特别是花色素苷/叶绿素是决定‘红叶’南天竹叶色表达的直接因素。刘雪梅等<sup>[22]</sup>对红、黄、绿三类色系的榉树(*Zelkova schneideriana*)研究表明, 红色系榉树的叶色表达与叶绿素/花色素苷的比值变化显著相关, 黄色系榉树的叶色表达与叶绿素/类胡萝卜素的比值变化密切相关。

相关研究表明, 花色素苷的合成与碳水化合物的代谢有关<sup>[23]</sup>, 特别是与可溶性糖含量显著正相关<sup>[24]</sup>, 可溶性糖可能作为花色素苷代谢过程中的前体物质或信号分子, 促进花色素苷的形成<sup>[25]</sup>。本研究表明, 4 个处理间叶片的可溶性糖含量差异虽不显著, 但处理后期可溶性糖含量大量增加, 与花色素苷含量迅速增加的时期相吻合。相关性结果也表明, 可溶性糖含量与花色素苷含量呈显著正相关, 表明可溶性糖对花色素苷的形成有一定促进作用, 这与前人的研究结果一致<sup>[22,26-27]</sup>。但遮荫处理对二者的影响又不完全一致, 说明光照可能还通过对其他物质的影响来促进花色素苷的合成积累。

某些矿质元素能以化合物或离子态形式促进花色素苷的合成, 不同矿质元素对植物的色彩影响不同。本研究表明, 叶片中矿质元素的积累受不同遮荫度影响存在较大差异。遮荫利于叶片中 N 的积

累, Andersen 等<sup>[28]</sup>的研究也表明在植株的同一位置, 随遮荫度的增加, 叶片中 N 积累增多。而光照促进叶片中 Ca 的积累, 植物内 Ca 的长距离运输主要发生在木质部, 其运输的动力是蒸腾作用, 光照利于蒸腾作用的进行。相关性结果表明, ‘红叶’南天竹叶片中 N 的积累与叶绿素含量呈显著正相关, 这也与榉树<sup>[29]</sup>的研究结果相一致。N 参与叶绿素的合成, 叶片中积累大量的 N 有利于叶绿素的合成<sup>[30]</sup>。而 Ca 的积累与叶绿素含量呈显著负相关, 与花色素苷含量呈显著正相关, 说明 Ca 对叶片的呈色有一定的促进作用。对荔枝(*Litchi chinensis*)<sup>[31]</sup>、红花檵木(*Loropetalum chinense* var. *rubrum*)<sup>[32]</sup>的研究表明, Ca<sup>2+</sup>对果皮与叶片的呈色有一定的增色作用。Weiss 等<sup>[33]</sup>研究表明, 赤霉素(GAs)促进花色素苷生物合成, Ca<sup>2+</sup>参与 GAs 信号转导作用。还有研究报道, Ca 参与调节花色素苷积累的糖传导途径<sup>[34]</sup>。由此可见, Ca 对花色素苷合成的促进作用可能是通过调节植物体内激素和糖的合成转运实现的。全光照和重度遮荫都不利于 P 的积累, P 含量与花色素苷含量虽呈正相关关系, 但相关系数不大。这与 Oren-Shamir 等<sup>[35]</sup>和 Messenger 等<sup>[36]</sup>认为缺 P 有利于花色素苷的表达结果不同, 与胡静静等<sup>[37]</sup>认为 P 显著影响黄连木(*Pistacia chinensis*)花色素苷含量的结果也有差异。K 可以促进糖的合成和运输, 而糖作为能源物质, 为花色素苷合成提供碳骨架, K 含量与花色素苷含量呈正相关, K<sup>+</sup>可提高杜鹃红山茶(*Camellia azalea*)<sup>[38]</sup>花色素苷的稳定性。在榉树的整个转色期中, 不同单株叶片中 Fe 与 Mg 含量整体变化都不大, 与叶绿素、花色素苷含量的相关性也不显著<sup>[29]</sup>, 与本研究结果一致。对紫薇(*Lagerstroemia indica*)<sup>[39]</sup>、卫矛(*Euonymus alatus*)<sup>[40]</sup>、风信子(*Hyacinthus* sp.)<sup>[41]</sup>等的研究也表明 Mg<sup>2+</sup>对花色素苷基本没影响, 而对北陵鸢尾(*Iris typhifolia*)<sup>[42]</sup>和芍药(*Paeonia lactiflora*)<sup>[43]</sup>的研究表明, Fe<sup>2+</sup>对花色素苷有破坏作用; 对钝裂银莲花(*Anemone obtusiloba*)<sup>[44]</sup>和红花肉桃(*Prunus persica* ‘Blood-flesh’)<sup>[45]</sup>的研究表明, Fe<sup>3+</sup>对花色素苷有稳定作用。Fe 对不同植物花色素苷的影响不同, 可能是因为金属离子对不同种类的花色素苷的影响不同, 有增色效应也有破坏作用, 这与花色素苷本身的分子结构和浓度有很大关系<sup>[46]</sup>。

综上所述, 光照对彩叶植物的影响, 除了通过光合作用为花色素苷的合成提供物质基础外, 还会

影响叶内矿质元素的积累, 而使叶内色素含量及比例发生变化, 进而影响叶片呈色。从园林应用上来说, 在 30% 的疏荫光照环境下, ‘红叶’南天竹的生长呈色最佳, 观赏性最好。

## 参考文献

- [1] JIANG W B, ZHUANG M, HAN H Z, et al. Progress on color emerging mechanism and photosynthetic characteristics of colored-leaf plants [J]. *Acta Hort Sin*, 2005, 32(2): 352–358. doi: 10.3321/j.issn:0513-353X.2005.02.042.  
姜卫兵, 庄猛, 韩浩章, 等. 彩叶植物呈色机理及光合特性研究进展 [J]. *园艺学报*, 2005, 32(2): 352–358. doi: 10.3321/j.issn:0513-353X.2005.02.042.
- [2] BRAND M H. Shade influences plant growth, leaf color, and chlorophyll content of *Kalmia latifolia* L. cultivars [J]. *Hort Sci*, 1997, 32(2): 206–208.
- [3] TIAN Y, ZHANG H H, WANG J, et al. Effects of shade measures on anthocyanin contents and photosynthetic energy distribution in leaves of *Prunus cerasifera* Ehrhart f. *atropurpurea* Jacq seedlings [J]. *J CS Univ For Technol*, 2013, 33(6): 64–69.  
田野, 张会慧, 王娟, 等. 遮荫对紫叶李幼苗叶片花色素苷含量和光合能量分配的影响 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2013, 33(6): 64–69.
- [4] LIPPHARDT S, BRETTSCHEIDER R, KREUZALER F, et al. UV-inducible transient expression in parsley protoplasts identifies regulatory cis-elements of a chimeric *Antirrhinum majus* chalcone synthase gene [J]. *EMBO J*, 1988, 7(13): 4027–4033.
- [5] WANG H C, HUANG X M, HU G B, et al. Studies on the relationship between anthocyanin biosynthesis and related enzymes in litchi pericarp [J]. *Sci Agri Sin*, 2004, 37(12): 2028–2032. doi: 10.3321/j.issn:0578-1752.2004.12.043.  
王惠聪, 黄旭明, 胡桂兵, 等. 荔枝果皮花青苷合成与相关酶的关系研究 [J]. *中国农业科学*, 2004, 37(12): 2028–2032. doi: 10.3321/j.issn:0578-1752.2004.12.043.
- [6] YU X N, ZHANG Q X. Anthocyanin in ornamental plant and color express [J]. *Sci Silv Sin*, 2002, 38(3): 147–153. doi: 10.3321/j.issn:1001-7488.2002.03.026.  
于晓南, 张启翔. 观赏植物的花色素苷与花色 [J]. *林业科学*, 2002, 38(3): 147–153. doi: 10.3321/j.issn:1001-7488.2002.03.026.
- [7] SHU J C, PENG C Y, LIU J Q, et al. Progress on chemical constituents and pharmacology of *Nandina domestica* [J]. *Chin Trad Patent Med*, 2013, 35(2): 372–375. doi: 10.3969/j.issn.1001-1528.2013.02.041.

- 舒积成, 彭财英, 刘建群, 等. 南天竹化学成分及药理研究进展 [J]. 中成药, 2013, 35(2): 372–375. doi: 10.3969/j.issn.1001-1528.2013.02.041.
- [8] PENG C Y, LIU J Q, ZHANG R, et al. A new alkaloid from the fruit of *Nandina domestica* Thunb. [J]. Nat Prod Res, 2014, 28(15): 1159–1164. doi: 10.1080/14786419.2014.921166.
- [9] BI S F, ZHU G Q, WU J, et al. Chemical composition and antioxidant activities of the essential oil from *Nandina domestica* fruits [J]. Nat Prod Res, 2016, 30(3): 362–365. doi: 10.1080/14786419.2015.1057584.
- [10] TANG L, LIU Y Q. Studied on the theory of the color change of *Nandina domestica* fruits [J]. Hunan For Sci Technol, 2007, 34(4): 20–21,32. doi: 10.3969/j.issn.1003-5710.2007.04.006.
- 唐丽, 刘友全. 南天竹果实变色机理研究 [J]. 湖南林业科技, 2007, 34(4): 20–21,32. doi: 10.3969/j.issn.1003-5710.2007.04.006.
- [11] SHIN C S, LI H X. Drought resistance assessment of four shrub species including *Nandina domestica* for extensive green roof [J]. Korean J Agri For Meteor, 2014, 16(4): 267–273. doi: 10.5532/KJAFM.2014.16.4.267.
- [12] WANG C, YIN Q P, CHEN H F, et al. Cutting propagation of *Nandina domestica* [J]. China For Sci Technol, 2012, 26(4): 126–128. doi: 10.3969/j.issn.1000-8101.2012.04.033.
- 王春, 尹庆平, 陈慧芳, 等. 南天竹扦插快繁技术 [J]. 林业科技开发, 2012, 26(4): 126–128. doi: 10.3969/j.issn.1000-8101.2012.04.033.
- [13] ПОЧИНОК Ф. H. JING J H, DING Z R. Translated. Biochemistry Analysis Methods for Plant [M]. Beijing: Science Press, 1981: 229–263.
- (苏)波钦诺克. 荆家海, 丁钟荣. 译. 植物生物化学分析方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1981: 229–263.
- [14] PIRIE A, MULLINS M G. Changes in anthocyanin and phenolics content of grapevine leaf and fruit tissues treated with sucrose, nitrate, abscisic acid [J]. Plant Physiol, 1976, 58(4): 478–472. doi: 10.1104/pp.58.4.468.
- [15] LI H S. Principle and Technology of Plant Physiology and Biochemistry Experiment [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003: 10–78.
- 李合生. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 10–78.
- [16] MA J J, ZHANG L B. Change of mineral nutrient elements content in growing period of *Cerasus humilis* [J]. Acta Hort Sin, 2004, 31(2): 165–168. doi: 10.3321/j.issn:0513-353X.2004.02.005.
- 马建军, 张立彬. 野生欧李生长期矿质营养元素含量的变化 [J]. 园艺学报, 2004, 31(2): 165–168. doi: 10.3321/j.issn:0513-353X.2004.02.005.
- [17] LIU K L, GAO J L, WANG L G. Study on dynamic balance assimilation of N, P and K in soybean [J]. Chin J Oil Crop Sci, 2004, 26(1): 51–54. doi: 10.3321/j.issn:1007-9084.2004.01.012.
- 刘克礼, 高聚林, 王立刚. 大豆对氮、磷、钾的平衡吸收动态的研究 [J]. 中国油料作物学报, 2004, 26(1): 51–54. doi: 10.3321/j.issn:1007-9084.2004.01.012.
- [18] SINGH S, SINGH S O. Photosynthetic and non-photosynthetic pigments in croton varieties [J]. J Andaman Sci Assoc, 1988, 4(1): 77–78.
- [19] GE Y X, WANG L S, ZHOU X H, et al. Correlation between the leaf color and pigments composition of *Cotinus coggygia* in Fragrant Hills Park and their temporal and spatial variation [J]. Sci Silv Sin, 2011, 47(4): 38–42.
- 葛雨萱, 王亮生, 周肖红, 等. 香山黄栌叶色和色素组成的相互关系及时空变化 [J]. 林业科学, 2011, 47(4): 38–42.
- [20] YANG S H, ZHU Y L, MA Y T, et al. Correlation between leaf color and pigment composition of the *Populus × euramericana* ‘Quanhong’ leaves in growing season [J]. J NE For Univ, 2013, 41(7): 63–68. doi: 10.3969/j.issn.1000-5382.2013.07.015.
- 杨淑红, 朱延林, 马永涛, 等. 生长季全红杨叶色与色素组成的相关性 [J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(7): 63–68. doi: 10.3969/j.issn.1000-5382.2013.07.015.
- [21] YU X N, ZHANG Q X. Effects of light intensity and quality on leaf color expression of *Prunus × blireiana* [J]. J Beijing For Univ, 2001, 23(S1): 36–38.
- 于晓南, 张启翔. 光强与光质对“美人”梅叶色的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2001, 23(S1): 36–38.
- [22] LIU X M, JIN X L, WANG X L, et al. Studies on the pigment content change rule in the leaf color expression period of 3 groups of leaf color *Zelkova schneideriana* [J]. J Henan Agri Univ, 2014, 48(5): 596–601. doi: 10.16445/j.cnki.1000-2340.2014.05.018.
- 刘雪梅, 金晓玲, 汪晓丽, 等. 3 类色系榉树叶色表达期色素含量变化规律研究 [J]. 河南农业大学学报, 2014, 48(5): 596–601. doi: 10.16445/j.cnki.1000-2340.2014.05.018.
- [23] SCHABERG P G, van den BERG A K, MURAKAMI P F, et al. Factors influencing red expression in autumn foliage of sugar maple trees [J]. Tree Physiol, 2003, 23(5): 325–333.
- [24] RONG L P, LI Q Z, LI S S, et al. Physiological changes of leaf color of *Acer buergerianum* and mutant plants during color-changing period [J]. Jiangsu J Agri Sci, 2011, 27(5): 1089–1092. doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2011.05.031.

- 荣立苹, 李倩中, 李淑顺, 等. 三角枫及其变异株转色期叶色变化生理 [J]. 江苏农业学报, 2011, 27(5): 1089–1092. doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2011.05.031.
- [25] LORETI E, ALPI A, PERATA P. Glucose and disaccharide-sensing mechanisms modulate the expression of  $\alpha$ -amylase in barley embryos [J]. *Plant Physiol*, 2000, 123(3): 939–948. doi: 10.1104/pp.123.3.939.
- [26] SHI B S, MENG J Z, LIU D Y, et al. The study on physiological and biochemical characteristics in different color leaves of *Parthenocissus quinquefolia* in autumn [J]. *Acta Agri Boreal Sin*, 2009, 24(S1): 172–175.
- 史宝胜, 孟建朝, 刘冬云, 等. 秋季不同色泽五叶地锦叶片生理生化特性的研究 [J]. 华北农学报, 2009, 24(S1): 172–175.
- [27] CHU A X, ZHANG Y Z, TIAN Y F. Physiological changes of leaves of several fall color trees during color changing period in autumn and winter [J]. *J NE For Univ*, 2012, 40(11): 40–43. doi: 10.3969/j.issn.1000-5382.2012.11.011.
- 楚爱香, 张要战, 田永芳. 几种秋色叶树种秋冬转色期叶色变化的生理特性 [J]. 东北林业大学学报, 2012, 40(11): 40–43. doi: 10.3969/j.issn.1000-5382.2012.11.011.
- [28] ANDERSEN R A, KASPERBAUER M J, BURTON H R. Shade during growth-effects on chemical composition and leaf color of air-cured burley tobacco [J]. *Agron J*, 1985, 77(4): 543–54. doi: 10.2134/agronj1985.00021962007700040009x.
- [29] ZHANG M, HU L B, ZHOU P, et al. Physiological and biochemical changes in *Zelkova serrata* leaves during leaf color transformation in autumn [J]. *Sci Silv Sin*, 2015, 51(8): 44–51. doi: 10.11707/j.1001-7488.20150806.
- 张敏, 黄利斌, 周鹏, 等. 榉树秋季转色期叶色变化的生理生化 [J]. 林业科学, 2015, 51(8): 44–51. doi: 10.11707/j.1001-7488.20150806.
- [30] HUANG C N, LU X P, XIAO Y M, et al. Effect of nitrogen application on expression of key enzyme genes in pathway of Ponkan leaf nitrogen assimilation and chlorophyll biosynthesis [J]. *J Fruit Sci*, 2014, 31(1): 7–12.
- 黄成能, 卢晓鹏, 肖玉明, 等. 施氮对椴柑叶片氮同化叶绿素合成关键酶基因表达的影响 [J]. 果树学报, 2014, 31(1): 7–12.
- [31] YAO H W, ZENG Q P, LAO Y M, et al. Effects of food additives on the stability of litchi anthocyanin [J]. *Food Sci*, 2006, 27(5): 152–156. doi: 10.3321/j.issn:1002-6630.2006.05.031.
- 姚伙旺, 曾秋平, 劳永民, 等. 食品添加剂对荔枝果皮花色苷稳定性影响的研究 [J]. 食品科学, 2006, 27(5): 152–156. doi: 10.3321/j.issn:1002-6630.2006.05.031.
- [32] LI X L, LI J Y, FAN Z Q. Extraction and characterization of anthocyanidins from *Loropetalum chinense* var. *rubrum* Yieh leaves [J]. *Food Sci*, 2011, 32(20): 57–62.
- 李辛雷, 李纪元, 范正琪. 红花檵木叶片花色苷提取及其性质研究 [J]. 食品科学, 2011, 32(20): 57–62.
- [33] WEISS D, van der LUIT A, KNEGT E, et al. Identification of endogenous gibberellins in petunia flowers (induction of anthocyanin biosynthetic gene expression and the antagonistic effect of abscisic acid) [J]. *Plant Physiol*, 1995, 107(3): 696–702.
- [34] VITRAC X, LARRONDE F, KRISA S, et al. Sugar sensing and  $Ca^{2+}$ -calmodulin requirement in *Vitis vinifera* cells producing anthocyanins [J]. *Phytochemistry*, 2000, 53(6): 659–665. doi: 10.1016/S0031-9422(99)00620-2.
- [35] OREN-SHAMIR M, LEVI-NISSIM A. Temperature effects on the leaf pigmentation of *Cotinus coggygria* ‘Royal Purple’ [J]. *J Hort Sci*, 1997, 72(3): 425–432. doi: 10.1080/14620316.1997.11515530.
- [36] MESSENGER A S, HRUBY B A. Response of interveinally chlorotic red maple trees treated with medicaps or by soil acidification [J]. *J Environ Hort*, 1990, 8(1): 5–9.
- [37] HU J J, SHEN X, LI X F, et al. Relationships of leaf color changes and soluble sugars and mineral elements in leaves of *Pistacia chinensis* in autumn [J]. *Sci Silv Sin*, 2010, 46(2): 80–86.
- 胡静静, 沈向, 李雪飞, 等. 黄连木秋季叶色变化与可溶性糖和矿质元素的关系 [J]. 林业科学, 2010, 46(2): 80–86.
- [38] LI X L, LI J Y, FAN Z Q. Extraction and characterization of the flower pigment of *Camellia azalea* [J]. *Sci Silv Sin*, 2011, 47(1): 79–84.
- 李辛雷, 李纪元, 范正琪. 杜鹃红山茶花色苷提取及其性质 [J]. 林业科学, 2011, 47(1): 79–84.
- [39] YAN L. Extraction and stability of red pigment from *Lagerstroemia indica* flowers [J]. *Nat Prod Res Dev*, 2014, 26(3): 414–418,443.
- 晏丽. 紫薇花红色素的提取及稳定性的研究 [J]. 天然产物研究与开发, 2014, 26(3): 414–418,443.
- [40] YUE H, YU M. Study on extraction and stability of anthocyanin in *Euonymus alatus* leaves [J]. *J Henan Agri Sci*, 2014, 43(4): 110–113. doi: 10.3969/j.issn.1004-3268.2014.04.024.
- 岳华, 于淼. 卫矛叶片花色苷的提取及稳定性研究 [J]. 河南农业科学, 2014, 43(4): 110–113. doi: 10.3969/j.issn.1004-3268.2014.04.024.
- [41] TANG D Q, XU Y Q, YUAN Y, et al. Effects of physical and chemical factors on anthocyanin stability in *Hyacinthus* [J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci)*, 2016, 40(4): 69–73. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2016.04.011.
- 唐东芹, 徐怡倩, 袁媛, 等. 理化因素对风信子花色苷稳定性的影响 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2016, 40(4): 69–73. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2016.04.011.



- [42] FU Y, XU Y, WAN Z Z, et al. A study on extraction and stability of pigment of *Iris typhifolia* [J]. Acta Agri Univ Jiangxi, 2015, 37(4): 719–724. doi: 10.13836/j.jjau.2015109.  
付尧, 许言, 万宗喆, 等. 北陵鸢尾花色素的提取及稳定性研究 [J]. 江西农业大学学报, 2015, 37(4): 719–724. doi: 10.13836/j.jjau.2015109.
- [43] ZHAO D Q, HAO Z J, TAO J. Effect of physical and chemical factors on coloring of anthocyanins obtained from herbaceous peony (*Paeonia lactiflora* Pall.) [J]. J Jilin Agri Univ, 2015, 37(6): 687–693. doi: 10.13327/j.jjlau.2015.2797.  
赵大球, 郝召君, 陶俊. 理化因子对芍药花色苷呈色的影响 [J]. 吉林农业大学学报, 2015, 37(6): 687–693. doi: 10.13327/j.jjlau.2015.2797.
- [44] XUE D Y, LIU Z J, GAO W, et al. Components and stability analysis of the petal pigments in different colored *Anemone obtusiloba* petals [J]. Pratac Sci, 2015, 32(10): 1569–1575. doi: 10.11829/j.issn.1001–0629.2015-0030.  
薛德艳, 刘左军, 高望, 等. 钝裂银莲花花色苷成分及其稳定性 [J]. 草业科学, 2015, 32(10): 1569–1575. doi: 10.11829/j.issn.1001–0629.2015-0030.
- [45] WANG L, SUN S X, SHAO Y D, et al. Extraction and stability of the anthocyanin from blood-flesh peach [J]. Sci Technol Food Ind, 2014, 35(24): 113–117,122. doi: 10.13386/j.issn1002–0306.2014.24.015.  
王露, 孙双勋, 邵焯丹, 等. 红肉桃花色苷的提取纯化及稳定性研究 [J]. 食品工业科技, 2014, 35(24): 113–117,122. doi: 10.13386/j.issn1002–0306.2014.24.015.
- [46] WANG W Q, DENG J H, WEI Y Z, et al. Research progress on synthesis and stability of grape anthocyanins [J]. Chin Brew, 2014, 33(5): 10–14. doi: 10.11882/j.issn.0254–5071.2014.05.003.  
王维茜, 邓洁红, 魏一枝, 等. 葡萄花色苷的合成及稳定性研究进展 [J]. 中国酿造, 2014, 33(5): 10–14. doi: 10.11882/j.issn.0254–5071.2014.05.003.