

赤霉素对龙眼果实大小的影响研究

程悦^{1,2}, 胡小文², 刘丽琴², 朱利飞², 李甜子², 李响², 决登伟⁴, 洪继旺³, 石胜友^{1,2,3*}

1. 华中农业大学园艺林学学院, 湖北武汉 430071; 2. 中国热带农业科学院南亚热带作物研究所/农业农村部热带果树生物学重点实验室, 广东湛江 524013; 3. 中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所, 海南海口 571101; 4. 重庆文理学院, 重庆 402160

摘要: 为了探索赤霉素 (GAs) 对龙眼果实大小的影响, 本研究以龙眼杂交群体凤梨朵×大乌圆的 F₁ 代中稳定遗传的大果 FD 52 与小果 FD 114 植株为材料, 分别于开花当天 (0 d)、开花 3、6、9、16、23、30 d 测定大、小果实中内源 GAs 含量、细胞大小及细胞层数 (细胞数目); 选取 50、100、150 mg/L 三个浓度 GAs 溶液分别在开花前 3 d (-3 d)、开花当天 (0 d)、开花 3 d 和开花 6 d 对小果龙眼花穗进行外施处理, 测定内源 GAs 含量以及成熟果实品质。结果表明: 在龙眼果实发育早期, 龙眼果实中的 GA₄ 含量均高于 GA₁、GA₃、GA₇ 三种活性 GAs, 且大果 FD 52 的内源 GA₄ 含量、细胞大小和细胞层数均高于小果 FD 114, 外施 GAs 对提升内源 GAs 含量及增大龙眼果实均具有促进作用, 尤其是开花 3 d 施用 100 mg/L GAs 处理组的生长效果最为显著。上述结果可为栽培上通过外施 GAs 提高龙眼果实大小提供参考。

关键词: 龙眼; 赤霉素; 果实大小; 外施

中图分类号: S667.2 文献标志码: A

Effect of Gibberellin on Longan Fruit Size

CHENG Yue^{1,2}, HU Xiaowen², LIU Liqin², ZHU Lifei², LI Tianzi², LI Xiang², JUE Dengwei⁴, HONG Jiwang³, SHI Shengyou^{1,2,3*}

1. College of Horticulture and Forestry, Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Institute of South Subtropical Crops, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences / Key Laboratory of Tropical Fruit Biology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Zhanjiang, Guangdong 524013, China; 3. Institute of Tropical Crop Variety Resources, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571101, China; 4. Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing, 402160, China

Abstract: The effect of gibberellin (GAs) on the fruit size of longan using the F₁ generation of a stable hybrid population, FD 52 (big-size fruit) and FD 114 (small-size fruit), which derived from the cross between ‘Fengliduo’ and ‘Dawuyuan’, were studied. Three concentrations of gibberellin (50 mg/L, 100 mg/L, and 150 mg/L) were applied to the inflorescences of small-fruit longan at four time points: 3 days before anthesis (-3 d), on the day of anthesis (0 d), 3 days after anthesis (3 d), and 6 days after anthesis (6 d). The endogenous GAs contents in the treatments were measured, and fruit quality traits were mature at the ripening stage. Additionally, the endogenous GAs content, cell size, and the number of cell layers in untreated large-fruit and small-fruit longan were compared. Results showed that exogenous gibberellin application significantly increased endogenous GAs levels and promoted fruit enlargement, with the most pronounced effect observed when 100 mg/L gibberellin was applied 3 days after anthesis. Early in fruit development, GA₄ was the predominant active gibberellin in longan fruit, with higher levels of GA₄, larger cell size, and more cell

收稿日期 2024-11-05; 接受日期 2025-01-23

基金项目 国家自然科学基金项目 (No. 32272674); 热带作物生物育种全国重点实验室科研专项 (No. NKLTBCBXTD11); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (No. 1630062024003)。

作者简介 程悦 (2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 龙眼育种。*通信作者 (Corresponding author): 石胜友 (SHI Shengyou), E-mail: ssy7299@163.com。

layers observed in big-size varieties compared to small-size ones. The findings suggest that GAs application and the differential accumulation of GA₄ along with cellular factors such as cell size and layer number, contribute to the variation in fruit size. This study would provide valuable insights for improving longan fruit size through the application of gibberellin in cultivation practices.

Keywords: longan; gibberellin; fruit size; external

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.05.015

龙眼 (*Dimocarpus longan* Lour.) 是我国南方重要的经济果树之一, 对南方农村经济的发展起到了重要作用。龙眼作为著名的亚热带名优水果, 影响其果实品质的因素主要有果实大小和单果质量、可食率以及可溶性固形物含量等^[1-2]。而果实大小作为衡量果实品质的重要因素, 严重影响着龙眼的经济价值。但我国目前栽培龙眼存在“大果不甜, 甜果不大”的普遍性问题, 严重影响了龙眼的商品价值, 制约了龙眼产业的健康和可持续发展。

GAs 是植物中重要的生长激素, 参与调控植物众多生长发育过程, 在果树生产栽培上得到了广泛应用^[3]。GAs 也是影响果实坐果和果实发育的关键因素, 许多果树坐果期和果实发育早期 GAs 都维持在较高水平, 如苹果^[4]、梨^[5]、葡萄^[6]、李^[7]等。多项研究表明, 在果实发育早期, 通过外施 GAs, 可显著增加成熟期果实大小。如祖超等^[8]通过外施 60 mg/L GAs, 可以将胡椒产量提高 1.46 倍。刘静等^[9]对金手指葡萄喷施 25 mg/L 浓度 GA₃ 溶液, 可以通过促进细胞膨大从而显著拉长果实。UDDIN 等^[10]发现使用 300 mg/L 的 GA₃ 处理红毛丹可以有效增大果实、提高坐果率和最终产量。

由于不同植物对 GAs 敏感程度存在差异, 同一植物不同发育阶段对 GAs 的需求也不同, 因此外施 GAs 的剂量和时间尤为关键^[11], 而龙眼生产上此方面的研究相对滞后。在已鉴定的 136 种 GAs 及其衍生物中, 具有生物活性的 GAs 主要为 GA₁、GA₃、GA₄ 和 GA₇^[12-13], 不同植物起作用的活性 GAs 也不尽相同。前人研究表明, 龙眼果实中活性 GAs 主要为 GA₄ 和 GA₇^[14], 而本课题前期研究表明外施 GA₃ 也能增加龙眼果实单果质量^[15], 但这几种 GAs 哪种起关键作用及怎样影响龙眼果实大小并不清楚。因此, 本研究以此为切入点, 通过对小果龙眼外施 GAs, 探索外源 GAs 对龙眼果实大小是否有促进作用, 并摸索合适的施用时间和剂量。同时通过分析大果与小果龙眼果实的内源活性 GAs 含量以及细胞大小、细胞数目之间的差异, 探究二者与龙眼果实大小之间的相关性。以期在生产上通过外施 GAs 提高龙眼果实大小提

供参考, 提高龙眼种植户的经济效益。

1 材料与方法

1.1 材料

本研究选用凤梨朵×大乌圆杂交 F₁ 代中稳定遗传的极大果植株 (FD 52) 和极小果植株 (FD 114), 种植于中国热带农业科学院亚热带作物研究所荔枝龙眼种质资源圃 (21°15'58"N, 110°16'28"E, 海拔 32 m, 年平均温度 23 °C, 年均降雨量 1690 mm, 年平均日照时数 1912 h, 全年无霜)。经多年观测, FD 52 平均单果质量为 13.10 g, 果实横径、纵径、侧径分别为 29.00、28.04、26.78 mm, 可溶性固形物含量为 17.19%, 可食率为 63.9%, 为杂交群体中典型的大果种质。FD 114 平均单果质量为 6.96 g, 果实横径、纵径、侧径分别为 22.72、20.78、21.58 mm, 可溶性固形物含量为 20.02%, 可食率为 62.0%, 为杂交群体中极小果种质。树龄 13 a, 采用标准化栽培管理, 树体健壮, 生长势良好。

为比较大果与小果龙眼果实的内源活性 GAs 含量以及细胞大小、细胞数目之间的差异, 根据课题组前期的研究结果^[16], 本研究选取龙眼果实发育前期 0~30 d 为试验时间, 分别于开花当天 (0 d)、开花 3、6、9、16、23、30 d, 采集大果和小果植株的幼花及幼果作为试验材料 (图 1)。一部分置于液氮速冻后保存于 -80 °C 超低温冰箱中, 用于测定内源活性 GA_s 含量; 另一部分立即放入 FAA 固定液, 固定 24 h 后用于制作石蜡切片。

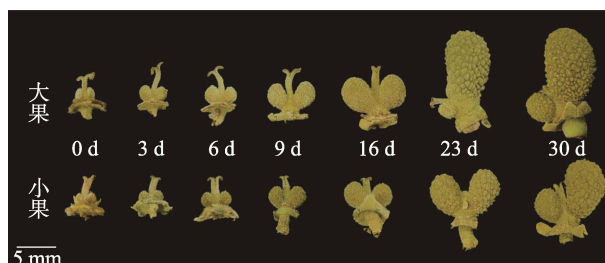


图 1 大、小果龙眼发育早期的幼花以及幼果材料 (已将花瓣去除)

Fig. 1 Young flowers and young fruit materials in early development of longans with large and small fruits (Petals removed)

参考胡香英^[17]的研究结果以及生产上的经验,选取 50、100、150 mg/L 浓度梯度外施 GAs,于开花前 3 d (−3 d)、开花当天 (0 d)、开花 3 d 和开花 6 d 对小果龙眼分别外施 50、100、150 mg/L 浓度 GAs 溶液,以喷施清水作对照 (表 1)。采集处理样本经液氮速冻后放置于−80 ℃超低温冰箱中保存用于后续试验。另外每个处理保留 2~3 个花穗使其自然生长至成熟,用作测量果实品质指标。

表 1 外施 GAs 试验处理设置
Tab. 1 Experimental treatments of external gibberellin

GAs 浓度 GAs concentration/(mg·L ⁻¹)	开花时间 Flowering time			
	−3 d	0 d	3 d	6 d
50	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄
100	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈
150	T ₉	T ₁₀	T ₁₁	T ₁₂
清水 (CK)	T ₁₃	T ₁₄	T ₁₅	T ₁₆

1.2 方法

1.2.1 内源 GAs 含量测定 采用乙腈溶液提取方法提取龙眼样品的内源 GAs,以 QuEChERS 方法净化其中杂质,并以氮气吹扫方式浓缩样品。而后以安捷伦 1290 高效液相色谱仪和 SCIEX 公司 Qtrap 6500 质谱仪,测定样品的内源 GAs 含量,并在提取液中加入内标物质校正检测结果。

1.2.2 石蜡切片制作以及细胞大小与数目的统计 将上述材料取样后立即置于 FAA 固定液,固定 24 h 后用于制作果实的横、纵石蜡切片,染色方法采用 0.5%的甲苯胺蓝溶液染色 30~60 s,染色完成后用中性树胶封片。使用 NIKON 80 i 生物显微镜,在 200 倍放大倍数下观察组织结构。每个材料随机选取 10 个大小均匀视野,使用 Image J 软件统计细胞大小。细胞层数参考 HAMADA 等^[18]的方法进行统计。

1.2.3 外施 GAs 处理 于开花−3、0、3、6 d 的早上 8:00,分别选取小果龙眼 FD 114 树体上生长健壮且一致的花穗 5~6 个,喷施 50、100、150 mg/L 浓度 GAs 溶液(购自上海源叶生物科技有限公司),以花穗表面湿润均匀且无液滴滴落为止,并以喷施清水作对照 (CK)。

1.2.4 果实品质测定 用电子天平称量单果质量和果肉质量,并计算可食率 (可食率=果肉质量/单果质量×100%);游标卡尺测量果实横径、侧径和纵径;可溶性固形物含量使用便携式糖度计

进行测定。每个指标测 10 个生物学重复。果实体积参考椭圆体计算公式 $V=4/3\times\pi\times a\times b\times c\times 1/8$ 进行计算,其中 a、b、c 分别代表龙眼果实的横径、纵径和侧径。

1.3 数据处理

使用 IBM SPSS Statistics 27 软件进行差异显著性分析 ($P<0.05$ 为差异显著, $P<0.01$ 为差异极显著),试验数据使用 Microsoft Office Excel 2019 和 GraphPad Prism 8.4.3 软件制图。

2 结果与分析

2.1 大、小果龙眼内源活性 GAs 含量差异

为了探究内源 GAs 对果实大小的影响,比较同一杂交群体后代大果种质 (FD 52) 和小果种质 (FD 114) 果实发育早期内源活性 GAs 含量的差异,发现大果和小果的 4 种内源活性 GAs 含量均差异显著 (图 2)。其中,GA₄ 含量显著高于其他种类 GAs,表明 GA₁、GA₃、GA₄ 和 GA₇ 可能在龙眼果实发育中对果实大小均起到了促进作用,但占主导的为 GA₄。大果和小果种质 GA₄ 含量具有相同的变化趋势,均表现为先上升后下降趋势。大果种质在开花 16 d 内源 GA₄ 含量达到峰值,小果种质则在开花 23 d 达到峰值。表明 GA₄ 还有可能调节果实发育周期。

2.2 大、小果龙眼发育早期果实大小、细胞大小、细胞层数比较

为进一步研究内源 GAs 如何影响龙眼果实大小,通过石蜡切片的方法比较果实发育早期大果和小果 (未进行 GAs 处理) 龙眼细胞大小和细胞层数的差异 (图 3)。结果表明,横向细胞大小和细胞层数在开花 0~6 d 差异不显著,在开花 9~30 d 差异显著 (图 4),而纵向细胞在果实早期发育的各阶段大果细胞大小和细胞层数均显著高于小果。表明龙眼果实发育早期开始阶段,果实大小主要体现在纵向细胞的增大和细胞数目的增加方面,随后才是整个果实的膨大,在果实发育早期,大果果实体积显著大于小果 (图 5)。进一步分析表明,大果在开花 9 d 后开始快速增大,而小果则在开花 16 d 开始快速增大,表明小果果实快速膨大期相对于大果有一定滞后,这与内源 GA₄ 含量变化趋势一致,表明内源 GA₄ 可能通过细胞的增大和细胞数目的增加影响龙眼果实大小。

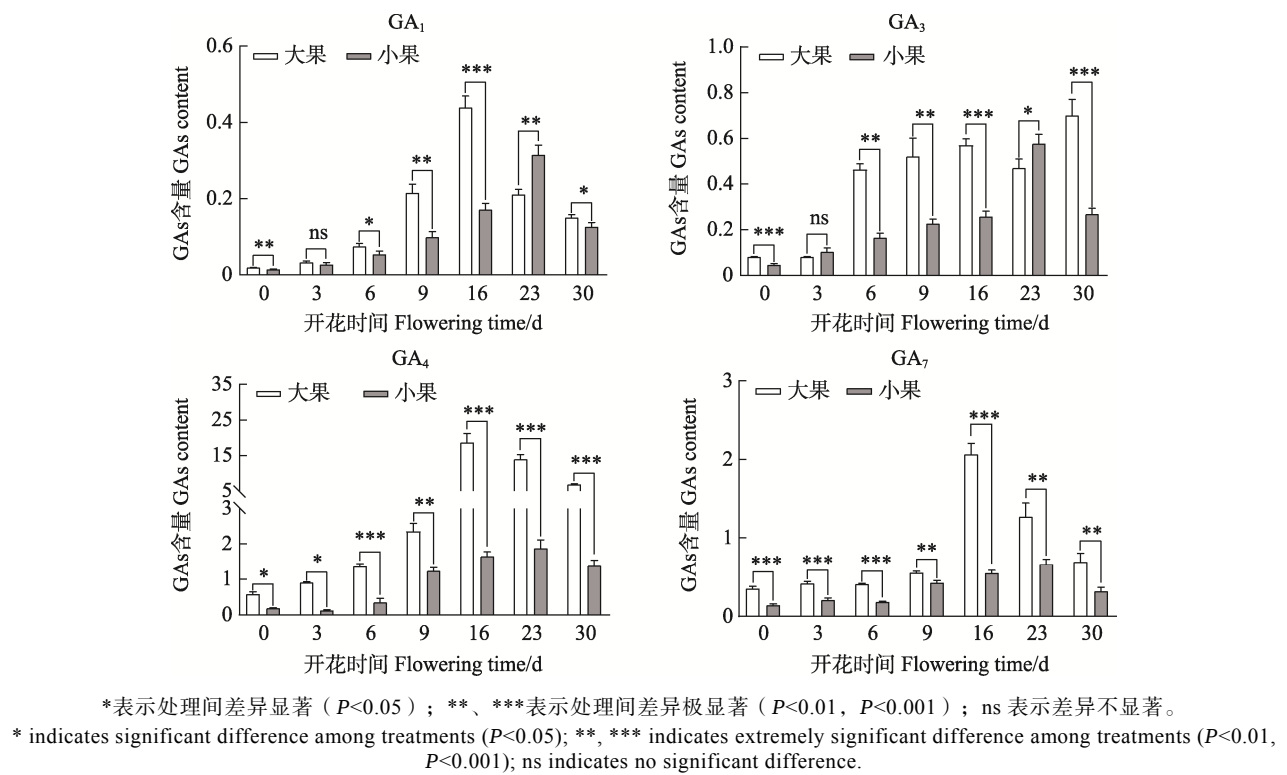


图 2 大、小果不同发育时期 4 种活性 GAs 含量比较

Fig. 2 Contents of four active GAs in large and small fruits at different developmental stages

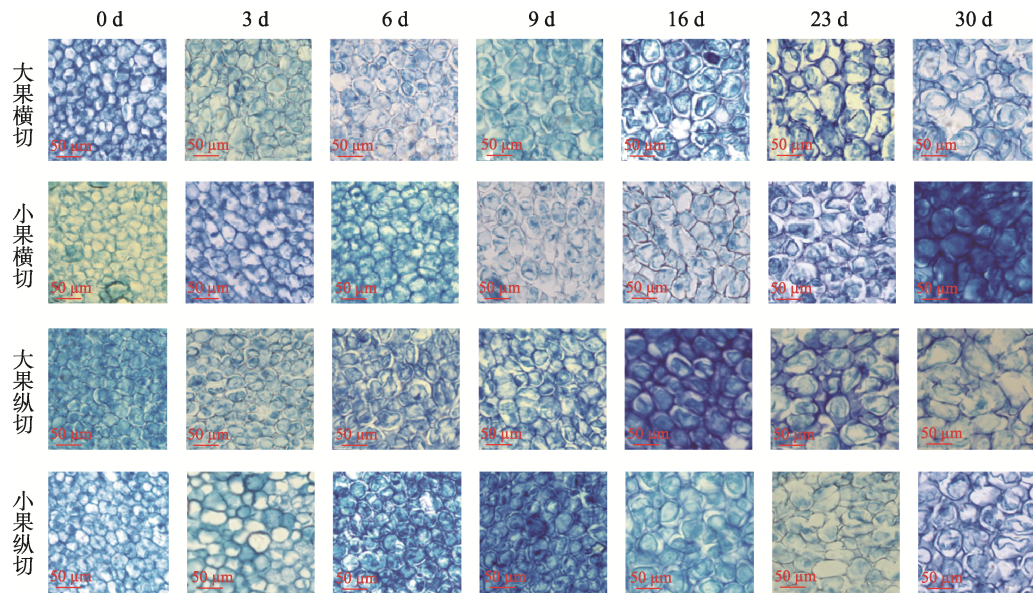


图 3 大、小果果实各时期石蜡切片横、纵切图

Fig. 3 Cross-sectional and longitudinal sections of paraffin sections at each stage of large and small fruits

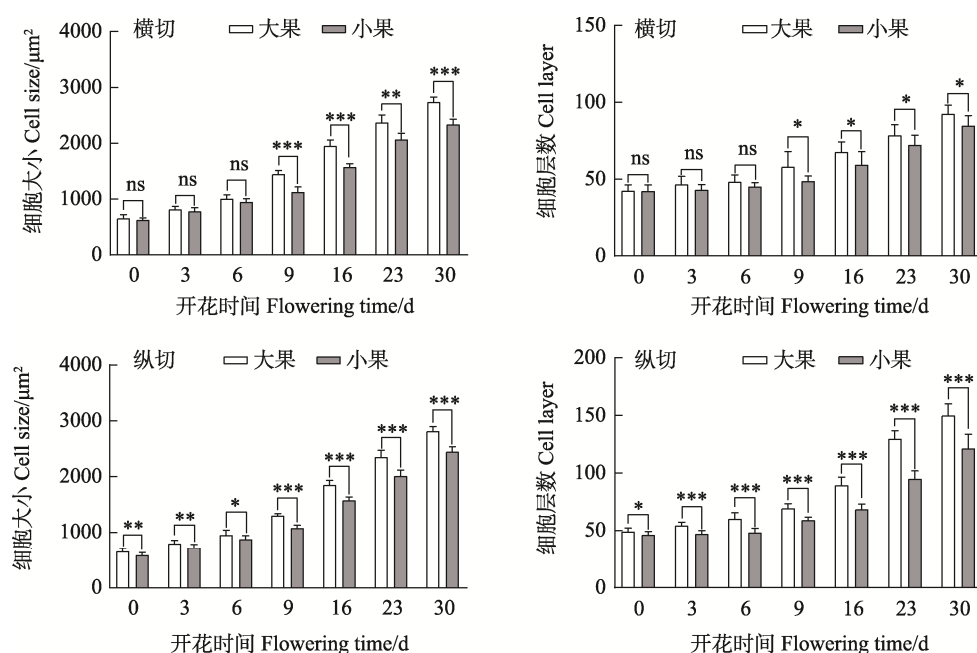
2.3 外施 GAs 对内源 GAs 的影响

采用不同处理时间和剂量对小果龙眼外施 GAs 溶液，研究外源 GAs 对内源 GAs 的影响。结果表明（图 6），各时段 GA₄ 含量均显著高于 GA₁、GA₃ 和 GA₇，更加明确了 GA₄ 是龙眼中的主要活性 GAs。外施 GAs 处理组的内源 GAs 含量相较于对照组显著升高，其中 100 mg/L 浓度和

开花 3 d 的处理组，对于 GA₄ 含量的提升效果最明显。

2.4 外施 GAs 对小果主要果实品质性状的影响

对外施 GAs 对照组（此时 CK 取 T₁₃、T₁₄、T₁₅、T₁₆ 的平均值）以及试验组成熟期果实主要品质性状进行测定（表 2），结果表明，相较于对照组，试验组中的所有处理均使单果质量有所增

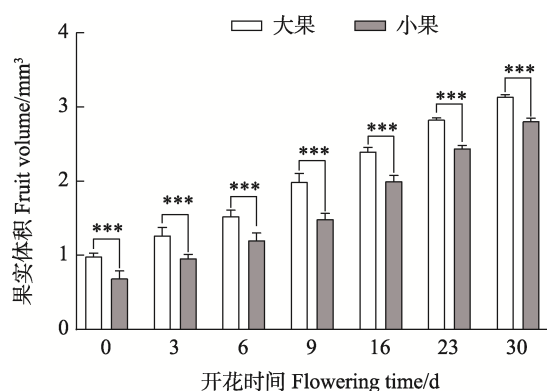


*表示处理间差异显著 ($P<0.05$) ; **、***表示处理间差异极显著 ($P<0.01$, $P<0.001$) ; ns 表示差异不显著。

* indicates significant difference among treatments ($P<0.05$); **, *** indicates extremely significant difference among treatments ($P<0.01$, $P<0.001$); ns indicates no significant difference.

图 4 大、小果不同发育时期横、纵向细胞大小及层数比较

Fig. 4 Transverse, longitudinal cell size and number of longitudinal cell layers at different developmental stages of large and small fruits



***表示处理间差异极显著 ($P<0.001$)。

*** indicates extremely significant difference among treatments ($P<0.001$).

图 5 发育早期大、小果果实体积

Fig. 5 Fruit volume of large and small fruits in early development

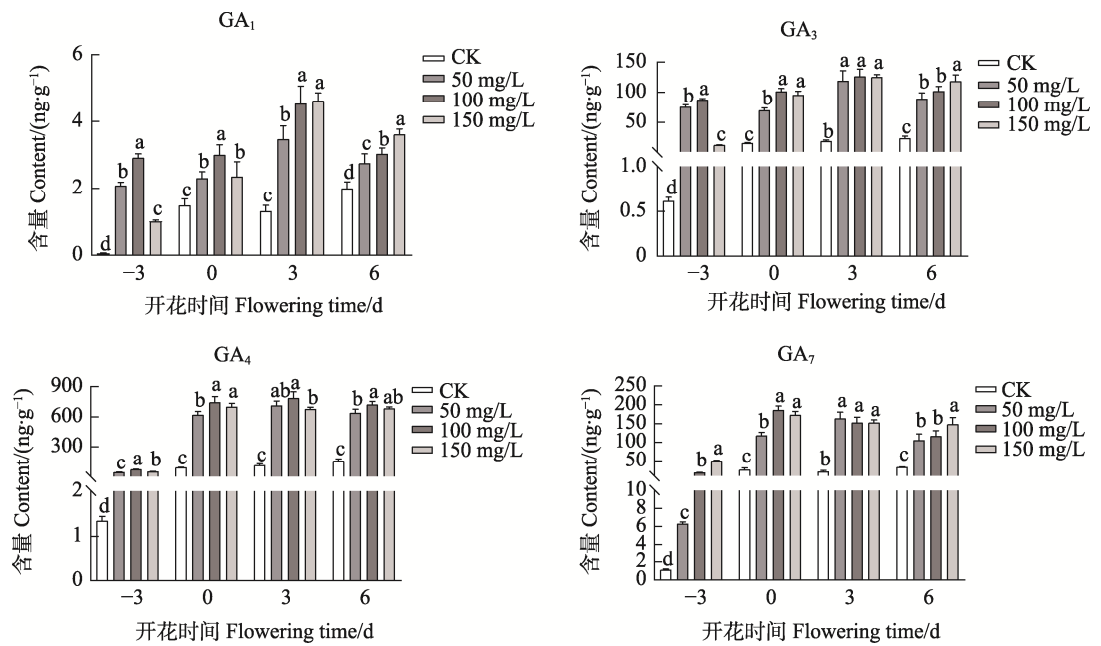
加。其中以开花 3 d 喷施 100 mg/L 的单果质量增加最为明显, 比对照组的单果质量增加了 36.8%。同时果实横径、侧径、纵径分别比对照组增加 7.8%、14.3%、11.3%。表明此处理对单果质量和果实大小增加最为显著。同时各处理之间的可食率差异不显著, 说明外施 GAs 后果实各部分均匀增大。另外, T_3 、 T_4 、 T_5 、 T_6 、 T_7 、 T_8 的可溶性固形物含量分别增加了 6.5%、9.5%、8.3%、3.9%、7.8%、5.9%, 其余几组与对照组差异不显著, 表

明果实大小的增加并不会造成可溶性固形物的降低, 甚至有促进作用。

3 讨论

3.1 内源 GAs 含量和种类对果实大小的影响

目前被发现广泛分布于高等植物、藻类、真菌及细菌中的 GAs 种类高达 136 种, 其中具有生物活性的主要有 GA_1 、 GA_3 、 GA_4 和 GA_7 ^[19-20]。而经前人研究发现, 龙眼中的活性 GAs 主要是 GA_4 和 GA_7 。本研究结果证实了这一结论, 在龙眼果实发育早期, GA_4 含量显著高于 GA_1 、 GA_3 和 GA_7 。并且在大果中, 内源活性 GA_4 含量各时期均显著高于小果, GA_1 、 GA_3 和 GA_7 含量虽然较少, 但也随着果实发育显著增加, 表明 GA_4 在龙眼果实发育早期占主导作用, GA_1 、 GA_3 和 GA_7 起辅助作用。ERIKSSON 等^[21]在关于 GAs 在拟南芥开花调控中作用的研究中发现, GA_4 是调节 LEAFY (LFY) 转录和开花时间的活性 GAs。VARBANOV 等^[22]发现在拟南芥中, 主要的生物活性 GAs (GA_4 和 GA_1) 参与了植物生长发育过程。并且拟南芥中的 GA_4 和 GA_1 在幼苗、芽、发育中的种子、萌发的种子、成熟的种子中均被研究检测。NAKAYAMA 等^[23]的研究确定了 GA_4



不同小写字母表示处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。
Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

图 6 外施 GAs 处理后的对照组以及试验组各时期的 GAs 含量
Fig. 6 GAs content in the control group and the experimental group after external gibberellin treatment

表 2 外施 GAs 处理后的试验组以及对照组的成熟果实品质
Tab. 2 Quality of ripe fruits in experimental group and control group after external gibberellin treatment

处理 Treatment	单果质量 Fruit weight/g	果实横径 Fruit diameter/mm	果实纵径 Fruit length/mm	果实侧径 Fruit side diameter/mm	可溶性固形物 Soluble Solid/%	可食率 Edible rate/%
CK	7.54±0.52 ^f	22.74±1.17 ^c	22.79±0.80 ^d	21.54±1.23 ^c	19.57±1.06 ^{cd}	0.58±0.02 ^c
T ₁	7.78±0.50 ^{ef}	24.33±1.70 ^b	23.30±0.67 ^{cd}	22.13±0.65 ^{de}	19.44±0.63 ^{cd}	0.62±0.02 ^a
T ₂	8.35±0.67 ^{cd}	24.00±0.69 ^b	24.09±1.02 ^b	22.79±0.57 ^{cd}	19.59±0.81 ^{cd}	0.60±0.02 ^{abc}
T ₃	10.02±0.68 ^a	25.68±1.75 ^a	25.68±0.64 ^a	24.79±0.66 ^a	20.84±1.32 ^{ab}	0.59±0.01 ^{bc}
T ₄	8.33±0.50 ^{cde}	24.46±0.61 ^b	24.01±0.73 ^{bc}	22.78±0.48 ^{cd}	21.42±0.92 ^a	0.58±0.03 ^c
T ₅	8.06±0.60 ^{cdef}	23.99±0.82 ^b	24.10±0.61 ^b	22.53±0.83 ^{cd}	21.19±0.63 ^{ab}	0.59±0.02 ^{bc}
T ₆	8.60±0.75 ^c	24.55±0.92 ^b	24.36±0.86 ^b	23.22±0.78 ^{bc}	20.34±0.91 ^{bc}	0.60±0.02 ^{abc}
T ₇	10.31±0.49 ^a	26.23±1.20 ^a	26.05±1.07 ^a	24.62±0.62 ^a	21.10±1.01 ^{ab}	0.61±0.02 ^{ab}
T ₈	8.26±0.52 ^{cde}	24.20±0.59 ^b	23.85±0.33 ^{bc}	22.86±0.77 ^{cd}	20.72±0.69 ^{ab}	0.60±0.02 ^{abc}
T ₉	8.01±0.44 ^{def}	23.74±1.02 ^b	23.61±0.77 ^{bc}	22.18±0.89 ^{de}	19.20±0.96 ^d	0.55±0.03 ^d
T ₁₀	8.40±0.38 ^{cd}	24.58±0.43 ^b	23.89±0.49 ^{bc}	23.31±0.60 ^{bc}	19.56±0.54 ^{cd}	0.61±0.02 ^{ab}
T ₁₁	9.29±0.41 ^b	25.84±0.50 ^a	25.45±0.53 ^a	23.72±0.62 ^b	19.11±1.08 ^d	0.56±0.02 ^d
T ₁₂	8.45±0.78 ^{cd}	24.11±1.13 ^b	23.96±0.77 ^{bc}	23.09±0.99 ^{bc}	18.79±1.03 ^d	0.60±0.03 ^{abc}

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ($P<0.05$).

是控制黄瓜茎伸长的活性 GAs。FUJIOKA 等^[24]在正常玉米幼苗营养芽提取物中鉴定出的活性 GAs 为 GA₁。HIRANO 等^[25]研究发现,在水稻花药中检测到的活性 GAs 为 GA₄,而在叶片中则为 GA₁。以上研究均表明,在不同植物、不同组织和不同发育阶段起作用的活性 GAs 类型有所区别,因此探究在龙眼中最主要的活性 GAs 十分必

要。但不同活性 GAs 在龙眼中是否具有组织特异性或者发育阶段的特异性,这些活性 GAs 之间是否可以通过相互转化从而达到动态平衡,这些问题尚需从生物化学、分子生物学和细胞生物学等多角度进行更深入的研究。
不同植物、品种、组织甚至不同发育时期对于 GAs 的敏感度可能也存在差异。如房玉慧^[26]

的研究表明,在桃树休眠解除期的花芽、根部以及茎中仅存在 GA_1 、 GA_3 、 GA_4 三种活性 GAs,其中 GA_1 含量最高,仅存于花芽,且含量随着休眠解除加深而升高。谢伶俐等^[27]研究发现欧洲的甘蓝型油菜品系中的 GAs 总量高于中国油菜品系。本研究结果也表明,在龙眼果实发育早期,无论大果还是小果种质 GA_4 含量均呈现先上升后下降的趋势,在果实发育快速膨大期, GA_4 含量并不是最高的。表明可能还有其他生长激素、信号分子或者营养物质等因素也影响果实的增大,GAs 可能只起到激活子的作用。果实发育是一个复杂的生理过程,期间可能涉及到多种因子的协同作用,因此尚需进行更为广泛和深入的研究。

3.2 细胞大小与细胞层数对果实大小的影响

从果实发育的内因来看,影响果实大小的主要因素是细胞的大小、数量以及细胞间的间隙,不同物种间影响果实大小的细胞学机制也各不相同,其中又以前 2 种影响因子更为常见^[28]。如橄榄^[29]和蓝莓^[30]果实大小主要体现在细胞数目之间的差异,而在苹果^[31]上的研究表明细胞数量和细胞大小共同决定果实大小。本研究结果也表明,在龙眼果实发育早期,大果龙眼和小果龙眼果实大小差异也主要体现在细胞大小和细胞数目的差异。在果实发育开始阶段(0~6 d),主要是纵向细胞的增加和伸长,而横向细胞在开花 6 d 之后细胞大小与细胞数目才呈现显著差异。

3.3 外施 GAs 对龙眼果实的影响

众多研究表明 GAs 在果实生长发育过程中发挥了重要作用,GAs 的代谢直接或间接地影响了果实的大小^[32],使得 GAs 成为农业生产中提升作物产量和品质的重要工具。本研究结果表明外施 GAs 可以显著提高小果龙眼果实大小,且开花 3 d 外施 100 mg/L 浓度 GAs 溶液试验组的效果最为明显。不同果树对于外施 GAs 的种类、时间和剂量存在一定的差异,如马靖恒等^[33]研究发现果实膨大期喷施 100 mg/L GA_3 +5 mg/L CPPU 时对蓝莓整体果实品质提升效果最显著。郭俊强等^[34]研究表明,户太 8 号葡萄和夏黑葡萄分别先在花期 1~3 d 和盛花期浸蘸 25 mg/L GA_3 ,10~15 d 后再浸蘸 50 mg/L GA_3 +2 mg/L CPPU 效果最好。LIU 等^[35]研究发现 100 mg/L GAs 处理可以显著增加苹果果实质量。LEE 等^[36]研究发现不同浓度和处理次数的 GA_3 对樱桃和普通番茄的鲜重有不同影响,有些处理会造成果实鲜重的增加,而有些处

理则对果实质量影响不大。这些研究均表明外施 GAs 确实可以增加果实大小,但在不同植物甚至不同品种中,施用 GAs 的最适浓度和最佳时间需不断摸索。

尽管试验组(外施 GAs 处理的小果花序)在果实质量和尺寸方面表现出显著的改善,但相对来说对可食率的影响不明显。这说明 GAs 处理主要作用于果实的整体生长,而非果实内部可食部分与非可食部分的比例。尽管这种增幅相比单果质量的增长可能相对较小,但仍然表明了外施 GAs 对果实整体大小的积极影响。此外,GAs 处理还使果实的可溶性固形物含量维持稳定甚至有所提升。表明外施 GAs 不仅可以有效增大龙眼果实大小,还能保证果实品质,为解决龙眼产业上“大果不甜,甜果不大”的问题提供了一条途径。在葡萄上的研究也表明 GA_3 溶液不仅能使果粒增大和单果质量的增加,还能提高可溶性固形物含量^[37]。而郑柯斌等^[38]研究结果显示,外施 50 mg/L GA_4 处理后的蓝莓可溶性固形物含量相较于对照提高了 19.44%。而薛莞莞等^[39]在红灯甜樱桃上的研究与之相反,表明在甜樱桃生长发育期间虽然喷施 GAs 溶液会增加单果质量和纵径,但同时也会降低可溶性固形物含量。表明外施 GAs 对果实品质的影响在不同果树中存在差异,且外施 GAs 对龙眼其他重要果实品质性状如糖的种类、维生素含量、风味等指标的影响尚需进一步研究。

4 结论

本研究明确了龙眼果实大小是由细胞大小和细胞数目共同决定的, GA_4 作为龙眼中最主要的内源 GAs, GA_4 含量的变化会影响龙眼果实细胞的分裂与膨大,从而导致龙眼果实大小之间的显著差异。在开花 3 d 喷施 100 mg/L 浓度的外源 GAs 能够显著促进龙眼果实的生长发育以及改善果实品质,特别是在果实大小以及质量方面,表现出显著的增强效果。

参考文献

- [1] 陈秀萍,蒋际谋,高慧颖,郑少泉.龙眼种质资源果实经济性状的稳定性评价[J].热带作物学报,2006,27(4): 9-13.
CHEN X P, JIANG J M, GAO H Y, ZHENG S Q. Evaluation of stability of fruit economic traits of longan germplasm[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2006, 27(4): 9-13. (in Chinese)

- [2] 韩冬梅, 吴振先, 杨武, 帅良, 李建光, 潘学文, 郭栋梁. 龙眼果实品质评价理化指标体系的构建[J]. 植物遗传资源学报, 2015, 16(3): 503-511, 519.
HAN D M, WU Z X, YANG W, SHUAI L, LI J G, PAN X W, GUO D L. Evaluation system established for the quality of ripened longan fruit based on physicochemical indices[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2015, 16(3): 503-511, 519. (in Chinese)
- [3] 王文然, 樊秀彩, 张文颖, 刘崇怀, 房经贵, 王晨. 果树赤霉素代谢与信号途径研究进展[J]. 生物技术通报, 2017, 33(11): 1-7.
WANG W R, FAN X C, ZHANG W Y, LIU C H, FANG J G, WANG C. Study progress on gibberellin metabolism and signaling transduction pathway in fruits trees[J]. Biotechnology Bulletin, 2017 33(11): 1-7. (in Chinese)
- [4] 徐臣善. 不同授粉品种对苹果果实生长及内源激素含量的影响[J]. 植物生理学报, 2013, 49(3): 277-284.
XU C S. Effects of different pollination varieties on fruit growth and endogenous hormones content in *Malus domestica* Borkh.[J]. Plant Physiology Journal, 2013 49(3): 277-284. (in Chinese)
- [5] 王溢, 兗攀, 姜维, 林继昌, 李超楠, 王振东, 陈奇凌. 库尔勒香梨果实发育过程中内源激素与抗氧化酶活性的变化规律[J/OL]. 分子植物育种, (2022-11-07)[2024-12-26]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=YBmesx2FU7nKQR6TDIFbzwND0VhL3uLWkMWN-_y4deakxobwyB7qJjGjW5sVOCt3s1mlw9D4oq_MEN-_M3VslGTSCbQz32s_hHUSFBXf8IBFBBA4-78Xp8qAyqWabzTmIbtQcAwvEcfaaiEOAD48yiv8Gs4pXE2GqxDTn7iQnhFdVC4xNSUIdYgBQO8c5bKx&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
WANG Y, YAN P, JIANG W, LIN J C, LI C N, WANG Z D, CHEN Q L. Changes of endogenous hormones and antioxidant enzyme activities during fruit development of Korla fragrant pear[J/OL]. Molecular Plant Breeding, (2022-11-07) [2024-12-26]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=YBmesx2FU7nKQR6TDIFbzwND0VhL3uLWkMWN-_y4deakxobwyB7qJjGjW5sVOCt3s1mlw9D4oq_MEN-_M3VslGTSCbQz32s_hHUSFBXf8IBFBBA4-78Xp8qAyqWabzTmIbtQcAwvEcfaaiEOAD48yiv8Gs4pXE2GqxDTn7iQnhFdVC4xNSUIdYgBQO8c5bKx&uniplatform=NZKPT&language=CHS. (in Chinese)
- [6] 张国海, 李学强, 李秀珍, 史国安, 夏仁学. 葡萄浆果发育期果皮、果肉和叶中内源激素含量的变化[J]. 四川农业大学学报, 2010, 28(4): 449-453, 466.
ZHANG G H, LI X Q, LI X Z, SHI G A, XIA R X. Changes in content of endogenous hormone in fruit peel, fruit flesh and leaf during fruit growth and development of grape[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2010, 28(4): 449-453, 466. (in Chinese)
- [7] 李冰晶, 罗丽平, 刘国华, 谢小林, 王代波. 九阡李生长过程中内源激素与果实品质相关性探究[J]. 中国南方果树, 2024, 53(5): 130-134.
LI B J, LUO L P, LIU G H, XIE X L, WANG D B. Study on the correlation between endogenous hormones and fruit quality during the growth process of Jiujian plum[J]. South China Fruits, 2024, 53(5): 130-134. (in Chinese)
- [8] 祖超, 李蓉蓉, 李志刚, 王灿, 鱼欢, 郑维全, 杨建峰. 外源赤霉素调控胡椒花穗形成及增产机理[J]. 热带作物学报, 2021, 42(2): 384-392.
ZU C, LI R R, LI Z G, WANG C, YU H, ZHENG W Q, YANG J F. Exogenous gibberellin regulating inflorescence formation and stimulation yield mechanism of black pepper[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2021 42(2): 384-392. (in Chinese)
- [9] 刘静, 董阳, 农慧兰, 余欣, 黄丽媛, 郑焕, 陶建敏. GA₃处理下葡萄果形变化及其生理和分子机制[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(2): 153-159.
LIU J, DONG Y, NONG H L, YU X, HUANG L Y, ZHENG H, TAO J M. Changes in grape fruit shape and their physiological and molecular mechanisms under GA₃ treatment[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(2): 153-159. (in Chinese)
- [10] UDDIN A S M M, GOMASTA J, ISLAM M T, ISLAM M, KAYESH E, KARIM M R. Gibberellic acid spray modulates fruiting, yield, quality, and shelf life of rambutan (*Nephelium lappaceum* L.)[J]. Journal of Horticultural Research, 2024, 32(1): 51-66.
- [11] 代琳, 张伦德, 周志扬, 陈泓臻, 黄康, 马晴晴, 孙孝贤, 熊博. 外源赤霉素、氨基酸钙处理对‘明日见’柑橘裂果的影响[J]. 中国农学通报, 2024, 40(7): 49-55.
DAI L, ZHANG L D, ZHOU Z Y, CHEN H Z, HUANG K, MA Q Q, SUN X X, XIONG B. Effects of exogenous gibberellin and calcium amino acid on fruit cracking of ‘Asumi’ citrus[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2024, 40(7): 49-55. (in Chinese)
- [12] 宋松泉, 刘军, 黄芸, 伍贤进, 徐恒恒, 张琪, 李秀梅, 梁娟. 赤霉素代谢与信号转导及其调控种子萌发与休眠的分子机制[J]. 中国科学: 生命科学, 2020, 50(6): 599-615.
SONG S Q, LIU J, HUANG H, WU X J, XU H H, ZHANG Q, LI X M, LIANG J. Gibberellin metabolism and signaling and its molecular mechanism in regulating seed germination and dormancy[J]. Scientia Sinica (Vitae), 2020, 50(6): 599-615. (in Chinese)
- [13] 王弋, 董晨, 魏永赞, 郑雪文, 李伟才. GA 信号途径及其调控果树生长发育的研究进展[J]. 果树学报, 2018, 35(4): 500-511.

- WANG Y, DONG C, WEI Y Z, ZHENG X W, LI W C. Research progress on GA signaling pathway and its function in regulating fruit trees growth and development[J]. Journal of Fruit Science, 2018, 35(4): 500-511. (in Chinese)
- [14] 周碧燕, 李建国, 黄旭明, 周贤军. 龙眼果实发育过程中 ZRs、GA 和 IAA 含量的变化[J]. 华南农业大学学报, 1999 (3): 50-53.
- ZHOU B Y, LI J G, HUANG X M, ZHOU X J. Changes in ZRs, GA, and IAA contents during fruit development of longan[J]. Journal of South China Agricultural University, 1999(3): 50-53. (in Chinese)
- [15] 刘丽琴, 李建光, 舒波, 王一承, 武红霞, 决登伟, 石胜友. GA₃ 对‘石硖’龙眼假种皮糖积累及蔗糖代谢相关酶的影响[J]. 西南农业学报, 2016, 29(11): 2698-2703.
- LIU L Q, LI J G, SHU B, WANG Y C, WU H X, JUE D W, SHI S Y. Effects of GA₃ on sugar accumulation and sugar metabolism-related enzyme activities in Shixia of *Dimocarpus longan* Lour fruits[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2016, 29(11): 2698-2703. (in Chinese)
- [16] SHI S Y, WANG W, LIU L Q, SHU B, WEI Y Z, JUE D W, FU J X, XIE, J H, LIU C M. Physico-chemical properties of longan fruit during development and ripening[J]. Scientia Horticulturae, 2016, 207: 160-167.
- [17] 胡香英. ‘紫娘喜’和‘妃子笑’荔枝花期调控效应研究[D]. 海口: 海南大学, 2016.
- HU X Y. Regulation of flower time in Ziniangxi and Feizixiao litchi[D]. Haikou: Hainan University, 2016. (in Chinese)
- [18] HAMADA K, HASEGAWA K, KITAJIMA A, OGATA T. The relationship between fruit size and cell division and enlargement in cultivated and wild persimmons[J]. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 2008, 83(2): 218-222.
- [19] SALAZAR-CEREZO S, MARTÍNEZ-MONTIEL N, GARCÍA-SÁNCHEZ J, PÉREZ-Y-TERRÓN R, MARTÍNEZ-CONTERRAS R D. Gibberellin biosynthesis and metabolism: a convergent route for plants, fungi and bacteria[J]. Microbiological Research, 2018, 208: 85-98.
- [20] HEDDEN P, SPONSEL V. A century of gibberellin research[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2015, 34(4): 740-760.
- [21] ERIKSSON S, BÖHLENIUS H, MORITZ T, NILSSON O. GA₄ is the active gibberellin in the regulation of LEAFY transcription and arabidopsis floral initiation[J]. The Plant Cell, 2006, 18(9): 2172-2181.
- [22] VARBANOVA M, YAMAGUCHI S, YANG Y, MCKELVEY K, HANADA A, BOROCHOV R, YU F, JIKUMARU Y, ROSS J, CORTES D, MA C J. Methylation of gibberellins by arabidopsis GAMT1 and GAMT2[J]. The Plant Cell, 2007, 19(1): 32-45.
- [23] NAKAYAMA M, YAMANE H, MUROFUSHI N, TAKAHASHI N, MANDER L N, SETO H. Gibberellin biosynthetic pathway and the physiologically active gibberellin in the shoot of *Cucumis sativus* L.[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 1991, 10(1): 115-119.
- [24] FUJIOKA S, YAMANE H, SPRAY C R, GASKIN P, MACMILLAN J, PHINNEY B O, TAKAHASHI N. Qualitative and quantitative analyses of gibberellins in vegetative shoots of normal, dwarf-1, dwarf-2, dwarf-3, and dwarf-5 seedlings of *Zea mays* L. 1[J]. Plant Physiology, 1988, 88(4): 1367-1372.
- [25] HIRANO K, AYA K, HOBOT, SAKAKIBARA H, KOJIMA M, SHIM R A, HASEGAWA Y, UEGUCHI-TANAKA M, MATSUOKA M. Comprehensive transcriptome analysis of phytohormone biosynthesis and signaling genes in microspore/pollen and tapetum of rice[J]. Plant and Cell Physiology, 2008, 49(10): 1429-1450.
- [26] 房玉慧. 桃树休眠解除期不同部位赤霉素种类及含量的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2023.
- FANG Y H. Study on the category and content of gibberellin in different parts during dormancy release in peach[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2023. (in Chinese)
- [27] 谢伶俐, 韦丁一, 章子爽, 徐劲松, 张学昆, 许本波. 甘蓝型油菜发育进程中赤霉素动态变化及其与产量的关系[J]. 中国农业科学, 2022, 55(24): 4793-4807.
- XIE L L, WEI D Y, ZHANG Z S, XU J S, ZHANG X K, XU B B. Dynamic changes of gibberellin content during the development and its relationship with yield of *Brassica napus* L.[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(24): 4793-4807. (in Chinese)
- [28] 王乐乐, 刘春燕, 陈鹏飞, 李志慧, 王灵哲, 周龙. 葡萄大小浆果发育前期细胞学、糖积累和库强比较[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2023(6): 1-9.
- WANG L L, LIU C Y, CHEN P F, LI Z H, WANG L Z, ZHOU L. Comparison of cytology, sugar accumulation and sink strength in early berry development of grape varieties with different berry size[J]. Sino-Overseas Grapevine & Wine, 2023(6): 1-9. (in Chinese)
- [29] HAMMAMI S B M, MANRIQUE T, RAPOPORT H F. Cultivar-based fruit size in olive depends on different tissue and cellular processes throughout growth[J]. Scientia Horticulturae, 2011, 130(2): 445-451.
- [30] JOHNSON L K, MALLADI A, NESMITH D S. Differences in cell number facilitate fruit size variation in rabbiteye blueberry genotypes[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 2011, 136(1): 10-15.

- [31] HARADA T, KURAHASHI W, YANAI M, WAKASA Y, SATOH T. Involvement of cell proliferation and cell enlargement in increasing the fruit size of *Malus* species[J]. *Scientia Horticulturae*, 2005, 105(4): 447-456.
- [32] 李保珠, 赵翔, 安国勇. 赤霉素的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(1): 1-5.
- LI B Z, ZHAO X, AN G Y. Recent advances in research of gibberellin[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(1): 1-5. (in Chinese)
- [33] 马靖恒, 李林宇, 裴彤, 魏晓琼, 王颖, 李金英, 吴林. 两种植物生长调节剂对蓝莓果实品质及内源激素的影响[J]. *分子植物育种*, (2023-05-24)[2024-12-26]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=YBmesx2FU7nt2wQw5_hixXGE97Mvb8cd-9CyibIWtdZybz-PsFqPlwEA5a0PQB0Vhs2RwPSTX1Tq5cPljRQRQaGUfr8XzKRhp7Vnx51kjxq-mrsLCbqVjhUwpzBb4sHmZ313q_bfZUtK2hDmbnd4IKJ5uQixCDON2yoJvzR6-qhOp8_yPNotlJlsviUMj2s&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- MA J H, LI L Y, PEI T, WEI X Q, WANG Y, LI J Y, WU L. Effects of two plant growth regulators on fruit quality and endogenous hormone content of blueberry[J]. *Molecular Plant Breeding*, (2023-05-24)[2024-12-26]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=YBmesx2FU7nt2wQw5_hixXGE97Mvb8cd-9CyibIWtdZybz-PsFqPlwEA5a0PQB0Vhs2RwPSTX1Tq5cPljRQRQaGUfr8XzKRhp7Vnx51kjxq-mrsLCbqVjhUwpzBb4sHmZ313q_bfZUtK2hDmbnd4IKJ5uQixCDON2yoJvzR6-qhOp8_yPNotlJlsviUMj2s&uniplatform=NZKPT&language=CHS. (in Chinese)
- [34] 郭俊强, 汤婷, 陈子秋, 张松霖, 李智, 王西平. 赤霉酸和氯吡脲处理对‘户太8号’和‘夏黑’葡萄果实品质的影响[J]. *北方园艺*, 2021(9): 8-17.
- GUO J Q, TANG T, CHEN Z Q, ZHANG S L, LI Z, WANG X P. Effects of GA₃ and CPPU treatments on fruit quality of grape varieties ‘Hutai No. 8’ and ‘Summer Black’[J]. *Northern Horticulture*, 2021(9): 8-17. (in Chinese)
- [35] LIU C S, XIAO P X, JIANG F, WANG S Y, LIU Z, SONG G Z, LI W, LV T X, LI J, WANG D M, LI Y, WU C B, LI T Z. Exogenous gibberellin treatment improves fruit quality in self-pollinated apple[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2022, 174: 11-21.
- [36] LEE M H, HAHM S, PARK J. Exogenous gibberellin application in tomato (*Solanum lycopersicum*) Recovers growth inhibition caused by triazole overuse[J]. *Horticultural Science and Technology*, 2023, 41(3): 285-294.
- [37] 何昕孺. 赤霉素对摩尔多瓦葡萄果实生长发育及品质的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2014.
- HE X R. Effects of gibberellin on development and quality of Moldova grape berry[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2014. (in Chinese)
- [38] 郑柯斌, 司文, 杨怡妍, 林海, 陈杰, 袁静. 3种赤霉素对蓝莓果实成熟与品质的影响[J]. *浙江农业科学*, 2020, 61(3): 524-527.
- ZHENG K B, SI W, YANG Y Y, LIN H, CHEN J, YUAN J. Effects of three gibberellins on fruit ripening and quality of blueberry[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2020, 61(3): 524-527. (in Chinese)
- [39] 薛莞莞, 龚荣高, 丁建林, 李克强, 邹金, 李如龙, 彭宏贵. 赤霉素喷施对红灯甜樱桃果实品质及解剖结构的影响[J]. *浙江农业学报*, 2018, 30(6): 978-984.
- XUE W W, GONG R G, DING J L, LI K Q, ZOU J, LI R L, PENG H G. Effect of gibberellin on fruit quality and anatomical structure of Hongdeng sweet cherry[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2018, 30(6): 978-984. (in Chinese)