

氮、磷、钾肥配施对‘红叶’南天竹叶片色素和可溶性糖含量的影响及相关性分析

孙泽晨, 任文, 潘远智^①, 于伟, 刘加文

(四川农业大学风景园林学院, 四川 成都 611130)

摘要:以2年生‘红叶’南天竹(*Nandina domestica* ‘Hongye’)盆栽苗为实验材料,根据 $L_{16}(4^5)$ 正交实验设计进行3因素(包括氮、磷和钾肥)4水平(N单株施用量分别为0.0、18.4、36.8和55.2 mg, P_2O_5 单株施用量分别为0.0、14.4、28.8和43.2 mg, K_2O 单株施用量分别为0.0、0.8、1.6和2.4 mg)施肥实验,对2015年11月5日至2016年1月20日期间各组叶片的光合色素(包括叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素和类胡萝卜素)、花色素苷和可溶性糖含量进行了比较;在此基础上,对叶片色素和可溶性糖含量及各肥料单株施用量进行了Pearson相关性分析。结果表明:总体来看,各组的光合色素和可溶性糖含量显著高于对照(N、 P_2O_5 和 K_2O 单株施用量均为0.0 mg)组,而花色素苷含量则显著低于对照组。其中,T14(N、 P_2O_5 和 K_2O 单株施用量分别为55.2、14.4和1.6 mg)、T15(N、 P_2O_5 和 K_2O 单株施用量分别为55.2、28.8和0.8 mg)和T16(N、 P_2O_5 和 K_2O 单株施用量分别为55.2、43.2和0.0 mg)组的光合色素含量均较高,T2(N、 P_2O_5 和 K_2O 单株施用量分别为0.0、14.4和0.8 mg)、T3(N、 P_2O_5 和 K_2O 单株施用量分别为0.0、28.8和1.6 mg)和T4(N、 P_2O_5 和 K_2O 单株施用量分别为0.0、43.2和2.4 mg)组的花色素苷含量均较高,T3和T4组的可溶性糖含量均较低。极差分析结果表明:N单株施用量对光合色素含量的影响最大, K_2O 单株施用量的影响最小;N单株施用量对花色素苷和可溶性糖含量的影响最大, P_2O_5 单株施用量的影响最小。相关性分析结果表明:N单株施用量与各光合色素含量呈极显著正相关,与可溶性糖含量呈显著正相关,与花色素苷含量呈极显著负相关;而 P_2O_5 和 K_2O 单株施用量与上述指标的相关性均不显著。各光合色素含量间存在极显著正相关,并与可溶性糖含量呈显著正相关,与花色素苷含量呈极显著负相关。此外,花色素苷含量与可溶性糖含量呈显著负相关。研究结果显示:高氮能够延长‘红叶’南天竹的绿叶期,低氮能够促进其叶片呈现红色,因此,在园林栽培过程中应根据实际需要施肥。

关键词:‘红叶’南天竹;氮、磷、钾肥配施;光合色素;花色素苷;可溶性糖;相关性分析

中图分类号: Q945; S506.2; S795.9 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2017)03-0059-10

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2017.03.08

Effects of combined application of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers on contents of pigments and soluble sugar in leaf of *Nandina domestica* ‘Hongye’ and correlation analysis SUN Zechen, REN Wen, PAN Yuanzhi^①, YU Wei, LIU Jiawen (College of Landscape Architecture, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2017, 26(3): 59-68

Abstract: Taking two-year-old pot seedlings of *Nandina domestica* ‘Hongye’ as experimental materials, fertilization experiment with three factors (including nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers) and four levels (N applying amount per plant of 0.0, 18.4, 36.8, and 55.2 mg, respectively, P_2O_5 applying amount per plant of 0.0, 14.4, 28.8, and 43.2 mg, respectively, K_2O applying amount per plant of 0.0, 0.8, 1.6, and 2.4 mg, respectively) was set up according to $L_{16}(4^5)$ orthogonal

收稿日期: 2017-02-23

基金项目: 四川省学术和技术带头人培养项目

作者简介: 孙泽晨(1993—),男,陕西渭南人,硕士研究生,主要从事园林植物培育与应用方面的研究。

^①通信作者 E-mail: sepyzls@163.com

experimental design. Contents of photosynthetic pigments (including chlorophyll *a*, chlorophyll *b*, total chlorophyll, and carotenoid), anthocyanin, and soluble sugar in leaf of each group during period from 5th November, 2015 to 20th January, 2016 were compared. On this basis, Pearson correlation analysis on contents of pigments and soluble sugar, and applying amount per plant of different fertilizers were analyzed. The results show that on the whole, photosynthetic pigment and soluble sugar contents of each group are significantly higher than those of the control (all N, P₂O₅, and K₂O applying amount per plant of 0.0 mg) group, while anthocyanin content is significantly lower than that of the control group. In which, photosynthetic pigment contents of T14 (N, P₂O₅, and K₂O applying amount per plant of 55.2, 14.4, and 1.6 mg, respectively), T15 (N, P₂O₅, and K₂O applying amount per plant of 55.2, 28.8, and 0.8 mg, respectively), and T16 (N, P₂O₅, and K₂O applying amount per plant of 55.2, 43.2, and 0.0 mg, respectively) groups are higher, anthocyanin contents of T2 (N, P₂O₅, and K₂O applying amount per plant of 0.0, 14.4, and 0.8 mg, respectively), T3 (N, P₂O₅, and K₂O applying amount per plant of 0.0, 28.8, and 1.6 mg, respectively), and T4 (N, P₂O₅, and K₂O applying amount per plant of 0.0, 43.2, and 2.4 mg, respectively) groups are higher, soluble sugar contents of T3 and T4 groups are lower. The range analysis result shows that the effect of N applying amount per plant on photosynthetic pigment contents is the largest, and that of K₂O applying amount per plant is the smallest. The effects of N applying amount per plant on anthocyanin and soluble sugar contents are the largest, and those of P₂O₅ applying amount per plant are the smallest. The correlation analysis results show that there are extremely significantly positive correlations of N applying amount per plant with photosynthetic pigment contents, and a significantly positive correlation with soluble sugar content, and an extremely significantly negative correlation with anthocyanin content; while correlations of P₂O₅ and K₂O applying amount per plant with the above indexes are not significant. There are extremely significantly positive correlations among photosynthetic pigment contents, and there are significantly positive correlations of them with soluble sugar content, and extremely significantly negative correlations with anthocyanin content. Otherwise, there is a significantly negative correlation of anthocyanin content with soluble sugar content. It is suggested that high nitrogen can prolong the green leaf stage of *N. domestica* 'Hongye', while low nitrogen can promote its leaf to appear red, therefore, during process of garden cultivation, fertilizers should be applied according to actual needs.

Key words: *Nandina domestica* 'Hongye'; combined application of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers; photosynthetic pigment; anthocyanin; soluble sugar; correlation analysis

叶色是植物自身遗传因子和外部环境因子共同作用的结果,彩叶植物通过调控叶中色素的种类、含量及分布形成多种叶色^[1-2]。通常情况下,叶绿素含量下降、花色素苷含量升高是彩叶植物叶片失绿显红的重要原因^[3-5]。相关研究结果表明:适度缺氮、缺磷或同时缺少氮和磷均能够促使彩叶植物叶片的花色素苷含量增加^[6-7],施钾能够促使彩叶植物叶片的花色素苷和可溶性糖含量显著升高^[8-9],提高彩叶植物叶片的观赏性,说明施肥对彩叶植物叶色有重要影响,这对于人工调控彩叶植物叶片观赏性具有重要作用。

'红叶'南天竹(*Nandina domestica* 'Hongye')为南天竹属(*Nandina* Thunb.)植物南天竹的栽培品种,集观叶和观果价值于一身,属于优良的地被和色块树种。目前,已有许多关于南天竹的研究报道^[10-15],但关于其叶色方面的研究报道却较少^[16],在一定程度上限制了南天竹在园林配置中的推广和应用。

文国琴等^[16]认为,南天竹叶色与叶片的花色素苷和叶绿素含量有关,并且,其红叶的可溶性糖含量明显高于绿叶。鉴于此,作者以2年生'红叶'南天竹盆栽苗为实验材料,根据L₁₆(4⁵)正交实验设计进行了3因素4水平施肥实验,对不同氮、磷、钾肥配施条件下叶片色素和可溶性糖含量的变化进行了比较,并对色素和可溶性糖含量及氮、磷、钾肥单株施用量进行了Pearson相关性分析,以期揭示'红叶'南天竹在生长发育过程中的需肥规律,为提高'红叶'南天竹的观赏性研究提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 材料

选择苗高15~20 cm且长势一致的2年生'红叶'南天竹盆栽苗,栽植于上口口径15 cm、高12 cm、口径10 cm的塑料花盆中,每盆1株。栽培基质为园

土,经风干、碾碎后,过孔径 3 mm 筛网,消毒,备用;土壤的碱解氮、速效磷和速效钾含量分别为 81.32、10.98 和 55.45 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 6.2。使用的氮肥为尿素[$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, N 质量分数为 46%,西陇化工股份有限公司],磷肥为过磷酸钙[$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, P_2O_5 质量分数为 12%,成都市科龙化工试剂厂],钾肥为氯化钾(KCl , K_2O 质量分数为 62%,西陇化工股份有限公司)。

1.2 方法

1.2.1 正交实验设计及施肥方法 于 2015 年 9 月至 2016 年 1 月,根据 $L_{16}(4^5)$ 正交实验设计进行 3 因素 4 水平施肥实验,整个实验过程在四川农业大学成都校区农场 4 号温室大棚内完成。3 因素包括氮、磷和钾肥,分别于 2015 年 9 月 5 日、9 月 20 日、10 月 5 日和 10 月 20 日进行液体施肥。其中,氮肥溶液中 N 质量浓度为 0、46、92 和 138 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,磷肥溶液中 P_2O_5 质量浓度为 0、36、72 和 108 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,钾肥溶液中 K_2O 质量浓度为 0、2、4 和 6 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$;将各肥料溶液按照实验设定的组合均匀浇在植株根部土壤中,每次每株浇灌 100 mL。经计算,N 单株施用量的 4 个水平分别为 0.0、18.4、36.8 和 55.2 mg, P_2O_5 单株施用量的 4 个水平分别为 0.0、14.4、28.8 和 43.2 mg, K_2O 单株施用量的 4 个水平分别为 0.0、0.8、1.6 和 2.4 mg。共 16 个处理组,每组 5 盆,各 3 个重复,共 240 盆,采取随机区组排列。对照(CK)组浇等量蒸馏水,即 N、 P_2O_5 和 K_2O 单株施用量均为 0.0 mg,编号 T1;其余 15 个处理组依次编号 T2 至 T16。

1.2.2 叶片采集及指标测定方法 分别于 2015 年 11 月 5 日、11 月 20 日、12 月 5 日和 12 月 20 日,以及 2016 年 1 月 5 日和 1 月 20 日,剪取各处理组植株中上部 3~5 枚新鲜叶片,将同一处理组的叶片混合,去除中脉后剪碎、混匀,用于测定光合色素、花色素苷和可溶性糖含量,各指标均重复测定 3 次。

1.2.2.1 光合色素含量测定 采用丙酮-乙醇混合液浸提法^[17]测定叶片的叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量,实际操作略有改动。称取新鲜叶片碎片 0.10 g,置于带盖离心管中,加入丙酮-乙醇混合液 [$V(\text{丙酮}):V(\text{无水乙醇})=1:1$] 15 mL,避光浸泡至叶片发白。以丙酮-乙醇混合液作为空白对照,使用 756 型紫外分光光度计(上海光学仪器厂)测定波长 470、649 和 665 nm 处的 OD 值。并且,根据叶绿素 a 和叶绿素 b 含量计算总叶绿素含量。

1.2.2.2 花色素苷含量测定 参考 Pirie 等^[18]的方法测定叶片的花色素苷含量,实际操作略有改动。称取新鲜叶片碎片 0.10 g,置于带盖离心管中,加入浓度 0.1 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐酸甲醇溶液 10 mL,盖好盖后,置于 32 $^{\circ}\text{C}$ 光照培养箱中暗培养 4 h,取上清液,使用 756 型紫外分光光度计测定波长 535 nm 处的 OD 值。

1.2.2.3 可溶性糖含量测定 采用蒽酮比色法^[19]测定新鲜叶片的可溶性糖含量。

1.3 数据处理和分析

采用 EXCEL 2010 和 SPSS 19.0 统计分析软件进行数据处理和统计分析。采用 Duncan's 新复极差法对数据进行多重比较,并进行极差分析;对氮、磷、钾肥单株施用量以及色素和可溶性糖含量进行 Pearson 相关性分析。

2 结果和分析

2.1 对叶片光合色素含量的影响

氮、磷、钾肥配施对‘红叶’南天竹叶片叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和类胡萝卜素含量的影响分别见表 1、表 2、表 3 和表 4。

2.1.1 对叶绿素 a 含量的影响 由表 1 可见:总体上看,各组叶片的叶绿素 a 含量显著高于对照(CK, N、 P_2O_5 和 K_2O 单株施用量均为 0.0 mg)组,并随时间推移呈波动变化趋势。2015 年 11 月 5 日, T16 组(N、 P_2O_5 和 K_2O 单株施用量分别为 55.2、43.2 和 0.0 mg)的叶绿素 a 含量最高,较 CK 组升高了 88.10%; T14(N、 P_2O_5 和 K_2O 单株施用量分别为 55.2、14.4 和 1.6 mg)和 T15(N、 P_2O_5 和 K_2O 单株施用量分别为 55.2、28.8 和 0.8 mg)组的叶绿素 a 含量也较高,分别较 CK 组升高了 78.57% 和 64.29%。2015 年 11 月 20 日, T15 组的叶绿素 a 含量最高,较 CK 组升高了 163.64%; T14 和 T10(N、 P_2O_5 和 K_2O 单株施用量分别为 36.8、14.4 和 2.4 mg)组的叶绿素 a 含量也较高,分别较 CK 组升高了 151.52% 和 148.48%。2015 年 12 月 5 日, T16 组的叶绿素 a 含量最高,较 CK 组升高了 128.95%; T15 和 T14 组的叶绿素 a 含量也较高,分别较 CK 组升高了 110.53% 和 107.89%。2015 年 12 月 20 日, T14 组的叶绿素 a 含量最高,较 CK 组升高了 111.26%; T16 和 T13(N、 P_2O_5 和 K_2O 单株施用量分别为 55.2、0.0 和 2.4 mg)组的叶绿素 a 含量也较高,分别较 CK 组升高了

97.44%和87.18%。2016年1月5日,T14组的叶绿素a含量最高,较CK组升高了251.85%;T12(N、P₂O₅和K₂O单株施用量分别为36.8、43.2和0.8mg)和T15组的叶绿素a含量也较高,分别较CK组升高了218.52%和203.70%。2016年1月20日,T13组的叶绿素a含量最高,较CK组升高了600.00%;T15和T12组的叶绿素a含量也较高,分别较CK组升高了530.00%和480.00%。

极差分析结果表明:N单株施用量对‘红叶’南天竹叶片叶绿素a含量的影响最大,P₂O₅单株施用量的影响次之,K₂O单株施用量的影响最小。

2.1.2 对叶绿素b含量的影响 由表2可见:总体上看,各组叶片的叶绿素b含量显著高于CK组,并随时间推移呈波动变化趋势。2015年11月5日,T16组的叶绿素b含量最高,较CK组升高了100.00%;T14和T15组的叶绿素b含量也较高,分别较CK组升高了78.57%和64.29%。2015年11月20日,T15组的叶绿素b含量最高,较CK组升高了181.82%;T16和T14组的叶绿素b含量也较高,分别较CK组升高了163.64%和154.55%。2015年12月5日,T16组的叶绿素b含量最高,较CK组升高了

130.77%;T15、T9(N、P₂O₅和K₂O单株施用量分别为36.8、0.0和1.6mg)和T12组的叶绿素b含量也较高,分别较CK组升高了123.08%、107.69%和107.69%。2015年12月20日,T14组的叶绿素b含量最高,较CK组升高了138.46%;T13、T15和T16组的叶绿素b含量也较高,均较CK组升高了107.69%。2016年1月5日,T14组的叶绿素b含量最高,较CK组升高了250.00%;T12和T13组的叶绿素b含量也较高,均较CK组升高了200.00%。2016年1月20日,T13组的叶绿素b含量最高,较CK组升高了575.00%;T15和T16组的叶绿素b含量也较高,分别较CK组升高了500.00%和450.00%。

极差分析结果表明:N单株施用量对‘红叶’南天竹叶片叶绿素b含量的影响最大,P₂O₅单株施用量的影响次之,K₂O单株施用量的影响最小。

2.1.3 对总叶绿素含量的影响 由表3可见:总体上看,各组叶片的总叶绿素含量显著高于CK组,并随时间推移呈波动变化趋势。2015年11月5日,T16组的总叶绿素含量最高,较CK组升高了94.55%;T14和T15组的总叶绿素含量也较高,分别较CK组升高了81.82%和67.27%。2015年11月

表1 氮、磷、钾肥配施对‘红叶’南天竹叶片叶绿素a含量的影响($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 1 Effect of combined application of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers on chlorophyll a content in leaf of *Nandina domestica* ‘Hongye’ ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

处理组 Treatment group	单株施用量/mg Applying amount per plant			不同日期(YYYY-MM-DD)叶片的叶绿素a含量/mg·g ⁻¹ Chlorophyll a content in leaf at different dates (YYYY-MM-DD)					
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	2015-11-05	2015-11-20	2015-12-05	2015-12-20	2016-01-05	2016-01-20
T1(CK)	0.0	0.0	0.0	0.42±0.03h	0.33±0.04f	0.38±0.00h	0.39±0.03h	0.27±0.02gh	0.10±0.00i
T2	0.0	14.4	0.8	0.53±0.01fg	0.37±0.08f	0.42±0.01h	0.37±0.02h	0.21±0.02h	0.15±0.03i
T3	0.0	28.8	1.6	0.51±0.01g	0.37±0.04f	0.38±0.01h	0.31±0.05i	0.25±0.02h	0.29±0.01fg
T4	0.0	43.2	2.4	0.56±0.02ef	0.47±0.02e	0.38±0.02h	0.46±0.02g	0.33±0.02g	0.25±0.04gh
T5	18.4	0.0	0.8	0.58±0.03de	0.63±0.01d	0.58±0.04e	0.59±0.04e	0.52±0.03f	0.39±0.07e
T6	18.4	14.4	0.0	0.64±0.03bc	0.57±0.05d	0.71±0.02d	0.51±0.04fg	0.60±0.02e	0.41±0.05e
T7	18.4	28.8	2.4	0.59±0.00de	0.57±0.05d	0.49±0.02g	0.47±0.02fg	0.33±0.03g	0.22±0.01h
T8	18.4	43.2	1.6	0.51±0.04g	0.57±0.04d	0.54±0.06ef	0.52±0.02f	0.48±0.05f	0.32±0.05f
T9	36.8	0.0	1.6	0.65±0.04bc	0.80±0.00abc	0.79±0.03b	0.64±0.05de	0.81±0.06bc	0.52±0.01cd
T10	36.8	14.4	2.4	0.67±0.02b	0.82±0.05ab	0.72±0.01cd	0.66±0.05cd	0.78±0.08cd	0.50±0.03d
T11	36.8	28.8	0.0	0.55±0.03efg	0.45±0.01e	0.52±0.02fg	0.53±0.02f	0.63±0.03e	0.48±0.03d
T12	36.8	43.2	0.8	0.68±0.02b	0.74±0.03c	0.76±0.05bc	0.66±0.02cd	0.86±0.02b	0.58±0.01bc
T13	55.2	0.0	2.4	0.61±0.05cd	0.76±0.04bc	0.72±0.01cd	0.73±0.03b	0.79±0.00cd	0.70±0.04a
T14	55.2	14.4	1.6	0.75±0.01a	0.83±0.03ab	0.79±0.01b	0.82±0.03a	0.95±0.01a	0.54±0.02cd
T15	55.2	28.8	0.8	0.69±0.02b	0.87±0.02a	0.80±0.03a	0.72±0.04bc	0.82±0.07bc	0.63±0.05b
T16	55.2	43.2	0.0	0.79±0.03a	0.81±0.03ab	0.87±0.02a	0.77±0.03ab	0.72±0.02d	0.55±0.05cd
R ²⁾	0.40	0.09	0.06						

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant difference ($P<0.05$).

²⁾ R: 极差 Range.

表2 氮、磷、钾肥配施对‘红叶’南天竹叶片叶绿素 *b* 含量的影响 ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 2 Effect of combined application of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers on chlorophyll *b* content in leaf of *Nandina domestica* ‘Hongye’ ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

处理组 Treatment group	单株施用量/mg Applying amount per plant			不同日期(YYYY-MM-DD)叶片的叶绿素 <i>b</i> 含量/mg · g ⁻¹ Chlorophyll <i>b</i> content in leaf at different dates (YYYY-MM-DD)					
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	2015-11-05	2015-11-20	2015-12-05	2015-12-20	2016-01-05	2016-01-20
T1 (CK)	0.0	0.0	0.0	0.14±0.01i	0.11±0.01h	0.13±0.01fg	0.13±0.01gh	0.06±0.00g	0.04±0.00j
T2	0.0	14.4	0.8	0.17±0.01fgh	0.13±0.02fgh	0.14±0.01ef	0.13±0.01gh	0.06±0.01g	0.06±0.00ij
T3	0.0	28.8	1.6	0.16±0.01gh	0.12±0.02gh	0.10±0.01g	0.11±0.02h	0.06±0.01g	0.11±0.01gh
T4	0.0	43.2	2.4	0.18±0.02efg	0.14±0.01fg	0.11±0.01fg	0.17±0.02ef	0.06±0.01g	0.09±0.01hi
T5	18.4	0.0	0.8	0.20±0.03cde	0.21±0.02d	0.18±0.03d	0.22±0.01c	0.11±0.01ef	0.13±0.02fg
T6	18.4	14.4	0.0	0.19±0.01def	0.18±0.02e	0.24±0.03bc	0.18±0.02de	0.12±0.00de	0.14±0.02ef
T7	18.4	28.8	2.4	0.17±0.02fgh	0.16±0.01ef	0.16±0.01de	0.15±0.01fg	0.06±0.00g	0.07±0.01ij
T8	18.4	43.2	1.6	0.15±0.02hi	0.15±0.01ef	0.17±0.02de	0.17±0.01ef	0.10±0.01f	0.15±0.05ef
T9	36.8	0.0	1.6	0.21±0.01cd	0.27±0.02b	0.27±0.02ab	0.21±0.01cd	0.14±0.02c	0.17±0.00def
T10	36.8	14.4	2.4	0.22±0.02bcd	0.26±0.02bc	0.23±0.02c	0.22±0.04c	0.17±0.02b	0.15±0.01ef
T11	36.8	28.8	0.0	0.17±0.01fgh	0.13±0.01fgh	0.16±0.01de	0.19±0.01de	0.13±0.01cd	0.18±0.01de
T12	36.8	43.2	0.8	0.20±0.01cde	0.24±0.01c	0.27±0.04ab	0.22±0.01c	0.18±0.01b	0.20±0.01cd
T13	55.2	0.0	2.4	0.20±0.02cde	0.27±0.01b	0.25±0.01bc	0.27±0.00b	0.18±0.02b	0.27±0.02a
T14	55.2	14.4	1.6	0.25±0.02b	0.28±0.03ab	0.24±0.01bc	0.31±0.01a	0.21±0.00a	0.19±0.01cd
T15	55.2	28.8	0.8	0.23±0.01bc	0.31±0.01a	0.29±0.03a	0.27±0.02b	0.17±0.01b	0.24±0.03ab
T16	55.2	43.2	0.0	0.28±0.01a	0.29±0.03ab	0.30±0.01a	0.27±0.02b	0.17±0.01b	0.22±0.03bc
R ²⁾	0.13	0.03	0.02						

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant difference ($P < 0.05$).

²⁾ R: 极差 Range.

表3 氮、磷、钾肥配施对‘红叶’南天竹叶片总叶绿素含量的影响 ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 3 Effect of combined application of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers on total chlorophyll content in leaf of *Nandina domestica* ‘Hongye’ ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

处理组 Treatment group	单株施用量/mg Applying amount per plant			不同日期(YYYY-MM-DD)叶片的总叶绿素含量/mg · g ⁻¹ Total chlorophyll content in leaf at different dates (YYYY-MM-DD)					
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	2015-11-05	2015-11-20	2015-12-05	2015-12-20	2016-01-05	2016-01-20
T1 (CK)	0.0	0.0	0.0	0.55±0.04k	0.44±0.06g	0.51±0.01gh	0.52±0.04f	0.32±0.02ghi	0.14±0.01i
T2	0.0	14.4	0.8	0.71±0.02ij	0.51±0.10g	0.56±0.01g	0.50±0.03f	0.27±0.03i	0.21±0.04hi
T3	0.0	28.8	1.6	0.67±0.02j	0.50±0.06b	0.48±0.00h	0.42±0.07g	0.31±0.03hi	0.40±0.02ef
T4	0.0	43.2	2.4	0.75±0.03hi	0.61±0.03f	0.49±0.03h	0.63±0.04e	0.39±0.03g	0.34±0.05fg
T5	18.4	0.0	0.8	0.79±0.05fgh	0.85±0.02d	0.76±0.07e	0.81±0.04c	0.63±0.04f	0.53±0.09d
T6	18.4	14.4	0.0	0.84±0.02def	0.75±0.06e	0.95±0.04d	0.69±0.06de	0.72±0.03e	0.56±0.06d
T7	18.4	28.8	2.4	0.77±0.02ghi	0.72±0.06e	0.65±0.03f	0.62±0.03e	0.38±0.03gh	0.29±0.02gh
T8	18.4	43.2	1.6	0.67±0.05j	0.72±0.04e	0.72±0.08ef	0.69±0.03de	0.57±0.06f	0.47±0.04de
T9	36.8	0.0	1.6	0.87±0.05cde	1.08±0.02b	1.06±0.05b	0.85±0.06c	0.96±0.09bcd	0.69±0.01bc
T10	36.8	14.4	2.4	0.89±0.04cd	1.09±0.06ab	0.95±0.02d	0.88±0.08c	0.95±0.10cd	0.64±0.04c
T11	36.8	28.8	0.0	0.72±0.04ij	0.59±0.01f	0.69±0.02f	0.72±0.03d	0.75±0.03e	0.65±0.05c
T12	36.8	43.2	0.8	0.89±0.03cd	0.98±0.03c	1.03±0.09bc	0.88±0.03c	1.04±0.03b	0.78±0.01b
T13	55.2	0.0	2.4	0.82±0.06efg	1.03±0.05bc	0.97±0.02cd	1.00±0.03b	0.97±0.02bcd	0.96±0.06a
T14	55.2	14.4	1.6	1.00±0.02b	1.11±0.03ab	1.02±0.01bcd	1.12±0.04a	1.16±0.01a	0.73±0.03bc
T15	55.2	28.8	0.8	0.92±0.02c	1.17±0.04a	1.14±0.05a	0.98±0.06b	0.98±0.07bc	0.88±0.08a
T16	55.2	43.2	0.0	1.07±0.03a	1.10±0.05ab	1.17±0.03a	1.03±0.06b	0.89±0.02c	0.76±0.08b
R ²⁾	0.53	0.12	0.02						

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant difference ($P < 0.05$).

²⁾ R: 极差 Range.

表4 氮、磷、钾肥配施对‘红叶’南天竹叶片类胡萝卜素含量的影响($\bar{X}\pm SD$)¹⁾Table 4 Effect of combined application of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers on carotenoid content in leaf of *Nandina domestica* ‘Hongye’ ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

处理组 Treatment group	单株施用量/mg Applying amount per plant			不同日期(YYYY-MM-DD)叶片的类胡萝卜素含量/mg·g ⁻¹ Carotenoid content in leaf at different dates (YYYY-MM-DD)					
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	2015-11-05	2015-11-20	2015-12-05	2015-12-20	2016-01-05	2016-01-20
T1(CK)	0.0	0.0	0.0	0.19±0.01h	0.16±0.02h	0.18±0.00g	0.20±0.02g	0.15±0.01h	0.08±0.01i
T2	0.0	14.4	0.8	0.24±0.01g	0.19±0.04fg	0.21±0.00f	0.20±0.01g	0.14±0.02h	0.13±0.02h
T3	0.0	28.8	1.6	0.23±0.01g	0.18±0.02gh	0.18±0.00g	0.17±0.02h	0.17±0.02gh	0.18±0.01fg
T4	0.0	43.2	2.4	0.25±0.01fg	0.21±0.01f	0.18±0.01g	0.23±0.01ef	0.19±0.01g	0.16±0.02g
T5	18.4	0.0	0.8	0.26±0.02ef	0.28±0.00d	0.26±0.02d	0.28±0.02d	0.25±0.01f	0.21±0.03ef
T6	18.4	14.4	0.0	0.29±0.01cd	0.24±0.01e	0.31±0.00c	0.24±0.02ef	0.28±0.01e	0.22±0.02e
T7	18.4	28.8	2.4	0.26±0.01ef	0.25±0.02e	0.22±0.01ef	0.22±0.01g	0.17±0.01gh	0.13±0.01h
T8	18.4	43.2	1.6	0.23±0.02g	0.25±0.01e	0.25±0.03d	0.24±0.01ef	0.24±0.02f	0.20±0.01ef
T9	36.8	0.0	1.6	0.29±0.02cd	0.35±0.02b	0.35±0.02ab	0.29±0.03d	0.38±0.03bc	0.27±0.01cd
T10	36.8	14.4	2.4	0.30±0.01c	0.34±0.02bc	0.31±0.00c	0.30±0.02cd	0.37±0.04bc	0.25±0.01d
T11	36.8	28.8	0.0	0.25±0.01fg	0.20±0.00fg	0.24±0.00de	0.25±0.01e	0.30±0.01e	0.25±0.01d
T12	36.8	43.2	0.8	0.30±0.01c	0.32±0.01c	0.33±0.02bc	0.30±0.02cd	0.40±0.02ab	0.29±0.01c
T13	55.2	0.0	2.4	0.27±0.02de	0.32±0.01c	0.32±0.01c	0.33±0.02bc	0.36±0.00cd	0.35±0.02a
T14	55.2	14.4	1.6	0.33±0.01b	0.35±0.01b	0.34±0.01b	0.37±0.02a	0.43±0.01a	0.27±0.00cd
T15	55.2	28.8	0.8	0.30±0.01c	0.39±0.01a	0.37±0.01a	0.32±0.02bc	0.38±0.02bc	0.32±0.02b
T16	55.2	43.2	0.0	0.36±0.01a	0.36±0.02b	0.37±0.01a	0.34±0.02ab	0.34±0.01ab	0.28±0.02c
R ²⁾	0.16	0.04	0.03						

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant difference ($P<0.05$).

²⁾ R: 极差 Range.

20日,T15组的总叶绿素含量最高,较CK组升高了165.91%;T14和T16组的总叶绿素含量也较高,分别较CK组升高了152.27%和150.00%。2015年12月5日,T16组的总叶绿素含量最高,较CK组升高了129.41%;T15和T9组的总叶绿素含量也较高,分别较CK组升高了123.53%和107.84%。2015年12月20日,T14组的总叶绿素含量最高,较CK组升高了115.38%;T16和T13组的总叶绿素含量也较高,分别较CK组升高了98.08%和92.31%。2016年1月5日,T14组的总叶绿素含量最高,较CK组升高了262.50%;T12和T15组的总叶绿素含量也较高,分别较CK组升高了225.00%和206.25%。2016年1月20日,T13组的总叶绿素含量最高,较CK组升高了585.71%;T15和T16组的总叶绿素含量也较高,分别较CK组升高了528.57%和442.86%。

极差分析结果表明:N单株施用量对‘红叶’南天竹叶片总叶绿素含量的影响最大,P₂O₅单株施用量的影响次之,K₂O单株施用量的影响最小。

2.1.4 对类胡萝卜素含量的影响 由表4可见:总体上看,各组叶片的类胡萝卜素含量显著高于CK组,并随时间推移呈波动变化趋势。2015年11月

5日,T16组的类胡萝卜素含量最高,较CK组升高了89.47%;T14、T10、T12和T15组的类胡萝卜素含量也较高,分别较CK组升高了73.68%、57.89%、57.89%和57.89%。2015年11月20日,T15组的类胡萝卜素含量最高,较CK组升高了143.75%;T16、T9和T14组的类胡萝卜素含量也较高,分别较CK组升高了125.00%、118.75%和118.75%。2015年12月5日,T15和T16组的类胡萝卜素含量最高,均较CK组升高了105.56%;T9组的类胡萝卜素含量也较高,较CK组升高了94.44%。2015年12月20日,T14组的类胡萝卜素含量最高,较CK组升高了85.00%;T16和T13组的类胡萝卜素含量也较高,分别较CK组升高了70.00%和65.00%。2016年1月5日,T14组的类胡萝卜素含量最高,较CK组升高了186.67%;T12、T9和T15组的类胡萝卜素含量也较高,分别较CK组升高了166.67%、153.33%和153.33%。2016年1月20日,T13组的类胡萝卜素含量最高,较CK组升高了337.50%;T15和T12组的类胡萝卜素含量也较高,分别较CK组升高了300.00%和262.50%。

极差分析结果表明:N单株施用量对‘红叶’南

天竹叶片类胡萝卜素含量的影响最大, P₂O₅ 单株施用量的影响次之, K₂O 单株施用量的影响最小。

2.2 对叶片花色苷含量的影响

氮、磷、钾肥配施对‘红叶’南天竹叶片花色苷含量的影响见表 5。由表 5 可见: 总体上看, 各组叶片的花色素苷含量显著低于对照(CK, N、P₂O₅ 和 K₂O 单株施用量均为 0.0 mg) 组, 并随时间推移呈逐渐升高的变化趋势, 其中 10 个组的花色素苷含量均在 2016 年 1 月 20 日最高。2015 年 11 月 5 日, T4(N、P₂O₅ 和 K₂O 单株施用量分别为 0.0、43.2 和 2.4 mg) 组的花色素苷含量最高, 较 CK 组升高了 8.11%; 其余各组的花色素苷含量均显著低于 CK 组。2015 年 11 月 20 日, T8(N、P₂O₅ 和 K₂O 单株施用量分别为 18.4、43.2 和 1.6 mg) 组的花色素苷含量最高, 较 CK 组升高了 29.27%; 其余各组的花色素苷含量均显著低于 CK 组。2015 年 12 月 5 日, T2(N、P₂O₅ 和 K₂O 单株施用量分别为 0.0、14.4 和 0.8 mg) 组的花色素苷含量最高, 较 CK 组升高了 61.70%; T3(N、P₂O₅ 和

K₂O 单株施用量分别为 0.0、28.8 和 1.6 mg) 和 T4 组的花色素苷含量也较高, 分别较 CK 组升高了 49.58% 和 22.27%; 并且, 这 3 组的花色素苷含量显著高于 CK 组, 而其余各组的花色素苷含量则低于或显著低于 CK 组。2015 年 12 月 20 日, T2 组的花色素苷含量最高, 较 CK 组升高了 34.62%; 其余各组的花色素苷含量低于或显著低于 CK 组。2016 年 1 月 5 日, T2 组的花色素苷含量最高, 较 CK 组升高了 5.20%; 其余各组的花色素苷含量低于或显著低于 CK 组。2016 年 1 月 20 日, T3 组的花色素苷含量最高, 较 CK 组升高了 7.30%; T4 组的花色素苷含量也较高, 较 CK 组升高了 4.39%; 并且, 这 2 组的花色素苷含量仅略高于 CK 组, 而其余各组的花色素苷含量则低于或显著低于 CK 组。

极差分析结果表明: N 单株施用量对‘红叶’南天竹叶片花色苷含量的影响最大, K₂O 单株施用量的影响次之, P₂O₅ 单株施用量的影响最小。

表 5 氮、磷、钾肥配施对‘红叶’南天竹叶片花色苷含量的影响 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 5 Effect of combined application of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers on anthocyanin content in leaf of *Nandina domestica* ‘Hongye’ ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

处理组 Treatment group	单株施用量/mg Applying amount per plant			不同日期(YYYY-MM-DD)叶片的花色素苷含量/nmol·g ⁻¹ Anthocyanin content in leaf at different dates (YYYY-MM-DD)					
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	2015-11-05	2015-11-20	2015-12-05	2015-12-20	2016-01-05	2016-01-20
T1(CK)	0.0	0.0	0.0	465.80±101.99a	595.24±66.07b	626.52±97.20c	1426.62±65.15b	2473.49±73.62ab	2656.17±65.11ab
T2	0.0	14.4	0.8	363.85±52.24b	391.13±23.33de	1013.10±156.63a	1920.56±128.80a	2602.17±88.51a	2498.70±208.97b
T3	0.0	28.8	1.6	229.44±10.72cde	476.41±50.87c	937.12±66.49a	1344.16±46.48b	2311.69±145.79b	2850.11±113.57a
T4	0.0	43.2	2.4	503.57±54.76a	466.67±54.03cd	766.02±113.03b	1111.15±81.11c	2395.13±244.00ab	2772.73±306.06ab
T5	18.4	0.0	0.8	224.14±50.10cde	330.63±37.74ef	332.14±74.83d	641.78±61.57d	1198.16±236.49de	1723.81±292.24c
T6	18.4	14.4	0.0	295.67±28.65bcd	151.08±49.39h	573.49±105.82c	261.04±30.25g	1348.59±108.83cd	1070.35±161.38ef
T7	18.4	28.8	2.4	255.20±52.87cde	240.37±30.71g	535.93±34.78c	401.52±35.51f	1494.81±95.69c	1004.65±177.44ef
T8	18.4	43.2	1.6	215.80±24.17de	769.49±83.19a	292.32±83.47de	619.59±39.56d	850.54±300.16fg	1451.52±124.86d
T9	36.8	0.0	1.6	116.78±33.44fg	248.49±45.74fg	208.55±47.75def	137.01±27.64hi	436.26±29.19h	631.49±108.98g
T10	36.8	14.4	2.4	184.74±13.53ef	400.33±18.54cde	262.66±30.13de	350.43±7.38f	1217.21±7.80de	831.49±55.36fg
T11	36.8	28.8	0.0	303.14±20.12bc	259.96±62.72fg	572.94±47.37c	520.89±59.02e	884.42±85.97fg	1242.10±146.10de
T12	36.8	43.2	0.8	110.07±26.44fg	81.49±22.53h	113.20±34.93fgh	182.36±25.98gh	708.01±49.65g	633.33±44.85g
T13	55.2	0.0	2.4	37.66±13.64g	287.34±76.84fg	90.37±17.29fgh	117.53±24.81hi	1084.96±116.15ef	1098.81±131.91ef
T14	55.2	14.4	1.6	111.26±76.14fg	80.20±9.14h	42.97±9.92gh	51.41±14.12ij	131.93±6.83i	308.98±24.58h
T15	55.2	28.8	0.8	65.26±10.08g	81.28±12.72h	171.43±11.00efg	180.30±20.10gh	394.81±149.04h	820.56±135.87fg
T16	55.2	43.2	0.0	56.49±12.75g	97.19±16.23h	21.43±2.89h	14.72±3.19j	723.92±20.38g	289.72±133.87h
R ²⁾	1118.21	177.22	221.79						

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant difference ($P < 0.05$).

²⁾ R: 极差 Range.

2.3 对叶片可溶性糖含量的影响

氮、磷、钾肥配施对‘红叶’南天竹叶片可溶性糖含量的影响见表 6。由表 6 可见: 总体上看, 各组叶片的可溶性糖含量显著高于对照(CK, N、P₂O₅ 和 K₂O

单株施用量均为 0.0 mg) 组, 并随时间推移呈“降低—升高—降低”的变化趋势, 其中, CK 组的可溶性糖含量在 2015 年 12 月 20 日最高, 其余各组的可溶性糖含量均在 2015 年 12 月 5 日最高。2015 年 11 月

5日, T2(N、P₂O₅和K₂O单株施用量分别为0.0、14.4和0.8 mg)和T15(N、P₂O₅和K₂O单株施用量分别为55.2、28.8和0.8 mg)组的可溶性糖含量最高,均较CK组升高了25.68%; T13(N、P₂O₅和K₂O单株施用量分别为55.2、0.0和2.4 mg)组的可溶性糖含量也较高,较CK组升高了24.66%。2015年11月20日, T3(N、P₂O₅和K₂O单株施用量分别为0.0、28.8和1.6 mg)组的可溶性糖含量最高,较CK组升高了26.45%; T2和T16(N、P₂O₅和K₂O单株施用量分别为55.2、43.2和0.0 mg)组的可溶性糖含量也较高,分别较CK组升高了24.38%和22.31%。2015年12月5日, T15组的可溶性糖含量最高,较CK组升高了62.94%; T14(N、P₂O₅和K₂O单株施用量分别为55.2、14.4和1.6 mg)和T12(N、P₂O₅和K₂O单株施用量分别为36.8、43.2和0.8 mg)组的可溶性糖含量也较高,分别较CK组升高了60.88%和54.71%。2015年12月20日, T12组的可溶性糖含量最高,较

CK组升高了33.62%; T10(N、P₂O₅和K₂O单株施用量分别为36.8、14.4和2.4 mg)和T13组的可溶性糖含量也较高,分别较CK组升高了28.25%和22.88%。2016年1月5日, T7(N、P₂O₅和K₂O单株施用量分别为18.4、28.8和2.4 mg)组的可溶性糖含量最高,较CK组升高了20.18%; T13和T9(N、P₂O₅和K₂O单株施用量分别为36.8、0.0和1.6 mg)组的可溶性糖含量也较高,分别较CK组升高了18.67%和16.27%。2016年1月20日, T16组的可溶性糖含量最高,较CK组升高了40.67%; T14和T11(N、P₂O₅和K₂O单株施用量分别为36.8、28.8和0.0 mg)组的可溶性糖含量也较高,分别较CK组升高了35.82%和31.34%。

极差分析结果表明: N单株施用量对‘红叶’南天竹叶片可溶性糖含量的影响最大, K₂O单株施用量的影响次之, P₂O₅单株施用量的影响最小。

表6 氮、磷、钾肥配施对‘红叶’南天竹叶片可溶性糖含量的影响($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 6 Effect of combined application of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers on soluble sugar content in leaf of *Nandina domestica* ‘Hongye’ ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

处理组 Treatment group	单株施用量/mg Applying amount per plant			不同日期(YYYY-MM-DD)叶片的可溶性糖含量/mg·g ⁻¹ Soluble sugar content in leaf at different dates (YYYY-MM-DD)					
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	2015-11-05	2015-11-20	2015-12-05	2015-12-20	2016-01-05	2016-01-20
T1 (CK)	0.0	0.0	0.0	2.92±0.33de	2.42±0.34e	3.40±0.47e	3.54±0.48d	3.32±0.03cd	2.68±0.26g
T2	0.0	14.4	0.8	3.67±0.12a	3.01±0.10ab	4.80±0.70bcd	3.91±0.23cd	3.82±0.24abc	3.39±0.15abcde
T3	0.0	28.8	1.6	2.97±0.20de	3.06±0.21a	4.31±0.45d	3.85±0.43cd	3.01±0.27d	2.66±0.36g
T4	0.0	43.2	2.4	2.99±0.11cde	2.76±0.09abcde	4.65±0.31cd	3.82±0.30cd	3.58±0.24abc	2.72±0.18g
T5	18.4	0.0	0.8	3.21±0.25bcde	2.56±0.04cde	4.39±0.41d	4.04±0.41bcd	3.58±0.38abc	3.23±0.13bcdef
T6	18.4	14.4	0.0	3.18±0.26bcde	2.57±0.43cde	4.60±0.24cd	4.03±0.12bcd	3.34±0.37cd	3.10±0.13cdefg
T7	18.4	28.8	2.4	3.23±0.12bcde	2.69±0.33abcde	4.42±0.55d	3.91±0.27cd	3.99±0.18a	2.87±0.24fg
T8	18.4	43.2	1.6	2.85±0.18e	2.67±0.28abcde	4.83±0.13abcd	4.03±0.36bcd	3.71±0.28abc	3.04±0.46defg
T9	36.8	0.0	1.6	2.84±0.15e	2.52±0.16de	4.79±0.52bcd	3.54±0.28d	3.86±0.19ab	3.44±0.23abcd
T10	36.8	14.4	2.4	3.30±0.09abcd	2.51±0.08e	4.86±0.26abcd	4.54±0.31ab	3.73±0.23abc	2.96±0.22efg
T11	36.8	28.8	0.0	3.38±0.19abc	2.76±0.16abcde	4.45±0.42d	4.22±0.15abc	3.70±0.35abc	3.52±0.03abc
T12	36.8	43.2	0.8	3.47±0.23ab	2.64±0.10bcde	5.26±0.13abc	4.73±0.18a	3.66±0.23abc	3.25±0.14bcdef
T13	55.2	0.0	2.4	3.64±0.18a	2.49±0.02e	4.52±0.13cd	4.35±0.06abc	3.94±0.07ab	3.44±0.34abcd
T14	55.2	14.4	1.6	3.10±0.21bcde	2.64±0.18bcde	5.47±0.43ab	4.28±0.11abc	3.45±0.36bcd	3.64±0.18ab
T15	55.2	28.8	0.8	3.67±0.32a	2.92±0.07abcd	5.54±0.32a	3.98±0.25bcd	3.78±0.16abc	3.41±0.03abcde
T16	55.2	43.2	0.0	2.90±0.29de	2.96±0.22abc	5.02±0.14abcd	4.08±0.38bcd	3.57±0.19abc	3.77±0.40a
R ²⁾	0.46	0.24	0.36						

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant difference ($P<0.05$).

²⁾ R: 极差 Range.

2.4 相关性分析

对‘红叶’南天竹叶片色素和可溶性糖含量及氮、磷、钾肥单株施用量进行了 Pearson 相关性分析, 结果见表7。由表7可见: N单株施用量与叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素和类胡萝卜素含量均呈极显著

($P<0.01$) 正相关, 相关系数分别为0.943、0.948、0.946和0.941; 与可溶性糖含量呈显著($P<0.05$) 正相关, 相关系数为0.711; 与花色素苷含量呈极显著负相关, 相关系数为-0.919。P₂O₅和K₂O单株施用量与这些指标的相关性均不显著。

由表7还可见:‘红叶’南天竹叶片的叶绿素 *a*、叶绿素 *b*、总叶绿素、类胡萝卜素、花色素苷和可溶性糖含量间均存在明显的相关性。其中,叶绿素 *a*、叶绿素 *b*、总叶绿素和类胡萝卜素含量间均存在极显著正相关性,相关系数为 0.992~0.999;可溶性糖含量与叶绿素 *a*、叶绿素 *b*、总叶绿素和类胡萝卜素含量均

呈显著正相关,相关系数分别为 0.692、0.714、0.699 和 0.712;花色素苷含量与叶绿素 *a*、叶绿素 *b*、总叶绿素和类胡萝卜素含量均呈极显著负相关,相关系数分别为-0.940、-0.903、-0.932 和-0.925;花色素苷含量与可溶性糖含量呈显著负相关,相关系数为-0.625。

表7 ‘红叶’南天竹叶片色素和可溶性糖含量及氮、磷、钾肥单株施用量的 Pearson 相关性分析¹⁾

Table 7 Pearson correlation analysis on pigment and soluble sugar contents in leaf of *Nandina domestica* ‘Hongye’, and applying amount per plant of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers¹⁾

指标 Index	相关系数 Correlation coefficient								
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Chla	Chlb	Chl	Car	Ant	SS
N	1.000								
P ₂ O ₅	0.000	1.000							
K ₂ O	0.000	0.000	1.000						
Chla	0.943**	-0.012	0.044	1.000					
Chlb	0.948**	-0.023	0.000	0.988**	1.000				
Chl	0.946**	-0.015	0.033	0.999**	0.993**	1.000			
Car	0.941**	0.005	0.037	0.998**	0.992**	0.999**	1.000		
Ant	-0.919**	-0.050	0.011	-0.940**	-0.903**	-0.932**	-0.925**	1.000	
SS	0.711*	0.259	0.042	0.692*	0.714*	0.699*	0.712*	-0.625*	1.000

¹⁾ N: N 单株施用量 N applying amount per plant; P₂O₅: P₂O₅ 单株施用量 P₂O₅ applying amount per plant; K₂O: K₂O 单株施用量 K₂O applying amount per plant; Chla: 叶绿素 *a* 含量 Chlorophyll *a* content; Chlb: 叶绿素 *b* 含量 Chlorophyll *b* content; Chl: 总叶绿素含量 Total chlorophyll content; Car: 类胡萝卜素含量 Carotenoid content; Ant: 花色素苷含量 Anthocyanin content; SS: 可溶性糖含量 Soluble sugar content. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

3 讨论和结论

施肥水平对彩叶植物叶色影响较大^[20]。胡静静等^[21]认为,叶片色素含量和比例直接影响黄连木 (*Pistacia chinensis* Bunge) 的叶色。本研究中,氮、磷、钾肥配施条件下‘红叶’南天竹叶片的叶绿素 *a*、叶绿素 *b*、总叶绿素和类胡萝卜素含量整体高于对照(N、P₂O₅和 K₂O 单株施用量均为 0.0 mg) 组,说明氮、磷、钾肥配施能够促进‘红叶’南天竹叶片中光合色素的合成和积累,减缓光合色素的降解,从而提高叶片的光合作用水平。氮是叶绿素的重要组成部分,施氮水平对植物叶绿素含量有显著影响^[22-24]。本研究中, T14(N、P₂O₅和 K₂O 单株施用量分别为 55.2、14.4 和 1.6 mg)、T15(N、P₂O₅和 K₂O 单株施用量分别为 55.2、28.8 和 0.8 mg) 和 T16(N、P₂O₅和 K₂O 单株施用量分别为 55.2、43.2 和 0.0 mg) 组的叶绿素 *a*、叶绿素 *b* 和总叶绿素含量总体较高,而花色素苷含量却较低,说明高氮能够延长‘红叶’南天竹的绿叶期。

在植物体内,氮和磷的吸收和利用相互影响,因

此,氮和磷的合理配施更利于植物对这 2 种元素的吸收和利用^[25]。钾可以促进植物体内碳水化合物的合成和运输^[26],而碳水化合物可为花色素苷合成提供碳骨架^[27],也可作为信号分子,通过特异信号传导途径诱导花色素苷合成^[28]。Rengel 等^[29]认为,缺氮能够促进玉米 (*Zea mays* Linn.) 叶片中花色素苷的积累。本研究中, T3(N、P₂O₅和 K₂O 单株施用量分别为 0.0、28.8 和 1.6 mg) 和 T4(N、P₂O₅和 K₂O 单株施用量分别为 0.0、43.2 和 2.4 mg) 组‘红叶’南天竹叶片的的花色素苷含量总体较高,但可溶性糖含量却较低,且这 2 个指标呈显著负相关,说明‘红叶’南天竹叶片中花色素苷的合成需要消耗部分可溶性糖。

叶色是植物叶片中各种色素的综合表现。朱书香等^[30]的研究结果表明:色素含量是 4 种李属 (*Prunus* Linn.) 彩叶植物叶片呈色的主要影响因子,并且花色素苷含量越高,叶色越深。本研究中, T2(N、P₂O₅和 K₂O 单株施用量分别为 0.0、14.4 和 0.8 mg)、T3 和 T4 组‘红叶’南天竹叶片的的花色素苷含量总体较高,而叶绿素 *a*、叶绿素 *b* 和总叶绿素含量却较低,说明低氮可促进‘红叶’南天竹叶片花色素苷

的合成,利于其叶片呈现红色。

综上所述,高氮能够有效提高‘红叶’南天竹叶片中的叶绿素含量,促进植株进行光合作用,推迟叶片变红;低氮则能够促进其叶片中花色素苷的合成,使叶片变红,从而提高叶片的观赏价值。在园林栽培过程中,应根据实际需要配施肥料。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 王振兴,于云飞,陈 丽,等.彩叶植物叶片色素组成、结构以及光合特性的研究进展[J].植物生理学报,2016,52(1):1-7.
- [3] 孙明霞,王宝增,范 海,等.叶片中的花色素苷及其对植物适应环境的意义[J].植物生理学通讯,2003,39(6):688-694.
- [4] 陈继卫,沈朝栋,贾玉芳,等.鸡爪槭转色期叶色变化生理研究[J].核农学报,2010,24(1):171-175.
- [5] 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.
- [6] OREN-SHAMIR M, LEVI-NISSIM A. Temperature effects on the leaf pigmentation of *Cotinus coggygria* ‘Royal Purple’ [J]. Journal of Horticultural Science, 1997, 72(3): 425-432.
- [7] MESSENGER A S, HRUBY B A. Response of interveinally chlorotic red maple trees treated with medicaps or by soil acidification [J]. Journal of Environmental Horticulture, 1990, 8(1): 5-9.
- [8] 徐莉莉,姜卫兵,韩 健,等.初夏叶面喷施 KH_2PO_4 和蔗糖对红叶桃叶片色素变化及净光合速率的影响[J].林业科学,2011,47(3):170-174.
- [9] 杨淑红,朱延林,张江涛,等.外施不同浓度 KH_2PO_4 营养液对4年生‘中红杨’叶色的影响[J].上海农业学报,2012,28(3):59-62.
- [10] 刘锦春.南天竹资源利用与开发研究[J].中国野生植物资源,2004,23(6):22-23.
- [11] 于 伟,潘远智,任 文,等.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[J].热带亚热带植物学报,2017,25(4):339-347.
- [12] TANG J, OLSON J D, OCHOA-CORONA F M, et al. *Nandina domestica*, a new host of *Apple stem grooving virus* and *Alternanthera mosaic virus* [J]. Australasian Plant Disease Notes, 2010, 5(1): 25-27.
- [13] KODAI T, HORIUCHI Y, NISHIOKA Y, et al. Novel cycloartane-type triterpenoid from the fruits of *Nandina domestica* [J]. Journal of Natural Medicines, 2010, 64(2): 216-218.
- [14] 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.
- [15] HU H L, LI B, HU W, et al. Development and characterization of microsatellite loci for heavenly bamboo (*Nandina domestica*) [J]. 植物分类与资源学报, 2015, 37(2): 141-144.
- [16] 文国琴,何道文,何 震.南天竹不同叶色与若干生理生化指标关系的研究[J].亚热带植物科学,2005,34(4):38-40.
- [17] 刘家尧,刘 新.植物生理学实验教程[M].北京:高等教育出版社,2010:13-15.
- [18] PIRIE A, MULLINS M G. Changes in anthocyanin and phenolics content of grapevine leaf and fruit tissues treated with sucrose, nitrate, and abscisic acid [J]. Plant Physiology, 1976, 58(4): 468-472.
- [19] 熊庆娥.植物生理学实验教程[M].成都:四川科学技术出版社,2003:81-83.
- [20] 洪 丽,王金刚,龚束芳.彩叶植物叶色变化及相关影响因素研究进展[J].东北农业大学学报,2010,41(6):152-156.
- [21] 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.
- [22] 李灿东,郭 泰,王志新,等.叶面施氮对大豆‘合丰50’叶片叶绿素含量及干物质积累的影响[J].中国土壤与肥料,2014(5):43-46.
- [23] 颜晓艺,林风莲,吴承祯,等.不同施肥处理对桂花品种‘浦城丹桂’幼苗生长和生理的影响及施肥成本分析[J].植物资源与环境学报,2016,25(3):52-61.
- [24] 张金政,刘岳路,李晓东,等.过量施氮对嵌合体‘金旗’玉簪叶色、氮代谢关键酶活性及叶绿体超微结构的影响[J].草业学报,2011,20(5):93-101.
- [25] 陆秀君,葛根塔娜,梅 梅,等.N、P、K配比施肥对美国红枫幼苗生长及叶色变化的影响[J].中南林业科技大学学报,2015,35(5):9-15.
- [26] 郭衍银,徐 坤,王秀峰,等.矿质营养与植物病害机理研究进展[J].甘肃农业大学学报,2003(4):385-393.
- [27] HARA M, OKI K, HOSHINO K, et al. Effects of sucrose on anthocyanin production in hypocotyl of two radish (*Raphanus sativus*) varieties [J]. Plant Biotechnology, 2004, 21(5): 401-405.
- [28] MOALEM-BENO D, TAMARI G, LEITNER-DAGAN Y, et al. Sugar-dependent gibberellin-induced chalcone synthase gene expression in petunia corollas [J]. Plant Physiology, 1997, 113(2): 419-424.
- [29] RENGEL Z, KORDAN H A. Effects of N, P, and K deficiencies on light-dependent anthocyanin formation in *Zea mays* L. seedlings [J]. Journal of Plant Physiology, 1988, 132(1): 126-128.
- [30] 朱书香,杨建民,王中华,等.4种李属彩叶植物色素含量与叶色参数的关系[J].西北植物学报,2009,29(8):1663-1669.

(责任编辑:佟金凤)