

王丹, 蓝惠萍, 张影波, 等. 镁对生长期艾纳香内源激素、产量和有效成分积累的影响 [J]. 福建农业学报, 2020, 35 (12): 1304–1311.

WANG D, LAN H P, ZHANG Y B, et al. Effect of Magnesium on Endogenous Hormones, Medicinal Material Yield, and *l*-Borneol Accumulation of Growing *Blumea balsamifera* Plants [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 35 (12): 1304–1311.

镁对生长期艾纳香内源激素、产量和有效成分积累的影响

王 丹¹, 蓝惠萍¹, 张影波¹, 胡 璇¹, 陈晓鹭¹, 陈振夏¹, 庞玉新², 于福来^{1*}

(1. 中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所/海南省艾纳香工程技术研究中心, 海南 海口 571101;

2. 广东药科大学中药资源学院, 广东 云浮 527500)

摘 要:【目的】明确施镁对生长期艾纳香内源激素、产量和有效成分 *l*-龙脑积累的影响情况。【方法】以 1 年生艾纳香种子苗为试验材料, 用七水合硫酸镁提供镁元素, 共设置 4 个镁水平, 分别为 0.0 (CK)、1.5、15.0、150.0 mg·mL⁻¹, 采用酶联免疫吸附法分别测定艾纳香叶片赤霉素 (GA₃)、生长素 (IAA)、脱落酸 (ABA)、玉米素 (ZR) 等 4 种内源激素含量。使用电子秤测定艾纳香药材产量, 利用 GC 测定生长期不同阶段艾纳香叶片有效成分 *l*-龙脑百分含量, 通过计算确定 *l*-龙脑单株产量。【结果】在处理第 30 d、60 d 和第 90 d 时, 不同施镁水平显著增加了艾纳香中 GA₃、IAA、ABA 和 ZR 等 4 种内源激素含量, 显著增加了生长期艾纳香药材产量, 其中 1.5、15.0 mg·mL⁻¹ 镁水平影响效果最显著。在处理第 60 d 和第 90 d 时, 不同施镁水平下艾纳香中 *l*-龙脑百分含量差异极显著 ($P < 0.01$), 在处理第 60 d 时, CK 组 *l*-龙脑百分含量最低, 较 1.5、15.0 和 150.0 mg·mL⁻¹ 镁处理组分别显著降低了 34.37%、35.48% 和 25.00%。在处理第 90 d 时, 1.5 mg·mL⁻¹ 镁处理组 *l*-龙脑百分含量显著高于其他处理组, 在处理第 30 d 和第 120 d 时, 各处理间差异不具有统计学意义 ($P > 0.05$)。在整个处理过程中, 与 CK 相比, 其他 3 个施镁水平均显著提高了 *l*-龙脑单株产量 ($P < 0.05$)。【结论】在处理第 30 d, 不同施镁水平显著促进了艾纳香内源激素、产量和 *l*-龙脑百分含量和单株产量的积累。在处理第 60 d、90 d 和第 120 d 时, 1.5、15.0 mg·mL⁻¹ 镁素的作用效果较明显, 对提高艾纳香药材产量和品质有显著的促进作用。

关键词: 镁; 艾纳香; 内源激素; 产量; *l*-龙脑

中图分类号: S 567

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2020) 12-1304-08

Effect of Magnesium on Endogenous Hormones, Medicinal Material Yield, and *l*-Borneol Accumulation of Growing *Blumea balsamifera* Plants

WANG Dan¹, LAN Huiping¹, ZHANG Yingbo¹, HU Xuan¹, CHEN Xiaolu¹, CHEN Zhenxia¹, PANG Yuxin², YU Fulai^{1*}

(1. Tropical Crops Genetic Resources Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences/Hainan Provincial Engineering Research Center for *Blumea balsamifera*, Haikou, Hainan 571101, China; 2. School of Chinese Medicinal Resources, Guangdong Pharmaceutical University, Yunfu, Guangdong 527500, China)

Abstract: 【Objective】Effects of magnesium (Mg) application on the endogenous hormones, medicinal material yield, and active component *l*-borneol accumulation of *Blumea balsamifera* (L.) DC. during growth periods were studied.

【Method】One-year-old seedlings of *B. balsamifera* were treated with MgSO₄·7H₂O to provide the plants with Mg at levels of 0.0, 1.5, 15.0 or 150.0 mg·mL⁻¹. Spanning across the growth periods of the plants, contents of gibberellic acid (GA₃), auxin (IAA), abscisic acid (ABA), and zeatin (ZR) in leaf were determined by the enzyme linked immunosorbent assay; yield of medicinal material on an electronic scale; and, contents of *l*-borneol by GC. The combined total *l*-borneol in life cycle was

收稿日期: 2020-04-12 初稿; 2020-10-17 修改稿

作者简介: 王丹 (1982-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 主要从事中药材 (南药) 规范化生产及其质量调控机制方面的研究 (E-mail: wang_dan1414@163.com)

* 通信作者: 于福来 (1983-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 主要从事中药 (南药) 资源定向培育、规范化生产及其质量调控研究 (E-mail: fulai.yu@163.com)

基金项目: 国家自然科学基金项目 (81403035); 海南省自然科学基金项目 (2019CXTD414); 中国热带农业科学院基本科研业务费专项资金项目 (1630032019004)

calculated as the per plant yield of the active component. 【Result】 On the 30th, 60th, and 90th day after the treatments, the 4 endogenous hormones and medicinal material yield of the treated plants significantly increased. The greatest effects were observed at the application levels of 1.5 or 15.0 mg·mL⁻¹. Sampled on the 60th and 90th day, the *l*-borneol contents in leaf significantly differed by the varied treatments the plants received ($P<0.01$). The lowest content showed up in the leaves tested on the 60th day after the 0.0 mg·mL⁻¹ control treatment, while 1.5 mg·mL⁻¹ had 34.37%, 15.0 mg·mL⁻¹ applications rendered 35.48%, and 150.0 mg·mL⁻¹ resulted in 25.00% on *l*-borneol. At the end of 90d, the *l*-borneol in leaf under 1.5 mg·mL⁻¹ treatment was significantly higher than those under other treatments, but no statistically significant differences found among the treatments on the 30th or the 120th day ($P>0.05$). All Mg applications significantly increased the per plant yields on *l*-borneol ($P<0.05$). 【Conclusion】 The Mg applications significantly boosted the endogenous hormones, medicinal material yield, and *l*-borneol production of the individual *B. balsamifera* plant in 30 d. On the 60th, 90th, and 120th day, the applications at the rates of 1.5 and 15.0 mg·mL⁻¹ seemed more apparent in promoting the yield of the medicinal material and the content of *l*-borneol than either control or the highest dosage.

Key words: magnesium; *Blumea balsamifera*; endogenous hormones; yield; *l*-borneol

0 引言

【研究意义】艾纳香为菊科艾纳香属植物艾纳香 *Blumea balsamifera* (L.) DC. 的叶及嫩枝, 贵州省、云南省和海南省是其主产区。艾纳香有祛风除湿、温中止泻、活血解毒等功效^[1-2]。《中国药典》规定艾纳香是提取天然冰片(艾片)的唯一来源, 主要有效成分为单萜类成分 *l*-龙脑^[3], 现代药理学研究发现, *l*-龙脑具有抗炎、抗氧化、抗辐射、镇痛、促进药物吸收、促进烫伤皮肤恢复、提神醒脑等作用^[4-5], 因此, 被广泛应用于医药、化妆品等领域。镁元素是植物所必需的营养元素之一, 在植物的生理生化过程中起到非常重要的作用。镁素具有影响植物光合生理过程、调节酶活化功能、影响活性氧代谢、碳氮代谢以及植物基因表达等作用^[6-7], 并且镁可以显著提高药用植物药材产量以及促进药材有效成分的积累^[8]。王丹等^[9]研究发现, 在海南冬季, 外源施加镁可以显著增加艾纳香叶片生物量, 对艾纳香有效成分 *l*-龙脑百分含量增加无显著促进作用, 但显著促进了艾纳香 *l*-龙脑单株产量的积累。以此为基础, 本文深入研究不同浓度镁对生长期艾纳香药材产量和内源激素以及 *l*-龙脑积累变化的影响, 确定最适宜的施镁浓度, 为实际栽培生产中艾纳香施镁提供数据支持和科学指导, 以生产出高产、高质的艾纳香药材。【前人研究进展】研究学者发现, 施肥可以显著提高艾纳香药材产量。何元农等^[10-11]证实 3 种农家肥、3 种一元化肥、复合肥和单独施用氮肥均对艾纳香的产量和有效成分的积累有显著促进作用。王丹等^[9, 12, 13]研究发现, 在海南冬季, 此时艾纳香生长进入迟缓期, 此时施用钙、镁、锰以及植物生长调节剂芸乙酸、赤霉素和 DA-6 均有益于艾纳香生长发育, 促进艾纳香叶、茎和根生物量的增加

以及有效成分 *l*-龙脑单株产量的积累。蓝惠萍等^[14]发现氮、磷、钾配施可以显著促进艾纳香药材产量和有效成分 *l*-龙脑相对含量的积累, 对产量积累影响作用依次为氮>钾>磷。王丹等^[2]证实 10.0 mg·mL⁻¹ 镁处理对 2 年生艾纳香药材产量和质量的提高效果最好, 1 年生艾纳香苗在生长期施加镁可以促进艾纳香生长, 提高叶片生物量, 显著促进磷、钾和镁元素积累, 抑制钙和铁的吸收, 对氮元素影响不显著, 15.0 mg·mL⁻¹ 镁素处理组锰、锌和铜含量最低^[15]。【本研究切入点】镁对生长期的艾纳香苗药材产量以及内源激素含量和 *l*-龙脑积累变化的影响研究未见报道。【拟解决的关键问题】本试验以 1 年生艾纳香为试验材料, 研究不同施镁水平对艾纳香药材产量和艾纳香叶片中内源激素赤霉素(GA₃)、生长素(IAA)、脱落酸(ABA)、玉米素(ZR)含量的影响变化, 以及有效成分 *l*-龙脑百分含量和 *l*-龙脑单株产量的变化情况, 以期为合理施肥, 提高艾纳香药材产量和品质提供理论依据和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

2015 年 7 月 9 日, 选择长势一致的艾纳香种子苗(经中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所于福来副研究员鉴定为艾纳香 *Blumea balsamifera* (L.) DC.) 为试验材料, 采用水培的方式, 基质为珍珠岩, 以 Hoagland 营养液为艾纳香提供营养成分。Hoagland 营养液中各组分的质量浓度分别为: KH₂PO₄ 136 mg·L⁻¹、H₃BO₃ 2.86 mg·L⁻¹、CuSO₄·5H₂O 0.08 mg·L⁻¹、ZnSO₄·7H₂O 0.22 mg·L⁻¹、Na₂MoO₄·2H₂O 0.52 mg·L⁻¹、MnSO₄·H₂O 1.81 mg·L⁻¹、Fe-EDTA 2.5 mg·L⁻¹、KNO₃ 510 mg·L⁻¹、Ca(NO₃)₂ 945 mg·L⁻¹。每天补充 1 次水分, 每隔 7 d 补充 1 次营养液。分别

于当年 8 月 15 日和 9 月 1 日进行叶面喷施镁, 以 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 提供镁素, 共设置 3 个质量浓度为 1.5、15.0、150.0 $\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$, 以不含镁的营养液为对照 (CK), 处理 120 d, 每 30 d 取样 1 次, 共取样 4 次。测定艾纳香药材产量以及药材有效成分 *l*-龙脑百分含量和 *l*-龙脑单株产量, 以及艾纳香叶片中内源激素 GA_3 、IAA、ABA、ZR 含量。

1.2 试验方法

1.2.1 药材产量的测定 取艾纳香的嫩枝和叶片, 阴干后用电子秤测量其药材产量。

1.2.2 *l*-龙脑百分含量测定 采用气相色谱法 (GC) 测定艾纳香中 *l*-龙脑百分含量^[2]。取艾纳香叶, 精密称量 3.000 g 置于 50 mL 具塞试管中, 加入乙酸乙酯 24 mL, 封口, 超声处理 40 min, 静置并抽滤, 滤液转移至 25 mL 容量瓶中, 用乙酸乙酯定容至 25 mL, 摇匀, 精密移取 2.0 mL 到 10 mL 容量瓶中, 水杨酸甲酯作为内标液, 加入 1.0 mL, 然后加乙酸乙酯稀释至刻度, 摇匀, 即得供试品溶液。使用 HP-5 石英毛细管色谱柱 (0.32 mm×30 m, 0.25 μm), 起始温度 50 $^{\circ}\text{C}$, 保持 2 min, 先以 5 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升温至 100 $^{\circ}\text{C}$, 然后以 20 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升温至 200 $^{\circ}\text{C}$, 保持 3 min; 进样口温度 220 $^{\circ}\text{C}$; 检测器温度 240 $^{\circ}\text{C}$; 进样量为 0.6 μL , 不分流。

1.2.3 *l*-龙脑单株产量的计算 将 *l*-龙脑百分含量与艾纳香单株药材产量相乘, 得 *l*-龙脑单株产量。

1.2.4 4 种内源激素含量测定 取相同部位的艾纳香成熟叶片, 采用酶联免疫吸附法测定 GA_3 、IAA、ABA、ZT 含量。试剂盒购自中国农业大学作物化学控制研究室。样品处理方法: 取艾纳香叶片 1.0 g 于液氮中速冻, 用 80% 甲醇溶液 (含二叔丁基对甲苯酚 (BHT) 1 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 匀浆, 4 $^{\circ}\text{C}$ 提取 8 h, 离心率为 4000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 15 min 沉淀, 再用 80% 甲醇重复提取 3 次, 合并上清液, 采用 C-18 固相萃取柱法去掉艾纳香叶片叶绿素, 氮气吹干, PBSTG 溶解定容, 用于酶联免疫检测仪测定^[16]。

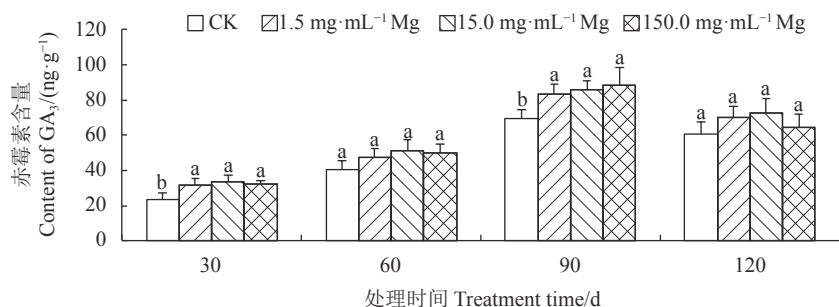
1.3 数据分析

使用 Excel 进行数据录入、整理及图表的绘制, 采用 SPSS 16.0 软件进行统计和分析, 用 One-way ANOVA 进行方差分析, 并用 Duncan 检验法进行多重比较分析。

2 结果与分析

2.1 镁对艾纳香叶片内源激素 GA_3 含量的影响

由图 1 可知, 在处理第 30 d 和第 90 d, 与 CK 相比, 其他 3 个施镁水平对艾纳香中 GA_3 含量增加均有显著的促进作用 ($P < 0.05$)。在处理第 30 d, 与 CK 相比, 1.5、15.0 和 150.0 $\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 镁处理 GA_3 分别显著增加了 31.82%、36.36% 和 42.71%。在处理第 60 d 和第 120 d, 各处理间差异不具有统计学意义 ($P > 0.05$)。



注: 同处理数字后不同小写字母表示显著差异 ($P < 0.05$)。图 2~7 同。

Note: Different lowercase letters behind the number in the same treatment indicated significant differences ($P < 0.05$). The same as Fig. 2-7.

图 1 不同施镁水平对艾纳香中赤霉素含量的影响

Fig. 1 Effect of Mg applications on GA_3 content of *B. balsamifera*

2.2 镁对艾纳香叶片内源激素 IAA 含量的影响

由图 2 可知, 在整个处理过程中, 镁元素极显著的增加了艾纳香中 IAA 含量 ($P < 0.01$)。在处理第 30 d, 与 CK 和 1.5 $\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 镁水平相比, 15.0、150.0 $\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 施镁水平极显著增加了 IAA 含量, 分别是 CK 和 1.5 $\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 镁处理组的 2.56 倍、1.45 倍和 2.40 倍、1.36 倍, 1.5 $\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 镁处理组是 0.0

$\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 镁处理组 IAA 含量的 1.77 倍 ($P < 0.01$)。

2.3 镁对艾纳香叶片内源激素 ABA 含量的影响

由图 3 可知, 在处理的第 30 d、60 d 和第 90 d, 镁显著的增加了艾纳香中 ABA 含量 ($P < 0.05$)。在处理第 30 d, 与 CK 和 1.5 $\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 镁水平相比, 15.0 $\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 和 150.0 $\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 施镁水平极显著增加了 ABA 含量, 分别是 CK 和 1.5 $\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 镁处理的 1.4 倍、

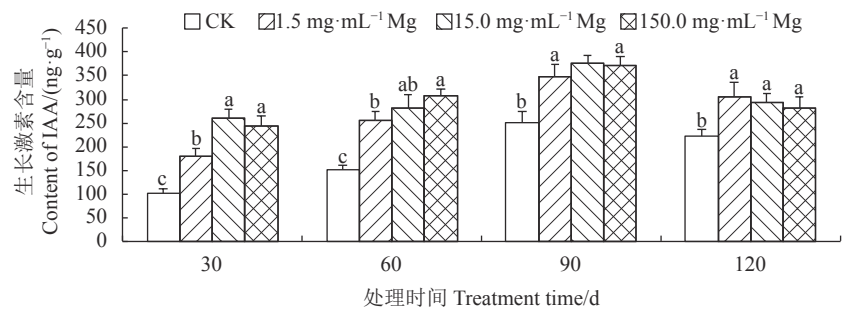


图 2 不同施镁水平对艾纳香中生长激素含量的影响

Fig. 2 Effect of Mg applications on IAA content of *B. balsamifera*

1.25 倍和 1.32 倍、1.18 倍，1.5 mg·mL⁻¹ 镁处理是 CK 组 ABA 含量的 1.12 倍 ($P<0.01$)。在处理第 120 d，各处理间差异不具有统计学意义 ($P>0.05$)。

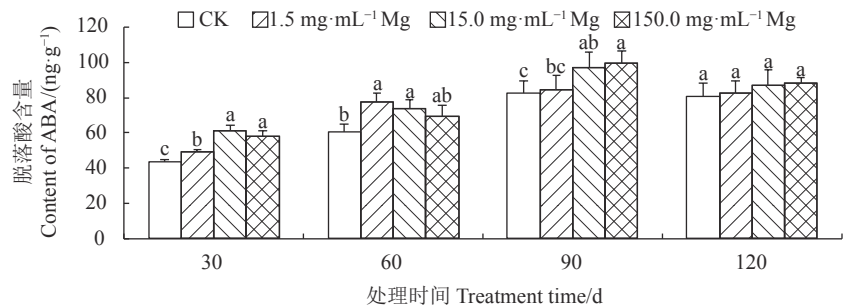


图 3 不同施镁水平对艾纳香中脱落酸含量的影响

Fig. 3 Effect of Mg applications on ABA content of *B. balsamifera*

2.4 镁对艾纳香叶片内源激素 ZR 含量的影响

由图 4 可知，在处理的第 30 d、60 d 和第 90 d，镁显著增加了艾纳香中 ZR 含量 ($P<0.05$)。在处理第 30 d，与 CK 和 1.5 mg·mL⁻¹ 镁水平相比，15.0 mg·mL⁻¹ 和 150.0 mg·mL⁻¹ 施镁水平极显著增加了 ZR 含量，分别是 CK 和 1.5 mg·mL⁻¹ 镁处理组的 2.46 倍、1.39 倍和 2.42 倍、1.37 倍，1.5 mg·mL⁻¹ 镁处理组是 CK 处理组 ZR 含量的 1.76 倍 ($P<0.01$)。在处理第 120 d，各处理间差异不具有统计学意义 ($P>0.05$)。

2.5 镁对艾纳香药材产量的影响

由图 5 可知，在艾纳香的生长期中，随着时间的延长，不同施镁水平下艾纳香药材产量整体呈现

出逐渐升高的趋势。在处理第 30 d，各处理间药材产量差异显著 ($P<0.05$)，1.5 mg·mL⁻¹ 和 15.0 mg·mL⁻¹ 镁处理组药材产量显著高于 CK 组，分别增加了 25.49% 和 25.08%。在处理第 60 d 和第 90 d，各处理间药材产量差异极显著 ($P<0.01$)。15.0 mg·mL⁻¹ 镁处理组药材产量最高，显著高于其他 3 个处理组。

2.6 镁对艾纳香 l-龙脑百分含量的影响

由图 6 可知，在艾纳香生长期，随着时间的延长，不同施镁水平下艾纳香有效成分 l-龙脑含量整体表现为先升高再下降。根据方差分析结果表明，在处理第 60 d 和第 90 d，各处理间差异极显著 ($P<0.01$)。在处理第 60 d，CK 组 l-龙脑百分含量最低，

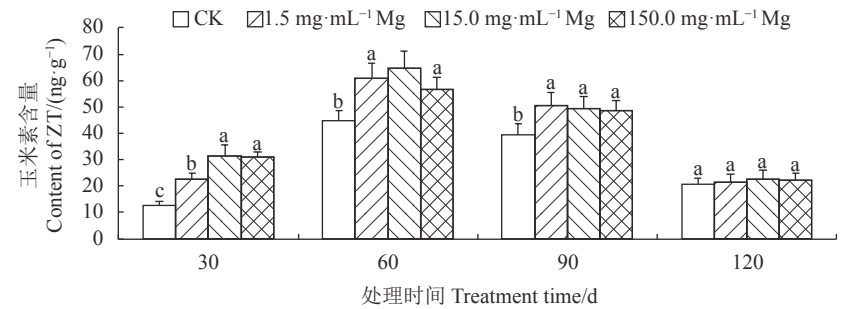


图 4 不同施镁水平对艾纳香中玉米素含量的影响

Fig. 4 Effect of Mg applications on ZT content of *B. balsamifera*

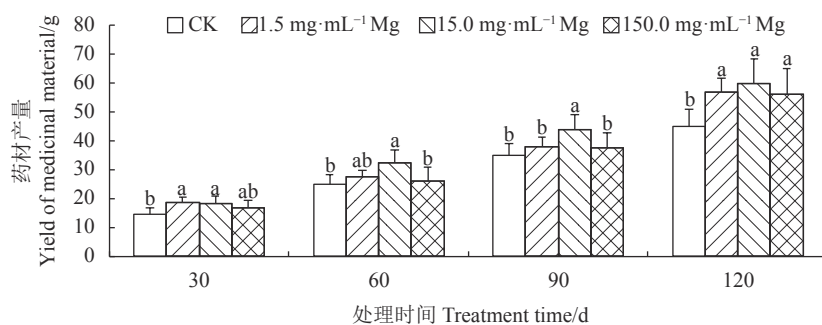


图 5 不同施镁水平对艾纳香药材产量的影响

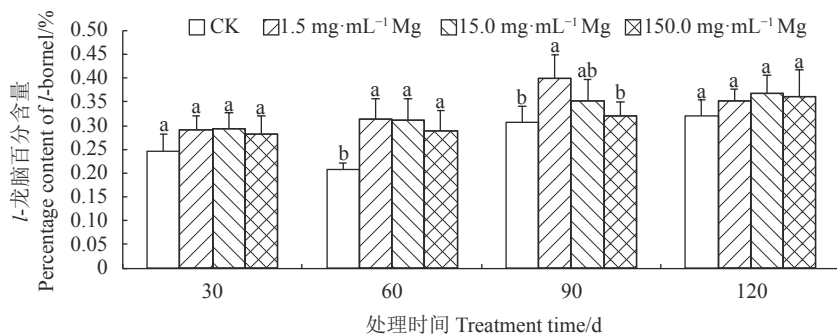
Fig. 5 Effect of Mg applications on medicinal material yield of *B. balsamifera*

图 6 不同施镁水平对艾纳香中 l-龙脑百分含量的影响

Fig. 6 Effect of Mg applications on l-borneol content of *B. balsamifera*

较 1.5、15.0 和 150.0 mg·mL⁻¹ 镁处理组分别显著降低了 34.37%、35.48% 和 25.00%。然而, 在处理第 90 d, 1.5 mg·mL⁻¹ 镁处理组 l-龙脑百分含量显著高于其他处理组。在处理第 30 d 和第 120 d, 各处理间差异不具有统计学意义 ($P>0.05$)。

2.7 镁对艾纳香 l-龙脑单株产量的影响

由图 7 可知, 在艾纳香生长期, 随着时间的延长, 不同施镁水平下艾纳香中 l-龙脑单株产量表现为

逐渐上升。根据方差分析结果表明, 各处理间差异极显著 ($P<0.01$)。在处理第 30 d、60 d 和第 120 d, 与 CK 相比, 其他 3 个施镁水平均显著提高了 l-龙脑单株产量。在处理第 90 d, 1.5 mg·mL⁻¹ 和 15.0 mg·mL⁻¹ 镁处理组 l-龙脑单株产量显著高于 0.0 mg·mL⁻¹ 和 150.0 mg·mL⁻¹ 镁处理组, 分别增加了 41.44%、25.00% 和 44.96%、28.12%。

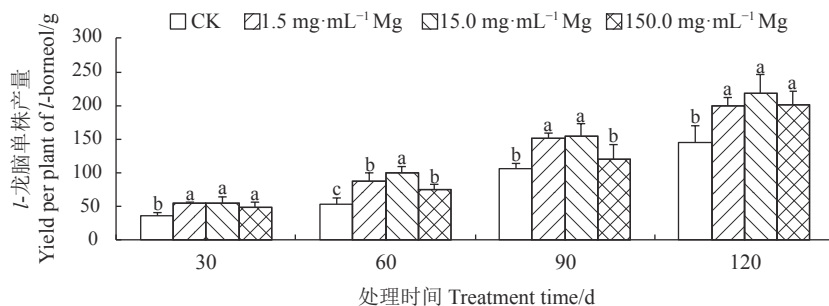


图 7 不同施镁水平对艾纳香中 l-龙脑单株产量的影响

Fig. 7 Effect of Mg applications on per plant l-borneol yield of *B. balsamifera*

3 讨论与结论

3.1 镁对艾纳香内源激素积累和产量的影响

内源激素对植物生长发育、产量和品质形成具

有重要的调控作用。在植物生长发育的不同阶段都需要植物激素的参与调控, 例如种子萌发、营养物质的转移和运输、果实发育成熟、植物衰老等不同阶段, 氮等营养元素的施用可以对植物内源激素的

代谢和平衡起到调节和促进的作用^[17-19]。但是有关施镁对植物内源激素的影响相关报道较少。周开兵等^[20]研究发现, 在妃子笑荔枝果实生长发育中, 施镁对 IAA 和 Eth 含量无明显的增加作用, 但是显著增加了 GA₃、ABA 含量以及 ABA/GA₃ 含量比。PeyamiBattal^[21] 研究发现, 较对照组相比, 过量氮、磷和镁处理的营养期玉米根、茎和叶中 GA₃ 含量增加了 6%~27%, 在开花期, GA₃ 没有显著的增加, 反而下降了 8%~35%。Rehman H U, et al^[22] 证实玉米籽粒提取物 (MGE) 结合叶面喷施镁可以促进 Hysun-336 向日葵杂种中氮、磷、钾、镁吸收以及增加内源性植物激素 IAA、GA₃ 和玉米蛋白含量。本文研究结果证实, 在艾纳香生长期, 对艾纳香叶片喷施不同水平的镁, 可以显著增加艾纳香叶片中内源激素 GA₃、IAA、ABA 和 ZT 含量, 与上述的研究结果一致, 说明适量的施镁能促进与艾纳香叶片产量形成密切相关的内源激素含量的增加, 进而显著提高艾纳香药材产量。这从内源激素生理角度阐述了适宜的镁处理能提高艾纳香药材产量的原因。

另一方面, 由于镁是植物生长发育所必需的营养元素之一, 施镁有利于植物叶绿素的形成和转化, 镁素还可以参与植物光合作用, 调节植物碳水化合物、脂肪、蛋白质和核酸等物质的合成和积累^[23-25], 可以更好地为植物提供良好的物质基础, 以促进植物生长和发育^[26]。这也佐证了本文研究结果, 证实镁可以显著提高生长期艾纳香药材产量。在海南, 艾纳香的生长期较长, 从 8 月至 11 月生长都比较旺盛, 11 月到 12 月为采收期, 此时的产量和质量均较高。以上结果与王丹等^[9] 在海南冬季外源施镁在艾纳香上的效果一致。这说明艾纳香生长的任何时期都需要镁素, 促进生长发育, 提高药材产量。目前, 已有众多研究证实, 施加镁可以促进太子参、槟榔等生长发育, 提高产量^[26-28]。

3.2 镁对艾纳香中 *l*-龙脑积累的影响

次生代谢是植物生命活动过程中重要的过程, 可以通过生物因素和非生物因素的诱导促进其大量形成。*l*-龙脑是艾纳香主要的萜类次生代谢产物, 也是艾纳香重要的药用活性成分, 提高 *l*-龙脑含量对于艾纳香的药用价值和功效作用有着重要的意义^[29]。镁不仅可以影响植物内源激素的变化和植物生长, 而且对植物体内化学成分积累等次生代谢也有影响。本研究发现, 不同施镁水平可以不同程度的提高艾纳香中 *l*-龙脑百分含量和单株产量, 尤其是 1.5 和 15.0 mg·mL⁻¹ 镁效果最好。这主要可能由于 *l*-龙脑为单萜类化合物, 其催化合成的第一个关键酶为单

萜合酶, 控制着异戊二烯转化为单萜化合物^[2, 30]。单萜合酶以单体或同型二聚体的形式催化反应。每个单体 C 端活性位点的天冬氨酸保守区 DDxxD 首先与一个二价金属阳离子 (Mg²⁺) 结合, 然后与氢键络合形成 H₂O-Mg²⁺ 复合物和 H₂O 形成基本空间结构, 后续的焦磷酸基团 (diphosphate, PPI) 可以与 Mg²⁺ 络合, 诱导活性位点的 α 螺旋规则排列进行催化, 并使香叶基焦磷酸 (geranyl diphosphate, GPP) 离子化, 才能发生异构、重排和环化反应^[31-34]。由此可见镁主要通过影响单萜合酶在 *l*-龙脑生物合成过程中的构成和催化活性, 调控 *l*-龙脑的次生代谢过程, 最终影响 *l*-龙脑的形成和积累。

参考文献:

- [1] 国家中医药管理局《中华本草》编委会. 中华本草 (1-10卷) [M]. 上海: 上海科技教育出版社, 1999.
- [2] 王丹, 蓝惠萍, 张影波, 等. 镁对两年生艾纳香生物量、抗氧化酶活性及有效成分积累的影响 [J]. 热带农业科学, 2018, 38 (7): 50-56.
WANG D, LAN H P, ZHANG Y B, et al. The effect of magnesium on biomass, antioxidant enzyme activities, and active component accumulation of two years old *Blumea balsamifera* [J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2018, 38 (7): 50-56. (in Chinese)
- [3] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典 [M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2015.
- [4] 李璞, 陈宇琼, 黄火强. 艾纳香化学成分与药理活性研究进展 [J]. 实用中医内科杂志, 2012, 26 (13): 3-4, 6.
LI P, CHEN Y Q, HUANG H Q. Research progress on chemical constituents and biological activities of *Blumea balsamifera* (L.) DC [J]. *Journal of Practical Traditional Chinese Internal Medicine*, 2012, 26 (13): 3-4, 6. (in Chinese)
- [5] 李小婷, 王丹, 庞玉新, 等. 左旋龙脑对UVB辐射后小鼠皮肤损伤的影响 [J]. 中国现代中药, 2017, 19 (4): 518-524.
LI X T, WANG D, PANG Y X, et al. effects of L-borneol on UVB-induced Photo-damages in skin of balb/c mice [J]. *Modern Chinese Medicine*, 2017, 19 (4): 518-524. (in Chinese)
- [6] SILVA D M D, DE SOUZA K R D, VILAS BOAS L V, et al. The effect of magnesium nutrition on the antioxidant response of coffee seedlings under heat stress [J]. *Scientia Horticulturae*, 2017, 224: 115-125.
- [7] CANIZELLA B T, MOREIRA A, MORAES L A C, et al. Efficiency of magnesium use by common bean varieties regarding yield, physiological components, and nutritional status of plants [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2015, 46 (11): 1376-1390.
- [8] 林敏霞, 张晓东, 邱美欢, 等. 植物镁素生理功能及镁素营养诊断和施用 [J]. 热带农业科学, 2016, 36 (3): 39-43.
LIN M X, ZHANG X D, QIU M H, et al. Physiological function, nutrition diagnosis and application of the magnesium element on

- plant [J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2016, 36 (3): 39–43. (in Chinese)
- [9] 王丹, 范佐旺, 庞玉新, 等. 外源镁对冬季迟缓期的艾纳香生物量和有效成分含量的影响 [J]. *中国实验方剂学杂志*, 2015, 21 (4): 75–79.
- WANG D, FAN Z W, PANG Y X, et al. Effect of exogenous magnesium on biomass and contents of effective constituents of *Blumea balsamifera* in slow growth period of winter [J]. *China Journal of Experimental Traditional Medical Formulae*, 2015, 21 (4): 75–79. (in Chinese)
- [10] 何元农, 丁映, 洗福荣, 等. 肥料种类对艾纳香生物产量和有效成分含量的影响 [J]. *贵州农业科学*, 2005, 33 (5): 53–57.
- HE Y N, DING Y, XIAN F R, et al. Effects of different fertilizers on biological yield and active ingredient content of *Blumea balsamifera* [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2005, 33 (5): 53–57. (in Chinese)
- [11] 何元农, 柴立, 丁映, 等. 艾纳香产量和有效成分含量对氮素营养的反应 [J]. *贵州农业科学*, 2006, 34 (2): 28–30.
- HE Y N, CHAI L, DING Y, et al. Effect of N nutrition on yield and active ingredient in *Blumea balsamifera* [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2006, 34 (2): 28–30. (in Chinese)
- [12] 王丹, 马青松, 范佐旺, 等. 赤霉素对冬季迟缓期艾纳香生长和有效成分含量的影响 [J]. *贵州农业科学*, 2015, 43 (11): 153–156.
- WANG D, MA Q S, FAN Z W, et al. Effects of gibberellin on growth and contents of effective constituents in *Blumea balsamifera* in slow growth period of winter [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2015, 43 (11): 153–156. (in Chinese)
- [13] WANG D, MA Q S, FAN Z W, et al. The effect of calcium element on biomass and contents of effective constituents in *BlumeaBalsamifera* in slow growth period of winter [J]. *Agricultural Science & Technology*, 2016, 17 (2): 358–361, 437.
- [14] 蓝惠萍, 王丹, 杨全, 等. 氮磷钾配施对艾纳香产量及品质的影响 [J]. *贵州农业科学*, 2017, 45 (1): 107–111.
- LAN H P, WANG D, YANG Q, et al. Effects of combined application of NPK fertilizers on yield and quality of *Blumea balsamifera* [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2017, 45 (1): 107–111. (in Chinese)
- [15] 王丹, 蓝惠萍, 张影波, 等. 镁素处理对艾纳香药材生物量和营养元素积累的影响 [J]. *热带作物学报*, 2018, 39 (11): 2126–2131.
- WANG D, LAN H P, ZHANG Y B, et al. The effect of magnesium on biomass and accumulation of nutrient elements in *Blumeabalsamifera* [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2018, 39 (11): 2126–2131. (in Chinese)
- [16] YANG J C, ZHANG J H, WANG Z Q, et al. Hormonal changes in the grains of rice subjected to water stress during grain filling [J]. *Plant Physiology*, 2001, 127 (1): 315–323.
- [17] 罗庆华, 李振雷, 林俊清, 等. 氮肥用量对苦荞内源激素、产量和品质的影响 [J]. *福建农业学报*, 2019, 34 (3): 271–277.
- LUO Q H, LI Z Z, LIN J Q, et al. Effects of nitrogen application level on endogenous hormones, yield and quality of Tartary buckwheat [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 34 (3): 271–277. (in Chinese)
- [18] 敖兰吉亚, 季祥, 邵盈, 等. 山药块茎生长期5种内源激素含量变化对块茎膨大的影响 [J]. *福建农业学报*, 2019, 34 (3): 284–292.
- AOLAN J Y, JI X, SHAO Y, et al. Correlation between endogenous hormones and Tuber growth of *Dioscorea oppositifolia* [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 34 (3): 284–292. (in Chinese)
- [19] QIU L H, CHEN R F, LUO H M, et al. Effects of exogenous GA₃ and DPC treatments on levels of endogenous hormone and expression of key gibberellin biosynthesis pathway genes during stem elongation in sugarcane [J]. *Sugar Tech*, 2019, 21 (6): 936–948.
- [20] 周开兵, 周晓超, 苏阳, 等. 叶面镁营养促进妃子笑荔枝果皮着色的生理成因 [J]. *热带作物学报*, 2016, 37 (9): 1752–1758.
- ZHOU K B, ZHOU X C, SU Y, et al. The physiological causes of foliar Mg application enhance the fruit pigmentation of *Litchi chinensis* sonn. cv feizixiao [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2016, 37 (9): 1752–1758. (in Chinese)
- [21] BATTAL P. Effects of some mineral nutrients on gibberellic acid levels in maize plants (ZEA MAYS L) [J]. *Economic Botany*, 2004, 58 (2): 195–203.
- [22] REHMAN H U, ALHARBY H F, ALZHRANI Y, et al. Magnesium and organic biostimulant integrative application induces physiological and biochemical changes in sunflower plants and its harvested progeny on sandy soil [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2018, 126: 97–105.
- [23] 靳晓琳, 马翠兰, 陈立松. 植物缺镁研究进展 [J]. *亚热带农业研究*, 2012, 8 (2): 118–122.
- JIN X L, MA C L, CHEN L S. Research progress on magnesium deficiency in plants [J]. *Subtropical Agriculture Research*, 2012, 8 (2): 118–122. (in Chinese)
- [24] 吕世保, 王戈, 白羽祥, 等. 不同施镁量对烤烟K326生长和产质量的影响 [J]. *安徽农业科学*, 2017, 45 (26): 41–43.
- LYU S B, WANG G, BAI Y X, et al. Effects of magnesium on growth and yield and quality of flue-cured tobacco K326 [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2017, 45 (26): 41–43. (in Chinese)
- [25] 苏阳. 荔枝果皮钾、钙和镁含量变化与着色发育的关系[D]. 海南大学, 2015.
- SU Y. Study on the relationships between the changes in the contents of potassium and calcium and magnesium in Litchi pericarps and the pericarp's coloring[D]. Haikou: Hainan University, 2015. (in Chinese)
- [26] 莫兴春, 李金玲, 赵致, 等. 钙镁元素缺乏对太子参产量和品质的影响 [J]. *中国现代中药*, 2014, 16 (7): 547–550, 555.
- MO X C, LI J L, ZHAO Z, et al. Effects on the yield and quality of *Pseudostellaria heterophylla* by treatments of calcium and magnesium deficiency [J]. *Modern Chinese Medicine*, 2014, 16 (7): 547–550, 555. (in Chinese)
- [27] 李佳, 曹先梅, 刘立云, 等. 镁对槟榔幼苗光合特性和叶绿体超微结构的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25 (11): 1949–1956.
- LI J, CAO X M, LIU L Y, et al. Effects of different magnesium nutrition levels on photosynthetic characteristics and chloroplast

- ultrastructure of areca palm seedlings [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25 (11) : 1949–1956. (in Chinese)
- [28] 袁剑龙, 杨丽丽, 王玉萍, 等. 低镁胁迫对马铃薯试管苗碳水化合物积累和分配的影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 2018, 36 (4) : 200–206.
- YUAN J L, YANG L L, WANG Y P, et al. Effect of the accumulation and distribution of carbohydrates of potato seedling under low magnesium stress [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36 (4) : 200–206. (in Chinese)
- [29] 白琳, 官玲亮, 陈松笔, 等. 茉莉酸甲酯对艾纳香活性成分、抗氧化酶活力以及内源激素含量的影响 [J]. *中草药*, 2019, 50 (1) : 203–209.
- BAI L, GUAN L L, CHEN S B, et al. Effects of methyl jasmonate on active components, anti-oxidant enzyme activities and endogenous hormone content in *Blumea balsamifera* [J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2019, 50 (1) : 203–209. (in Chinese)
- [30] KARP F, ZHAO Y X, SANTHAMMA B, et al. Inhibition of monoterpene cyclases by inert analogues of geranyl diphosphate and linalyl diphosphate [J]. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 2007, 468 (1) : 140–146.
- [31] HYATT D C, YOUN B, ZHAO Y, et al. Structure of limonene synthase, a simple model for terpenoid cyclase catalysis [J]. *PNAS*, 2007, 104 (13) : 5360–5365.
- [32] PETERS R J, CROTEAU R B. Alternative termination chemistries utilized by monoterpene cyclases: Chimeric analysis of bornyl diphosphate, 1,8-cineole, and sabinene synthases [J]. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 2003, 417 (2) : 203–211.
- [33] WHITTINGTON D A, WISE M L, URBANSKY M, et al. Nonlinear partial differential equations and applications: Bornyl diphosphate synthase: Structure and strategy for carbocation manipulation by a terpenoid cyclase [J]. *PNAS*, 2002, 99 (24) : 15375–15380.
- [34] 徐应文. 鱼腥草单萜次生代谢研究[D]. 四川农业大学, 2012.
- XU Y W. Monoterpene secondary metabolites in *Houttuynia cordata* Thunb.[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2012. (in Chinese)

(责任编辑：黄爱萍)