

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

颜晓艺^{1a,1b,1c}, 林凤莲^{1a,1c}, 吴承祯^{1c,2,①}, 洪伟^{1a,1c}, 李键^{1a,1c,①}

(1. 福建农林大学: a. 林学院, b. 生命科学学院, c. 福建省高校森林生态系统过程与经营重点实验室, 福建 福州 350002;
2. 武夷学院生态与资源工程学院, 福建 武夷山 354300)

摘要: 采用 $L_9(3^3)$ 设置 3 因素(包括氮、磷和钾肥)3 水平(N 单株施用量分别为 0、10 和 20 g, P_2O_5 单株施用量分别为 0、4 和 8 g, K_2O 单株施用量分别为 0、6 和 12 g) 正交实验, 在 2015 年 3 月和 4 月分 2 次施肥, 对 9 个施肥处理组施肥前后 2 年生桂花品种‘浦城丹桂’(*Osmanthus fragrans* ‘Pucheng Dangui’) 幼苗的生长和生理指标进行测定; 并采用 Pearson 相关性分析法和回归分析法分别对各指标间的相关性以及各生长指标与施肥成本的关系进行分析。结果表明: 与对照组(N、 P_2O_5 和 K_2O 单株施用量均为 0 g) 相比, 各处理组幼苗的株高和地径增长量及全株干质量总体上显著提高($P < 0.05$)。3 月份至 10 月份, 各处理组幼苗叶片的叶绿素 a (Chla) 和叶绿素 b (Chlb) 含量总体呈先升高后降低的变化趋势, 并在 12 月份明显升高; 而施肥后(6 月份至 12 月份) 各处理组叶片的 Chla/Chlb 比值总体呈先降低后升高的变化趋势, 并且在 12 月份显著高于对照组。施肥后, 各处理组叶片的 SOD 和 POD 活性及可溶性蛋白质含量也呈先高后低的变化趋势。相关性分析结果表明: 施肥后, 全株干质量与株高增长量和地径增长量呈极显著正相关($P < 0.01$), 并与 POD 活性呈显著负相关; 株高增长量与地径增长量和 Chla/Chlb 含量比值分别呈极显著和显著正相关; Chla 含量与 Chlb 含量和可溶性蛋白质含量分别呈极显著和显著正相关。回归分析结果表明: 单株施肥成本与幼苗的株高增长量和地径增长量及全株干质量均呈线性关系, 且均呈极显著正相关; 其中, A8(N、 P_2O_5 和 K_2O 单株施用量分别为 20、8 和 6 g) 和 A7(N、 P_2O_5 和 K_2O 单株施用量分别为 20、4 和 0 g) 处理组的幼苗生长指标较高且差异不明显, 但 A8 处理组的单株施肥成本高于 A7 处理组。研究结果表明: 氮、磷和钾肥合理配施能够有效调节‘浦城丹桂’幼苗叶片的光合色素含量和抗氧化酶活性, 并可促进幼苗生长。综合考虑施肥成本和生长指标, 单株分别施用 N 和 P_2O_5 20 和 4 g 较适宜‘浦城丹桂’幼苗的生长。

关键词: 桂花品种‘浦城丹桂’; 施肥处理; 生长指标; 生理指标; 施肥成本

中图分类号: Q945; S685.13.062 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2016)03-0052-10

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2016.03.07

Effect of different fertilizer treatments on growth and physiology of *Osmanthus fragrans* ‘Pucheng Dangui’ seedling and analysis on fertilizer cost YAN Xiaoyi^{1a,1b,1c}, LIN Fenglian^{1a,1c}, WU Chengzhen^{1c,2,①}, HONG Wei^{1a,1c}, LI Jian^{1a,1c,①} (1. Fujian Agriculture and Forestry University: a. College of Forestry, b. College of Life Sciences, c. Fujian Provincial Key Laboratory of Forest Ecosystem Processing and Management, Fuzhou 350002, China; 2. College of Ecology and Resource Engineering, Wuyi University, Wuyishan 354300, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2016, 25(3): 52-61

Abstract: Orthogonal experiment with three factors (including nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers) and three levels (applying amount per plant of N was 0, 10 and 20 g, respectively, that of P_2O_5 was 0, 4 and 8 g, respectively, that of K_2O was 0, 6 and 12 g, respectively) was set up by $L_9(3^3)$, and fertilized at two separate times in March and April, 2015. Growth and physiological indexes of two-year-old seedling of *Osmanthus fragrans* ‘Pucheng Dangui’ in nine fertilizer treatment groups before and

收稿日期: 2016-03-02

基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20123515110011); 福建省科技重大专项(2012NZ0001)

作者简介: 颜晓艺(1989—), 女, 福建泉州人, 硕士研究生, 主要从事森林生态学研究。

①通信作者 E-mail: fjwez@126.com; hmilycau@163.com

after fertilization were determined. And correlations among different indexes and relationship of different growth indexes with fertilizer cost were analyzed by Pearson correlation analysis and regression analysis methods, respectively. The results show that compared with the control group (all of applying amount per plant of N, P_2O_5 and K_2O is 0 g), increments of seedling height and ground diameter, and dry weight of whole plant of seedling of different treatment groups all generally increase significantly ($P < 0.05$). During March to October, contents of chlorophyll *a* (Chl*a*) and chlorophyll *b* (Chl*b*) in leaf of seedling of different treatment groups generally appear the changing trend of firstly increasing and then decreasing, and obviously increase in December, while after fertilization (during June to December), Chl*a*/Chl*b* ratio in leaf of different treatment groups generally appears the changing trend of firstly decreasing and then increasing, and that in December is significantly higher than that of the control group. After fertilization, activities of SOD and POD, and content of soluble protein in leaf of different treatment groups also appear the changing trend of firstly increasing and then decreasing. Correlation analysis result shows that after fertilization, there are extremely significantly positive correlations of dry weight of whole plant with increments of seedling height and ground diameter ($P < 0.01$), and significantly negative correlation with POD activity; there are extremely significantly and significantly positive correlations of increment of seedling height with increment of ground diameter and Chl*a*/Chl*b* ratio, respectively; and there are extremely significantly and significantly positive correlations of Chl*a* content with contents of Chl*b* and soluble protein, respectively. Regression analysis result shows that there are linear relationships of fertilizer cost per plant with increments of seedling height and ground diameter and dry weight of whole plant of seedling, and all of them appear extremely significantly positive correlation. In which, growth indexes of seedling in A8 (applying amount per plant of N, P_2O_5 and K_2O is 20, 8 and 6 g, respectively) and A7 (applying amount per plant of N, P_2O_5 and K_2O is 20, 4 and 0 g, respectively) treatment groups are higher with no significant difference, but fertilizer cost per plant of A8 treatment group is higher than that of A7 treatment group. It is suggested that properly applying nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers can effectively regulate photosynthetic pigment content and antioxidant enzyme activity in leaf of ‘Pucheng Dangui’ seedling, and can promote growth of seedling. Comprehensively considering fertilizer cost and growth indexes, respectively applying 20 and 4 g per plant of N and P_2O_5 is suitable to growth of ‘Pucheng Dangui’ seedling.

Key words: *Osmanthus fragrans* ‘Pucheng Dangui’; fertilizer treatment; growth index; physiological index; fertilizer cost

施肥是培养优质苗木、促进植物快速生长发育和新陈代谢的关键栽培技术环节之一。施肥量不足或过量均可导致生产成本增加,并破坏土壤的结构和养分循环,从而影响植株的健康生长^[1-2]。相关研究结果表明:施用适宜的氮、磷和钾肥能够明显促进植物的生长和发育,使株高和地径等生长指标显著提高^{[3]17-19,[4-5]},相关抗氧化酶活性^{[3]36-37,[1,6-7]}、叶绿素含量^[7-8]及可溶性蛋白质含量^[1]等生理生化指标也有所提高,同时还能够增强植物的抗逆性^[7]和种间竞争力^[9]。然而,不同植物适宜的氮、磷和钾肥的施用量和配比差异较大,因此,针对不同植物筛选适宜的施肥方案具有重要意义。

桂花 (*Osmanthus fragrans* Lour.) 系木犀科 (Oleaceae) 木犀属 (*Osmanthus* Lour.) 常绿灌木或小乔木,为中国十大传统名花之一^[10]。桂花树形优美、四季常青、花香浓郁,广泛用于中国传统园林造景;此外,因其富含丹桂醇、肉豆酸和月桂酸等天然化合

物^[11],桂花在医药产业中也具有较高的应用价值^[12]。主产于福建浦城的‘浦城丹桂’ (‘Pucheng Dangui’) 为桂花的重要品种之一^[13],在城市园林建设中也大量应用。‘浦城丹桂’的生产在浦城县农村经济中占有重要地位,然而,人工栽培的苗木生长缓慢且成树周期长,严重制约了‘浦城丹桂’的生产。为促进‘浦城丹桂’植株的快速生长,需要针对其栽培过程中的平衡施肥和精准施肥技术进行系统研究,尤其要明确氮、磷和钾肥的合理配施方案。目前仅见吴建华^[11]报道了关于‘浦城丹桂’的施肥研究,其研究结果说明氮、磷、钾肥配施优于单施。

作者以‘浦城丹桂’2年生幼苗为研究对象,在大田条件下采用 $L_9(3^3)$ 正交实验设计不同氮、磷、钾施肥组合,比较了不同施肥组合对株高和地径增长量及全株干质量以及叶片中叶绿素含量、抗氧化酶活性和可溶性蛋白质含量的影响,采用 Pearson 相关性分析法对各指标间的相关性进行了分析,并对施肥成本与

各生长指标进行了回归分析,以期筛选出适宜‘浦城丹桂’幼苗生长的施肥组合,为‘浦城丹桂’规模化生产过程中的肥力运筹及抗逆品种选育提供基础研究数据。

1 研究地概况和研究方法

1.1 研究地概况

实验苗圃位于武夷山市武夷学院后山,地理坐标为东经 118°00′32″、北纬 27°44′01″。该区域属中亚热带季风气候,年平均降水量约 1 700 mm,与‘浦城丹桂’传统种植地的气候条件相近。实验地土壤为红壤,0~20 cm 土层的有机质、全氮、全钾和全磷含量分别为 26.08、1.40、1.19 和 0.75 g·kg⁻¹,水解氮、有效磷和速效钾含量分别为 32.14、114.94 和 115.67 mg·kg⁻¹。

1.2 实验材料

供试‘浦城丹桂’2年生幼苗由浦城县林业局提供。所有幼苗均为 2013 年扦插成活且来源于同一无性系的扦插苗,平均株高为 97.76 cm,平均胸径为 6.68 mm。

实验使用的氮肥为尿素[CO(NH₂)₂,浙江晋巨化工有限公司],其中氮的质量分数为 46.3%;磷肥为过磷酸钙[Ca(H₂PO₄)₂,福建省福农农资集团有限公司],其中 P₂O₅ 的质量分数为 12.0%;钾肥为氯化钾(KCl,中化化肥有限公司),其中 K₂O 的质量分数为 60.0%。

1.3 实验方法

1.3.1 样地设置 于 2015 年 3 月,在‘浦城丹桂’幼龄林中随机设置面积 1 m×3 m 的样地 27 个,各样地的立地条件和苗木生长状况基本相似;每块样地平均 20 株幼苗,株距和行距均为 0.5 m;在各样地间设置宽度 1 m 的缓冲带(缓冲带不施肥),样地四角用木桩进行标记。

1.3.2 施肥方法 采用 3 因素 3 水平[L₉(3³)]正交实验设计。3 因素为 N、P₂O₅ 和 K₂O;N 单株施用量的 3 个水平分别为 0、10 和 20 g,P₂O₅ 单株施用量的 3 个水平分别为 0、4 和 8 g,K₂O 单株施用量的 3 个水平分别为 0、6 和 12 g;共 9 个处理组,各 3 次重复;其中,对照组(CK)3 种肥料的单株施用量均为 0 g,其余 8 个处理组依次编号为 A1 至 A8。

每块样地均分别在 2015 年 3 月中旬和 4 月中旬

同法施肥 2 次。根据每块样地的实际幼苗数,按照实验设置的 3 种肥料的单株施用量,将各处理组施肥总量 50% 的肥料溶于 20 L 水中,采用背式喷雾器将肥料溶液均匀喷洒在样地内所有植株的根部土壤中,对照组则喷洒等量蒸馏水。

1.3.3 指标测定方法

1.3.3.1 生长指标测定 在施肥前(2015 年 3 月中旬)和施肥后(2015 年 12 月初),每块样地随机选取 8 株幼苗测量株高和地径,并计算株高和地径的增长量,结果取平均值。于 2015 年 12 月初,在每块样地内随机选取长势均匀的幼苗 3 株,将幼苗根系连同周围土壤一同挖出(尽量保证根系完整),小心去除根系上附着的泥土,用清水洗净;将幼苗分别置于烘箱中,先在 105 ℃ 条件下杀青 30 min,然后于 65 ℃ 条件下烘干至恒质量,称量每株幼苗的全株干质量,结果取平均值。

1.3.3.2 生理指标测定 于 2015 年 3 月中旬(施肥前)、6 月初、8 月初、10 月初和 12 月初,在每块样地中随机选取 5 株幼苗,收集植株上新生枝条中部的成熟叶片 6 枚,用蒸馏水洗净并吸干表面水分,置于液氮中保存、备用。

参照舒展等^[14]的方法测定叶片中的叶绿素含量。取适量叶片,用体积比 1:1 的丙酮-无水乙醇混合液于黑暗条件下浸提 12 h;以体积分数 95% 乙醇为空白,在波长 663 和 645 nm 处分别测定浸提液的吸光值。分别按照公式“Chla = 12.7OD₆₆₃ - 2.69OD₆₄₅”和“Chlb = 22.9OD₆₄₅ - 4.86OD₆₆₃”计算叶片中叶绿素 a (Chla) 和叶绿素 b (Chlb) 的含量,并计算二者含量的比值(Chla/Chlb)。每个指标重复测定 3 次,结果取平均值。

将叶片去脉、剪碎后混匀,称取 0.1 g,加入磷酸缓冲液(pH 7.0)0.9 mL,于冰浴中研磨成匀浆;4 ℃、15 000 r·min⁻¹ 离心 10 min,上清液置于 4 ℃ 条件下保存,用于超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性及可溶性蛋白质含量测定。采用黄嘌呤氧化酶法^[15]测定 SOD 活性;采用愈创木酚法^[16]测定 POD 活性;采用考马斯亮蓝法^[17]测定可溶性蛋白质含量。每个指标重复测定 3 次,结果取平均值。

1.4 数据处理和统计分析

采用 EXCEL 2013 和 SPSS 19.0 软件进行数据处理、分析和绘图;采用单因素方差分析法(one-way ANOVA)和 Univariate 法对实验数据进行方差分析,

并采用 Duncan's 新复极差法进行差异显著性分析和多重比较;采用 Pearson 相关性分析法进行各指标间的相关性分析;采用回归分析法对单株施肥成本与各生长指标间的关系进行分析。

2 结果和分析

2.1 不同施肥处理对‘浦城丹桂’幼苗生长指标的影响

不同施肥处理对‘浦城丹桂’幼苗株高和地径的增长量以及全株干质量的影响见表1。

由表1可见:A3(N、P₂O₅和K₂O单株施用量分别为10、0和6g)至A8(N、P₂O₅和K₂O单株施用量分别为20、8和6g)处理组幼苗的株高和地径的增长量基本上均显著($P<0.05$)高于CK组(对照组,N、P₂O₅和K₂O单株施用量均为0g);其中,A7(N、P₂O₅和K₂O单株施用量分别为20、4和0g)处理组幼苗株高

和地径的增长量均最高,分别为85.55cm和12.63mm,分别为CK组的5.26和1.67倍;A8处理组幼苗株高和地径的增长量也较高,分别为80.17cm和12.24mm,仅略低于A7处理组。A1(N、P₂O₅和K₂O单株施用量分别为0、4和6g)和A2(N、P₂O₅和K₂O单株施用量分别为0、8和12g)处理组幼苗的株高增长量也显著高于CK组,而幼苗的地径增长量虽然也高于CK组,但差异不显著($P>0.05$)。

由表1还可见:A3至A8处理组的幼苗全株干质量基本上显著高于CK组,而A1和A2处理组幼苗的全株干质量虽然也高于CK组,但无显著差异。在A3至A8处理组中,A8处理组幼苗的全株干质量最高(383.30g),为CK组的2.06倍;A7处理组的全株干质量略低于A8处理组,为351.87g;A5(N、P₂O₅和K₂O单株施用量分别为10、8和0g)和A6(N、P₂O₅和K₂O单株施用量分别为20、0和12g)处理组的全株干质量也较高,但均显著低于A8组。

表1 不同施肥处理对桂花品种‘浦城丹桂’幼苗株高和地径的增长量及全株干质量的影响($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 1 Effect of different fertilizer treatments on increments of seedling height and ground diameter, and dry weight of whole plant of *Osmanthus fragrans* ‘Pucheng Dangui’ seedling ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

处理组 Treatment group	单株施用量/g Applying amount per plant			株高增长量/cm Increment of seedling height	地径增长量/mm Increment of ground diameter	全株干质量/g Dry weight of whole plant
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O			
CK	0	0	0	16.27±11.61f	7.55±1.12e	185.80±11.32e
A1	0	4	6	47.77±12.40de	8.58±1.64de	214.20±28.16de
A2	0	8	12	61.59±13.72cd	9.74±1.95cde	214.10±37.30de
A3	10	0	6	40.37±12.68e	10.28±2.24bcd	264.47±25.16cd
A4	10	4	12	63.37±8.17cd	11.30±2.44abc	287.40±20.59bc
A5	10	8	0	65.12±14.92bc	10.81±2.27abcd	310.97±44.53bc
A6	20	0	12	75.65±10.04abc	10.03±1.59bcd	291.60±49.67bc
A7	20	4	0	85.55±16.17a	12.63±1.16a	351.87±43.13ab
A8	20	8	6	80.17±16.48ab	12.24±1.74ab	383.30±52.46a

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示各处理组间同一指标差异显著($P<0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference of the same index among different treatment groups ($P<0.05$).

2.2 不同施肥处理对‘浦城丹桂’幼苗叶片生理指标的影响

2.2.1 对叶绿素含量的影响 不同施肥处理对‘浦城丹桂’幼苗叶片叶绿素a(Chla)和叶绿素b(Chlb)含量以及Chla/Chlb比值的影响见表2。

由表2可见:3月份至10月份期间,A1(N、P₂O₅和K₂O单株施用量分别为0、4和6g)至A8(N、P₂O₅和K₂O单株施用量分别为20、8和6g)处理组叶片的Chla和Chlb含量总体上呈现先升高后降低的变化趋势,大多在10月份降至谷值,并在12月份显著升高

($P<0.05$)。3月份(施肥前),各处理组叶片的Chla和Chlb含量与CK组(对照组,N、P₂O₅和K₂O单株施用量均为0g)无显著差异($P>0.05$);6月份,各处理组叶片的Chla和Chlb含量总体上高于施肥前,其中,A8处理组叶片的Chla和Chlb含量最高且显著高于其他处理组,分别较施肥前升高48.15%和40.35%;而在8月份、10月份和12月份,A6(N、P₂O₅和K₂O单株施用量分别为20、0和12g)处理组叶片的Chla和Chlb含量均最高,并且显著高于CK组和其他处理组。

表 2 不同施肥处理对桂花品种‘浦城丹桂’幼苗叶片叶绿素 *a* (Ch_a) 和叶绿素 *b* (Ch_b) 含量及 Ch_a/Ch_b 比值的影响 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾
 Table 2 Effect of different fertilizer treatments on contents of chlorophyll *a* (Ch_a) and chlorophyll *b* (Ch_b), and Ch_a/Ch_b ratio in leaf of *Osmanthus fragrans* ‘Pucheng Dangui’ seedling ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

处理组 Treatment group	单株施用量/g Applying amount per plant			不同月份叶片的 Ch _a 含量/mg · g ⁻¹ Content of Ch _a in leaf at different months				
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	3 月 March	6 月 June	8 月 August	10 月 October	12 月 December
CK	0	0	0	1.51±0.37aB	1.91±0.12cdeA	1.89±0.03cdA	1.35±0.08cB	1.67±0.01defAB
A1	0	4	6	1.36±0.14aC	2.06±0.14bcdA	1.59±0.06eB	1.05±0.10deD	1.64±0.06efB
A2	0	8	12	1.40±0.22aB	1.78±0.15eA	1.68±0.16deAB	1.02±0.11deC	1.50±0.18fAB
A3	10	0	6	1.43±0.05aC	2.13±0.07bA	2.21±0.14bA	0.93±0.03efD	1.73±0.03deB
A4	10	4	12	1.56±0.10aB	2.09±0.09bcA	2.09±0.10bcA	0.78±0.11fC	2.21±0.11bA
A5	10	8	0	1.58±0.20aAB	1.55±0.06fB	0.98±0.19fC	0.83±0.03fC	1.82±0.13dA
A6	20	0	12	1.33±0.03aE	1.89±0.06deD	2.54±0.06aB	2.13±0.10aC	2.78±0.08aA
A7	20	4	0	1.53±0.25aC	2.19±0.13bA	2.23±0.21bA	1.76±0.11bBC	2.00±0.08cAB
A8	20	8	6	1.62±0.08aC	2.40±0.10aA	1.93±0.05cB	1.18±0.11dD	1.51±0.01fC

处理组 Treatment group	单株施用量/g Applying amount per plant			不同月份叶片的 Ch _b 含量/mg · g ⁻¹ Content of Ch _b in leaf at different months				
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	3 月 March	6 月 June	8 月 August	10 月 October	12 月 December
CK	0	0	0	0.48±0.09abcB	0.64±0.04cdeA	0.65±0.02cdA	0.46±0.04cB	0.66±0.04bcA
A1	0	4	6	0.42±0.03dC	0.68±0.06bcdA	0.53±0.03eB	0.35±0.03dC	0.50±0.07deB
A2	0	8	12	0.44±0.04bcB	0.60±0.04efA	0.59±0.08deA	0.34±0.03deB	0.42±0.06eB
A3	10	0	6	0.50±0.01abcB	0.71±0.03bcA	0.72±0.03bcA	0.34±0.01deC	0.50±0.03deB
A4	10	4	12	0.50±0.05abcB	0.72±0.05bA	0.75±0.03bA	0.29±0.03eC	0.70±0.04bA
A5	10	8	0	0.52±0.06abA	0.56±0.02fA	0.38±0.06fB	0.29±0.01eB	0.57±0.10cdA
A6	20	0	12	0.43±0.03bcD	0.63±0.02deC	0.96±0.02aA	0.80±0.03aB	0.87±0.14aAB
A7	20	4	0	0.51±0.06abcC	0.71±0.05bcAB	0.76±0.10bcA	0.63±0.06bBC	0.60±0.01bcdBC
A8	20	8	6	0.57±0.02aC	0.80±0.05aA	0.69±0.01bcB	0.42±0.02cD	0.42±0.01eD

处理组 Treatment group	单株施用量/g Applying amount per plant			不同月份叶片的 Ch _a /Ch _b 比值 Ch _a /Ch _b ratio in leaf at different months				
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	3 月 March	6 月 June	8 月 August	10 月 October	12 月 December
CK	0	0	0	3.13±0.20abA	2.98±0.03bA	2.92±0.05abcA	2.94±0.09abA	2.52±0.15bB
A1	0	4	6	3.24±0.11aA	3.01±0.05abA	3.01±0.14abA	2.97±0.08abA	3.29±0.51aA
A2	0	8	12	3.18±0.23abB	2.95±0.04bcBC	2.86±0.12bcC	3.02±0.10aBC	3.61±0.12aA
A3	10	0	6	2.85±0.05bcd	2.98±0.03bBC	3.08±0.10aB	2.76±0.07cdD	3.43±0.19aA
A4	10	4	12	3.15±0.14abA	2.89±0.08cB	2.79±0.02cdBC	2.70±0.12dC	3.17±0.05aA
A5	10	8	0	3.04±0.09abAB	2.79±0.06dBC	2.54±0.10cC	2.87±0.01abcBC	3.26±0.39aA
A6	20	0	12	3.10±0.20abAB	2.99±0.05bAB	2.66±0.03deB	2.65±0.02dB	3.25±0.50aA
A7	20	4	0	2.99±0.30abB	3.07±0.03aAB	2.93±0.10abcB	2.81±0.11bcdB	3.33±0.19aA
A8	20	8	6	2.86±0.06bBC	2.99±0.05abB	2.78±0.02cdC	2.80±0.13bcdC	3.64±0.10aA

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示各处理组间同一指标差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference of the same index among different treatment groups ($P < 0.05$); 同行中不同的大写字母表示不同月份间同一指标差异显著 ($P < 0.05$) Different capitals in the same row indicate the significant difference of the same index among different months ($P < 0.05$).

由表 2 还可见:施肥后(6 月份至 12 月份),A1 至 A8 处理组叶片的 Ch_a/Ch_b 比值总体上呈现先降低后升高的变化趋势,大多在 10 月份降至最低;而 CK 组叶片的 Ch_a/Ch_b 比值则总体上呈现逐渐降低的趋势。与施肥前(3 月份)相比,A1、A2(N、P₂O₅ 和 K₂O 单株施用量分别为 0、8 和 12 g)、A4(N、P₂O₅ 和 K₂O 单株施用量分别为 10、4 和 12 g)、A5(N、P₂O₅ 和 K₂O 单株施用量分别为 10、8 和 0 g)和 A6 处理组叶片的

Ch_a/Ch_b 比值降低,而 A3(N、P₂O₅ 和 K₂O 单株施用量分别为 10、0 和 6 g)、A7(N、P₂O₅ 和 K₂O 单株施用量分别为 20、4 和 0 g)和 A8 处理组叶片的 Ch_a/Ch_b 比值则升高。在 12 月份,各处理组叶片的 Ch_a/Ch_b 比值均显著高于 CK 组,但各处理组间无显著差异;其中,A8 处理组叶片的 Ch_a/Ch_b 比值最高(3.64),较施肥前升高 27.27%。

2.2.2 对 SOD 和 POD 活性的影响 不同施肥处理

对‘浦城丹桂’幼苗叶片超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性的影响见表3。

由表3可见:施肥后(6月份至12月份),CK组以及A1至A8处理组叶片的SOD活性均呈现先升高后降低的变化趋势。6月份,各处理组叶片的SOD活性均显著低于施肥前(3月份);10月份各处理组叶片的SOD活性达到最高值,其中A1、A2和A8处理组叶片的SOD活性显著高于CK组,A7处理组叶片的SOD活性显著低于CK组,其余处理组与CK组无显著差异;12月份,各处理组以及CK组叶片的SOD活性均降至最低,显著低于施肥前。相比之下,10月份A1处理组叶片的SOD活性最高,A8处理组叶片的SOD活性也较高且其较施肥前升高46.24%,增幅在所有处理组中最大。

由表3还可见:整个实验期间(3月份至11月份),A1至A8处理组叶片的POD活性均呈现先升高

后降低的变化趋势。其中,A8处理组叶片的POD活性峰值出现在10月份,其余处理组叶片的POD活性峰值均出现在8月份,并且,8月份和10月份各处理组叶片的POD活性均高于CK组。8月份,A1处理组叶片的POD活性最高,但与施肥前相比,A4处理组叶片的POD活性增幅最大,A3和A6处理组也较大;10月份,A2处理组叶片的POD活性最高,但A6处理组叶片的POD活性增幅最大,A7和A4处理组叶片的POD活性增幅也较大。

2.2.3 对可溶性蛋白质含量的影响 不同施肥处理对‘浦城丹桂’幼苗叶片可溶性蛋白质含量的影响见表4。

结果表明:施肥后(6月份至12月份),A1至A8处理组叶片的可溶性蛋白质含量均呈现先升高后降低的变化趋势,而CK组叶片的可溶性蛋白质含量则在实验期间小幅波动且无显著变化。各处理组叶片

表3 不同施肥处理对桂花品种‘浦城丹桂’幼苗叶片超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性的影响($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 3 Effect of different fertilizer treatments on activities of superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD) in leaf of *Osmanthus fragrans* ‘Pucheng Dangui’ seedling ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

处理组 Treatment group	单株施用量/g Applying amount per plant			不同月份叶片的SOD活性/ $U \cdot g^{-1}$ Activity of SOD in leaf at different months				
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	3月 March	6月 June	8月 August	10月 October	12月 December
	CK	0	0	0	1 026.41±18.47abB	1 043.22±41.39aB	1 014.50±18.27cB	1 152.83±42.42bcA
A1	0	4	6	1 050.90±120.05abB	915.97±28.60abC	1 094.83±6.48abcB	1 289.80±25.62aA	229.60±51.58cD
A2	0	8	12	1 103.45±90.77abB	689.51±166.94bcC	1 102.27±7.85abcB	1 273.17±5.78aA	424.53±10.29aD
A3	10	0	6	981.37±100.54abB	785.82±105.14bC	1 138.44±29.10abA	1 177.90±5.38bA	338.72±6.61bD
A4	10	4	12	1 068.43±66.96abA	691.32±89.23bcB	1 106.33±37.59abcA	1 113.59±8.01cdA	454.21±14.00aC
A5	10	8	0	1 151.30±50.17aA	539.95±186.09cdB	1 044.63±131.82bcA	1 191.06±38.33bA	213.73±28.75cC
A6	20	0	12	1 111.90±131.49aA	681.26±90.09bcB	1 161.12±45.04aA	1 181.00±8.77bA	429.62±19.07aC
A7	20	4	0	1 093.56±97.69aA	504.43±134.14cdB	1 096.28±37.59abcA	1 098.79±25.98dA	425.90±14.94aB
A8	20	8	6	861.56±221.27bB	415.60±187.98dC	1 113.78±68.87abcA	1 259.92±22.10aA	353.10±12.12bC

处理组 Treatment group	单株施用量/g Applying amount per plant			不同月份叶片的POD活性/ $U \cdot g^{-1}$ Activity of POD in leaf at different months				
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	3月 March	6月 June	8月 August	10月 October	12月 December
	CK	0	0	0	14.41±3.55aA	16.19±2.47abA	17.48±1.19cA	18.56±1.64cdA
A1	0	4	6	9.52±3.17cdC	9.68±6.25cC	34.48±5.63aA	26.46±1.60abB	14.10±1.71aC
A2	0	8	12	13.28±0.81abB	15.87±1.54abcB	32.63±3.96abA	30.00±2.25aA	13.02±0.98abB
A3	10	0	6	5.65±1.13eC	16.82±1.15aB	27.57±3.53bA	17.47±5.11dB	13.81±1.28aB
A4	10	4	12	6.48±1.30deE	17.39±2.53aC	32.41±3.73abA	23.22±3.80bcB	11.49±0.18bcD
A5	10	8	0	10.85±0.91bcC	12.79±5.37abcC	29.19±2.24bA	23.33±2.25bcB	10.06±2.37cC
A6	20	0	12	6.06±1.46deD	18.63±0.45aB	27.53±1.02bA	26.17±1.79abA	10.56±0.51cC
A7	20	4	0	7.14±0.82deC	17.10±0.29aB	27.95±3.51bA	26.45±3.67abA	9.45±0.03cC
A8	20	8	6	8.30±0.79cdeB	10.06±4.21bcB	26.94±2.55bA	29.45±3.12aA	6.35±0.20dB

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示各处理组间同一指标差异显著($P < 0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference of the same index among different treatment groups ($P < 0.05$); 同行中不同的大写字母表示不同月份间同一指标差异显著($P < 0.05$) Different capitals in the same row indicate the significant difference of the same index among different months ($P < 0.05$).

的可溶性蛋白质含量在 6 月份均显著低于施肥前(3 月份),并在 10 月份则达到最高值;10 月份,A8 处理组叶片的可溶性蛋白质含量最高(8.37 mg·g⁻¹)且增幅也最大,A5 和 A6 处理组叶片的可溶性蛋白质含量的增幅也较大。总体上看,各处理组叶片的 POD

活性在 6 月份均显著低于 CK 组,在 10 月份均显著高于 CK 组,在 8 月份与 CK 组无显著差异;而在 12 月份,仅 A3 和 A6 处理组叶片的 POD 活性显著高于 CK 组,其余处理组与 CK 组无显著差异。

表 4 不同施肥处理对桂花品种‘浦城丹桂’幼苗叶片可溶性蛋白质含量的影响($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 4 Effect of different fertilizer treatments on content of soluble protein in leaf of *Osmanthus fragrans* ‘Pucheng Dangui’ seedling ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

处理组 Treatment group	单株施用量/g Applying amount per plant			不同月份叶片的可溶性蛋白质含量/mg·g ⁻¹ Content of soluble protein in leaf at different months				
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	3 月 March	6 月 June	8 月 August	10 月 October	12 月 December
CK	0	0	0	2.35±0.16aA	2.35±0.47aA	2.24±0.37aA	2.50±0.42fA	2.21±0.39bcA
A1	0	4	6	2.49±0.46aB	1.47±0.03bC	2.12±0.13aBC	4.14±0.53deA	2.22±0.36bcB
A2	0	8	12	2.30±0.26aB	0.87±0.10dcdC	2.08±0.37aBC	3.70±1.51efA	1.94±0.15bcBC
A3	10	0	6	2.55±0.74aC	0.96±0.15dcdD	2.56±0.31aC	4.78±0.40cdeA	3.50±0.49aB
A4	10	4	12	2.70±0.32aB	0.97±0.00cdD	2.18±0.21aC	6.18±0.10bA	2.46±0.34bBC
A5	10	8	0	2.42±0.20aB	0.79±0.16dC	2.36±0.66aB	6.03±0.95bcA	2.44±0.10bcB
A6	20	0	12	2.02±0.11aC	0.65±0.11dD	2.43±0.39aC	5.43±0.55bcdA	3.86±0.11aB
A7	20	4	0	2.51±0.58aB	1.15±0.08bcC	2.62±0.49aB	5.33±0.64bcdA	1.89±0.08cBC
A8	20	8	6	2.33±0.28aB	1.42±0.04bC	2.54±0.60aB	8.37±0.49aA	2.05±0.23bcBC

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示各处理组间同一指标差异显著($P<0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference of the same index among different treatment groups ($P<0.05$); 同行中不同的大写字母表示不同月份间同一指标差异显著($P<0.05$) Different capitals in the same row indicate the significant difference of the same index among different months ($P<0.05$).

2.3 不同施肥处理条件下‘浦城丹桂’幼苗生长和生理指标的相关性分析

对不同施肥条件下‘浦城丹桂’幼苗生长和生理指标进行 Pearson 相关性分析,结果见表 5。结果表明:全株干质量与株高和地径的增长量均呈极显著正相关($P<0.01$)、与过氧化物酶活性呈显著负相关($P<$

0.05),相关系数分别为 0.82、0.93 和 -0.69;株高增长量与地径增长量呈极显著正相关、与 Chla/Chlb 比值呈显著正相关,相关系数分别为 0.85 和 0.67;叶绿素 a 含量与叶绿素 b 含量呈极显著正相关、与可溶性蛋白质含量呈显著正相关,相关系数分别为 0.92 和 0.65;其余各指标间均无显著相关性。

表 5 不同施肥处理条件下桂花品种‘浦城丹桂’幼苗生长和生理指标间的 Pearson 相关性分析结果¹⁾

Table 5 Result of Pearson correlation analysis among growth and physiological indexes of *Osmanthus fragrans* ‘Pucheng Dangui’ seedling under different fertilizer treatment conditions¹⁾

指标 Index	各指标间的相关系数 Correlation coefficient among different indexes								
	DW	ISH	IGD	Chla	Chlb	Chla/Chlb	SP	POD	SOD
DW	1.00								
ISH	0.82**	1.00							
IGD	0.93**	0.85**	1.00						
Chla	0.21	0.35	0.16	1.00					
Chlb	-0.03	0.03	-0.13	0.92**	1.00				
Chla/Chlb	0.49	0.67*	0.60	-0.17	-0.55	1.00			
SP	-0.03	-0.07	-0.13	0.65*	0.57	-0.02	1.00		
POD	-0.69*	-0.42	-0.49	-0.05	-0.07	0.04	0.26	1.00	
SOD	0.33	0.57	0.53	0.47	0.24	0.39	0.14	-0.06	1.00

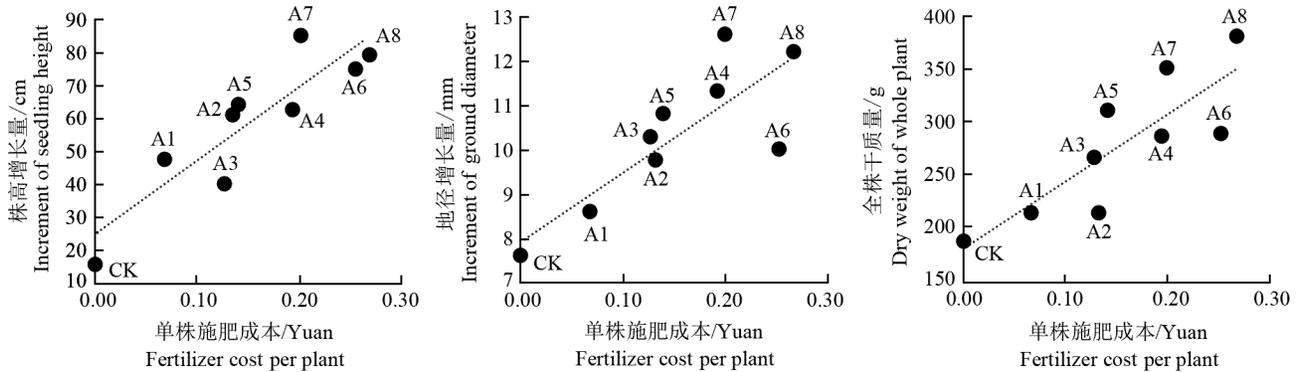
¹⁾ DW: 全株干质量 Dry weight of whole plant; ISH: 株高增长量 Increment of seedling height; IGD: 地径增长量 Increment of ground diameter; Chla: 叶绿素 a 含量 Content of chlorophyll a; Chlb: 叶绿素 b 含量 Content of chlorophyll b; Chla/Chlb: 叶绿素 a 含量与叶绿素 b 含量的比值 Ratio of Chla content to Chlb content; SP: 可溶性蛋白质含量 Content of soluble protein; POD: 过氧化物酶活性 Activity of peroxidase; SOD: 超氧化物歧化酶活性 Activity of superoxide dismutase. *: $P<0.05$; **: $P<0.01$.

2.4 单株施肥成本与‘浦城丹桂’幼苗生长指标的回归分析

根据不同施肥处理组的 N、P₂O₅ 和 K₂O 单株施用量及肥料价格计算施肥成本,结果显示:CK 组(对照组)的 N、P₂O₅ 和 K₂O 单株施用量均为 0 g,单株施肥成本为 0 元;A1 处理组的 N、P₂O₅ 和 K₂O 单株施用量分别为 0、4 和 6 g,A2 处理组的 N、P₂O₅ 和 K₂O 单株施用量分别为 0、8 和 12 g,A3 处理组的 N、P₂O₅ 和 K₂O 单株施用量分别为 10、0 和 6 g,A4 处理组的 N、P₂O₅ 和 K₂O 的单株施用量分别为 10、4 和 12 g,A5 处理组的 N、P₂O₅ 和 K₂O 单株施用量分别为 10、8 和 0 g,A6 处理组的 N、P₂O₅ 和 K₂O 单株施用量分别为 20、0 和 12 g,A7 处理组的 N、P₂O₅ 和 K₂O 单株施用量分别为 20、4 和 0 g,A8 处理组的 N、P₂O₅ 和 K₂O 单株施用量分别为 20、8 和 6 g,据此计算出各处理组单株

施肥成本依次为 0.066 7、0.133 3、0.126 4、0.193 1、0.139 7、0.252 8、0.199 5 和 0.266 1 元。

分析结果表明:单株施肥成本与‘浦城丹桂’幼苗株高和地径的增长量及全株干质量均呈极显著正相关($P < 0.01$)。以幼苗株高和地径的增长量及全株干质量分别为因变量 y_1 、 y_2 和 y_3 ,以单株施肥成本为自变量 x ,进行线性回归分析(见图 1),获得的线性回归拟合方程分别为 $y_1 = 227.37x + 24.739$ ($R^2 = 0.80, P = 0.001$)、 $y_2 = 15.598x + 7.964$ ($R^2 = 0.67, P = 0.007$) 和 $y_3 = 645.71x + 179.36$ ($R^2 = 0.70, P = 0.005$)。综合分析结果显示:A7 和 A8 处理组幼苗株高和地径的增长量及全株干质量均较高且差异相对较小,但 A7 处理组的单株施肥成本低于 A8 处理组,因此,综合考虑施肥成本和生长指标,A7 处理组的施肥配置较为适宜。



CK: N、P₂O₅ 和 K₂O 单株施用量均为 0 g All of applying amount per plant of N, P₂O₅ and K₂O is 0 g; A1: N、P₂O₅ 和 K₂O 单株施用量分别为 0、4 和 6 g Applying amount per plant of N, P₂O₅ and K₂O is 0, 4 and 6 g, respectively; A2: N、P₂O₅ 和 K₂O 单株施用量分别为 0、8 和 12 g Applying amount per plant of N, P₂O₅ and K₂O is 0, 8 and 12 g, respectively; A3: N、P₂O₅ 和 K₂O 单株施用量分别为 10、0 和 6 g Applying amount per plant of N, P₂O₅ and K₂O is 10, 0 and 6 g, respectively; A4: N、P₂O₅ 和 K₂O 单株施用量分别为 10、4 和 12 g Applying amount per plant of N, P₂O₅ and K₂O is 10, 4 and 12 g, respectively; A5: N、P₂O₅ 和 K₂O 单株施用量分别为 10、8 和 0 g Applying amount per plant of N, P₂O₅ and K₂O is 10, 8 and 0 g, respectively; A6: N、P₂O₅ 和 K₂O 单株施用量分别为 20、0 和 12 g Applying amount per plant of N, P₂O₅ and K₂O is 20, 0 and 12 g, respectively; A7: N、P₂O₅ 和 K₂O 单株施用量分别为 20、4 和 0 g Applying amount per plant of N, P₂O₅ and K₂O is 20, 4 and 0 g, respectively; A8: N、P₂O₅ 和 K₂O 单株施用量分别为 20、8 和 6 g Applying amount per plant of N, P₂O₅ and K₂O is 20, 8 and 6 g, respectively.

图 1 单株施肥成本与桂花品种‘浦城丹桂’幼苗株高和地径的增长量及全株干质量的回归分析
Fig. 1 Regression analysis on fertilizer cost per plant with increments of seedling height and ground diameter, and dry weight of whole plant of *Osmanthus fragrans* ‘Pucheng Dangui’ seedling

3 讨论和结论

同其他栽培植物相似,除了受品种、气候条件、土壤条件及栽培经营管理制度的影响外,施肥也是丹桂植株生长状况与品质最重要的影响因素之一。配施适宜氮、磷和钾肥对植物的增产、增质、增加经济效益等均有重要作用,反之,过量或过少施肥对植物的生

长则有负作用。

在正常生长状态下,植物体内自由基的产生和清除速率处于动态平衡状态,环境中的养分出现匮乏或富余均会导致植物体内超氧自由基积累,使细胞膜脂过氧化程度加剧^[18]。超氧化物歧化酶(SOD)是植物体内保护细胞膜系统、清除超氧自由基的最关键保护酶之一^[17,19-20]。冯岑^[3]的研究结果表明:施肥过量或过少均可使台湾栲木(*Alnus formosana* Makino)叶片

中抗氧化酶活性增高,推测其原因可能为台湾桫木植株在受到不同程度的养分胁迫(营养不足或剩余)后,通过提高体内相关保护酶活性来减轻机体受到的伤害。本研究中,施肥后(6月份至12月份),各施肥处理组‘浦城丹桂’幼苗叶片中的SOD和POD活性以及可溶性蛋白质含量均呈现先升高后降低的变化趋势,说明不同施肥处理对‘浦城丹桂’幼苗生长均有一定的营养胁迫作用,导致其体内抗氧化酶活性升高;而冬季(12月份)低温可使其体内活性氧代谢失衡,膜质过氧化程度加剧,最终导致SOD和POD活性降低,这可能是植物对冬季降温的一种积极防御反应^[20],此外,也可能与冬季植物新陈代谢减缓有关。汪建飞等^[21]认为,氮、磷和钾肥的比例及施肥水平通过影响植物氮代谢和有机酸代谢等相关代谢途径进而影响机体的抗氧化能力。春季是植物的生长旺季,因此,本研究选择在3月中旬和4月中旬进行施肥有助于植株的快速生长,但春季2次施肥是否会影响幼苗的相关代谢途径,并进而影响植株的抗氧化酶活性,尚待深入研究。

叶绿素是植物进行光合作用的主要色素,能够直接影响植物的光合功能和新陈代谢^[22],提高植物叶片的光合能力是实现植物高产的关键^[23];而适当配施氮、磷和钾肥均能够使植物叶片的叶绿素含量升高,有利于叶片进行光合作用并积累光合产物^[8,24]。本研究中,在施肥后的6月份,各施肥处理组‘浦城丹桂’幼苗叶片中的叶绿素a(Chla)和叶绿素b(Chlb)含量总体上均显著高于施肥前(3月份),说明各施肥处理均能够促进‘浦城丹桂’幼苗叶片中叶绿素的合成和积累。在环境胁迫条件下,叶片中的Chla与Chlb的含量比值(Chla/Chlb)与捕光色素复合体II(LHC II)含量呈反比,Chla/Chlb比值升高,LHC II含量降低,表明叶片的衰老程度较大^[22,25]。本研究中,施肥后(6月份至12月份),各施肥处理组‘浦城丹桂’幼苗叶片中的Chla/Chlb比值总体上呈先降低后升高的变化趋势,其中,A4(N、P₂O₅和K₂O单株施用量分别为10、4和12g)、A5(N、P₂O₅和K₂O单株施用量分别为10、8和0g)、A6(N、P₂O₅和K₂O单株施用量分别为20、0和12g)和A8(N、P₂O₅和K₂O单株施用量分别为20、8和6g)处理组叶片的Chla/Chlb比值在6月份至10月份均较小,说明该段时间内这4个施肥处理组叶片中的LHC II含量均较高,叶片对光能的捕获能力也较强。大量研究结果表明:可溶性

蛋白质含量与植物的抗逆性和敏感性有关^[26-27],其含量越高说明植物的适应能力越强^[28-29],植物的光合作用能力也越强^[30-32]。本研究中,各施肥处理组‘浦城丹桂’幼苗叶片中的可溶性蛋白质含量均在10月份达到最高值且总体上显著高于对照,其中,A8处理组叶片的可溶性蛋白质含量最高且增幅最大,说明A8处理组的施肥配比有利于叶片中蛋白质的合成和积累,该处理组幼苗具有较高的光合能力和适应能力,有助于体内有机物的积累。

综合分析结果表明:配施适宜的氮、磷和钾肥能够明显使‘浦城丹桂’幼苗叶片的抗氧化能力和叶绿素合成能力提高,同时对幼苗的生长和全株干物质积累具有一定的促进作用,其中,A8处理组增效最佳,而A7处理组(N、P₂O₅和K₂O单株施用量分别为20、4和0g)增效也较明显。比较而言,A8处理组幼苗的全株干质量最大,叶片的SOD和POD活性增幅最大,10月份叶片的可溶性蛋白质含量显著高于A7处理组,但3月份至10月份叶片的Chla/Chlb比值低于A7处理组。在生产实践中除考虑增产增收等因素外,生产成本也是主要的考虑因素。回归分析结果显示:A8处理组的单株施肥成本高于A7处理组,但其株高和地径的增长量及全株干质量与A7处理组间的无显著差异,因此,综合考虑施肥成本和生长指标,A7处理组的施肥配比较为适宜。

在实验过程中,‘浦城丹桂’幼苗并未出现生长受抑制甚至烧苗的现象,说明本实验设置的氮、磷和钾肥梯度水平还可以进一步扩展,以明确过量施肥的临界阈值。由于本研究采用田间实验方式,光照和温度等环境因素具有不可控性,因此,建议在环境可控条件下进行相关实验,以便更准确地研究针对个体水平的氮、磷和钾肥配施方案。此外,由于植物形态^[33]和生理功能^[34]与其苗龄密切相关,因此,还需进一步探讨氮、磷和钾肥配施对‘浦城丹桂’不同苗龄植株生长及生理的影响,以确定‘浦城丹桂’优质高产的最佳施肥方案。

参考文献:

- [1] 刘刚,殷浩,黄盖群,等. 氮磷钾肥施用量对桑树叶片的抗氧化能力的影响[J]. 草业科学, 2014, 31(4): 697-704.
- [2] 黄东风,王果,李卫华,等. 不同施肥模式对蔬菜生长、氮肥利用及菜地氮流失的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(3): 631-638.
- [3] 冯岑. 氮磷钾配比施肥对台湾桫木生理及光合特性影响[D].

- 长沙:中南林业科技大学林学院,2009.
- [4] 包亚英,胡秀英,郝雨杉,等.不同施肥处理对甜菊生长及糖苷含量和积累量的影响[J].植物资源与环境学报,2016,25(1):71-80.
- [5] JEYANNY V, AB RASIP A G, WAN RASIDAH K, et al. Effects of macronutrient deficiencies on the growth and vigour of *Khaya ivorensis* seedlings[J]. Journal of Tropical Forest Science, 2009, 21(2): 73-80.
- [6] 周录英,李向东,汤笑,等.氮、磷、钾肥配施对花生生理特性及产量、品质的影响[J].生态学报,2008,28(6):2707-2714.
- [7] 王春枝,陶姝宇,齐宝利,等.施肥对南果梨树叶片叶绿素含量、抗氧化酶活性及膜脂过氧化程度的影响[J].土壤通报,2011,42(6):1399-1403.
- [8] 陈周琴,张露,李燕山,等.龙脑樟叶片光合特性对氮磷钾肥的响应[J].江西农业大学学报,2015,37(3):490-496.
- [9] 顾梦鹤,杜小光,文淑均,等.施肥和刈割对垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、中华羊茅(*Festuca sinensis*)和羊茅(*Festuca ovina*)种间竞争力的影响[J].生态学报,2008,28(6):2472-2479.
- [10] 臧德奎,向其柏,刘玉莲.木犀属品种分类研究[J].林业科学,2006,42(5):17-21.
- [11] 吴建华.浦城丹桂苗木营养特性及氮源和氮磷钾配比施肥效应[J].花卉,2015(9):15-16.
- [12] 江淑萍.浦城丹桂扦插繁殖技术[J].广东林业科技,2014,30(5):84-86.
- [13] 张育松,严锦华,金剑荣,等.浦城丹桂花茶的审制与开发[J].福建茶叶,2014(2):22.
- [14] 舒展,张晓素,陈娟,等.叶绿素含量测定的简化[J].植物生理学通讯,2010,46(4):399-402.
- [15] 徐东,赵建,黄汉昌,等.改良的黄嘌呤氧化酶法测定动植物组织中SOD比活力[J].食品科学,2011,32(6):237-241.
- [16] ZHANG N, YU L. Effect of N^+ ion implantation on antioxidant activity in *Blakeslea trispora*[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2008, 77(9): 1046-1049.
- [17] 颜晓艺,赵丹,吴承祯,等.4种诱导剂对雷公藤幼苗叶片生长及内酯醇含量的影响[J].应用与环境生物学报,2015,21(4):607-615.
- [18] 廖德志,吴际友,王旭军,等.氮磷钾不同配比施肥对台湾桉木抗氧化酶的影响[J].林业科技开发,2010,24(3):72-74.
- [19] 陈坚,李妮亚,刘强,等.NaCl处理下两种引进红树的光合及抗氧化防御能力[J].植物生态学报,2013,37(5):443-453.
- [20] 徐广平,何成新,李先琨,等.园林植物桂花叶片矿质元素及生理特征对冬季异常低温的响应[J].核农学报,2013,27(3):365-372.
- [21] 汪建飞,沈其荣.有机酸代谢在植物适应养分和铝毒胁迫中的作用[J].应用生态学报,2006,17(11):2210-2216.
- [22] 李铮铮,伍钧,唐亚,等.铅、锌及其交互作用对鱼腥草(*Houttuynia cordata*)叶绿素含量及抗氧化酶系统的影响[J].生态学报,2007,27(12):5441-5446.
- [23] 罗凡,张厅,龚雪蛟,等.不同施肥方式对茶树新梢氮磷钾含量及光合生理的影响[J].应用生态学报,2014,25(12):3499-3506.
- [24] 李永闲.不同氮磷钾配比对轮台白杏生长发育及产量品质的影响[D].乌鲁木齐:新疆农业大学林学与园艺学院,2012:19.
- [25] 李磊,李向义,林丽莎,等.两种生境条件下6种牧草叶绿素含量及荧光参数的比较[J].植物生态学报,2011,35(6):672-680.
- [26] 张智猛,宋文武,丁红,等.不同生育期花生渗透调节物质含量和抗氧化酶活性对土壤水分的响应[J].生态学报,2013,33(14):4257-4265.
- [27] AKCAY U C, ERCAN O, KAVAS M, et al. Drought-induced oxidative damage and antioxidant responses in peanut (*Arachis hypogaea* L.) seedlings[J]. Plant Growth Regulation, 2010, 61(1):21-28.
- [28] 于敏,王文国,王胜华,等.外源柠檬酸对水稻铜毒害的缓解效应[J].应用与环境生物学报,2010,16(5):617-621.
- [29] LIVESLEY M A, BRAY C M. Heat shock and recovery in aged wheat aleurone layers[J]. Seed Science Research, 1993, 3(3):179-186.
- [30] PATTERSON T G, MOSS D N, BRUN W A. Enzymatic changes during the senescence of field-grown wheat[J]. Crop Science, 1980, 20(1):15-18.
- [31] WARREN C R, DREYER E, ADAMS M A. Photosynthesis-Rubisco relationships in foliage of *Pinus sylvestris* in response to nitrogen supply and the proposed role of Rubisco and amino acids as nitrogen stores[J]. Trees, 2003, 17(4):359-366.
- [32] WARREN C R, LIVINGSTON N J, TURPIN D H. Photosynthetic responses and N allocation in Douglas-fir needles following a brief pulse of nutrients[J]. Tree Physiology, 2004, 24(6):601-608.
- [33] 刘海涛,贾志清,朱雅娟,等.高寒沙地不同林龄乌柳的水分生理特性及叶性状[J].应用生态学报,2012,23(9):2370-2376.
- [34] 杨亚琴.不同林龄油茶生理特性及其根区土壤性质研究[J].河南农业科学,2015,44(7):61-66.

(责任编辑:佟金凤)