

引用格式: 刘畅, 陈思缘, 吴鸿飞, 等. 外源 AVG 与 GA_3 对香榧坐果及果实品质的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2026, 43(5): 954–962. LIU Chang, CHEN Siyuan, WU Hongfei, et al. Effects of exogenous AVG and GA_3 on seed setting and quality in *Torreya grandis* ‘Merrillii’[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2026, 43(5): 954–962.

外源 AVG 与 GA_3 对香榧坐果及果实品质的影响

刘 畅^{1,2}, 陈思缘^{1,2}, 吴鸿飞^{1,2}, 姜 威^{1,2}, 王富城^{1,2}, 吴家胜^{1,2}, 张 瑞^{1,2}

(1. 浙江农林大学 森林食物资源挖掘与利用全国重点实验室, 浙江 杭州 311300; 2. 浙江农林大学 全省经济林品质调控与加工利用重点实验室, 浙江 杭州 311300)

摘要: 【目的】香榧 *Torreya grandis* ‘Merrillii’ 为中国南方的特色干果树种, 其落果率高达 90%, 严重制约产业发展。探究外源植物生长调节剂氨基乙氧基乙烯基甘氨酸 (AVG) 和赤霉素 (GA_3) 对香榧坐果和果实品质的影响及其生理调控机制, 可为香榧产业提质增效提供理论支撑。【方法】在早春营养竞争激烈时期 (授粉前 20 d) 喷施 4 种处理: AVG ($180\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、 GA_3 ($200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、AVG+ GA_3 组合, 以及蒸馏水作为对照 (ck)。测定落果动态、果实品质及其相关生理指标, 分析不同植物生长调节剂对香榧坐果和果实品质的影响。【结果】AVG 和 GA_3 处理均能显著提高坐果率和单果质量 ($P<0.05$), 其中 AVG 处理对坐果率的提高效果更为明显, 由 ck 的 6.84% 提升至 16.92%; GA_3 处理则对单果质量的提高更为明显, 其单果质量为 ck 的 141.91% ($P<0.05$); AVG+ GA_3 组合喷施可增加单果质量, 但对坐果率的提高并不明显。在品质形成方面, AVG、 GA_3 及 AVG+ GA_3 组合均在不同程度上改善了果实品质特性。 GA_3 处理维持了较高的吲哚乙酸 (IAA) 与 GA_3 的协同效应, AVG 处理通过降低果实发育前期脱落酸 (ABA) 与 GA_3 的比值 (ABA/ GA_3) 来影响坐果。¹³C 标记显示: AVG 和 GA_3 处理均能促进光合同化物向果实分配, 进而促进果实发育。【结论】AVG 和 GA_3 处理通过影响内源激素波动和营养物质分配, 来改善香榧坐果和果实营养品质。在生产中, 若以提高坐果率为首要目标, 建议喷施 AVG ($180\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); 若以提高单果质量为首要目标, 则建议喷施 GA_3 ($200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); AVG+ GA_3 组合处理仍需进一步优化配比。图 4 表 1 参 25

关键词: 香榧; 氨基乙氧基乙烯基甘氨酸; 赤霉素; 内源激素; 营养品质

中图分类号: S759.3 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2026)05-0954-09

Effects of exogenous AVG and GA_3 on seed setting and quality in *Torreya grandis* ‘Merrillii’

LIU Chang^{1,2}, CHEN Siyuan^{1,2}, WU Hongfei^{1,2}, JIANG Wei^{1,2}, WANG Fucheng^{1,2}, WU Jiasheng^{1,2}, ZHANG Rui^{1,2}

(1. State Key Laboratory for Development and Utilization of Forest Food Resources, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. Zhejiang Key Laboratory of Non-wood Forest Products Quality Regulation and Processing Utilization, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

Abstract: 【Objective】*Torreya grandis* ‘Merrillii’ is a characteristic dried fruit tree species in southern China, exhibiting a seed drop rate of up to 90%, which severely constrains its productivity and sustainable industrial development. This study aims to investigate the effects of exogenous plant growth regulators [aminoethoxyvinylglycine (AVG) and gibberellic acid (GA_3)] on seed setting and quality of *T. grandis*, and to elucidate the underlying physiological regulatory mechanisms, providing theoretical support for enhancing seed quality and yield in *T. grandis* industry. 【Method】Using middle-aged bearing *T. grandis* trees as experimental material, 4 treatments were applied via foliar spraying during the early spring period of intense nutrient

收稿日期: 2025-06-27; 修回日期: 2026-05-06

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2024YFD2200600)

作者简介: 刘畅 (ORCID: 0000-0003-3917-0624), 从事经济林栽培与利用研究。E-mail: 2022602122075@stu.zafu.edu.cn。通信作者: 张瑞 (ORCID: 0000-0002-7235-505X), 教授, 博士, 从事经济林栽培与利用研究。E-mail: rui.zhang@zafu.edu.cn

competition (20 d before pollination): AVG (180 mg·L⁻¹), GA₃ (200 mg·L⁻¹), a combination of AVG (180 mg·L⁻¹) and GA₃ (200 mg·L⁻¹), and distilled water (control, ck). Seed setting rate, seed weight, endogenous hormone levels and nutrient content were measured to analyze the effects of different plant growth regulators on seed setting rate and quality. [Result] Both AVG and GA₃ treatments significantly increased seed setting rate and seed weight. AVG treatment was more effective in improving seed setting rate to 16.92% compared to ck of 6.84% ($P < 0.05$). GA₃ treatment had a more pronounced effect on seed weight, which increased single seed weight to 141.91% of ck ($P < 0.05$). AVG+GA₃ treatment increased seed weight but did not significantly improve the seed setting rate. Regarding quality formation, AVG, GA₃, and AVG+GA₃ treatments improved the seed nutritional quality to varying degrees. GA₃ treatment maintained a higher synergistic effect between indole-3-acetic acid (IAA) and GA₃. AVG treatment influenced seed setting by reducing the abscisic acid (ABA)/GA₃ ratio during the early seed development stage. ¹³C labeling demonstrated that both AVG and GA₃ treatments promoted the allocation of assimilates to the seed, thereby enhancing seed development. [Conclusion] AVG and GA₃ treatments improve seed setting and nutritional quality in *T. grandis* by modulating endogenous hormone fluctuations and nutrient partitioning. For practical application, AVG (180 mg·L⁻¹) is recommended when the primary objective is to increase the seed setting rate, and GA₃ (200 mg·L⁻¹) is suggested when the main goal is to increase the seed weight. The optimal ratio for the AVG+GA₃ treatment requires further optimization. [Ch, 4 fig. 1 tab. 25 ref.]

Key words: *Torreya grandis* ‘Merrillii’; aminoethoxyvinylglycine (AVG); gibberellic acid (GA₃); endogenous hormones; nutritional quality

香榧 *Torreya grandis* ‘Merrillii’ 为红豆杉科 Taxaceae 榧树属 *Torreya* 常绿乔木, 是中国南方山区特色干果树种。香榧兼具药用与食用价值, 可用于保健品、化妆品原料等深加工产品开发, 经济价值持续提升。与一般经济林树种相比, 香榧果实生长发育和调控过程独具特色^[1], 其果实从授粉到成熟历时漫长, 达 17 个月。雌球花通常于 4 月开花授粉后形成幼果, 包裹在珠鳞中, 直至翌年 4 月幼果才开始生长膨大。此阶段对于香榧产量和品质形成至关重要, 由于树体资源分配的“库强源弱”特性, 营养需求旺盛而光合产物供应不足, 大量幼果会出现生长发育停滞的现象, 无法突破种鳞组织而停止生长, 导致大量落果发生^[2]。调查显示: 在某些香榧种植区, 僵果发生率高达 95%, 严重影响了香榧的产量^[3]。因此, 如何提高香榧坐果率, 是香榧产业发展亟待解决的问题。

WANG 等^[4]通过对香榧进行不同时间和强度的疏花疏果处理, 发现授粉前 20 d 进行花果调控可以显著提高香榧坐果率, 这是影响营养分配的关键时期。然而, 疏花疏果虽然可以部分缓解花果竞争对坐果的影响, 但需要耗费大量的人力和物力, 不适于大规模应用。因此, 产业上通常采用外施植物生长调节剂来改善落果情况和增强果实品质。外源赤霉素 (GA₃) 处理已被证明能显著提高油茶 *Camellia oleifera* 当年的果实产量, 并改善油茶的大小年现象^[5]。氨基乙氧基乙烯基甘氨酸 (AVG) 作为一种乙烯合成抑制剂, 可通过抑制 1-氨基环丙烷-1-羧酸合成酶 (ACS) 的活性, 阻断 S-腺苷甲硫氨酸 (SAM) 向 1-氨基环丙烷-1-羧酸 (ACC) 转化, 抑制乙烯的生物合成, 从而影响果实发育。ALTUNTAS 等^[6]发现 200 mg·L⁻¹ 的 AVG 水溶液能够有效延长圣罗沙李 *Prunus salicina* 成熟期和收获期, 并改善果实品质。

本研究拟在香榧早春营养竞争关键时期, 采用外施 AVG、GA₃ 以及两者结合处理, 通过测定不同处理下香榧的坐果动态、果实产量和品质性状以及果实发育过程中关键生理指标的变化, 分析花果营养物质积累与分配规律, 旨在揭示不同外源植物生长调节剂对香榧坐果及品质的影响及其生理调控机制, 为香榧产业提质增效提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于浙江省杭州市临安区於潜镇的香榧生态高效经营示范林长期基地 (30°10'N, 119°22'E)。

该基地的香榧人工林建立于2004年,其林分密度为 $1\,200\text{株}\cdot\text{hm}^{-2}$,香榧树体平均地径为 16.1 cm ,平均树高为 3.7 m 。该地区属于亚热带季风气候区,年均降水量为 $1\,628.6\text{ mm}$,年均气温为 $16.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,年日照时数为 $1\,847.3\text{ h}$,无霜期为 237 d 。土壤类型以黄壤为主,地形地貌为低山丘陵,土壤质地疏松,排水良好。基地实施标准化树型调控和水肥管理。

1.2 外源激素处理

选取树龄一致、生长势相近的20株成年香榧树作为试材,于2023年3月初(授粉前20 d)进行外源激素喷施试验。参照前人研究^[5,7],试验采用4种处理,包括3种外源激素处理[AVG($180\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、 GA_3 ($200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、AVG($180\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)+ GA_3 ($200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)组合],以及对照组(喷施等量蒸馏水,ck)。采用随机区组设计开展香榧外源喷施处理试验,为确保试验的代表性和可靠性,采用分层随机取样策略,在每株样树的东、南、西、北4个主要方位,各选取30个结果枝进行标记。每处理包含5株香榧树。

1.3 表型调查

在果实发育期间,每7 d观察并记录标记结果枝的坐果动态,以监测不同处理对坐果率的影响。为了确保坐果率的准确度,每株标记不少于100个果实。坐果率=9月成熟期果实数量/4月初果期果实数量 $\times 100\%$ 。同时,在2023年9月的果实成熟期,观测其开裂率,并随机选取10个果实,测定其质量及淀粉、蛋白等产量品质相关性状。

1.4 ^{13}C 标记处理

为探究不同外源生长调节剂处理对光合同化物分配的影响,在处理后的0、10、30和40 d分别进行 ^{13}C 标记处理。选择生长健壮、生理状态一致的植株进行 ^{13}C 同位素标记试验。以香榧新梢为对象,于每日8:00开始试验,待叶片光合速率稳定后,用标记袋(透光率90%,厚度 0.05 mm)包裹新梢并注入 $^{13}\text{CO}_2$ (丰度99%),维持2 h同化期,期间每1 h补充1次 $^{13}\text{CO}_2$,总标记时长为4 h。标记结束后,按果实、叶片、花器官和枝条分类,各采集3个生物学重复样品,经 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 杀青15 min、 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒量后,采用差异转速球磨粉碎,进行 ^{13}C 同位素丰度测定以解析碳分配动态。最终样品送至中国科学院东北地理与农业生态研究所进行稳定同位素质谱(IRMS)分析。

1.5 生理样品采集

为了探究不同处理的生理调控规律,在处理后15、50、75 d,随机采集香榧幼果样本,进行营养物质和激素测定。采集的样品均立即置于液氮($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$)中进行速冻处理,随后转移至 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 超低温冰箱中长期保存,以备后续试验分析使用。

1.6 果实营养成分测定

采用标准化乙醇提取法进行可溶性糖的提取与测定。取 0.5 g 样品,加入 10 mL 预冷的体积分数80%的乙醇匀浆, $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 水浴提取1 h, $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下 $8\,500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心20 min,收集上清液;沉淀重复提取1次,合并上清液并定容至 20 mL 。提取液经活性炭脱色、过滤后,取 10 mL 于 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 蒸干乙醇,蒸馏水定容至 5 mL 。采用改良蒽酮比色法,以葡萄糖为标准品,于 620 nm 处测定吸光度,依据标准曲线定量。

采用分步提取法测定样品中淀粉质量分数。取 0.2 g 样品,加入 10 mL 体积分数80%的乙醇匀浆, $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 水浴1 h, $8\,500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心15 min后弃上清(重复此乙醇提取步骤1次);沉淀悬浮于 10 mL 质量浓度80%的硝酸钙溶液,沸水浴提取1 h,过滤后获得淀粉提取液。采用碘-碘化钾($\text{I}_2\text{-KI}$)比色法,于 620 nm 处测定吸光度,依据标准曲线定量。

采用低温离心法提取可溶性蛋白并进行定量分析。取 0.2 g 新鲜样品,加入 5 mL 预冷磷酸盐缓冲液($50\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, pH为7.4),冰浴研磨匀浆; $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下 $12\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心20 min,收集上清液。采用Bradford法(考马斯亮蓝G-250染色),以牛血清白蛋白(BSA)为标准品,于 595 nm 处测定吸光度,依据标准曲线定量。

氨基酸采用氨基酸自动分析仪测定,各氨基酸组分依据外标法进行定量分析。以上所有指标测定均设置3个生物学重复,确保数据可靠性。

1.7 内源激素质量分数测定

内源激素质量分数采用超高效液相色谱-串联质谱(UPLC-MS/MS)分析法测定^[8]。样品经液氮研磨后,使用优化的提取溶剂体系进行激素提取和纯化。色谱分离在Acquity UPLC BEH C18反相色谱柱

(2.1 mm×100.0 mm, 1.7 μm 粒径) 上完成, 采用梯度洗脱程序实现生长素 (IAA)、脱落酸 (ABA)、GA₃ 等植物激素的有效分离。质谱检测采用三重四极杆质谱仪 (Qtrap 5500) 的多反应监测 (MRM) 模式, 所有目标激素的定量分析均通过 MultiQuant 3.0.2 软件完成, 采用同位素内标法进行定量校正。试验所用激素标准品 (纯度≥98%) 均购自 Sigma-Aldrich 公司。

1.8 数据分析

所有数据均经过系统化统计分析处理。原始数据先采用 Excel 进行整理与计算, 使用 R 语言 (version 4.2.2) 进行统计分析。数据正态性检验通过 Shapiro-Wilk 检验完成, 方差齐性采用 Bartlett 检验验证。对于符合正态分布的数据, 应用单因素方差分析 (ANOVA) 评估处理间差异显著性, 并采用 Duncan 多重比较检验 ($\alpha=0.05$) 进行组间差异分析。数据可视化通过 R 语言的 ggplot2 和 pheatmap 包完成。

2 结果与分析

2.1 外源植物生长调节剂处理对香榧坐果及果实品质的影响

由表 1 可知: 外源植物生长调节剂影响香榧坐果率。AVG 和 GA₃ 处理的坐果率均显著高于 ck ($P<0.05$), 其中 AVG 处理的坐果率最高, 达 16.92%; AVG+GA₃ 组合处理的坐果率与 ck 无显著差异。在果实开裂率方面, AVG 和 GA₃ 处理均显著高于 ck ($P<0.05$), 但 2 种处理间无显著差异; AVG+GA₃ 组合处理的开裂率与 ck 相近。AVG、GA₃ 及其组合处理均能提高香榧的单果质量, 其中以 GA₃ 处理的单果质量最高, 为 ck 的 141.91%。

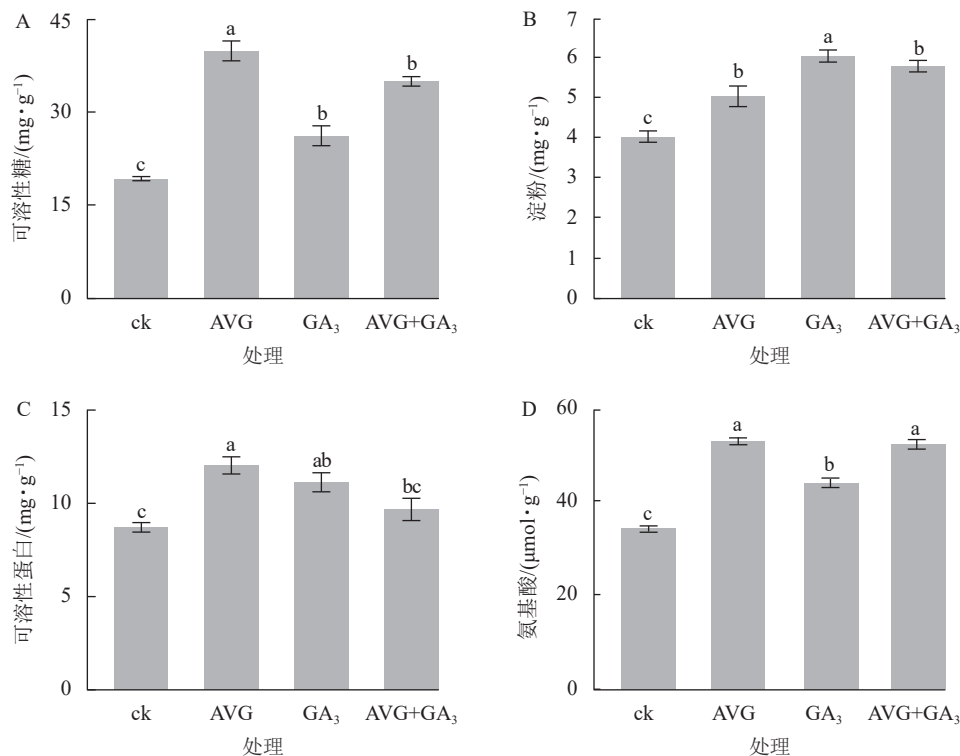
由图 1 可知: 外源植物生长调节剂对提高成熟香榧果实内营养物质的效果显著。与 ck 相比, 所有处理均显著提高了果实内的氨基酸质量摩尔浓度

表 1 外源植物生长调节剂对香榧坐果及成熟果实相关品质的影响

Table 1 Effects of exogenous plant growth regulators on seed setting and seed-related quality in mature *T. grandis* 'Merrillii'

处理	坐果率/%	开裂率/%	单果质量/g
ck	6.84±1.71 c	35.49±2.08 b	6.06±1.07 b
AVG	16.92±4.26 a	42.16±4.48 a	7.90±1.56 a
GA ₃	14.36±2.52 ab	43.30±2.50 a	8.60±2.02 a
AVG+GA ₃	10.65±0.88 bc	37.32±2.50 b	7.83±1.92 a

说明: 同列不同字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。



不同字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。

图 1 外源植物生长调节剂对香榧成熟期果实营养物质的影响

Figure 1 Effects of exogenous plant growth regulators on nutritional components of *T. grandis* 'Merrillii' seeds at maturity stages

($P<0.05$)。其中, AVG处理对可溶性糖、可溶性蛋白质质量分数和氨基酸质量摩尔浓度的提升最为明显, 分别达 $39.83 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $12.03 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $48.42 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 。GA₃处理则对淀粉质量分数的提升更为明显, 达 $6.06 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。而 AVG+GA₃ 组合处理与单一处理相比, 并不能进一步提高果实的营养物质。

2.2 外源植物生长调节剂处理对香榧发育营养物质的动态影响

由图2可知: 不同外源植物生长调节剂处理对香榧果实发育时期的可溶性糖、淀粉及可溶性蛋白的影响存在差异。各处理组内的可溶性糖质量分数均呈持续上升趋势。在果实发育初期(处理后15 d), AVG处理和 AVG+GA₃ 组合处理果实内的可溶性糖质量分数高于 ck 和 GA₃ 处理; 处理后50和75 d, 各处理组间无显著差异。GA₃处理果实内的淀粉质量分数呈先增后减的趋势; AVG处理果实内的淀粉质量分数显著高于 ck ($P<0.05$)。在果实发育初期(处理后15 d), GA₃处理果实内的可溶性蛋白质质量分数显著高于 ck ($P<0.05$), 后期各处理果实内的可溶性蛋白质质量分数持续上升。

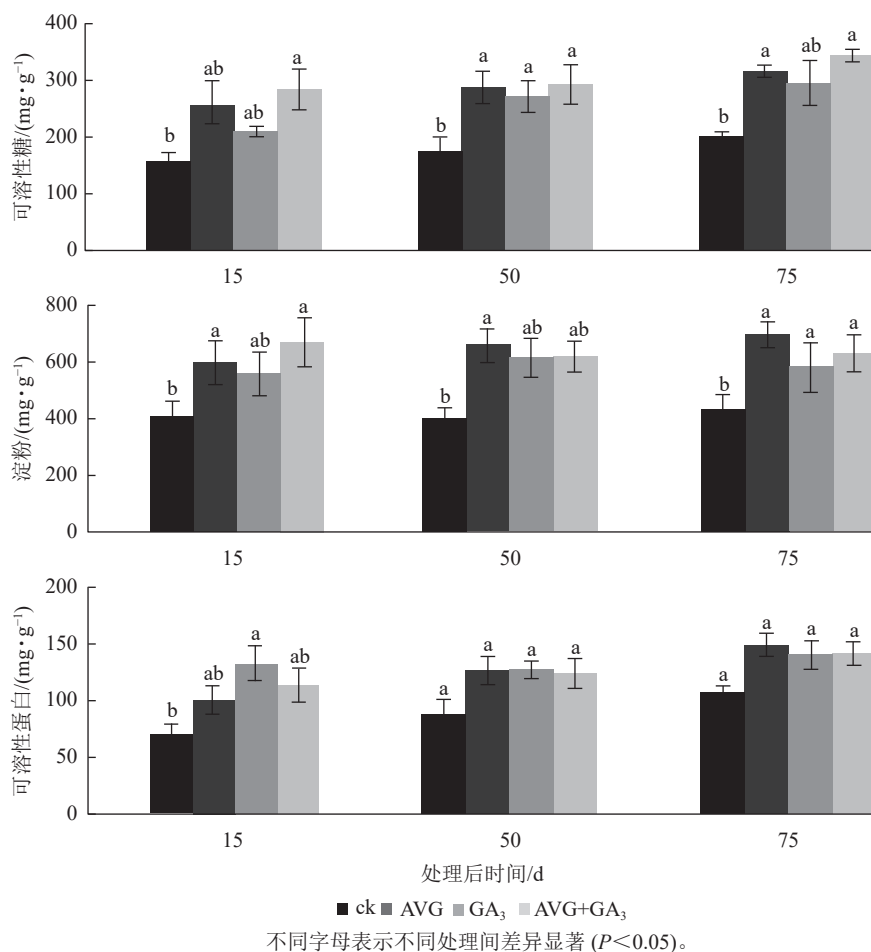


图2 外源植物生长调节剂对香榧发育期果实营养物质的影响

Figure 2 Effects of exogenous plant growth regulators on nutritional components of *T. grandis* 'Merrillii' seeds at development stages

2.3 外源植物生长调节剂处理对香榧果实发育内源激素的动态影响

在外源植物生长调节剂处理后, 对香榧果实发育不同阶段内源激素的动态变化情况进行了分析(图3)。与 ck 相比, GA₃处理在处理15~50 d, 果实内 IAA 质量分数显著上升 ($P<0.05$), 但处理后75 d 降至最低水平。AVG处理果实内 IAA 在处理50 d 内呈现累积趋势。AVG处理和 ck 的果实 GA₃ 质量分数呈现先升后降的趋势, 而 AVG+GA₃ 组合处理则相反, 且在处理75 d 显著高于 AVG 和 ck 处理 ($P<0.05$)。AVG 和 AVG+GA₃ 组合处理在处理15 d, 果实内的 ABA 质量分数较 GA₃ 处理有所降低, 但在处理后50~75 d 上升。AVG处理果实内 ABA/GA₃ 在处理15~50 d 下降, 随后在50~75 d 上升; AVG+GA₃ 组合处理果实内 ABA/GA₃ 先上升后下降; GA₃处理果实内 ABA/GA₃ 则呈现平稳上升趋势。

2.4 基于¹³C标记的香榧关键生长发育期的光合产物分配

使用¹³C标记的 CO₂ 饲喂叶片后, ¹³C标记的代谢物被运输至果枝的不同器官(图4)。各处理的源叶

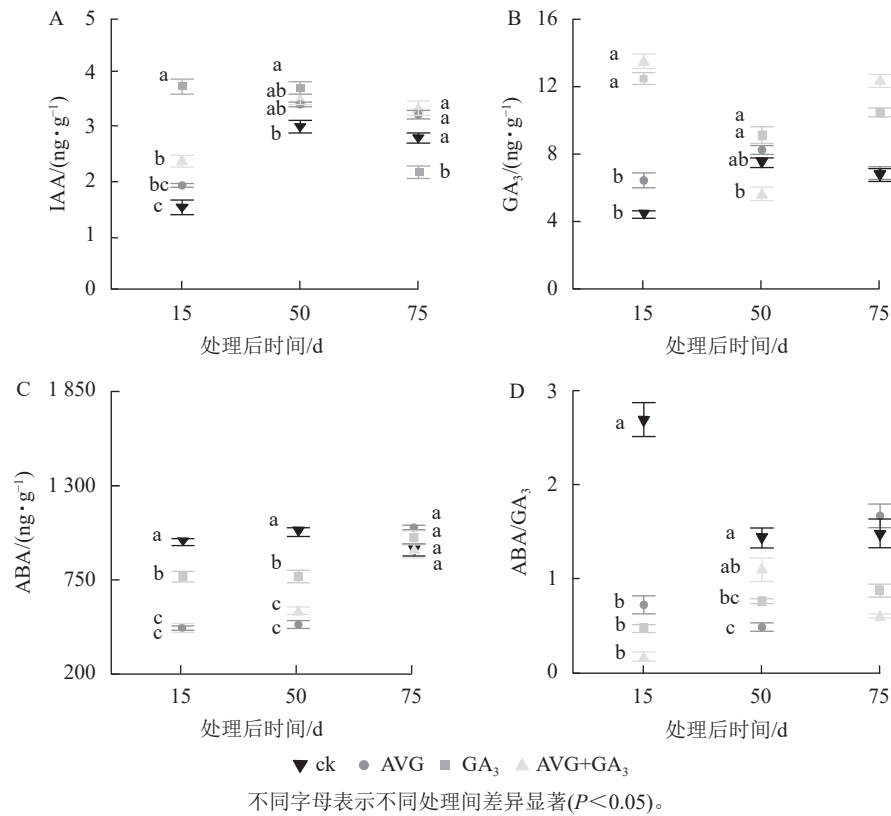


图 3 外源植物生长调节剂处理对香榧果实内源激素的影响

Figure 3 Effects of exogenous plant growth regulators on endogenous hormones content of *T. grandis* 'Merrillii' seeds

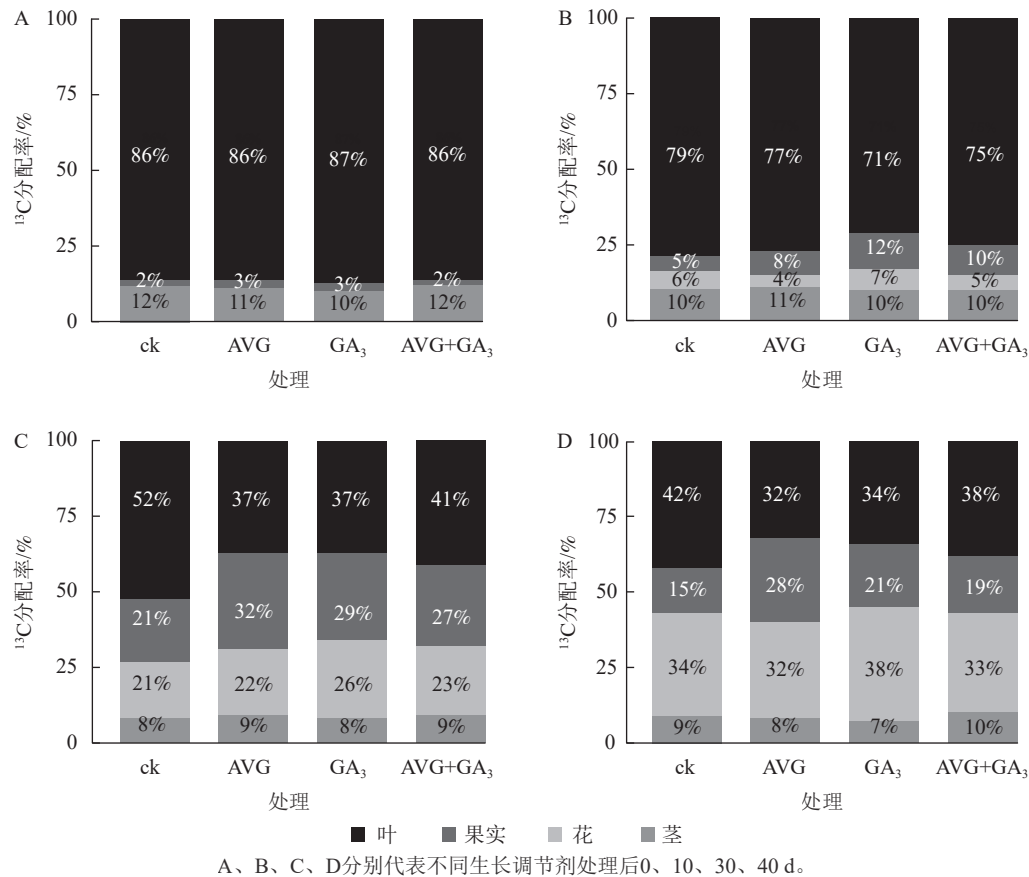


图 4 香榧果实早期发育阶段各器官¹³C 分配率

Figure 4 ¹³C distribution rate of each tissue in the early seed formation of *T. grandis* 'Merrillii'

^{13}C 分配率呈持续下降趋势, 果实的 ^{13}C 占比在 30 d 左右达到峰值, 随后在 40 d 下降。雌球花作为二代果的发育原基, 其 ^{13}C 占比持续上升, 表明叶片 ^{13}C 分配率和同化物的运输方向随着花果生长阶段而变化。随着果实发育, 叶片 ^{13}C 分配率下降, 表明光合产物向库器官的转运逐渐增强。茎组织作为中间库器官, 其 ^{13}C 分配比例在整个观测期间保持相对稳定。处理初期, 各激素处理间无明显差异。处理后 10 d (一代果膨大期), 光合同化物优先向生殖库器官分配, 其中幼果 ^{13}C 分配比例显著增加, 而同期新梢和花器官的 ^{13}C 分配比例低于果实。GA₃ 处理提升果实 ^{13}C 截获量至 12%, 较 AVG 处理 (8%) 提高了 50%。处理后 40 d (二代果形成期), 光合同化物大量供给雌球花生长, 花中 ^{13}C 分配比例提高。AVG 处理下果实分配率达 28%。GA₃ 处理则显著促进雌球花发育, 使其分配率达 38%。

3 讨论

3.1 GA₃ 和 AVG 对香榧坐果的影响

前人研究表明: 香榧果实发育过程中存在 2 个明显的生理落果高峰期^[1]。第一阶段发生在果实发育初期 (4 月上旬至中旬), 主要表现为未突破种鳞的僵果脱落。第二阶段出现在果实发育中期 (4 月下旬至 5 月中旬), 此时期幼果已突破种鳞并开始膨大, 且正值新梢快速生长与花器官发育关键期, 但当年生叶片光合能力较弱, 光合同化物供应不足^[3-4]。本研究发现: 外施 AVG 和 GA₃ 可显著缓解落果, 这可能与提升果实库强相关。例如, GA₃ 处理果实发育过程中可溶性糖、可溶性蛋白、淀粉质量分数均显著高于 ck。AVG 处理的最终坐果率最高, 为 16.92%, GA₃ 处理次之, 为 14.36%。GA₃ 处理对单果质量的提升效果最为明显。

AVG 处理能显著提高多种果树的坐果率, 如腰果 *Anacardium occidentale*^[9]、夏威夷果 *Macadamia integrifolia*^[10] 和梨 *Pyrus communis*^[11] 等。SÁNCHEZ 等^[11] 研究表明: 施用 250 mg·L⁻¹ AVG 显著提高了阿巴特费特尔梨 ‘Abate Fetel’ 和帕克汉姆胜利梨 ‘Packham’s Triumph’ 的坐果率和产量。这可能归因于 AVG 对乙烯合成的抑制作用, 而乙烯参与了花朵和幼果的衰老和脱落过程^[12]。本研究中, AVG 处理的最终坐果率最高, 该处理不仅显著提高了香榧坐果率, 还显著提升了成熟果实的可溶性糖、可溶性蛋白等营养物质的质量分数, 表明其可能通过调控乙烯合成与碳水化合物累积促进果实发育^[6,9]。GA₃ 处理下成熟果实的营养物质也显著提升, 其中对淀粉质量分数的提升最为明显。然而, AVG+GA₃ 组合处理的效果并未优于单一处理。研究表明: GA₃ 可能通过调控光信号通路中的关键基因 (如 *HY5*), 增强光合作用产物向果实分配^[13]; 而 AVG 通过抑制 ACC 合成酶活性, 降低乙烯产量, 从而延长果实发育时间^[14]。基于本研究结果来看, AVG 更有利于提升坐果率, 而 GA₃ 则更有助于增加单果质量。在两者组合施用, 可能存在果实数量与质量的权衡, 导致组合处理未能进一步提升坐果率, 这种权衡效应可能与光合同化物的分配模式有关^[9]。

3.2 GA₃ 和 AVG 对香榧果实发育过程营养累积及内源激素的影响

GA₃ 是植物发育过程中不可或缺的激素之一, 在开花期施用可显著促进果实的形成^[15]。果实发育过程中, GA₃ 与 IAA 相互作用, 共同调控细胞分裂和伸长^[16]。本研究表明: GA₃ 处理不仅提高了香榧的结实率和果实质量, 还使果实发育初期的 IAA 保持了较高水平。这与宁夏枸杞 ‘宁杞 1 号’ *Lycium barbarum* ‘Ningqi 1’ 的研究结果一致, 即种子中 IAA 水平与果实大小和质量呈显著正相关^[17], 表明种子来源的 IAA 信号可能通过促进细胞分裂或扩张来调控果实发育^[18]。本研究中, GA₃ 处理使香榧单果质量显著增加至 8.60 g, 进一步证实了 GA₃ 在促进果实发育中的作用。

ABA 在植物生长发育和果实成熟过程中发挥重要作用, 是调控蔗糖积累信号通路的关键组分^[19-20]。本研究中, AVG 处理的香榧果实在发育初期和中期 ABA 水平较低, 且伴随着可溶性糖质量分数的增加, 随后在果实发育后期 ABA 水平上升。这表明 AVG 可能通过调控 ABA 影响碳水化合物积累来增强库组织活力。研究表明: 苹果 *Malus × domestica* 果实膨大期 ABA 和乙烯的迅速增加会导致大量落果^[21]; 枣 *Ziziphus jujuba* 落果期, ABA 的增加会促进离层形成、破坏激素平衡, 可能会改变光合同化物分配模式, 使其优先供给树体其他部位, 而非果实^[22-23]。而本研究中各处理组在果实发育关键期的 ABA 水平均低于 ck, 这有助于降低落果率。

3.3 GA₃ 和 AVG 对香榧果实发育过程光合同化物分配的影响

果实作为强代谢库,其发育与碳水化合物供应密切相关^[24]。研究表明:香榧生长发育过程中,花果竞争格局复杂,在花与花、花与果、果与果之间均存在养分竞争,进而影响产量和品质^[4]。本研究发现:GA₃ 和 AVG 处理均促进了光合产物向果实的转运,增强了果实库强,其中 AVG 对库强的促进作用更为明显,从而提高坐果率。从本研究结果来看,香榧果实发育还存在数量和大小之间的权衡。AVG 通过增强果实库强,优先促进坐果数量的增加,表现为坐果率提升最为显著;而 GA₃ 则倾向于将库强的增强作用用于果实质量的提升,表现为单果质量增加最明显,这可能与协同光信号促进果实发育相关^[13]。此外,柑橘 *Citrus unshiu* 等果树中果实数量与大小的负相关关系^[25],进一步证实了库器官间竞争的普遍性。

4 结论

在早春香榧启动发育、营养竞争激烈时期,喷施 AVG 和 GA₃ 对香榧的坐果、果实品质以及花果竞争格局产生了显著影响。AVG 和 GA₃ 通过影响内源激素波动,促进了光合同化物向果实分配,增强了果实库强,显著提升了香榧的坐果率和果实营养品质。在生产上,根据香榧栽培目标的不同,若以提升坐果率为首要目标,建议喷施 AVG (180 mg·L⁻¹);若以提升单果质量为首要目标,建议喷施 GA₃ (200 mg·L⁻¹);若兼顾香榧坐果率和果实大小,可考虑喷施 AVG+GA₃,但最佳配比还需进一步研究和优化。

5 参考文献

- [1] 郭维华. 香榧落果机理与保果技术研究[J]. 浙江林学院学报, 2002, 19(4): 395–398. GUO Weihua. *Torreya grandis*: mechanism of fruit drop and measures of preventing fruit drop[J]. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2002, 19(4): 395–398.
- [2] WU Jiasheng, HUANG Jiandiao, HONG Yiwei, *et al.* De novo transcriptome sequencing of *Torreya grandis* reveals gene regulation in sciadonic acid biosynthesis pathway[J]. *Industrial Crops and Products*, 2018, 120: 47–60. DOI: 10.1016/j.indcrop.2018.04.041.
- [3] SUO Jinwei, TONG Ke, WU Jiasheng, *et al.* Comparative transcriptome analysis reveals key genes in the regulation of squalene and β -sitosterol biosynthesis in *Torreya grandis*[J]. *Industrial Crops and Products*, 2019, 131: 182–193. DOI: 10.1016/j.indcrop.2019.01.035.
- [4] WANG Lei, JIANG Wei, JIN Hangbiao, *et al.* Nutrient competition between female cones and young seeds in spring affects the physiological dropping and nut-setting rate in *Torreya grandis*[J]. *Physiologia Plantarum*, 2024, 176(5): e14525. DOI: 10.1111/ppl.14525.
- [5] 袁军, 石斌, 吴泽龙, 等. 不同库源关系对油茶光合作用及果实品质的影响[J]. 植物生理学报, 2015, 51(8): 1287–1292. YUAN Jun, SHI Bin, WU Zelong, *et al.* Response of fruit quality and leaf photosynthesis to different sink-source relationships in *Camellia oleifera*[J]. *Plant Physiology Journal*, 2015, 51(8): 1287–1292. DOI: 10.13592/j.cnki.ppj.2015.0297.
- [6] ALTUNTAS E, YALDIZ M. Physical, mechanical and chemical properties of plums (cv. Santa Rosa) affected by aminoethoxyvinylglycine applications[J]. *African Journal of Traditional, Complementary and Alternative Medicines*, 2015, 13(1): 128–133. DOI: 10.21010/ajtcam.v13i1.18.
- [7] ZHANG Caixi, TANABE K, TANI H, *et al.* Biologically active gibberellins and abscisic acid in fruit of two late-maturing Japanese pear cultivars with contrasting fruit size[J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 2007, 132(4): 452–458. DOI: 10.21273/JASHS.132.4.452.
- [8] 赵杨, 王银屏, 刘海学, 等. UPLC-MS/MS 法同时测定生菜叶片中 5 种内源植物激素[J]. 北方园艺, 2021(16): 8–15. ZHAO Yang, WANG Yinping, LIU Haixue, *et al.* Simultaneous determination of five plant endogenous hormones in lettuce leaves by ultra high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. *Northern Horticulture*, 2021(16): 8–15.
- [9] SOUZA K O, SILVEIRA A G, LOPES M M, *et al.* AVG and GA₃ prevent preharvest fruit drop and enhance postharvest

- quality of ‘BRS 189’ cashew[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, **257**: 108771. DOI: [10.1016/j.scienta.2019.108771](https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108771).
- [10] MCFADYEN L, ROBERTSON D, SEDGLEY M, *et al.* Effects of the ethylene inhibitor aminoethoxyvinylglycine (AVG) on fruit abscission and yield on pruned and unpruned *Macadamia* trees[J]. *Scientia Horticulturae*, 2012, **137**: 125–130. DOI: [10.1016/j.scienta.2012.01.028](https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.01.028).
- [11] SÁNCHEZ E, CURETTI M, RETAMALES J. Effect of AVG application on fruit set, yield and fruit size in ‘Abate Fetel’ and ‘Packam’s Triumph’ pears in a semi-commercial statistical trial[J]. *Acta Horticulturae*, 2011, **909**: 435–440. DOI: [10.17660/ActaHortic.2011.909.50](https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2011.909.50).
- [12] RANJAN R, PUROHIT S S, PRASAD V. *Plant Hormones: Action and Application*[M]. Jodhpur: Agrobios (India), 2003: 185–188.
- [13] ALABADÍ D, GALLEGU-BARTOLOMÉ J, ORLANDO L, *et al.* Gibberellins modulate light signaling pathways to prevent *Arabidopsis* seedling de-etiolation in darkness[J]. *The Plant Journal*, 2008, **53**(2): 324–335. DOI: [10.1111/j.1365-3113.2007.03346.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-3113.2007.03346.x).
- [14] 萧韵琴. 采前喷布 AVG 对苹果贮藏寿命和品质的影响[J]. *中国果树*, 1993(2): 18–21, 23. XIAO Yunqin. Effect of spraying AVG before harvest on storage life and quality of apples[J]. *China Fruits*, 1993(2): 18–21, 23. DOI: [10.16626/j.cnki.issn1000-8047.1993.02.007](https://doi.org/10.16626/j.cnki.issn1000-8047.1993.02.007).
- [15] de JONG M, MARIANI C, VRIEZEN W H. The role of auxin and gibberellin in tomato fruit set[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2009, **60**(5): 1523–1532. DOI: [10.1093/jxb/erp094](https://doi.org/10.1093/jxb/erp094).
- [16] SEXTON R, ROBERTS J A. Cell biology of abscission[J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1982, **33**: 133–162. DOI: [10.1146/annurev.pp.33.060182.001025](https://doi.org/10.1146/annurev.pp.33.060182.001025).
- [17] GAPPER N E, MCQUINN R P, GIOVANNONI J J. Molecular and genetic regulation of fruit ripening[J]. *Plant Molecular Biology*, 2013, **82**(6): 575–591. DOI: [10.1007/s11103-013-0050-3](https://doi.org/10.1007/s11103-013-0050-3).
- [18] WOLTERS H, JÜRGENS G. Survival of the flexible: hormonal growth control and adaptation in plant development[J]. *Nature Reviews Genetics*, 2009, **10**(5): 305–317. DOI: [10.1038/nrg2558](https://doi.org/10.1038/nrg2558).
- [19] 任杰, 刘永霞, 冷平, 等. ABA 对番木瓜成熟软化的影响及其与乙烯的关系[J]. *中国农业大学学报*, 2011, **16**(5): 77–81. REN Jie, LIU Yongxia, LENG Ping, *et al.* Effect of ABA on papaya fruit ripening and its relation to ethylene[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2011, **16**(5): 77–81.
- [20] MACNEILL G J, MEHRPOUYAN S, MINOW M A A, *et al.* Starch as a source, starch as a sink: the bifunctional role of starch in carbon allocation[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2017, **68**(16): 4433–4453. DOI: [10.1093/jxb/erx291](https://doi.org/10.1093/jxb/erx291).
- [21] BOTTON A, ECCHER G, FORCATO C, *et al.* Signaling pathways mediating the induction of apple fruitlet abscission[J]. *Plant Physiology*, 2011, **155**(1): 185–208. DOI: [10.1104/pp.110.165779](https://doi.org/10.1104/pp.110.165779).
- [22] 贾晓梅. 冬枣落果的生理机理及环剥宽度对冬枣果实发育、品质的影响[D]. 保定: 河北农业大学, 2004. JIA Xiaomei. *Physiological Mechanism of Dongzao Fruit and Effect of Girdling Width to Dongzao Development and Quality*[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2004.
- [23] PLUMMER J A, MULLINS M G, VINE J H. Seasonal changes in endogenous ABA and IAA and the influence of applied ABA and auxin in relation to shoot growth and abscission in Valencia orange (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck)[J]. *Plant Growth Regulation*, 1991, **10**(2): 139–151. DOI: [10.1007/BF00024960](https://doi.org/10.1007/BF00024960).
- [24] 董敏, 丁之恩, 闫晗, 等. 板栗种实生长发育中营养物质积累及动态模型建立[J]. *核农学报*, 2016, **30**(6): 1143–1148. DONG Min, DING Zhi'en, YAN Han, *et al.* Establishment of the dynamic model and nutrient accumulation of chestnut's fruits and seeds during the growth period[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2016, **30**(6): 1143–1148. DOI: [10.11869/j.issn.100-8551.2016.06.1143](https://doi.org/10.11869/j.issn.100-8551.2016.06.1143).
- [25] KOMATSU A, MORIGUCHI T, KOYAMA K, *et al.* Analysis of sucrose synthase genes in *Citrus* suggests different roles and phylogenetic relationships[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2002, **53**(366): 61–71. DOI: [10.1093/jexbot/53.366.61](https://doi.org/10.1093/jexbot/53.366.61).