

柑橘果皮的发育特征及 GA₃ 的防裂效果

李永杰¹, 金国强^{1*}, 淳长品², 朱潇婷¹, 邱晓莹¹

(¹临海市特产技术推广总站, 浙江临海 317000; ²西南大学·中国农业科学院柑桔研究所, 重庆 400712)

摘要:【目的】以杂柑甘平为试材, 研究其果皮的发育特征及其与裂果的相关性, 探索赤霉素(GA₃)对果实裂果的影响, 为柑橘裂果的机制研究和综合防控提供参考。【方法】采用石蜡切片法观察果皮的解剖结构, 应用机械喷雾 GA₃ 于果实表面, 并对裂果率和果实品质参数进行评价。【结果】果实发育的果形指数由盛花后 30 d 的 0.92 趋向扁圆形发展, 到转色前为 0.76。谢花后, 果皮厚度随着果实的发育快速增长, 在盛花后 45 d 左右达到最高值 0.50 cm, 之后逐渐变薄, 直至转色前维持在 0.19 cm 左右。解剖结构显示中果皮细胞间在盛花后 45 d 即开始出现明显的裂隙, 随着发育的进行持续扩大, 成为果皮开裂的敏感部位。GA₃ 喷施有利于表皮细胞和中果皮细胞维持相对稳定的层次和胞间连接, 进而可以有效地降低裂果的发生, 与对照相比, 3 次 10 mg·kg⁻¹ 处理可降低果实裂果率 54.53%, 并且对果实品质的影响不显著。【结论】柑橘果实裂果与果形趋向扁圆形发展、果皮持续变薄及中果皮胞间隙扩大有关, 外源 GA₃ 可在一定程度上缓冲裂隙的发展, 进而显著降低裂果的发生。

关键词: 杂交柑橘; 裂果; 中果皮; 赤霉素

中图分类号: S666

文献标志码: A

文章编号: 1009-9980(2021)07-1092-10

Developmental characteristics of citrus peel and the effect of gibberellic acid on fruit cracking

LI Yongjie¹, JIN Guoqiang^{1*}, CHUN Changpin², ZHU Xiaoting¹, QIU Xiaoying¹

(¹Station of Popularizing Speciality Technology in Linhai, Linhai 317000, Zhejiang, China; ²Southwest University/Citrus Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Chongqing 400712, China)

Abstract: 【Objective】Fruit cracking is an important physiological disease in citrus. Due to the complexity of the fruit cracking mechanism and the variability of the climate, there are still no effective measures to solve fruit cracking problem in practice. Kanpei is a hybrid citrus variety recently introduced to China. Its fruit cracking phenomenon is serious regardless of changes in the external environment, which provides a good case for fruit cracking research. This paper comprehensively evaluated the development characteristics of peel and its correlation with fruit cracking in Kanpei fruit. Effects of gibberellic acid (GA₃) on fruit cracking rate and fruit quality were also investigated. 【Methods】During the young fruit stage and the fruit expanding stage, 1.5 cm×2.0 cm peel pieces were cut and subjected to FAA fixation, washing, dehydration, transparency, paraffin impregnation, embedding, sectioning and gluing, dewaxing, staining, dehydration, hyalinization, sealing and other steps to obtain paraffin sections of the peel. The paraffin sections were used for the observation of the structural characteristics of the peel tissues. Fruit shape index and peel thickness were measured with a vernier caliper. The firmness of fruit was measured using a digital force gauge, and the equatorial position is taken as the measuring point. There were four treatments in the experiment, including three concentration gradients of gibberellic acid, 5 (G5), 10 (G10), and 20 mg·kg⁻¹ (G20), which was sprayed on the surface of the fruit every 20 days from the young fruit stage (June 15). The fourth treatment involved spraying with

收稿日期: 2021-02-01 接受日期: 2021-04-09

基金项目: 临海市协同创新项目(2019lhxc01); 浙江省农业重大技术协同推广计划(2020XTTGPP03-02)

作者简介: 李永杰, 男, 硕士, 主要从事柑橘栽培生理研究。Tel: 13656559286, E-mail: research2046@163.com

*通信作者 Author for correspondence. E-mail: 1939097093@qq.com

10 mg · kg⁻¹ GA₃ (DG10) every 15 days from the fruit expansion period (July 5). In all the treatments, the GA₃ were sprayed three times, each containing 0.05% Tween-20 as the surfactant. Spraying water served as the control group (CK). The initial fruit load (M) of each tree after fruit set (July 20) and the final fruit load (N) of each tree at the end of fruit cracking (mid-late October) were recorded. The fruit cracking rate = (M-N)/M × 100%. The soluble solid content (SSC) of the fruit and color parameters of the fruit surface were measured with a Brix meter and a color difference meter, respectively. The juice filtered through two layers of gauze and diluted by 50 times was used for the citric acid content determination. 【Results】After flowering, the vertical and horizontal diameters of the fruit increased rapidly, and the growth rate of the horizontal diameter was faster than that of the vertical diameter, which led to a decrease in fruit shape index from 0.92 at 30 days after full bloom to 0.76 before color break. The thickness of the peel increased rapidly with the development of the fruit, reaching a maximum value of 0.50 cm around 45 days after the full bloom, and then gradually decreased to about 0.19 cm at color break stage. The results of the paraffin section showed the microstructure of peel, where the albedo is the sensitive layer for cracking because cracks appeared between the albedo cells from 45th days after full bloom and expanded with fruit development. There was no significant correlation between fruit shape index and cracking incidence, but thicker peel resulted in higher peel hardness, which was beneficial to buffer the stress on the peel caused by the increased turgor pressure of the fruit. The gibberellic acid treatments effectively reduced fruit cracking rate. The fruit cracking rate in G10(10 mg · kg⁻¹) treatment decreased by 54.53% and 34.76% compared with the control group and DG10, respectively. However, higher concentration GA₃ (20 mg · kg⁻¹) increased the sunburn injury caused by high-temperature days in summer, while lower concentration GA₃ (5 mg · kg⁻¹) had a limited effect in preventing peel cracking. Spraying GA₃ (G10) enhanced the connectivity of albedo cells and improved the arrangement of cuticle layers, which might play an important role in reducing the rate of fruit cracking. All the GA₃ treatment had no significant effect on fruit internal quality, but 20 mg · kg⁻¹ GA₃ increased peel firmness and thickness, by 8.1% and 15.0%, respectively, compared with the control group. Delayed and frequent application of GA₃ (DG10) postponed the accumulation of red pigment in the peel. It is worth noting that the fruit shape index in each GA₃ treatment was 1.5%-4.5% higher than in the control. 【Conclusion】The cracking of citrus fruit is a gradual process, which is the result of both external and internal factors. The fruit cracking is related to the continuous thinning of peel thickness and cell cracks in the albedo tissue. Exogenous GA₃ suppresses the development of cracks, and thus effectively control the occurrence of fruit cracking. However, some attention should be paid upon the concentration and time of GA₃ application, otherwise, some adverse effects may occur.

Key words: Hybrid citrus; Fruit cracking; Mesocarp; Gibberellic acid

柑橘是世界种植面积和产量最高的水果作物,新中国成立以来,我国的柑橘产业迅速发展,当前的种植面积和产量均居世界首位^[1]。柑橘属于上位果实,其果皮在发育的过程中,由于与果实生长的不协调,会导致部分品种发生裂果现象,如脐橙的内裂和温州蜜柑的外裂^[2]。裂果是指果皮机械断裂的一种生理性病害或者失调现象,枣^[3]、石榴^[4]、樱桃^[5]、梨^[6]、油桃^[7]和荔枝^[8]等水果作物也多有发生,而柑橘裂果严重的年份,果实的裂果率甚至可达50%以上^[9],严

重影响柑橘的产出效益。裂果的原因很多,其中遗传因素、延迟采摘和土壤或空气湿度变化^[4]等占据主导地位。而植物营养物质的缺乏^[9]、果皮的日灼和损伤^[4]、病原菌的活动^[10]、砧木的不合理选择^[11]以及内源激素的不平衡^[12]也是引起大面积发生裂果的重要因素。研究者普遍认为,水分状态的变化是引起果实裂果的首要因素^[13-15]。Burhan等^[16]通过避雨设施的覆盖和果面喷涂隔水膜,阻断了果实直接从外界吸收水分,在增加了果皮弹性的同时,显著减少

了果实裂果的发生,然而,该方法受限于生产条件和果实发育过程中对环境的需求,较难应用于实践。

外源赤霉酸(Gibberellins)对裂果调控的研究较为广泛。Yilmaz等^[4]采前应用赤霉酸、松脂二烯(一种抗蒸腾剂)和矿质元素喷雾石榴果实,赤霉酸对降低石榴裂果的效果最为明显,而松脂二烯和矿质元素处理后对裂果的影响并不显著。但是高浓度赤霉酸的应用降低了果实假种皮和出汁率,增加了果皮的厚度并延迟果实着色。在樱桃采收前30~40 d,应用赤霉酸可同样降低果实的裂果率并且延迟采摘时间3~4 d^[5]。柑橘上,喷布不同次数较高浓度的赤霉酸可以显著降低脐橙果实的裂果率^[17]。但是,Cline等^[18]则认为单次40 mg·L⁻¹和重复10 mg·L⁻¹ GA₃处理并没有缓解甚至加剧了甜樱桃的裂果。相似的结论也被前人所报道^[19-20]。尽管Sofia等^[21]发现,GA₃喷雾改变了表皮的厚度和蜡质含量,这种变化可能影响裂果的发生。但是,当前针对赤霉酸防治裂果的机制仍没有被正式提出,其对柑橘果实裂果的防效仍有待进一步研究验证。

柑橘果皮结构由三部分组成,其中外果皮或油胞层为果实最外面的组织层,含表皮和薄壁细胞。再往里是中果皮,又叫海绵层或白皮层,构成果皮厚度的主要部分。而内果皮则为室膜的一部分,位于心皮的内侧^[22]。果皮断裂主要指的是外果皮和中果皮的开裂。果皮在果实膨大期的发育进程与果肉不一致是导致脐橙裂果的主要因素^[2]。而果皮韧性的降低则是其不能抵抗来自内部果肉持续增加的应力而造成裂果的另一个重要原因^[23-24]。温州蜜柑裂果与外界环境的变化显著相关,夏季的高温干燥气候对果肉外部的果皮损伤较大,破坏了果皮组织和细胞原有的增大过程,进而破坏了果肉和果皮之间发育的平衡性,导致果皮易裂^[25]。红江橙的已裂果果皮通常较薄、弹性差且硬度低,而果形指数小也是其果实易裂的重要因素,扁圆形果表皮角质层厚,表皮细胞排列不紧密,细胞过渡性差,中果皮网络组织疏松,从果腰到果顶果皮迅速变薄,遇到不利条件(如突遇大雨或大量灌水),相对于梨形果更容易发生裂果^[26]。由此,果皮的发育特征与柑橘裂果有着显著的相关性。

当前针对柑橘的裂果,前人研究多注重于裂果现象和机制的观察,而在实践中,仍难以根据品种特性、生长环境提出针对性地减少裂果的措施。果皮

作为裂果发生的一个重要指示指标,笔者从幼果期开始观察其显微结构变化,力图寻找柑橘裂果的关键时期,然后提出针对性的防控措施,以期进一步了解柑橘裂果发生机制,为生产上防控裂果提供参考。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试材料为浙江省临海市涌泉柑橘专业合作社种植在红黄壤土上的20年生枳[*Poncirus trifoliata* (L.)Raf.]砧高接3 a(年)的杂柑甘平(*Citrus Kanpei*),中间砧为宫川温州蜜柑(*Citrus unshiu* Marc. Sugiyama wase),甘平是新引进我国的杂交柑橘新品种,父本为椪柑,母本为西之香(清见×特洛维塔甜橙),具有较高的糖分,极易裂果^[27],平均裂果率可达60%,因此,个体间差异较小,试验间重复的一致性高。

1.2 样品采集

分别于2019年5月25日(盛花后30 d)、6月10日(盛花后45 d)、6月25日(盛花后60 d)、7月10日(盛花后75 d)、7月25日(盛花后90 d)、8月10日(盛花后105 d)、8月25日(盛花后120 d)、9月10日(盛花后135 d)和9月25日(盛花后150 d)随机采集15个果实,置于冰袋的泡沫盒中,带回实验室处理。用流水洗净果皮表面污渍,擦干后,使用游标卡尺测量果实赤道部横径和纵径,然后在赤道部横切,用游标卡尺测定果皮厚度。切取1.5 cm×2.0 cm果皮小块,置FAA固定液中,真空泵抽气15 min,放入4℃冰箱中24 h后转至室温保存,制作石蜡切片。石蜡切片的详细流程参照马小焕^[28]的方法制作,OLYMPUS生物显微镜下观察、拍照。在果实裂果盛期(8月25日前后),分别采集已裂果和未裂果各25个,测量他们的果形指数、果皮厚度和果皮硬度。果皮硬度使用西安盖文电子科技有限公司生产的GSI315W系数字力计(Digital Force Gauge),以硬度计穿刺果实赤道面果皮的力表示,单位为N。

1.3 试验设计

GA₃喷布:试验共划分4个处理,单株为1个重复,4株为1个处理。其中处理1、处理2、处理3从2020年6月15日开始,每隔20 d分别喷布5、10、20 mg·kg⁻¹ GA₃,处理4从7月5日(果实膨大期)开始,每隔15 d喷布10 mg·kg⁻¹ GA₃。为了方便描述将各处理分别简化为处理1(G5)、处理2(G10)、处理3

(G20)和处理4(DG10),所有处理均喷雾3次,每次处理均含0.05%的吐温-20作为活性剂。设立喷水为对照(CK)。使用背负式电动喷雾器。

裂果率调查:分别统计每株树在定果后裂果前(7月20日)总挂果量(M)和裂果基本结束时(10月中下旬)的总挂果量(N),二者之间的差值为总裂果数量,即裂果率/%=(M-N)/M×100。

果实品质测定:于2021年1月5日果实成熟期随机采集每个处理21个果实,随机分成3组,即为3次重复。测量果实纵径、横径、果皮厚度和果皮硬度。可溶性固形物含量和柠檬酸含量使用日产ATAGO便携糖酸速测仪(PAL-BX/ACID F5)测定。果面色差使用日本柯尼卡美能达(Konicaminolta)生产的CR-400色差仪测定,每个果实测量赤道位置4个点,4个点的平均值为单个果实的色差值。

1.4 数据处理与分析

采用Excel和SPSS软件进行数据统计分析及绘图,采用邓肯氏新复极差法分析差异显著性。

2 结果与分析

2.1 甘平果实生长曲线

如图1所示,甘平果实在盛花后30 d由近圆形,向扁圆形状不断发育,主要是因为果实膨大的过程中,横径的生长速率明显高于纵径。首先,在幼果期,果实生长能力最强,纵横径生长速率最大。从盛花期后60 d开始,果实纵横径生长速率相对平缓,但横径的生长速度明显快于纵径,果实质量在显著增加的同时,果形指数(纵径/横径)小于1,且越来越小,果实越发趋于扁圆形,至着色期果形指数不超过0.8。盛花后60~75 d果实纵横径生长变化较为平

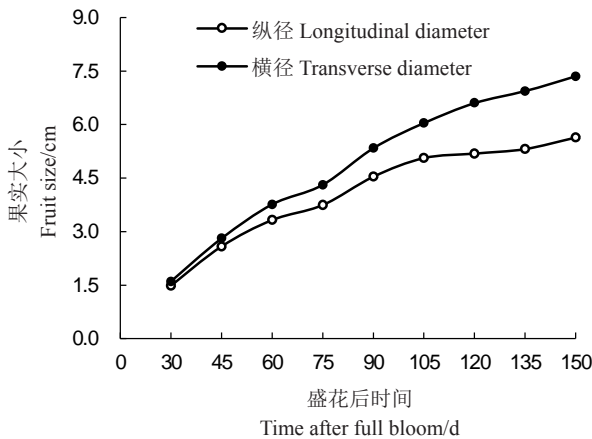


图1 甘平果实的生长曲线

Fig. 1 Growth curve of Kanpei fruit

缓,可能与该时期果园较为缺水有关。

2.2 甘平果皮厚度的变化

图2显示了甘平果皮厚度的动态变化,呈先增后降的趋势。在幼果期,果皮细胞通过分裂增加了细胞数量和细胞层次,快速生长,导致果皮厚度显著增加,在盛花后45 d,果皮厚度达到峰值0.50 cm。之后,果皮发育与果肉发育不再同步进行,果皮开始变薄,厚度变薄的速率呈现出“快-慢-快-慢”的变化趋势,盛花后80~105 d果皮变薄的相对速率最快。盛花后120 d,果皮厚度变化趋于平缓,直至转色期基本维持在0.19 cm左右。

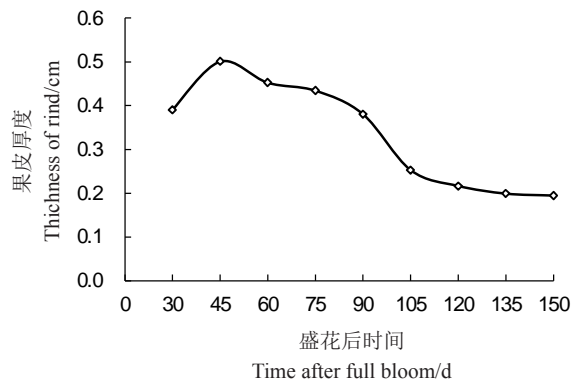


图2 甘平果皮厚度的变化

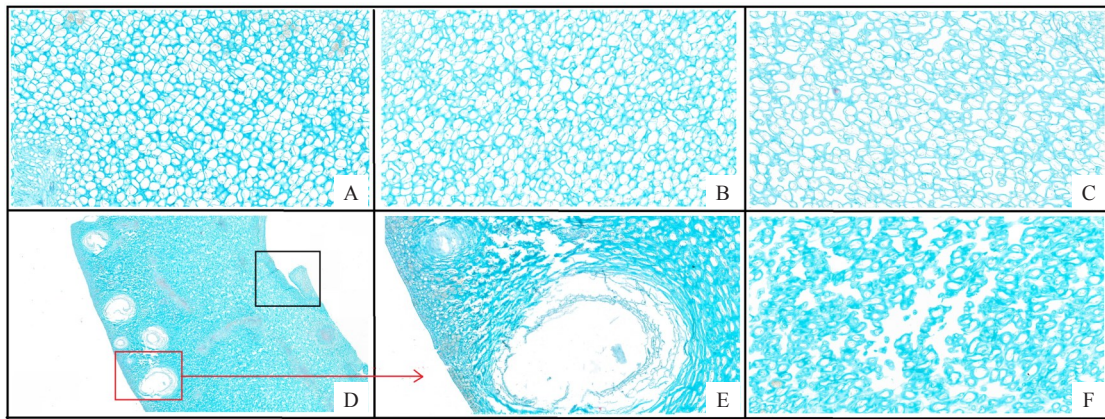
Fig. 2 Changes in pericarp thickness of Kanpei fruit

2.3 甘平果皮解剖结构的变化

果皮解剖结构显示,果实在发育初期(盛花后30 d),中果皮(海绵层)细胞似玉米粒状,几无形态差异且紧密排列(图3-A)。6月上旬,海绵层细胞膨大生长,胞间出现裂生的间隙,细胞间仍维持较高的连接性(图3-B)。但随着果实发育的不断进行,海绵层细胞间隙不断扩大,细胞失去了原有的均匀度和连接性,排列疏松(图3-C),中果皮变成了裂果的敏感部位。海绵层的韧性也随之降低,如遇来自内部果肉的异常膨压,外果皮角质层和油胞层细胞先后被撕裂,胞质外流(图3-D、E),同时,中果皮与内果皮间的薄壁组织细胞间也出现明显的裂缝(图3-D中黑色框标记),随着裂缝的持续发展,海绵层被撕裂,出现空洞(图3-F),最后,在果皮对应的位置出现肉眼可见的开裂。值得注意的是,表皮属于被机械撕裂,其细胞的排列层次和整齐度在裂果前仍维持较好的完整性。

2.4 甘平裂果的果形指数、果皮厚度和果皮硬度

比较甘平裂果果实和正常果的果形指数大



A、B、C. 甘平果皮海绵层在盛花后 30 d(A. × 100)、盛花后 45 d(B. × 100)和盛花后 75 d(C. × 100)的结构。D、E、F. 盛花后 90 d 甘平果皮开裂的显微过程(D. × 20; E. × 100; F. × 100)。

A, B and C. The microstructure of albedo at the 30th, 45th and 75th day after full bloom(× 100); D, E. Peel microstructure of cracking fruit on the 90th day after full bloom(D. × 20; E. × 100; F. × 100).

图 3 甘平果实的果皮组织结构变化

Fig. 3 The histological structure of the rind of Kanpei fruit

小,二者无差异(表 1),说明果形指数并不是裂果果实和未裂果实差异的主要因素。但是,正常果的果皮厚度和果皮硬度分别比已裂果高出 21.1% 和 17.9%,表明了拥有更厚、更硬果皮的果实在发育的过程中有利于缓冲果肉的膨压进而避免果皮开裂。

表 1 甘平果实特征与裂果的关系

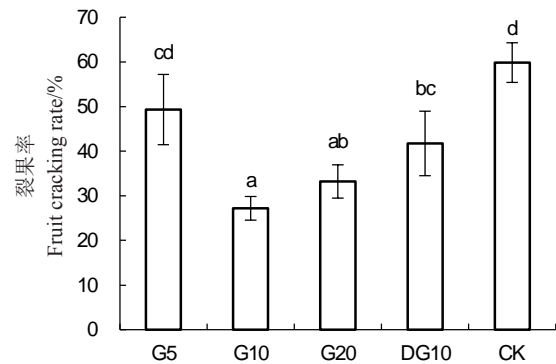
Table 1 The correlation of fruit cracking and Kanpei fruit characteristic

果实类型 Fruit type	果形指数 Fruit shape index	果皮厚度 Peel thickness/cm	果皮硬度 Firmness/N
已裂果 Cracked fruit	0.81±0.05	0.19±0.03	285.16±86.18
正常果 Normal fruit	0.82±0.04	0.23±0.04	336.17±91.24

2.5 GA₃对甘平果实裂果的影响

在果实幼果期和膨大初期应用 GA₃可有效减少果实膨大期中后期裂果的大面积发生(图 4)。与对照相比,从幼果期开始应用 5、10 和 20 mg · kg⁻¹ GA₃处理的果实裂果率分别降低了 17.55%、54.53% 和 44.55%。而从果实膨大初期开始喷布 GA₃(DG10)处理的果实裂果率比对照组降低了 30.30%,但是高于 G10 处理 53.29%,且差异显著。另一方面,低浓度 GA₃(G5)处理的结果与对照和 G10 处理的差异均不显著。

由图 5 可知,赤霉素(G10)的应用,可一定程度上加强中果皮细胞间的连接性和紧密度,延缓柑橘



不同小写字母表示不同处理间差异显著(p < 0.05)。

Different small letters indicate significant differences among treatments at p < 0.05.

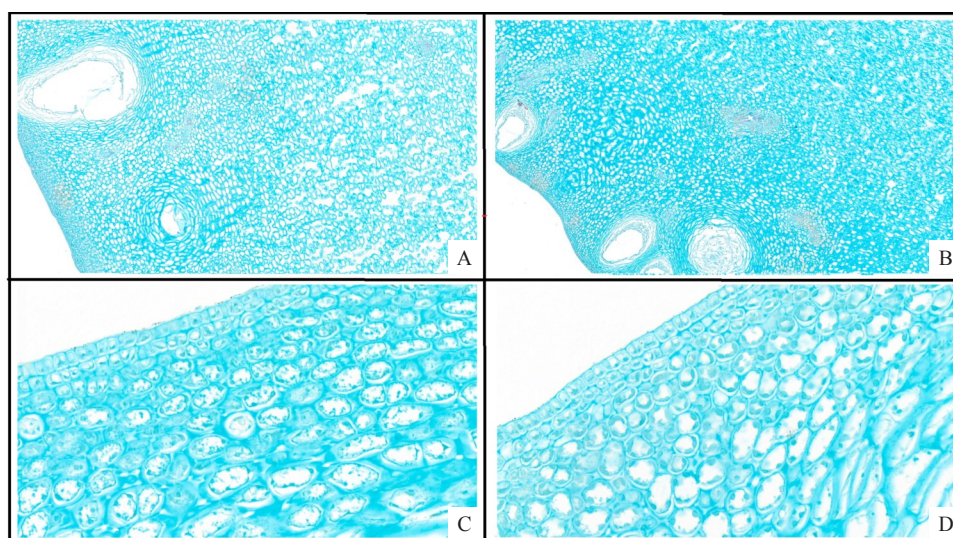
图 4 不同处理对甘平果实裂果率的影响

Fig. 4 Effects of different treatments on cracking rate of Kanpei fruit

果皮海绵层间隙的快速发展(图 5-B)。而未经过 GA₃处理的甘平果皮在裂果盛期(8月 25 日)的海绵层细胞间隙已发展至表皮油胞附近,细胞间隙也较大(图 5-A)。但是 GA₃喷雾对油胞层细胞没有显著影响。GA₃处理后的表皮细胞排列层次更明显,整齐度较好(图 5-D),对照的表皮细胞体积大小差异较大(图 5-C)。

2.6 GA₃处理对甘平果实品质的影响

表 2 显示了 GA₃处理对果实品质的影响。结果表明,不同浓度 GA₃处理对甘平果实的内部品质(SSC 和 CA)没有显著影响,但是 G20 处理的果皮



A. 裂果发生期(盛花后 105 d),对照果皮细胞结构(×40);B. 裂果发生期(盛花后 105 d),GA₃处理后的果皮细胞结构(×40);C. 裂果发生期(盛花后 105 d),对照表皮细胞结构(×400);D. 裂果发生期(盛花后 105 d),GA₃处理后的果皮细胞结构(×400)。

A. Peel microstructure of CK fruit on the 105th day after full bloom(×40); B. Peel microstructure of GA₃ treatment fruit on the 105th day after full bloom(×40); C. Cuticle microstructure of CK fruit on the 105th day after full bloom(×400); D. Cuticle microstructure of GA₃ treatment fruit on the 105th day after full bloom(×400).

图5 GA₃处理对果实果皮组织结构的影响

Fig. 5 Effect of GA₃ treatments on the histological structure of peel

表2 赤霉素对甘平果实品质的影响

Table 2 Effects of GA₃ on quality of Kanpei fruit

处理 Treatment	果形指数 Fruit index	果皮厚度 Peel thickness/cm	硬度 Firmness /N	色差指数 Color characteristics			w(可溶性固形物) Soluble solids content/%	w(柠檬酸) Citric acid/%
				L*	a*	b*		
G5	0.70±0.03 a	0.20±0.01 a	61.35±3.82 b	63.34±1.42 a	33.32±1.43 a	59.95±2.64 a	13.13±0.61 a	0.62±0.04 a
G10	0.68±0.02 a	0.22±0.03 a	59.64±1.42 b	64.17±1.55 a	32.61±1.03 a	61.60±2.97 a	12.90±0.50 a	0.60±0.02 a
G20	0.69±0.01 a	0.23±0.01 a	70.08±1.17 a	64.42±0.99 a	34.25±1.12 a	62.06±1.80 a	12.85±0.25 a	0.55±0.05 a
DG10	0.70±0.01 a	0.21±0.02 a	64.88±3.45 b	66.29±1.81 a	28.29±0.88 b	64.65±2.51 a	12.88±0.26 a	0.59±0.02 a
对照 CK	0.67±0.02 a	0.20±0.01 a	64.82±2.87 b	64.03±1.55 a	33.97±1.66 a	60.81±2.02 a	13.05±0.15 a	0.60±0.05 a

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($p < 0.05$)。

Note: Different small letters in the same column indicate significant differences among treatments at $p < 0.05$.

硬度显著高于对照及其他各处理,可能与其在一定程度上增加了果皮厚度有关,与对照相比,20 mg·kg⁻¹处理后的果皮厚度增加了15.0%。果面色泽是果实品质最直接的表现,笔者在本研究中发现,G5、G10和G20的果实在成熟期的果皮色泽与对照差异不显著,而DG10果面的a*值显著低于对照组,L*和b*值变化不显著,这也意味着,GA₃于幼果期开始应用并不会对成熟期果实果皮的转色造成显著影响,而从果实膨大期开始喷雾GA₃会延缓果皮红色素的形成。果形指数各处理与对照的差异均不显著,但GA₃处理后的果实果形指数平均高于对照1.5%~4.5%。

3 讨论

柑橘果实裂果现象在世界各柑橘产区均有发生^[9],尤其是橙类和温州蜜柑品系裂果发生较为频繁。当前有关裂果研究多集中在与裂果率相关的生理(果形指数、果实大小等)^[2,9]和生化(酶、基因表达等)指标^[24,29]上,很少从显微结构入手,提出针对性防控裂果发生的有效措施,可能与裂果的规律较难把握有关。而甘平是极易裂果的杂柑新品种,为研究裂果提供了良好的试材。笔者首先分析了裂果与果皮发育特征的相关性,然后针对性地提出控制裂果的实践措施,从而为柑橘裂果机制和防控措施

研究提供重要参考。

3.1 果实和果皮发育特征与裂果的关系

研究表明,裂果与果实发育过程密切相关。红江橙裂果多发生在果皮越来越薄的果实发育后期,此时果实仍在进行微弱的生长,而果皮已达最薄,裂果现象易发^[26]。果实组织迅速发育早期、果皮呈浅黄橙色时的着色期及成熟后期是脐橙裂果易发的敏感时期^[2]。而温州蜜柑裂口形状多数是从果顶处向下纵裂,主要原因之一是果实顶部果皮较薄,果蒂处果皮相对较厚^[30]。盛花后80~140 d果皮厚度迅速下降,该下降过程是脐橙果实内裂的诱因^[28]。果皮变薄的过程也诱发了甘平的裂果,甘平裂果现象通常发生在7月下旬至10月中旬,本文研究结果显示,果皮从6月中旬开始变薄,而在7月中下旬,果皮变薄的速率最高,裂果开始发生,该阶段可能是之后大面积裂果诱发的敏感时期。果皮厚度下降幅度最大的阶段也是诱发或加剧脐橙内裂的原因之一^[2]。

果皮的厚度和硬度是衡量果实强度的重要指标,也与柑橘果皮开裂直接相关。在柑橘果实发育后期,果皮厚度和硬度更低是卡拉脐橙裂果率高于纽荷尔脐橙的重要因素之一^[24]。果皮厚度与红江橙的裂果率之间呈显著负相关^[26]。本研究表明,果皮更厚的甘平果实其果皮硬度也更高,有助于避免果实裂果现象的发生。前人研究果形指数的结果表明,同一个品种内,更易发生裂果的柑橘果实往往是扁圆形果实^[28,30-31],但是,叶正文等^[17]的研究认为,脐橙果实的果形指数与裂果不存在相关性,而与果皮厚度纵向变化有着更明显的关系。本研究也表明,甘平果实的裂果与果形指数的差异不存在明显的相关性,但是,果实横径与纵径的生长速率差异较大,果形指数较小,可能是甘平果实极易裂果的重要因素。温州蜜柑和脐橙的果实在发育的过程中,果形指数通常分别维持在0.9^[30]和1.0^[2]左右,而甘平的果形指数在裂果期间始终在一个更低的指数0.8上下,这意味着,果实顶部受到的压力会显著增大^[32]。因此,相较于温州蜜柑和脐橙,甘平果实有着更高的裂果率。

3.2 果皮显微结构与裂果的关系

甘平果实外果皮细胞发育从幼果期至膨大期始终保持较为紧密的结构,但是外果皮较为明显的细胞排列的层次仅在表皮的2~3层,故其表皮厚度较薄,抗裂能力较弱^[33]。本研究结果表明,海绵层组织

是裂果最敏感的部位,在谢花后的一段时间内,海绵层细胞的大小较为一致,随后海绵层细胞间出现裂隙,且在不断扩大,导致整个果皮的韧性也在不断降低,最终在膨压的异常作用下,表皮和海绵层被撕裂,导致果皮开裂。因此,早期果皮海绵层的发育出现间隙导致中果皮韧性降低是后期裂果发生的基础。这与脐橙果实内裂的过程相似,脐橙果皮内裂是一个长期的渐变过程,在盛花后80 d,海绵层细胞间出现较大的裂隙,随着发育的进行而不断扩大,最终形成大的裂缝和空洞^[9]。李娟等^[23]的报道也指出易裂的华盛顿脐橙白皮层细胞间有些地方较密集而有些地方则出现大的空隙。随着果实的发育,中果皮显得松散,胞间连接性差,且中果皮和内果皮间无致密的薄壁细胞加以过渡等因素也提高了红江橙果实对裂果的敏感度^[33]。此外,甘平果实中果皮与内果皮间的薄壁组织在表皮细胞被撕裂时也几乎同时产生裂隙。这与锦橙果实外裂始于角质层随后油胞层、海绵层甚至囊瓣开裂^[31]的报道有些许偏差,究其原因可能是不同品种的果实裂果方式存在差异。

因此,果皮的海绵层组织是果皮易裂的内在敏感因素,在海绵层裂隙持续扩大前,采取针对性的调控措施,可能是预防柑橘裂果的关键。

3.3 GA₃对柑橘裂果和果皮细胞发育的影响

赤霉素是一种植物生长调节剂,可以影响植物生长发育分化的各个方面^[5]。GA₃处理增加了果皮角质层的厚度,从而降低了枣^[16]和樱桃^[21]的裂果率。邹清河等^[33]的研究发现,一定浓度的GA₃可改变红江橙的表皮细胞特征,表皮细胞变得小而紧密,下表皮细胞层数增多,细胞小而密集,表现出细胞分裂增多的迹象,由外到内逐渐过渡。角质层和表皮层结构上的差异也是不同甜樱桃品种易裂与否的重要因素,而GA₃的喷布对甜樱桃表皮细胞的大小有着重要的影响^[34-35],表皮细胞体积大小差异较大,当细胞失水而又复水后,会加剧细胞壁受到的膨胀压力,容易导致果皮开裂^[23]。但是GA₃使用不当不仅不会降低果实的裂果率^[36]甚至会加重裂果的发生^[18]。本文的结果表明,GA₃加强了表皮细胞的排列层次以及白皮层细胞间的连接,与对照相比,裂果率最多可减少54.53%,这可能与紧密的表皮细胞加强了果皮韧性,同时阻碍了果实表面水分被果肉快速吸收,减少了雨水诱导的裂果有关^[37]。而低浓度的GA₃处理对裂果的影响甚微,更高浓度的GA₃处

理,也没有进一步降低裂果的发生,可能是因为20 mg·kg⁻¹的重复使用加剧了夏季高温天气对果实表面的日灼伤害^[36]。此外,与叶正文等^[17]使用50 mg·kg⁻¹ GA₃防控脐橙裂果的研究相比,笔者的结果显著降低了赤霉酸的使用浓度(10 mg·kg⁻¹),同时有效地减少裂果,在实践中更具有参考价值。

3.4 GA₃对柑橘品质特性的影响

不同浓度GA₃处理对甘平果实的多个内外品质参数(果形指数、果皮厚度、可溶性固形物和柠檬酸含量)影响不显著,仅20 mg·kg⁻¹会显著提高果皮的硬度,这可能与GA₃的使用浓度低、时间早和果实采摘较晚有关。Yildirim等^[5]于樱桃采摘30~40 d前喷施不同浓度的GA₃可显著改变成熟期果实大小、硬度及裂果率等,并且延迟采摘3~4 d。在果实转色前的8—9月份喷布10 mg·L⁻¹ GA₃可延迟锦橙果实着色1~2个月,同时提高果实内部品质^[38]。谢花后的5—7月份使用50 mg·L⁻¹ GA₃不仅降低脐橙的裂果率、果实总糖和酸含量,同时改变了果皮厚度的均匀度,但是与果形指数没有明显的关系,且将喷药时期后移会导致果皮着色不均匀^[17]。而Cline等^[18]的研究结果则表明叶面喷雾10或40 mg·L⁻¹ GA₃不会影响果实总糖含量的积累。因此,通过探索针对不同品种及不同种植条件下GA₃的使用方式,对柑橘裂果的防控和GA₃的应用具有重要意义。值得注意的是,各GA₃处理的甘平果实果形指数均稍高于对照,这可能与GA₃促进了果实纵径的生长有关。相似的研究结论也被报道发生在甜樱桃^[5]和无核葡萄^[39]的果形调控上。另一方面,10 mg·kg⁻¹的GA₃使用不当(处理时间较迟),阻碍了果面红色素的形成,可能与外源赤霉素延缓柑橘果皮花青素的积累有关^[18,40],但延迟褪绿的现象不显著。总的来说,外源喷施赤霉酸具有改善果实品质的作用,但受限于使用浓度、时间及品种自身特性的影响,在实际应用中需要合理的掌握其使用方法。

4 结 论

柑橘果实裂果起始于果实膨大期的果皮海绵层细胞间隙的不断扩大,果皮的厚度在发育的进程中也在不断变薄,果形也在持续趋向扁圆形发展,遇到内部异常膨压的作用极易发生裂果现象。外源GA₃可在一定程度上缓冲胞间裂隙的发展,进而防控裂果的发生。但生产上使用GA₃,喷雾时间和浓度需

要合理的把握,在幼果期开始喷药,且在裂果发生前完成,喷药需注意时间间隔;此外,使用GA₃还需因地制宜,兼顾其他措施进行综合调控,如矿质养分的丰缺和环境湿度的均衡性等。

参考文献 References:

- [1] 郭文武,叶俊丽,邓秀新. 新中国果树科学研究70年:柑橘[J]. 果树学报,2019,36(10):1264-1272.
GUO Wenwu, YE Junli, DENG Xiuxin. Fruit scientific research in New China in the past 70 years: Citrus[J]. Journal of Fruit Science, 2019, 36(10): 1264-1272.
- [2] 李蕾. 脐橙果皮发育与裂果发生的解剖学研究[D]. 武汉:华中农业大学,2006.
LI Lei. An anatomical study of rind development and splitting occurrence in Navel orange[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2006.
- [3] 杜巍,李新岗,王长柱,高文海,王月清. 枣裂果机制研究[J]. 果树学报,2012,29(3):374-381.
DU Wei, LI Xingang, WANG Changzhu, GAO Wenhai, WANG Yueqing. Mechanism of fruit cracking in *Zizyphus jujuba*[J]. Journal of Fruit Science, 2012, 29(3): 374-381.
- [4] YILMAZ C, OZGUVEN A I. The effects of some plant nutrients, gibberellic acid and pinolene treatments on the yield, fruit quality and cracking in pomegranate[J]. Acta Horticulturae, 2009, 818: 205-212.
- [5] YILDIRIM A N, KOYUNCUSTAGE F. The effect of gibberellic acid applications on the cracking rate and fruit quality in the '0900 ziraat' sweet cherry cultivar[J]. African Journal of Biotechnology, 2010, 9(38): 6307-6311.
- [6] 阮晓,王强,周疆明,郑春霞. 香梨的果表突起和落果裂果与果实中内源激素之间的关系(简报)[J]. 植物生理学通讯, 2001, 37(3): 220-221.
RUAN Xiao, WANG Qiang, ZHOU Jiangming, ZHEN Chunxia. The Relationship between endogenous hormone of fragrant pear fruit and calyx-end tubercle, abscission of fruit and schizocarpic fruit[J]. Plant Physiology Communications, 2001, 37(3): 220-221.
- [7] CAROLINE G, JOL C, GILLES V, MICHEL G. Cuticular cracking on nectarine fruit surface: spatial distribution and development in relation to irrigation and thinning[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 2007, 132(5): 583-591.
- [8] HUANG X M, WANG H C, LU X J, YUAN, W Q, LU J M, LI J G. Cell wall modifications in the pericarp of litchi (*Litchi chinensis* Sonn.) cultivars that differ in their resistance to cracking[J]. Journal of Horticultural Science & Biotechnology, 2006, 81(2): 231-237.
- [9] 马小焕,彭良志,淳长品,凌丽俐,曹立,江才伦,解发,张雯雯,古祖亮. 脐橙果皮内裂发生的解剖结构和矿质营养元素变

- 化[J]. 园艺学报, 2011, 38(10): 1857-1864.
- MA Xiaohuan, PENG Liangzhi, CHUN Changpin, LING Lili, CAO Li, JIANG Cailun, XIE Fa, ZHANG Wenwen, GU Zuliang. Changes in albedo microstructures and macroelement content in peels of peel pitting 'Navel' oranges[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2011, 38(10): 1857-1864.
- [10] ALIVIELA V, ZARAGOZA S, PRIMO-MILLO E, AGUSTI M. Hormonal control of splitting in 'Nova' mandarin fruit[J]. *Journal of Horticultural Science*, 1994, 69(6): 969-973.
- [11] CLINE J, SEKSE L, MELAND M, WEBSTER A. Rain-induced fruit cracking of sweet cherries: I. Influence of cultivar and rootstock on fruit water absorption, cracking and quality[J]. *Acta Agriculturae Scandinavica*, 1995, 45(3): 213-223.
- [12] 李三玉, 陈苑虹, 吕均良, 林颖. 玉环柚果实内源激素含量与裂果关系的研究[J]. 科技通报, 1999, 15(3): 166-169.
- LI Sanyu, CHEN Yuanhong, LÜ Junliang, LIN Ying. Studies on the relationship between fruit hormones content and fruit cracking in Yuhuan Pomelo[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 1999, 15(3): 166-169.
- [13] MESJO C, REIG C, MARTINEZ F, GAMBETTA G, GRAVINA A, AGUSTI M. Tree water status influences fruit splitting in citrus[J]. *Scientia Horticulturae*, 2016, 209: 96-104.
- [14] MEASHAM P. Rain-induced fruit cracking in sweet cherry (*Prunus avium* L.) [M]. Tasmania: School of Agricultural Science, University of Tasmania, 2011: 170.
- [15] HUA Y B, SONG Y Q, LI J, TIAN C F, ZHOU X G, LI L L. A proposed systemic modeling software for jujube fruit cracking[J]. *American Journal of Plant Sciences*, 2015, 6(5): 565-573.
- [16] BURHAN O, ERDINC B, ERDAL A, ORHAN K, SEFA G. Cracking and quality attributes of jujube fruits as affected by covering and pre-harvest Parka and GA₃ treatments[J]. *Scientia Horticulturae*, 2018, 240: 65-71.
- [17] 叶正文, 叶兰香, 张学英. 朋娜等脐橙的裂果规律及赤霉素防裂效果[J]. 上海农业学报, 2002, 18(4): 53-58.
- YE Zhengwen, YE Lanxiang, ZHANG Xueying. The fruit cracking rules of navel orange varieties such as pengna and the effect of gibberellin (GA) preventing fruits from cracking[J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2002, 18(4): 53-58.
- [18] CLINE J A, TROUGHT M A. Effect of gibberellic acid on fruit cracking and quality of Bing and Sam sweet cherries[J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 2007, 87(3): 545-550.
- [19] 刘学鹏, 陵军成. 日光温室金手指葡萄裂果调查和致因分析[J]. 果树资源学报, 2020, 1(2): 11-14.
- LIU Xuepeng, LING Juncheng. Cause analysis and fruit cracking investigation of Golden finger grape in greenhouse[J]. *Journal of Fruit Resources*, 2020, 1(2): 11-14.
- [20] HOPPE F, HUYSKENS K S, ULRICHS C, HANRAHAN I. Assessment of susceptibility and prevention of cracking of 'Skeena' sweet cherry[J]. *Acta Horticulturae*, 2015(1099): 819-825.
- [21] SOFIA C, MARLENE S, SLAWA G, MAGDALENA G, MANUELA M, VALDEMAR C, ROB S, ANA P S, BERTA G. Effects of exogenous compound sprays on cherry cracking: skin properties and gene expression[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 202002-07. <https://doi.org/10.1002/js-fa.10318>
- [22] 邓秀新, 彭抒昂. 柑橘学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2012: 193-194.
- DENG Xiuxin, PENG Shu'ang. *Citrus Science*[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2012: 193-194.
- [23] 李娟, 陈杰忠, 万继锋, 黄永敬, 姚青. 朋娜和华盛顿脐橙果皮结构与裂果类型的关系[J]. 热带作物学报, 2011, 32(5): 921-925.
- LI Juan, CHEN Jiezhong, WAN Jifeng, HUANG Yongjing, YAO Qing. The correlation of cracking fruits types and peel structure between Washington and Bonanza navel oranges[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2011, 32(5): 921-925.
- [24] LI J, CHEN J Z. Citrus fruit-cracking: causes and occurrence[J]. *Horticultural Plant Journal*, 2017, 3(6): 41-46.
- [25] 李小林, 杨金海. 脐橙裂果原因及预防措施[J]. 广西园艺, 2000(3): 6-7.
- LI Xiaolin, YANG Jinhai. Causes and preventive measures of navel orange fruit cracking[J]. *Guangxi Horticulture*, 2000(3): 6-7.
- [26] 高飞飞, 黄辉白, 许建楷. 红江橙裂果原因探讨[J]. 华南农业大学学报, 1994, 15(1): 34-39.
- GAO Feifei, HUANG Huibai, XU Jiankai. Reasons for cracking of Hongjiang orange[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 1994, 15(1): 34-39.
- [27] 江东, 孙珍珠, 王婷, 王小柯, 刘小丰, 冉志林. 杂柑'甘平'在重庆北碚的引种表现及栽培技术[J]. 中国南方果树, 2017, 46(1): 32-33.
- JIANG Dong, SUN Zhenzhu, WANG Ting, WANG Xiaoke, LIU Xiaofeng, RAN Zhilin. Introduction performance and cultivation techniques of hybrid citrus 'Ganping' in Beibei, Chongqing[J]. *South China Fruits*, 2017, 46(1): 32-33.
- [28] 马小焕. 脐橙果皮内裂发生的解剖结构和矿质营养元素变化研究[D]. 重庆: 西南大学, 2011.
- MA Xiaohuan. Study on the changes of peel albedo microstructures and macroelement content in peels of 'Navel' oranges during the development of peel pitting[D]. Chongqing: Southwest University, 2011.
- [29] 陈杰忠, 叶自行, 周碧燕, 徐春香, 李娟. 柑橘果皮果胶及其酶活性对皱果皮形成的影响[J]. 园艺学报, 2005, 32(2): 202-206.
- CHEN Jiezhong, YE Zixing, ZHOU Biyan, XU Chunxiang, LI Juan. Effects of pectins and pectinesterase activity on creasing fruit formation in Orange (*Citrus sinensis* Osbeck)[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2005, 32(2): 202-206.
- [30] 温明霞, 吴韶辉, 王鹏, 石学根. 温州蜜柑裂果的形态结构特征研究[J]. 浙江农业科学, 2016, 57(7): 1096-1098.
- WEN Mingxia, WU Shaohui, WANG Peng, SHI Xuegen. Study on morphological and structural characteristics of cracked fruits

- of satsuma mandarin[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2016, 57(7): 1096-1098.
- [31] 王宁, 秦焯南. 锦橙裂果过程的扫描电镜观察[J]. 四川农业学报, 1987, 2(1): 39-42.
- WANG Ning, QIN Xuannan. Scanning electron microscope observation on the process of fruit cracking in Jincheng orange[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 1987, 2(1): 39-42.
- [32] CONSIDINE J, BROWN K. Physical aspects of fruit growth: theoretical analysis of distribution of surface growth forces in fruit in relation to cracking and splitting[J]. Plant Physiology, 1981, 68(2): 371-376.
- [33] 邹河清, 许建楷. 红江橙的果皮结构与裂果的关系研究[J]. 华南农业大学学报, 1995, 16(1): 90-96.
- ZOU Heqing, XU Jiankai. Study on the relationship between peel structure and fruit cracking of Hongjiang orange[J]. Journal of South China Agricultural University, 1995, 16(1): 90-96.
- [34] MUNIB U R, HASSAN R, NIYAZ A D, MOHMAD M M, UMAR I, MOHMAD R M, SIBHAT F, KHALID R H. Causes and prevention of cherry cracking: a review[J]. Springer International Publishing, 2015(19): 543-552.
- [35] ZHANG C, WHITING M. Pre-harvest foliar application of prohexadione-ca and gibberellins modify canopy source-sink relations and improve quality and shelf-life of 'Bing' sweet cherry[J]. Plant Growth Regulation, 2011, 65(1): 145-156.
- [36] SHARIF H, SEPAHI A. Effect of gibberellic acid on fruit cracking in meykosh pomegranate[J]. Tran Agricultural Research, 1984, 3(2): 149-155.
- [37] SEKSE L. Fruit cracking in sweet cherries (*Prunus avium* L.). Some physiological aspects: a mini review[J]. Scientia Horticulturae, 1995, 63(3/4): 135-141.
- [38] 淳长品, 彭良志, 曹立, 江才伦, 雷霆. 不同激素处理对锦橙果实留树贮藏的效应研究[J]. 西南农业大学学报(自然科学版), 2005, 27(5): 43-46.
- CHUN Changpin, PENG Liangzhi, CAO Li, JIANG Cailun, LEI Ting. Effects of different hormone treatment on "on-tree storage" of jinchen orange fruit[J]. Journal of Southwest University(Natural Science Edition), 2005, 27(5): 43-46.
- [39] 张钰. 无核葡萄无核 8611 大粒化处理的试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2004.
- ZHANG Yu. Experimental study on seedless grape- seedless 8611 large grain processing[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2004.
- [40] 王丽, 王曦焯, 王可可, 袁园园, 王林嵩. 外源赤霉素对心里美萝卜幼苗花青素的影响[J]. 中国生物化学与分子生物学报, 2016, 32(3): 326-331.
- WANG Li, WANG Xiye, WANG Keke, YUAN Yuanyuan, WANG Linsong. Effect of exogenous gibberellic acid on anthocyanidin in raphanus sativus seedlings[J]. Chinese Journal of Biochemistry and Molecular Biology, 2016, 32(3): 326-331.