



氮磷钾配方施肥对丹桂苗木叶片内源激素含量的影响

吴磊 何易蔓 余雯静 颜晓艺 吴承祯 李健

Effects of Combined Application of N, P and K on the Content of Endogenous Hormones of Leaves in the Seedlings of *Osmanthus fragrans* var. *aurantiacus*

Wu Lei, He Yiman, Yu Wenjing, Yan Xiaoyi, Wu Chengzhen, Li Jian

引用本文:

吴磊, 何易蔓, 余雯静, 颜晓艺, 吴承祯, 李健. 氮磷钾配方施肥对丹桂苗木叶片内源激素含量的影响[J]. 西南林业大学学报, 2024, 44(3):61–70. doi: 10.11929/j.swfu.202304039

Wu Lei, He Yiman, Yu Wenjing, Yan Xiaoyi, Wu Chengzhen, Li Jian. Effects of Combined Application of N, P and K on the Content of Endogenous Hormones of Leaves in the Seedlings of *Osmanthus fragrans* var. *aurantiacus*[J]. *Journal of Southwest Forestry University(Natural Science)*, 2024, 44(3):61–70. doi: 10.11929/j.swfu.202304039

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11929/j.swfu.202304039>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

红蓝光质对比对观光木苗木生长及内源激素的影响

Effects of Red and Blue Light Ratio on Growth and Endogenous Hormone Synthesis of *Tsoongiodendron odorum* Seedlings
西南林业大学学报. 2022, 42(2): 11–18 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.202103008>

不同埋土深度杉木无性系萌蘖及内源激素含量的差异

Differences of Tillering and Endogenous Hormone Content of *Cunninghamia lanceolata* Clones in Different Soil Depth
西南林业大学学报. 2021, 41(5): 36–41 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.202005044>

中国沙棘平茬萌蘖能力对内源激素的响应

Response of Stump Sprouting Ability to Endogenous Hormones in *Hippophae rhamnoides* ssp. *sinensis*
西南林业大学学报. 2020, 40(3): 82–87 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.201912043>

日本落叶松种子园结实母株种实性状对氮磷钾配比施肥的响应

Response of Seed Characteristics of Seed-bearing Mother Plant of *Larix kaempferi* Seed Orchard to Nitrogen, Phosphorus and Potassium Proportional Fertilization
西南林业大学学报. 2020, 40(6): 6–11 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.201909004>

小省藤苗木生长对遮阴和施肥的响应

Growth Response of *Calamus gracilis* Seedlings to Shading and Fertilization
西南林业大学学报. 2019, 39(1): 20–26 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.201803045>

2,4-D处理对大百合种子休眠解除及内源激素变化的影响

Effects of 2,4-D on Dormancy Release and Endogenous Hormone Changes in *Cardiocrinum giganteum* Seeds
西南林业大学学报. 2019, 39(5): 51–57 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.201812064>

DOI: 10.11929/j.swfu.202304039

引文格式: 吴磊, 何易蔓, 余雯静, 等. 氮磷钾配方施肥对丹桂苗木叶片内源激素含量的影响 [J]. 西南林业大学学报 (自然科学), 2024, 44(3): 61–70.

氮磷钾配方施肥对丹桂苗木叶片内源激素含量的影响

吴磊^{1,2} 何易蔓³ 余雯静^{1,2} 颜晓艺¹ 吴承祯⁴ 李健^{1,2}

(1. 福建农林大学林学院, 福建 福州 350002; 2. 福建农林大学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;
3. 福建农林大学生命科学学院, 福建 福州 350002; 4. 武夷学院生态与资源工程学院, 福建 南平 354300)

摘要: 采用 L9 (3³) 设置 3 因素 (氮、磷和钾肥) 3 水平 (氮单株施用量分别为 0、5、10 g, 磷单株施用量分别为 0、2、4 g, 钾单株施用量分别为 0、3、6 g) 正交实验, 对‘浦城丹桂’幼苗间隔 30 d 进行 2 次氮磷钾配施处理, 采用酶联免疫吸附分析法 (ELISA) 测定第 2 次施肥后 60、120、180、240 d 后叶片 4 种激素 [生长素 (IAA)、脱落酸 (ABA)、赤霉素 (GA₃)、玉米素核苷 (ZR)] 含量。结果表明: N₅P₀K₃ 处理可以显著提高 IAA、ABA 和 ZR 的含量, 于施肥 240 d 达到最高值 (分别为 139.90、157.79、14.86 ng/g), 相比 CK 分别提高了 101.52%、36.79%、73.08%; N₅P₂K₆ 处理可以显著提高 GA₃ 的含量, 于施肥 240 d 达到最高值 (13.57 ng/g), 相比 CK 提高了 97.71%; N₅P₀K₃ 处理显著提高 ABA / GA₃ 和 ZR / GA₃ 值, 显著降低 ABA / IAA 和 ZR / IAA 值; N 和 K 因素对 IAA、GA₃、ABA 和 ZR 含量的影响均有显著差异, P 因素仅对 GA₃ 含量的影响有显著差异; 氮磷钾配施对丹桂苗木叶片内源激素含量及其之间的稳态有显著影响, 综合方差和极差分析, 得出提高叶片 IAA、GA₃ 和 ZR 含量的最佳配施方案为 N₅P₂K₆, 提高叶片 ABA 含量的最佳配施方案为 N₅P₀K₃。

关键词: 施肥; 丹桂; 叶片; 内源激素; 正交设计

中图分类号: S685.13

文献标志码: A

文章编号: 2095-1914(2024)03-0061-10

Effects of Combined Application of N, P and K on the Content of Endogenous Hormones of Leaves in the Seedlings of *Osmanthus fragrans* var. *aurantiacus*

Wu Lei^{1,2}, He Yiman³, Yu Wenjing^{1,2}, Yan Xiaoyi¹, Wu Chengzhen⁴, Li Jian^{1,2}

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou Fujian 350002, China; 2. The Higher Educational Key Laboratory for Forest Ecosystem Process and Management of Fujian Province, College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou Fujian 350002, China; 3. College of Life Sciences, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou Fujian 350002, China; 4. College of Ecology and Resource Engineering, Wuyi University, Nanping Fujian 354300, China)

Abstract: According to an orthogonal experimental design using L9(3³), 3 factors (nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizer) were set at 3 levels (N application rates of 0, 5, and 10 g per plant; P₂O₅ application rates of 0, 2, and 4 g per plant; KCl application rates of 0, 3, and 6 g per plant). The experiment on 'Pucheng Danguai' seed-

收稿日期: 2023-04-20; 修回日期: 2023-07-11

基金项目: 福建农林大学林学高峰学科建设项目 (72202200205) 资助; 学科交叉融合推动菌草科学及产业高质量发展项目 (XKJC-712021030) 资助。

第 1 作者: 吴磊 (1999—), 男, 硕士研究生。研究方向: 树木生理与基础生物学。Email: 1210428018@fafu.edu.cn。

通信作者: 李健 (1982—), 男, 博士, 副教授。研究方向: 林木表型组学与林业分子生态学。Email: jianli@fafu.edu.cn。

lings involved 2 rounds of nitrogen, phosphorus, and potassium combinations with a 30-day interval. The enzyme-linked immunosorbent assay(ELISA) method was used to measure the content of 4 hormones [indole-3-acetic acid(IAA), abscisic acid(ABA), gibberellic acid(GA₃), and zeatin riboside(ZR)] in the leaves after 60, 120, 180, and 240 days of the second fertilization. The results showed that N₅P₀K₃ treatment significantly increased the content of IAA, ABA, and ZR, reaching their peak values at 240 days after fertilization(139.90, 157.79, and 14.86 ng/g, respectively). Compared to the control group(CK), these levels increased by 101.52%, 36.79%, and 73.08%, respectively. N₅P₂K₆ treatment significantly increased the content of GA₃, reaching its highest value(13.57 ng/g) at 240 days after fertilization, which was 97.71% higher than the CK group. N₅P₀K₃ treatment significantly increased the ABA/GA₃ and ZR/GA₃ ratios, while significantly decreasing the ABA/IAA and ZR/IAA ratios. The effects of nitrogen and potassium factors on the content of IAA, GA₃, ABA, and ZR differed significantly, while the phosphorus factor only showed a significant difference in the content of GA₃. The combined application of nitrogen, phosphorus, and potassium had a significant impact on the endogenous hormone content and homeostasis in the leaves of 'Pucheng Dangui' seedlings. Based on variance and range analysis, the optimal fertilization scheme to increase leaf IAA, GA₃, and ZR content was N₅P₂K₆, while the optimal scheme to increase leaf ABA content was N₅P₀K₃.

Key words: fertilization; *Osmanthus fragrans* var. *aurantiacus*; leaf; endogenous hormone; orthogonal design

植物的生长发育通过激素表达水平的变化来体现,并通过调控内源激素的合成和代谢应对胁迫环境而重新实现植物体内的稳态^[1]。生长素(IAA)大多集中在植物体生长旺盛的部分,具有影响细胞的分化和生长,调控植物胚胎、根和叶片发育的功能^[2-4],并且参与调控植物的向重力性生长和向光性生长^[5-6]。脱落酸(ABA)在植物种子休眠、萌发以及萌发后生长的过程中起重要作用,在环境胁迫下会有显著响应^[1]。赤霉素(GA₃)在植物各组织器官都有分布,参与调控种子萌发、茎秆伸长、成花转变及花和果实的发育等过程。玉米素核苷(ZR)是一种天然植物细胞分裂素,广泛分布于高等植物中,能够刺激细胞分裂分化,促进愈伤组织和种子发芽^[7]。上述内源激素与植物的环境适应性、抗逆性、胁迫信号传导等密切相关^[8]。现有研究表明,干旱胁迫^[9-10]、盐胁迫^[11]、外源激素添加^[12-13]和施肥措施^[14-18]等都会影响植物内源激素含量的变化,从而引起植物生理性状的变化。人工林抚育过程中,氮、磷和钾肥的用量和配比因树种而异,而不同配比方案对于植物内源激素的表达产生的影响,又不同程度地影响树种的经济性状,特别是一些以花、果为主要经济性状的树种,其激素表达需求与用材林大不相同。因此,针对不同树种经济性状需求筛选适宜的配比施肥方案对于林业生产具有重要的现实意义。

桂花(*Osmanthus fragrans*)为木犀科(Oleaceae)木犀属(*Osmanthus*)植物,属于小乔木或常绿灌木,为中国十大传统名花之一^[19],大量应用于园林建设中,以其制备的桂花茶品质优异,深受大众喜爱^[20]。主产于福建浦城的‘浦城丹桂’为桂花的重要品种之一,但其生长缓慢,成树周期长,严重限制了‘浦城丹桂’产业的快速发展。合理施肥能够有效改善土壤养分并提高苗木质量^[21],吴建华^[22]研究表明对‘浦城丹桂’进行氮磷钾配比施肥优于单施,施肥条件的变化会通过改变激素水平进而影响植物生殖生长和营养生长的分配^[23],而丹桂作为以花入食药的树种,激素水平的变化将会极大影响其经济性状,因此,明晰丹桂苗木叶片内源激素在不同施肥条件下的变化状况,对于提升丹桂的种植水平有重要的指导作用。本研究以‘浦城丹桂’为研究对象,通过不同氮磷钾配比施肥处理,分析丹桂苗木叶片内源激素含量的动态变化,明晰不同氮磷钾配施下的激素稳态的差异,以期为丹桂的高效栽培和定向培育措施的制定提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验地概况

丹桂苗圃实验地位于福建省武夷山市武夷学院后山(27°44′01″N, 118°00′32″E),属中亚热带季风气候,年平均降水量1700 mm,与‘浦城

丹桂’传统种植地气候类型相近。实验地土壤为红壤, pH 值为 5.2, 0~20 cm 土层的基础地力与‘浦城丹桂’苗圃土壤相近, 其中有机质含量为 26.08 g/kg, 全 N 为 1.40 g/kg, 全 K 为 1.19 g/kg, 全 P 为 0.75 g/kg, 水解性 N 为 32.14 mg/kg, 有效 P 为 114.94 mg/kg, 速效 K 为 15.67 mg/kg。

1.2 供试品种

实验材料为‘浦城丹桂’2 a 幼苗(供试材料由浦城县林业局提供, 均来自同一无性系扦插苗)。

1.3 样地设置与实验设计

丹桂幼苗种植面积约 1600 m², 种植密度约 6~7 株/m², 随机选择 27 个基本一致地段设置样地进行施肥实验。

设置立地条件及苗木长势基本相似的面积为 1 m × 3 m 的样地 27 块(每块样地为 1 个处理, 共 9 个处理, 每处理 3 个重复), 平均每块样地 20 株‘浦城丹桂’幼苗, 在各样地间设置 1 m 缓冲带, 缓冲带不施肥, 各区四角用木桩标记, 实验前先进行各样地土壤取样和调查。

采用正交设计方案, 设置 N、P、K 3 个养分纯量因素, 各因素设 3 个水平, N₀、N₅、N₁₀ 分别表示 N 素用量为 0、5、10 g/株; P₀、P₂、P₄ 分别表示 P 素用量为 0、2、4 g/株; K₀、K₃、K₆ 分别表示 K 素用量为 0、3、6 g/株, 共 9 个处理(表 1), 各处理设 3 次重复。N 肥采用尿素(CH₄N₂O, 46.3%), P 肥采用过磷酸钙(Ca(H₂PO₄)₂, 12.0%), K 肥采用氯化钾(KCl, 60%), 根据各施肥配方的纯量再计算所需化肥的用量。

表 1 各处理 N、P、K 用量
Table 1 Fertilizer treatments g/株

处理	处理水平	N	P	K
A	CK	0	0	0
B	N ₀ P ₂ K ₃	0	2	3
C	N ₀ P ₄ K ₆	0	4	6
D	N ₅ P ₀ K ₃	5	0	3
E	N ₅ P ₂ K ₆	5	2	6
F	N ₅ P ₄ K ₀	5	4	0
G	N ₁₀ P ₀ K ₆	10	0	6
H	N ₁₀ P ₂ K ₀	10	2	0
I	N ₁₀ P ₄ K ₃	10	4	3

于 3 月和 4 月中旬分 2 次进行施肥实验, 用背式喷雾器在各处理样地幼苗冠下人工均匀喷

洒, 每次实验将不同处理组合配方的 N、P、K 肥溶解于 20 L 水中, CK 则以蒸馏水等量喷施, 于第 2 次施肥后 60、120、180、240 d 后采样测定苗木叶片的内源激素含量。

1.4 测定项目和方法

在每个处理样地中随机选取 5 株丹桂幼苗, 每株选取新生枝条中部成熟叶 6 片, 蒸馏水除尘, 滤纸吸干水分, 剪碎、去脉混匀, 称取 0.2 g 叶样, 用液氮冷冻 30 min 后, 保存在-70 ℃超低温冰箱中。由中国农业大学提供试剂盒及活性检测方法, 用酶联免疫吸附分析法(ELISA)测定叶片中的 4 种激素 IAA、GA₃、ABA、ZR 含量, 3 次重复, 用酶联免疫分光光度计依次测定样品 490 nm 处的显色值, 根据 Yang 等^[24]的方法制备各激素的标准曲线。曲线的横坐标用激素标样各浓度的自然对数表示, 纵坐标用各浓度显色值的 Logit 值表示。Logit 的计算公式为:

$$\text{Logit}(B/B_0) = \ln \frac{B/B_0}{1-B/B_0} = \ln \frac{B}{B_0-B}$$

式中: B₀ 是空白样的显色值, B 是其他浓度的显色值。

1.5 数据处理

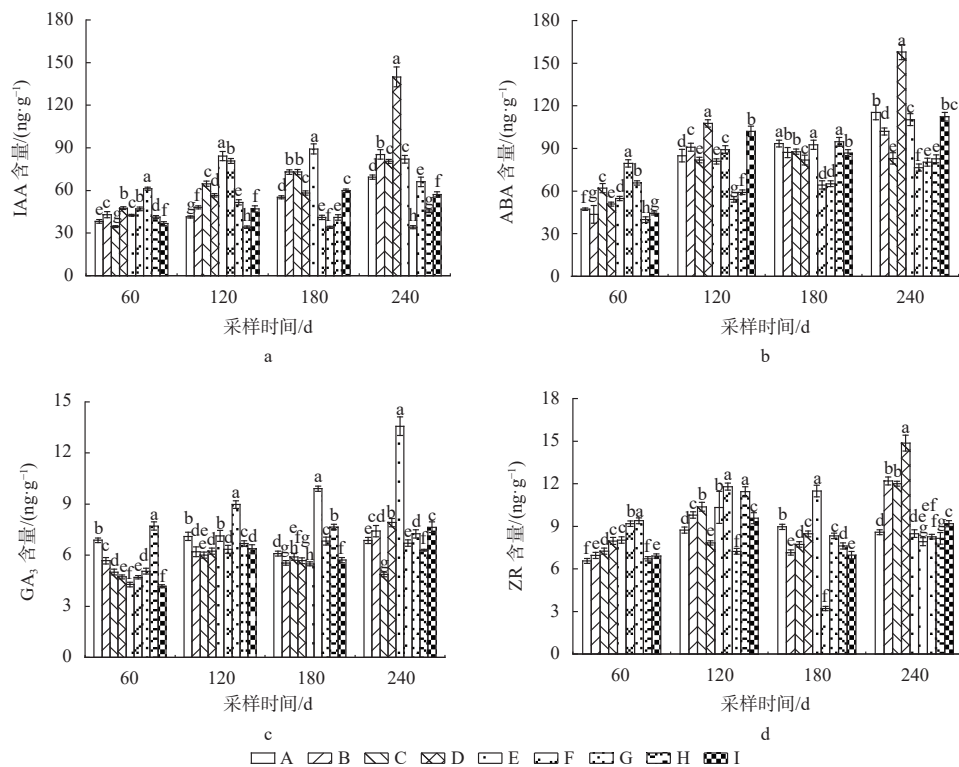
采用 Excel 2013、R 4.0.4、Origin 2018 和 minitab 20 软件进行数据处理、分析和图形绘制。使用单因素方差分析法(ANOVA)和极差分析法进行分析, 差异显著水平为 P<0.05。

2 结果与分析

2.1 氮磷钾配施对丹桂苗木叶片内源激素的影响

2.1.1 对 IAA 含量的影响

不同的氮磷钾配施方案对不同时间丹桂苗木叶片中 IAA 含量的影响差异显著(P<0.05, 图 1a)。60 d 时, 除 C、I 处理叶片的 IAA 含量显著低于 CK 外, 其余各处理均显著高于 CK(P<0.05); 120 d 时, 除 H 处理外, 其余所有处理叶片的 IAA 含量均显著高于 CK(P<0.05); 180 d 时, F、G 和 H 处理叶片的 IAA 含量显著低于 CK(P<0.05), 其余各处理均显著高于 CK(P<0.05); 240 d 时, B、C、D 和 E 处理叶片的 IAA 含量显著高于 CK(P<0.05), 其余各处理均显著低于 CK(P<0.05)。在 CK 中, 叶片中 IAA 含量随着采样时间的推进总体呈现升高的趋势, 在所有处理中总体处于中等水平。B、D 和 E 处理在各个采样时期 IAA 含量均显著高于 CK 组(P<0.05)。



不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图1 不同氮磷钾配施对叶片 IAA、ABA、 GA_3 和 ZR 含量的影响

Fig. 1 Effects of different combined application of N, P and K on IAA, ABA, GA_3 and ZR contents in leaves

2.1.2 对 ABA 含量的影响

不同的氮磷钾配施方案对不同时间丹桂苗木叶片中 ABA 含量的影响差异显著 ($P < 0.05$, 图 1b)。60 d 时, B、H 和 I 处理叶片的 ABA 含量分别显著低于 CK ($P < 0.05$), 其余各处理均显著高于 CK ($P < 0.05$); 120 d 时, B、D、F 和 I 处理叶片的 ABA 含量分别显著高于 CK ($P < 0.05$), 其余各处理均显著低于 CK ($P < 0.05$); 180 d 时, 除 E 和 H 外各处理间 ABA 含量均显著低于 CK ($P < 0.05$); 240 d 时, D 处理叶片的 ABA 含量显著高于 CK ($P < 0.05$), 其余各处理均显著低于 CK ($P < 0.05$) 或差异不显著。在 CK 中, 叶片中 ABA 含量随着采样时间的推进呈现持续增加的趋势, 于 240 d 时达到最大值, 在所有处理中总体处于较高水平。与其他内源激素变化相比, ABA 含量变化幅度最大, 其变化趋势与 IAA 变化趋势总体上相似。

2.1.3 对 GA_3 含量的影响

不同的氮磷钾配施方案对不同时间丹桂苗木叶片中 GA_3 含量的影响差异显著 ($P < 0.05$, 图 1c)。60 d 时, H 处理叶片的 GA_3 含量显著高于 CK ($P < 0.05$), 其余各处理均显著低于 CK ($P < 0.05$); 120 d 时, G 处理叶片的 GA_3 含量显著高于 CK ($P < 0.05$), 其余各处理均显著低

于 CK ($P < 0.05$) 或差异不显著; 180 d 时, F、G 和 H 处理叶片的 GA_3 含量显著高于 CK ($P < 0.05$), 其余各处理均显著低于 CK ($P < 0.05$); 240 d 时, E、F、G 和 H 处理叶片的 GA_3 含量显著高于 CK ($P < 0.05$), 其余各处理显著低于 CK ($P < 0.05$) 或差异不显著。在 CK 中, 叶片中 GA_3 含量随着采样时间的推进呈现先升高后降低的趋势, 于 120 d 时达到最大值, 在所有处理中总体处于较高水平, 但其含量变化幅度相比其他处理较小, 仅为 6.09 ~ 7.10 ng/g 。

2.1.4 对 ZR 含量的影响

不同的氮磷钾配施方案对不同时间丹桂苗木叶片中 ZR 含量的影响差异显著 ($P < 0.05$, 图 1d)。60 d 时, 除 H 处理外, 其余各处理叶片 ZR 含量均显著高于 CK ($P < 0.05$); 120 d 时, 除 D 和 G 处理叶片 ZR 含量显著低于 CK 外 ($P < 0.05$), 其余各处理均显著高于 CK ($P < 0.05$); 180 d 时, E 处理叶片 ZR 含量显著高于 CK ($P < 0.05$), 其余各处理均显著低于 CK ($P < 0.05$); 240 d 时, B、C、D 和 H 处理叶片 ZR 含量显著高于 CK ($P < 0.05$), 其余各处理显著低于 CK ($P < 0.05$) 或差异不显著。在 CK 中, 叶片中 ZR 含量随着采样时间的推进呈现先升高后降低的趋势, 在 180 d 达到最大值, 在所有处理

中处于中等水平。E 处理在 60、120、180 d 时 ZR 含量均高于 CK 组，于 240 d 时与 CK 组无显著差异。ZR 含量变化趋势与 GA₃ 含量变化趋势总体上相似。

2.1.5 氮磷钾配施下丹桂苗木叶片内源激素含量的方差分析

对不同氮磷钾配施下的内源激素含量进行方

差分析（表 2）。由表 2 可知，N 对丹桂苗木叶片 IAA、GA₃ 和 ABA 含量影响极显著（ $P<0.01$ ），对 ZR 含量影响显著（ $P<0.05$ ）；P 对丹桂苗木叶片 GA₃ 含量影响极显著（ $P<0.01$ ），对 IAA、ABA 和 ZR 含量影响不显著；K 对丹桂苗木叶片 IAA、GA₃、ABA 和 ZR 含量影响极显著（ $P<0.01$ ）。

表 2 不同氮磷钾配施下丹桂苗木叶片 IAA、GA₃、ABA、ZR 的方差分析

Table 2 Variance analysis of IAA, GA₃, ABA and ZR contents in leaves of *O. fragrans* var. *aurantiacus* seedlings under the different combined application of N, P and K

试验因素	自由度	IAA		GA ₃		ABA		ZR	
		SS	F	SS	F	SS	F	SS	F
N	2	19548.752	23.637**	33.817	5.879**	9517.990	8.469**	37.184	4.330*
P	2	1704.419	1.817	40.380	7.070**	1623.909	1.384	14.538	1.666
K	2	17836.820	21.293**	37.538	6.552**	10461.785	9.358**	45.497	5.331**

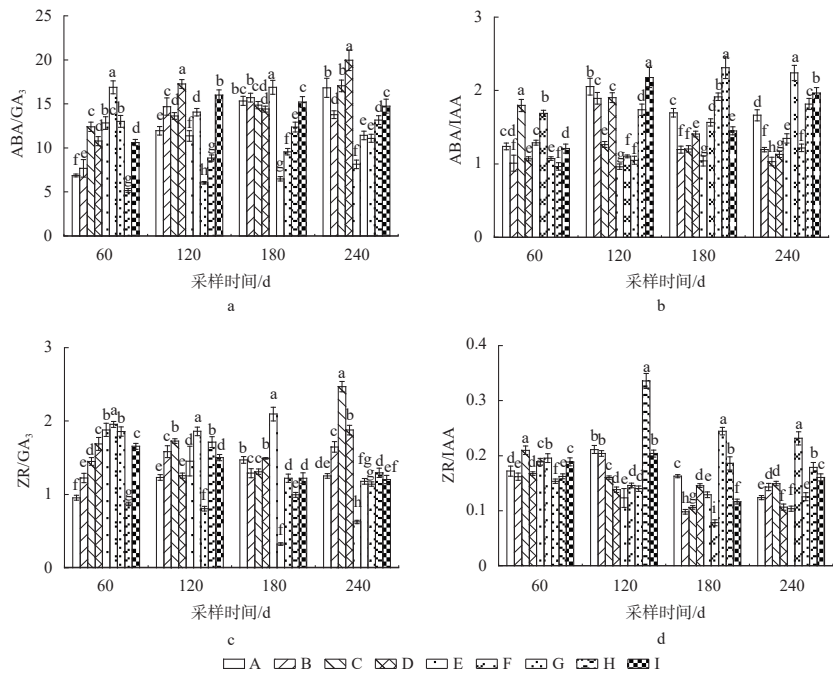
注：*表示相关性显著（ $P<0.05$ ），**表示相关性极显著（ $P<0.01$ ）。

2.2 氮磷钾配施对丹桂苗木叶片内源激素比值的影响

2.2.1 对 ABA/GA₃ 的影响

不同的氮磷钾配施方案对不同时间丹桂苗木叶片中 ABA/GA₃ 比值的影响差异显著（ $P<0.05$ ，图 2a）。60 d 时，除 H 处理的 ABA/GA₃ 显著低于 CK 外（ $P<0.05$ ），其他处理均显著高于 CK（ $P<0.05$ ）；120 d 时，B、C、D、F 和 I 处理的 ABA/GA₃ 显著高于 CK（ $P<0.05$ ），其余各处理均显著低于 CK（ $P<0.05$ ）；180 d 时，B、

E 处理的 ABA/GA₃ 显著高于 CK（ $P<0.05$ ），其余各处理均显著低于 CK（ $P<0.05$ ）或差异不显著；240 d 时，D 处理的 ABA/GA₃ 显著高于 CK（ $P<0.05$ ），其余各处理均显著低于 CK（ $P<0.05$ ）或差异不显著。在 CK 中，随着采样时间的推进叶片中 ABA/GA₃ 表现出持续升高的趋势，于 240 d 达到最大值，在所有处理中总体处于中等水平。CK 与 C 处理变化趋势相同，但 CK 涨幅高于 C 处理。



不同小写字母表示差异显著（ $P<0.05$ ）。

图 2 不同氮磷钾配施对叶片 ABA/GA₃、ABA/IAA、ZR/GA₃ 和 ZR/IAA 的影响

Fig. 2 Effects of different combined application of N, P and K on ABA/GA₃, ABA/IAA, ZR/GA₃ and ZR/IAA contents in leaves

2.2.2 对 ABA/IAA 的影响

不同的氮磷钾配施方案对不同时间丹桂苗木叶片中 ABA/IAA 比值的影响差异显著 ($P < 0.05$, 图 2b)。60 d 时, C 和 F 处理的 ABA/IAA 显著高于 CK ($P < 0.05$), 其余各处理均显著低于 CK ($P < 0.05$) 或差异不显著; 120 d 时, I 处理的 ABA/IAA 显著高于 CK ($P < 0.05$), 其余各处理均显著低于 CK ($P < 0.05$); 180 d 时, G 和 H 处理的 ABA/IAA 显著高于 CK ($P < 0.05$), 其余各处理均显著低于 CK ($P < 0.05$); 240 d 时, F、H 和 I 处理的 ABA/IAA 显著高于 CK ($P < 0.05$), 其余各处理均显著低于 CK ($P < 0.05$)。在 CK 中, 随着采样时间的推进 ABA/IAA 表现出先升高后降低的趋势, 在 120 d 达到最大值, 在所有处理中总体处于中等水平, D 处理与其变化趋势相同。

2.2.3 对 ZR/GA₃ 的影响

不同的氮磷钾配施方案对不同时间丹桂苗木叶片中 ZR/GA₃ 的影响差异显著 ($P < 0.05$, 图 2c)。60 d 时, 除 H 处理的 ZR/GA₃ 显著低于 CK 外 ($P < 0.05$), 其余各处理均显著高于 CK ($P < 0.05$); 120 d 时, G 处理的 ZR/GA₃ 显著低于 CK ($P < 0.05$), D 处理的 ZR/GA₃ 与 CK 差异不显著, 其余各处理均显著高于 CK ($P < 0.05$); 180 d 时, E 处理的 ZR/GA₃ 显著高于 CK ($P < 0.05$), 其余各处理均显著低于 CK ($P < 0.05$) 或差异不显著; 240 d 时, B、C 和 D 处理的 ZR/GA₃ 显著高于 CK ($P < 0.05$), 其余各处理均显著低于 CK ($P < 0.05$) 或差异不显著。在 CK 中, 随着采

样时间的推进, ZR/GA₃ 表现为先升高后降低的趋势, 在 180 d 达到最大值, 在所有处理中总体处于中等水平。

2.2.4 对 ZR/IAA 的影响

不同的氮磷钾配施方案对不同时间丹桂苗木叶片中 ZR/IAA 的影响差异显著 ($P < 0.05$, 图 2d)。60 d 时, C、E、F 和 I 处理的 ZR/IAA 显著高于 CK ($P < 0.05$), 其余各处理均显著低于 CK ($P < 0.05$) 或差异不显著; 120 d 时, H 处理的 ZR/IAA 显著高于 CK ($P < 0.05$), 其余各处理均显著低于 CK ($P < 0.05$) 或差异不显著; 180 d 时, G 和 H 处理的 ZR/IAA 显著高于 CK ($P < 0.05$), 其余各处理均显著低于 CK ($P < 0.05$); 240 d 时, D 和 E 处理的 ZR/IAA 显著低于 CK ($P < 0.05$), G 处理与 CK 差异不显著, 其余各处理均显著高于 CK ($P < 0.05$)。在 CK 中, 随着采样时间的推进, ZR/IAA 比值表现为先升高后降低的趋势, 在 120 d 达到最大值, 在所有处理中总体处于较低水平, H 处理与其变化趋势相同。

2.2.5 氮磷钾配施下丹桂苗木叶片内源激素比值的方差分析

对不同氮磷钾配施下的内源激素比值进行方差分析 (表 3)。由表 3 可知, N 对丹桂苗木叶片 ABA/GA₃、ABA/IAA、ZR/GA₃ 和 ZR/IAA 影响极显著 ($P < 0.01$); P 对丹桂苗木叶片 ABA/GA₃、ABA/IAA 影响极显著 ($P < 0.01$), 对 ZR/GA₃ 影响显著 ($P < 0.05$), 对 ZR/IAA 影响不显著; K 对丹桂苗木叶片 ABA/GA₃、ABA/IAA、ZR/GA₃、ZR/IAA 影响极显著 ($P < 0.01$)。

表 3 不同氮磷钾配施下丹桂苗木叶片 ABA/GA₃、ABA/IAA、ZR/GA₃、ZR/IAA 的方差分析

Table 3 Variance analysis of ABA/GA₃、ABA/IAA、ZR/GA₃ and ZR/IAA contents in leaves of *O. fragrans* var. *aurantiacus* seedlings under the different combined application of N, P and K

试验因素	自由度	ABA/GA ₃		ABA/IAA		ZR/GA ₃		ZR/IAA	
		SS	F	SS	F	SS	F	SS	F
N	2	308.579	14.790**	1.895	7.376**	2.345	7.227**	0.076	0.076**
P	2	194.650	9.330**	4.454	5.661**	1.043	3.216*	0.006	1.440
K	2	404.684	19.397**	8.968	34.910**	3.881	11.746**	0.061	15.489**

注: *表示相关性显著 ($P < 0.05$), **表示相关性极显著 ($P < 0.01$)。

2.3 不同氮磷钾配施下丹桂苗木叶片 IAA、GA₃、ABA、ZR 含量的极差分析

对不同氮磷钾配施下丹桂苗木叶片内源激素含量进行极差分析 (表 4), N、K 因素显著影响 IAA 含量 ($P < 0.05$), P 因素对 IAA 含量影响

不显著。N₀、N₅、N₁₀ 之间有显著影响 ($P < 0.05$), N₅ 水平下值最高, 表现最好。P₀、P₂、P₄ 之间无显著影响, P₀ 水平下值最高。K₀ 与 K₃、K₆ 之间有显著影响 ($P < 0.05$), K₃ 和 K₆ 之间无显著影响, K₆ 水平下值最高。N 的极差为 18.96, P

的极差为 5.22, K 的极差为 16.19, N、P、K 3 因素对叶片 IAA 含量的影响顺序为 N > K > P。3 因素各水平表现为: N₅ > N₀ > N₁₀, P₀ > P₂ > P₄, K₆ > K₃ > K₀。

表 4 不同氮磷钾配施下丹桂苗木叶片 IAA、GA₃、ABA、ZR 含量的极差分析

Table 4 Range analysis of IAA, GA₃, ABA and ZR contents in leaves of *O. fragrans* var. *aurantiacus* seedlings under the different combined application of N, P and K

因素	指标	IAA 含量/(ng·g ⁻¹)	GA ₃ 含量/(ng·g ⁻¹)	ABA 含量/(ng·g ⁻¹)	ZR 含量/(ng·g ⁻¹)
N	N ₀	58.84 ^b	6.129 ^b	81.59 ^a	8.854 ^{ab}
	N ₅	66.94 ^a	6.89 ^a	87.17 ^a	9.127 ^a
	N ₁₀	47.98 ^c	6.697 ^a	73.94 ^b	8.312 ^b
	R	18.96	0.761	13.22	0.815
P	P ₀	59.93 ^a	6.633 ^a	83.69 ^a	8.762 ^a
	P ₂	59.11 ^a	6.971 ^a	78.21 ^a	9.025 ^a
	P ₄	54.71 ^a	6.112 ^b	80.79 ^a	8.506 ^a
	R	5.22	0.858	5.48	0.519
K	K ₀	47.44 ^b	6.913 ^a	77.23 ^b	8.237 ^b
	K ₃	62.68 ^a	6.107 ^b	88.92 ^a	8.983 ^a
	K ₆	63.63 ^a	6.696 ^a	76.54 ^b	9.073 ^a
	R	16.19	0.806	12.39	0.836

注: N₀、N₅、N₁₀、P₀、P₂、P₄、K₀、K₃、K₆分别表示各水平均值, R表示水平均值的极差; 不同小写字母表示差异显著 (P<0.05)。

N、P 和 K 因素显著影响 GA₃ 含量 (P<0.05)。N₀ 与 N₅、N₁₀ 之间存在显著影响 (P<0.05), N₅、N₁₀ 之间无显著影响, N₅ 水平下值最高。P₄ 与 P₀、P₂ 之间存在显著影响 (P<0.05), P₀、P₂ 之间无显著影响, P₂ 水平下值最高。K₃ 与 K₀、K₆ 之间存在显著影响 (P<0.05), K₀、K₆ 之间无显著影响, K₀ 水平下值最高。N 的极差为 0.761, P 的极差为 0.858, K 的极差为 0.806, N、P、K 3 因素对叶片 GA₃ 含量的影响顺序为 P>K>N。3 因素各水平表现为: N₅>N₀>N₁₀, P₂>P₀>P₄, K₀>K₃>K₆。

N 和 K 因素显著影响 ABA 含量 (P<0.05), P 因素对 ABA 含量影响不显著。N₁₀ 与 N₀、N₅ 之间存在显著影响 (P<0.05), N₀ 与 N₅ 之间不存在显著影响, N₅ 水平下值最高, 表现最好。P₀、P₂、P₄ 之间无显著影响, P₀ 水平下值最高。K₃ 与 K₀、K₆ 之间存在显著影响 (P<0.05), K₀、K₆ 之间无显著影响, K₃ 水平下值最高。N 的极差为 13.22, P 的极差为 5.48, K 的极差为 12.39, N、P、K 3 因素对叶片 ABA 含量的影响顺序为 N>K>P。3 因素各水平表现为: N₅>N₀>N₁₀, P₀>P₄>P₂, K₃>K₀>K₆。

N 和 K 因素显著影响 ZR 含量 (P<0.05), P 因素对 ZR 含量影响不显著。N₅ 与 N₁₀ 之间存

在显著影响, N₀ 与 N₅、N₁₀ 之间均不存在显著影响, N₅ 水平下值最高, 表现最好。P₀、P₂、P₄ 之间无显著影响, P₂ 水平下值最高。K₀ 与 K₃、K₆ 之间存在显著影响 (P<0.05), K₃、K₆ 之间无显著影响, K₆ 水平下值最高。N 的极差为 0.815, P 的极差为 0.519, K 的极差为 0.836, N、P、K 3 因素对叶片 ZR 含量的影响顺序为 K>N>P。3 因素各水平表现为: N₅>N₀>N₁₀, P₂>P₀>P₄, K₆>K₃>K₀。

3 结论与讨论

内源激素在植物体内合成, 再从合成部位运输往作用部位, 对植物的生长发育、物质代谢和形态建成等发挥不可替代的调控作用^[25]。本研究表明在不同配比施肥作用下, 所有配施处理的叶片 IAA、ABA、GA₃、ZR 含量均与 CK 产生显著差异 (P<0.05), 氮磷钾配施水平与植物内源激素含量显著相关 (P<0.05), 这与罗帅等^[14]和袁小军等^[16]对植物激素含量变化的研究结果相似。本研究中 IAA 和 ABA 变化趋势相似, GA₃ 和 ZR 变化趋势相似, 这可能是因为 IAA、GA₃ 与 ABA、ZR 相互拮抗, 植物调节激素间平衡而导致的^[26]。IAA 具有双重性, 低浓度的 IAA 对植株生长有促进作用, 而过高浓度的 IAA 对植株生长有抑制作

用。IAA的合成部位主要是在植物幼嫩叶片中,并且IAA是唯一具有极性运输功能的内源激素^[27]。D(N₅P₀K₃)处理的IAA含量在4个采样时期均显著高于CK($P<0.05$),分别为47.53、56.57、58.16、139.90 ng/g, E(N₅P₂K₆)处理的IAA含量在4个采样时期均显著高于CK($P<0.05$),分别为42.53、84.22、89.24、81.94 ng/g,故提高IAA含量的较优组合为N₅P₀K₃和N₅P₂K₆,说明合适的氮磷钾配施对IAA的积累有促进作用。ABA是抑制植物生长的内源激素,其含量越高,则说明抑制作用越强。N₅P₀K₃处理的ABA含量在60、120、240 d时均显著高于CK($P<0.05$),分别为50.84、107.60、157.79 ng/g,与CK对比,整体呈现上升趋势, N₅P₂K₆处理的ABA含量在60 d时显著高于CK($P<0.05$),与CK对比,整体变化趋势不明显,综合所有采样时间来看, N₅P₀K₃为提高ABA含量的最佳方案。GA₃是赤霉素中活性最高的一种,是天然的生长促进剂,可促进植物细胞伸长,茎伸长,叶片扩大,加速植株生长和发育,使作物提早成熟,增加产量的同时提高品质^[28-29]。N₅P₀K₃处理的GA₃含量在240 d时显著高于CK($P<0.05$),其余时间均显著低于CK($P<0.05$),整体呈现下降趋势。N₅P₂K₆处理的GA₃含量在240 d时达到最高值(13.57 ng/g),显著高于CK($P<0.05$),整体呈现上升趋势,综合所有采样时间来看, N₅P₂K₆为提高GA₃含量的最佳方案。ZR能够促进细胞分裂分化,调控植物响应干旱、盐和冷胁迫^[30-32]。N₅P₀K₃处理的ZR含量于240 d时达到最高值(14.86 ng/g),且在60 d和240 d时显著高于CK($P<0.05$),整体呈上升趋势。N₅P₂K₆处理的ZR含量在60、120、180 d时显著高于CK($P<0.05$),240 d时与CK无显著差异。N₅P₀K₃处理的ZR含量虽然于240 d时达到所有方案的最大值,但在其他时间的含量均显著低于N₅P₂K₆处理($P<0.05$),故N₅P₂K₆为提高ZR含量的最佳方案。

植物的生理活动是多种激素相互作用的结果,植物通过激素含量的改变对外界环境进行响应,使各激素处于一个相对稳态^[33]。不同激素功能的发挥不仅与其自身浓度有关,还与其他激素紧密联系。本研究表明,施肥措施与植物内源激素之间比值显著相关($P<0.05$),这与袁雅琪等^[17]对植物内源激素比例变化的研究结果相似。现有研究表明^[18,34-36],不同内源激素之间具有协同或拮抗作用,ABA/IAA、ABA/GA₃、ZR/IAA、

ZR/GA₃能够反映植物开花和生长发育的进程,植物能够通过调节体内激素比例来提高对逆境的抗性。本研究中N₅P₀K₃处理的ABA/GA₃在60、120、240 d时显著高于CK($P<0.05$),整体呈现上升趋势。N₅P₂K₆处理的ABA/GA₃在60 d和180 d时显著高于CK($P<0.05$),整体呈现下降趋势。N₅P₀K₃处理的ABA/IAA在4次采样时间均显著低于CK($P<0.05$),整体呈现下降趋势。N₅P₂K₆处理的ABA/IAA在60 d时与CK无明显差异,其余时间均显著低于CK($P<0.05$),整体呈现下降趋势。N₅P₀K₃处理的ZR/GA₃在60 d和240 d时均显著高于CK,在120 d和180 d时与CK无明显差异,整体呈上升趋势。N₅P₂K₆处理的ZR/GA₃在60、120、180 d时均显著高于CK($P<0.05$),在240 d时显著低于CK($P<0.05$),整体呈现上升趋势。N₅P₀K₃处理的ZR/IAA在240 d时显著高于CK,其他时间显著低于CK或差异不显著,整体呈现下降趋势。N₅P₂K₆处理的ZR/IAA在60 d时显著高于CK($P<0.05$),其他时间均显著低于CK($P<0.05$),整体呈现下降趋势。

本研究采用极差分析法能更科学地分析各因素对内源激素含量的影响程度。人工施肥是植物获取矿质营养的主要途径之一,营养元素配比施肥可以改变植物内源激素水平并提高植株产量^[37-38]。本研究中,氮磷钾肥对内源激素的影响不同,氮肥对IAA、ABA的影响效应最明显,磷肥对GA₃含量的影响效应最大,而钾肥对ZR的影响效应最大。张振博等^[39]研究表明,适量增施氮肥,可促进玉米(*Zea mays*)籽粒中IAA、ZR、GA₃的合成,过量施氮,IAA、ZR、GA₃含量有所降低。本研究中N₅水平下的IAA、GA₃、ABA、ZR含量均为最高,证明适量增施氮肥对丹桂叶片内源激素的合成起促进作用。彭龙等^[40]研究发现,施用适量的钾肥能提高棉花(*Gossypium hirsutum*)叶片中IAA、ZR的含量,并且会提高棉花的品质和产量。本研究中K₀、K₆水平下IAA和ZR含量均与K₀(不施K)水平存在显著差异($P<0.05$),且高于K₀水平,这说明适当增施钾肥对丹桂叶片IAA、ZR含量有促进作用。官纪元等^[41]研究表明,过高或过低的供磷水平会显著降低刺梨(*Rosa roxburghii*)叶片GA₃含量。本研究中P对GA₃含量有显著影响($P<0.05$),P₂水平下GA₃含量最高,证明适宜的供磷水平对丹桂苗木叶片GA₃含量有促进作用。植物内源激素与

植物的生长发育相关, 有针对性地调控植物相关激素对植物的高效栽培和定向培育有重大意义。通过极差分析得出提高 IAA、GA₃、ABA、ZR 含量的最佳方案分别为 N₅P₀K₆、N₅P₂K₀、N₅P₀K₃ 和 N₅P₂K₆, 其中 N₅P₀K₆、N₅P₂K₀ 为正交设计实验所得出理论方案, 但 P 对 IAA 含量影响不显著, P₀、P₂ 水平下 IAA 含量差值仅为 0.82 ng/g, 故在试验施肥范围内 N₅P₂K₆ 为提高 IAA 含量的最佳方案; K₀ 与 K₆ 水平下 GA₃ 含量差值仅为 0.217 ng/g 且差异不显著, 故在试验范围内 N₅P₂K₆ 为提高 GA₃ 含量的最佳方案, 以上最佳方案与单因素分析的结果相似。

本研究中, 不同 N、P、K 供给下丹桂苗木内源激素含量出现不同程度的提高, 以 N₅P₀K₃ 和 N₅P₂K₆ 处理提高的幅度较大, 说明丹桂苗木会通过调节自身激素水平来应对外界干扰。N₅P₀K₃ 和 N₅P₂K₆ 处理的 ABA/GA₃、ABA/IAA、ZR/GA₃ 和 ZR/IAA 均发生了显著变化, 说明氮磷钾配施不仅对丹桂苗木内源激素的含量造成显著影响, 还会对内源激素之间的稳态造成显著影响。N 和 K 因素对 IAA、GA₃、ABA 和 ZR 含量均有显著影响, P 因素仅对 GA₃ 含量有显著影响。在试验施肥水平范围内, 综合方差和极差分析, 得出提高 IAA、GA₃ 和 ZR 的最佳施肥配比为 N₅P₂K₆, 提高 ABA 含量的最佳施肥配比为 N₅P₀K₃。

【参 考 文 献】

- [1] 黎家, 李传友. 新中国成立 70 年来植物激素研究进展 [J]. 中国科学 (生命科学), 2019, 49(10): 1227–1281.
- [2] Zhou W K, Wei L R, Xu J, et al. *Arabidopsis* Tyrosyl-protein sulfotransferase acts in the auxin/PLETHORA pathway in regulating postembryonic maintenance of the root stem cell niche [J]. The Plant Cell, 2010, 22(11): 3692–3709.
- [3] Chen D, Ren Y J, Deng Y T, et al. Auxin polar transport is essential for the development of zygote and embryo in *Nicotiana tabacum* L. and correlated with ABP1 and PM H⁺-ATPase activities [J]. Journal of Experimental Botany, 2010, 61(6): 1853–1867.
- [4] Ni D A, Wang L J, Xu Z H, et al. Foliar modifications induced by inhibition of polar transport of auxin [J]. Cell Research, 1999, 9(1): 27–35.
- [5] Hu X Y, Neill S J, Tang Z C, et al. Nitric oxide mediates gravitropic bending in soybean roots [J]. Plant Physiology, 2005, 137(2): 663–670.
- [6] Sun J Q, Qi L L, Li Y N, et al. PIF4 and PIF5 transcription factors link blue light and auxin to regulate the phototropic response in *Arabidopsis* [J]. The Plant Cell, 2013, 25(6): 2102–2114.
- [7] 张海娜, 李存东, 肖凯. 外源细胞分裂素调控小麦生长及衰老特性的生理机制 [J]. 华北农学报, 2007, 22(5): 1–7.
- [8] Miguel A L, Gerard B, Carmen C. Controlling hormone signaling is a plant and pathogen challenge for growth and survival [J]. Current Opinion in Plant Biology, 2008, 11(4): 420–427.
- [9] 朱波, 徐绮雯, 马淑敏, 等. 干旱缺钾对油菜内源激素、光合作用和叶绿素荧光特性的影响 [J]. 中国油料作物学报, 2022, 44(3): 570–580.
- [10] 张世英, 刘易超, 李泳潭, 等. 干旱胁迫对中华金叶榆盆栽苗木内源激素的影响 [J]. 西部林业科学, 2021, 50(6): 40–45.
- [11] 罗玉婕, 邹旭, 彭冶, 等. 盐胁迫对两种海棠生长和内源激素的影响 [J]. 经济林研究, 2021, 39(1): 201–210.
- [12] 李昕辉, 张勛, 王森, 等. 外施 GA₃ 对中秋酥脆枣内源激素及果实品质的影响 [J]. 经济林研究, 2021, 39(2): 155–163.
- [13] 黎正英, 丘立杭, 闫海锋, 等. 外源赤霉素信号对甘蔗分蘖及其内源激素的影响 [J]. 热带作物学报, 2021, 42(10): 2942–2951.
- [14] 罗帅, 钟秋平, 葛晓宁, 等. 不同氮、磷、钾施肥对比对油茶花芽分化的影响 [J]. 林业科学研究, 2019, 32(2): 131–138.
- [15] 王玥琳, 徐大平, 杨曾奖, 等. 不同栽培措施对降香黄檀内源激素含量的影响 [J]. 植物研究, 2018, 38(5): 688–696.
- [16] 袁小军, 周幼成, 吴喜昌, 等. 氮磷钾配比施肥对油茶花芽生长及分化的影响 [J]. 经济林研究, 2019, 37(3): 1–8.
- [17] 袁雅琪, 王丽云, 袁小军, 等. 生长调节剂对南方红豆杉大孢子叶球和内源激素的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(6): 16–24.
- [18] 张华, 聂艳, 王定跃, 等. 乙烯利和多效唑对簕杜鹃生长开花及生理特性的影响 [J]. 林业科学, 2018, 54(10): 46–55.
- [19] 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.
- [20] 孙君, 朱留刚, 林志坤, 等. 不同烘焙温度对丹桂乌龙茶品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2017, 38(15): 11–14, 19.
- [21] 罗仙英, 莫荣海, 丁贵杰, 等. 不同配比施肥对马尾松

- 幼苗生长特征的影响[J]. 广西植物, 2022, 42(4): 608–616.
- [22] 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.
- [23] 周慧文, 陈荣发, 范业赓, 等. 不同施氮水平下甘蔗内源激素、产量和糖分的变化特征[J]. 热带作物学报, 2019, 40(11): 2142–2148.
- [24] Yang Y M, Xu C N, Wang B M, et al. Effects of plant growth regulators on secondary wall thickening of cotton fibres[J]. Plant Growth Regulation, 2001, 35(3): 233–237.
- [25] 李晓慧, 班甜甜, 王青青, 等. 不同LED补光时长对甘蓝幼苗内源激素含量的影响[J]. 分子植物育种, 2022, 20(19): 6512–6521.
- [26] 李宗霆, 周燮. 植物激素及其免疫检测技术[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1996.
- [27] 董宁光. 杨树嫩茎生根机理及调控激素的组织细胞原位分析[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [28] Singh D D, Singh R R, Ray P K. Effect of GA3 on Leaf Nutrients and Chemical Composition of Mango[J]. Chemical Science Review and Letters, 2021, 10(38): 283–287.
- [29] Bagale P, Pandey S, Regmi P, et al. Role of Plant Growth Regulator "Gibberellins" in Vegetable Production: An Overview[J]. International Journal of Horticultural Science and Technology, 2022, 9(3): 291–299.
- [30] Wang Y P, Shen W Z, Chan Z L, et al. Endogenous cytokinin overproduction modulates ROS homeostasis and decreases salt stress resistance in *Arabidopsis thaliana* [J]. Frontiers in Plant Science, 2015, 6: 1004.
- [31] Zhu J, Zhang K X, Wang W S, et al. Low temperature inhibits root growth by reducing auxin accumulation via ARR1/12[J]. Plant and Cell Physiology, 2015, 56(4): 727–736.
- [32] Zhang P, Wang W Q, Zhang G L, et al. Senescence-inducible expression of isopentenyl transferase extends leaf life, increases drought stress resistance and alters cytokinin metabolism in cassava[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2010, 52(7): 653–669.
- [33] Depuydt S, Hardtke C S. Hormone signalling crosstalk in plant growth regulation[J]. Current Biology, 2011, 21(9): R365–R373.
- [34] 欧二绫, 班骞, 田方, 等. 干旱对高羊茅幼苗生长和内源激素影响的分析[J]. 分子植物育种, 2023, 21(12): 4085–4093.
- [35] 覃喜军, 黄夕洋, 蒋水元, 等. 罗汉果花芽分化过程中内源激素的变化[J]. 植物生理学通讯, 2010, 46(9): 939–942.
- [36] 莫长明, 涂冬萍, 黄杰, 等. 罗汉果花芽分化过程中形态及其激素水平变化特征[J]. 西北植物学报, 2015, 35(1): 98–106.
- [37] Onanuga A O, Jiang P A, Adl S. Determination of endogenous hormones content in cotton varieties (*Gossypium hirsutum*) as influenced by phosphorus and potassium nutrition[J]. Journal of Agricultural Science, 2012, 4(7): 76–85.
- [38] Ahmed R, Hussain M J, Ahmed S, et al. Effect of N, P and K fertilizer on the flower yield of *Chrysanthemum* [J]. The Agriculturists, 2017, 15(1): 58–67.
- [39] 张振博, 屈馨月, 于宁宁, 等. 施氮量对夏玉米籽粒灌浆特性和内源激素作用的影响[J]. 作物学报, 2022, 48(9): 2366–2376.
- [40] 彭龙, 原保忠, 周欢, 等. 钾对棉花生长发育生理特性以及产量品质的影响研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(12): 227–231.
- [41] 官纪元, 樊卫国. 不同磷水平下刺梨实生苗生长及根系形态特征与内源激素含量的关系[J]. 林业科学, 2019, 55(4): 51–61.

(责任编辑 刘永梅)

