

澳洲坚果桂热 1 号人工授粉有效性及花粉直感研究¹

潘浩男¹, 潘贞珍¹, 环秀菊¹, 覃潇敏¹, 郑树芳¹, 陆宇明², 康专苗³, 陶亮⁴, 王文林^{1*},
覃振师^{1*}

(¹广西南亚热带农业科学研究所, 广西崇左 532100; ²广西农业科学院园艺研究所, 广西南宁 530000; ³贵州省农业科学院亚热带作物研究所, 贵州贵阳 550025; ⁴云南省热带作物科学研究所, 云南景洪 666100)

摘要:【目的】旨在为广西澳洲坚果主栽品种桂热 1 号筛选出能够改善产量与果实品质的授粉品种以及为澳洲坚果人工授粉技术提供理论依据。【方法】以桂热 1 号澳洲坚果为母本, 用种植面积次之的 4 个不同澳洲坚果品种为父本, 进行人工授粉, 同时设置自交和开放授粉试验组, 比较不同授粉组合的坐果率、产量、果实形态和品质性状差异, 并采用主成分分析法进行综合评价。【结果】桂热 1 号澳洲坚果存在明显的自交不亲和现象。2022 年不同品种人工授粉 40 串的平均产量较自然授粉 (CK) 整株产量高出 229.6%, 其中用 HAES695 和 Own Choice 授粉的产量最高, 分别为 6.42 kg 和 6.12 kg。在果实外观形态方面, 不同品种授粉在果皮颜色、果顶乳头状突起、壳果腹缝线和壳果斑纹没有明显差异, 但在青皮果和壳果的纵、横径、单果质量以及青皮果果形指数, 均表现出花粉直感效应。在果实品质方面, 不同品种授粉在单个果仁质量、出仁率、粗蛋白、总糖、矿质 P、Fe、Ca 元素含量以及脂肪酸中的棕榈酸、棕榈油酸、十七碳烯酸、亚油酸含量等方面均表现出花粉直感效应, 且矿质 Fe 元素含量与单不饱和脂肪酸含量呈显著正相关且与多不饱和脂肪酸含量呈极显著正相关。通过主成分分析法综合评价结果显示, 695 授粉综合得分最高, 为 0.720。【结论】695 作桂热 1 号授粉树, 能够提高产量、且果仁品质较优, 适宜做广西桂热 1 号授粉品种。

关键词: 澳洲坚果; 人工授粉; 花粉直感; 果实品质; 综合评价

中图分类号: S664 文献标志码: A 文章编号: 1009-9980(2024)01-0001-08

Studies on the effectiveness of artificial pollination and pollen xenia in macadamia nut Guire No. 1

PAN Haonan¹, PAN Zhenzhen¹, HUAN Xiuju¹, QIN Xiaomin¹, ZHENG Shufang¹, LU Yuming², KANG Zhuanmiao³, TAO Liang⁴, WANG Wenlin^{1*}, QIN Zhenshi^{1*}

(¹South Subtropical Agricultural Science Research Institute of Guangxi, Chongzuo 532100, Guangxi, China; ²Horticultural Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530000, Guangxi, China; ³Institute of Subtropical Crops, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550025, Guizhou, China; ⁴Yunnan Institute of Tropical Crops, Jinghong 666100, Yunnan, China)

Abstract: 【Objective】 As the first new variety of macadamia nuts independently selected and bred in Guangxi, Guire No. 1 is themacadamia variety with the largest cultivation in Guangxi at present, accounting for about more than 65% of the planted area. However, it has been found in

收稿日期: 2024-08-06 接受日期: 2024-09-24

基金项目: 广西科技创新引导专项 (桂科 AC23026001); 广西农科院基本项目 (桂农科 2023YM21); 广西重点研发计划 (桂科 AB22035012)

作者简介: 潘浩男, 男, 硕士研究生, 研究方向为果树栽培营养与生理。E-mail: 18487337667@163.com

*通信作者 Author for correspondence. E-mail: 39431642@qq.com

some local orchards that when other varieties are planted in the vicinity of 'Guire No.1', the fruiting rate and yield are higher than those in areas where 'Guire No.1' is planted in a row. Through the survey, it was found that '695', O.C, 'JW' and A16 are four varieties that widely planted Guangxi with less area as comparing with 'Guire No.1'. Using these varieties as the pollen sources and 'Guire No.1' as the female parent, artificial pollination was conducted to determine which variety had the best effect on improving the yield and fruit quality of 'Guire No.1'. And self-pollination and open pollination were set as controls. **【 Methods 】** The 'Guire No.1' macadamia nut was used as the mother and 4 varieties with less planting area were used as pollen sources for hand pollination. In 2021, three plants (12 a) each of the mother and father were selected, and the experiment was set up with complete self-pollination as the control (CK) and six pollination groups, totaling seven treatments, with 10 bunches of inflorescences per plant in each of the treated mothers in the pollination groups, for a total of 30 bunches of inflorescences in the three trees. Fruit was harvested on September 3, 2021, and fruit set surveys were conducted using the final number of fruit set/initial number of flowers. In 2022, five plants (5 a) each of the mother and father were selected, and 40 bunches of inflorescences per plant were pollinated from each treatment mother in the pollination group, for a total of 200 bunches of inflorescences from the five trees. Flowers were taken after 24 h of pollination and counted for pollination efficiency = (number of flowers with pollen germinating at the stigma / total number of flowers examined by microscopy). The fruit was harvested on August 31, 2022, and the fruit setting situation was investigated using the number of fruits set per inflorescence. The fruit setting situation was recorded 14 days after pollination. Pollination group yield was the total mass of 40 bunches of fresh fruits per plant artificially pollinated by the mother plant, while 'Guire No.1' naturally pollinated (CK) was the yield of the whole tree. Fruit appearance traits and kernel quality were determined and comprehensively evaluated using principal component analysis. **【 Results 】** 'Guire No.1' macadamia nut has obvious self-incompatibility. In 2021, the fruiting rate of pollination with '695', 'JW' and 'A16' were 28.86%, 18.62% and 12.85%, and the fruiting rate of pollination with 'Guire No.1' was 11.39%, and heterogamous pollination could significantly improve the fruiting rate. The 2022 trial site experienced inverted spring weather and the overall orchard yield was reduced by about 1/3 from last year. However, the yield of 40 bunches of flowers of different varieties pollinated artificially in the experiment (about 300~400 bunches of macadamia inflorescences of the whole plant of 5-year-old 'Guire No.1') was not only significantly higher than the yield of the whole tree pollinated naturally, but also the yield of 40 bunches of flowers pollinated with '695' was up to 6.42 kg, which was comparable to the yield of 5-year-old 'Guire No.1' under conventional climatic conditions. In terms of fruit appearance, pollination of different varieties showed no significant difference in peel color, papillary process at the top of the fruit, suture at the belly of the shell and fruit, and markings on the shell, which all showed the biological characteristics of the female parent of 'Guire No.1', but showed pollen xenia Effect in the vertical, horizontal, single fruit weight and fruit shape index of green peel and

shell. In terms of fruit quality, pollination of different varieties showed pollen xenia effect in terms of single kernel weight, kernel setting rate, crude protein, total sugar, mineral P, Fe, Ca elements, and palmitic acid, palmitic acid, 10-heptacenoic acid, linoleic acid in fatty acids. Correlation analysis revealed that the mineral Fe element was significantly positively correlated with the monounsaturated fatty acid MUFA and highly significantly positively correlated with the polyunsaturated fatty acid PUFA, while on the contrary it was highly significantly negatively correlated with the saturated fatty acid SFA. The results of the comprehensive evaluation by principal component analysis showed that '695' pollination had the highest composite score of 0.720. **【 Conclusion 】** Artificial pollination can significantly increase the yield of 'Guire No.1' macadamia nuts, and at the same time, it can mitigate the adverse effects of special climate to a certain extent. The presence of xenia in 'Guire No.1' macadamia nuts in terms of fruit set, yield, longitudinal and transverse meridian and single fruit mass of green and shelled fruit, green fruit shape index, individual kernel mass, kernel yield, crude protein, total sugar, mineral P, Fe, and Ca elements, as well as palmitic acid, palmitoleic acid, 10-heptacenoic acid, and linoleic acid in fatty acid. Through the comprehensive evaluation of yield and fruit quality, it was concluded that 695 was the most suitable pollination variety for Guangxi 'Guire No.1'.

Key words : *Macadamia integrifolia*; Artificial pollination; Xenia; Nut quality; Comprehensive evaluation

澳洲坚果 (*Macadamia* spp.) 又称夏威夷果, 为山龙眼科 (Proteaceae) 澳洲坚果属 (*Macadamia* F. Muell) 多年生常绿乔木果树^[1]。广西从 20 世纪 70 年代开始澳洲坚果商业化种植, 截至 2023 年, 种植面积已超 5.3 万 hm^2 , 位居全国第二。桂热 1 号作为广西首个自主选育的澳洲坚果新品种, 具有早产早结、丰产稳产的特点, 是目前广西种植面积最大的澳洲坚果品种, 约占种植面积 65% 以上^[2-3]。然而, 当地有些果园发现, 桂热 1 号附近若种植其他品种时, 其挂果率、产量要高于连片种植桂热 1 号的区域。

植物的异花授粉对人类生存十分重要, 世界上 3/4 的主要粮食作物依靠异花授粉来获得最佳产量, 而且降低异花授粉水平也会降低粮食品质, 从而影响人体营养^[4-5]。花粉直感 (xenia) 广泛存在于高等植物中, 即不同基因型花粉直接影响胚或胚乳发育产生种子和果实表型特征差异的现象^[6]。大量研究结果证明, 在柚、猕猴桃、杨梅、梨、苹果等果树均存在花粉直感现象, 其不仅影响作物种子和果实的大小、形状、颜色等性状, 还对坐果率、果实品质、次生代谢物质及酶活性等产生影响^[7-11]。澳洲坚果营养丰富, 素来享有“干果皇后”的誉称^[12]。近年来, 利用花粉直感效应筛选授粉树等方面的研究均有报道, 通过异花授粉, 能提高坐果率、产量等^[13-14], 而前人关于产量的研究角度往往注重于坐果率, 缺乏对产量直观的探讨, 同时也并未对授粉后果实品质等指标进行综合评价。

人工授粉是一项促进科学研究以及解决农业生产问题的关键性技术, 为探究植物繁育特征、交配系统以及传粉互作等科学问题提供了一种行之有效的手段^[15]。而植物花器官在构

造上的差异对人工授粉的方法也有很大的影响，Urata^[6]研究发现，澳洲坚果花没有花瓣，开花前花萼、花药和柱头紧紧贴连在一块，且开花时自身的花粉就附着在柱头上不易被分离（刮风、下雨）。因此，澳洲坚果人工授粉方式及有效性也是研究花粉直感效应的基础条件。

笔者在本研究中以广西澳洲坚果主栽品种桂热 1 号为研究对象，利用种植面积次之的 4 个品种的花粉对桂热 1 号进行人工授粉试验。同时设置自交和开放授粉实验组。探究人工授粉有效性及花粉直感对果实品质的影响，并对主要性状指标进行综合评价，旨在筛选出能够改善产量与果实品质的授粉品种以及为提高澳洲坚果产业效益提供指导和理论依据。

1 材料和方法

1.1 供试材料

2021 年，试验设在广西南亚热带农业科学研究所种质资源圃进行，以桂热 1 号（简写 Guire No. 1）为母本，参试的授粉树品种为 HAES695（695）、桂热 1 号、HVA16（A16）、JW。参试品种均为园区长势相当、光照度一致的 12 年生果树，株行距 5 m×6 m，东西行向。

2022 年，试验设在广西南亚热带农业科学研究所科技示范园进行，以桂热 1 号为母本，参试的授粉树品种为 Own Choice（O.C）、HAES695（695）、HVA16（A16）和 JW。参试品种均为园区长势相当、光照度一致的 5 年生果树，株行距 5 m×6 m，东西行向。

试验区均配备水肥一体化设施，进行统一化常规管理。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计

2021 年，试验按完全随机设计，参试树母本和父本各选 3 株，为减低昆虫影响，整株树用 80 目防虫网罩住，试验设完全自花授粉为对照组（CK）和 6 个授粉组，共 7 个试验组。在树体四个方位分别选择试验花序，每个试验组母本每株授粉 10 串花序，3 株树共计 30 串花序。授粉时间：母本进入盛花期，晴朗无风天的上午 9：00—11：30，将收集来的其他品种花粉用毛笔刷上去，授粉 14 d 后拆除防虫网。详情授粉组合见表 1。

2022 年，试验按完全随机设计，参试树母本和父本各选 5 株，降低昆虫影响方法同上，为降低母本花序间花粉影响，每串花序授粉后再套一个 300 目网袋。试验设自然授粉为对照组（CK）和 5 个授粉组，共 6 个试验组。在树体四个方位分别选择试验花序，每个授粉组母本每株授粉 40 串花序，5 株树共计 200 串花序。授粉时间：母本进入盛花期，晴朗无风天的上午 9：00—11：30，先用毛笔扫干净附着在花柱上的原花粉（注：毛笔均一次性不重复），再将收集来的其他品种花粉用毛笔刷上去（注：同株同花序不进行处理），授粉 14 d 后拆除网袋、防虫网。详情授粉组合见表 1。

表 1 桂热 1 号杂交授粉组合

Table 1 Pollination combinations of Guire No. 1

授粉组合

Pollination combinations	
2021 年 In 2021	2022 年 In 2022
母本同株同花序 Mother plant same plant same inflorescence	Guire No. 1 ♀ × 695 ♂
母本同株不同花序 Mother plant Same plant but different inflorescence	Guire No. 1 ♀ × A16 ♂
Guire No. 1 ♀ × Guire No. 1 ♂	Guire No. 1 ♀ × JW ♂
Guire No. 1 ♀ × 695 ♂	Guire No. 1 ♀ × O.C ♂
Guire No. 1 ♀ × A16 ♂	母本同株同花序 Mother plant Same plant and inflorescence
Guire No. 1 ♀ × JW ♂	Guire No. 1 自然授粉 (CK)
Guire No. 1 完全自花授粉 (CK)	Guire No. 1 Natural pollination (CK)
Guire No. 1 Complete self pollination (CK)	

1.2.2 坐果情况与产量

2021 年 9 月 3 日收果，坐果情况调查采用最终坐果数/初始花朵数来统计；2022 年 8 月 31 日收果，坐果情况调查采用每串花序坐果个数来统计，统计授粉后 14 d 坐果情况，授粉组产量为母本每株人工授粉 40 串青皮果总质量，而 Guire No. 1 自然授粉 (CK) 为整株树产量。

1.2.3 授粉花柱中花粉管生长荧光显微镜观察

试验为 2022 年开展，取授粉 24 h 后的花朵，每个处理随机选 30 朵小花，去除萼片、雄蕊，将带花托的花柱放在 FAA 固定液 (40% 甲醛 : 冰醋酸 : 70% 乙醇 = 5 : 5 : 90) 中固定，4 °C 保存待用。将固定的带花托花柱从基部切下后经 70% 乙醇、50% 乙醇、蒸馏水各 20 min 后，用 4 mol·L⁻¹ 的 NaOH 软化 1 h，蒸馏水冲洗 2 遍后放入事先配制好的过夜脱色苯胺蓝溶液 (0.1% 苯胺蓝 + 2.6% 磷酸氢二钠) 中，染色 4 h 以上，然后整体压片，在荧光显微镜 (Leica QM2500, Germany) 波长 408 nm 的激发光诱导下观察，统计授粉有效率/% = (花粉在柱头萌发的花朵数/镜检总花朵数) × 100。

1.2.4 果实外观性状测定

2022 年 8 月 31 日收果，每个授粉组合随机取 50 个果，采用 UPOV、贺熙勇等^[13]的方法，测定青皮果和壳果单果质量和纵、横径以及纵横径之比的果形指数。

1.2.5 果仁品质测定

以果实外观性状测定的样本，出仁率和一级果仁率，参考贺熙勇等^[13]的方法测定；采用酸水解苯酚-硫酸比色法测定总糖含量；采用索氏抽提法测定粗脂肪含量；采用硫酸-催化剂消解，凯氏定氮法测定粗蛋白含量；采用硝酸消解，ICP-MS/OES 测定各元素含量；以 GB 5009.168—2016 法中外标法-水解法提取样品中脂肪酸，以 TraceGC Ultra 气相色谱仪测定样品中脂肪酸组分。对澳洲坚果果仁中脂肪酸进行营养评价，将脂肪酸分为饱和脂肪酸 (SFA)、单不饱和脂肪酸 (MUFA)、多不饱和脂肪酸 (PUFA) ^[17]。

1.3 数据分析

数据统计分析和图标制作采用 Microsoft Excel 2022、SPSS 27.0 和 ChiPlot 软件完成。各性状采用单因素完全随机试验进行方差分析，多重比较采用 Duncan 新复极差法。对各授粉组合果实品质进行主成分分析，首先对各项指标进行标准化处理，根据主成分分析降维思想，采用最大方差法计算出主成分旋转载荷矩阵，根据旋转载荷矩阵计算各主成分因子得分 F_i ，结合方差贡献率计算各授粉组合的综合得分^[11]。

2 结果与分析

2.1 不同授粉品种对桂热 1 号坐果率和产量的影响

由表 2 可以看出，2021 年不同授粉组合对桂热 1 号的坐果率有显著的影响。从完全自花授粉和同株同花序授粉坐果率为 0 可以看出，桂热 1 号存在明显的自交不育现象。用 695 授粉的坐果率最高，为 28.86%，其次是用 JW 授粉的坐果率，为 18.62%，用桂热 1 号与 A16 授粉的坐果率之间没有显著差异，分别为 11.39%和 12.85%。从坐果率角度看，695 可作为桂热 1 号授粉树。由图 1 可知，2022 年所有的人工授粉品种产量（40 串），都要比自然授粉的整株产量要高，平均产量高出 229.6%，其中用 695 和 O.C 授粉的产量最高，分别 6.12 kg 和 6.42 kg。但是，从授粉 14 d 后平均坐果数来看，用 JW 和 O.C 授粉坐果效果最好，分别 21.1 粒/串和 20.1 粒/串，用 A16 授粉坐果效果最差，10.3 粒/串。从产量角度看，695 和 O.C 可作为桂热 1 号授粉树。

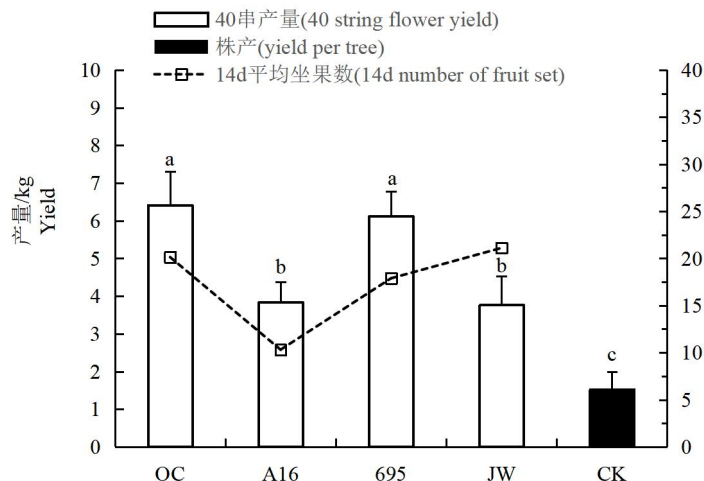
表 2 2021 年授粉品种对桂热 1 号坐果率的影响

Table 2 Effect of pollinated varieties on fruit setting rate of Guire No. 1 in 2021

授粉组合 Pollination combination	3月7日授粉花朵数 Number of pollinated flowers in March 7th			9月3日挂果数 Number of fruits in Sep. 3rd			坐果率 Fruiting rate /%
	最大值 Max	最小值 Min	平均值 Average	最大值 Max	最小值 Min	平均值 Average	
	母本同株同花序 Mother plant Same plant and inflorescence	179	138	158	0	0	
母本同株不同花序 Mother plant Same plant but different inflorescence	195	122	154	2	0	0.20	1.29 d
Guire No. 1 ♀ × Guire No. 1 ♂	265	105	158	6	0	1.80	11.39 c
Guire No. 1 ♀ × 695 ♂	213	105	150	7	0	4.33	28.86 a
Guire No. 1 ♀ × A16 ♂	256	103	140	8	0	1.80	12.85 c
Guire No. 1 ♀ × JW ♂	210	58	116	4	0	1.00	18.62 b
完全自花授粉 (CK) Complete self pollination(CK)	262	146	204	0	0	0.00	0.00

注：同列不同小写字母表示差异显著， $p < 0.05$ 。下同。

Note: Different small letters in the same column indicate significant differences, $p < 0.05$. The same as below.



200 串母本同株同花序授粉坐果个数总计 9 个不进行统计。

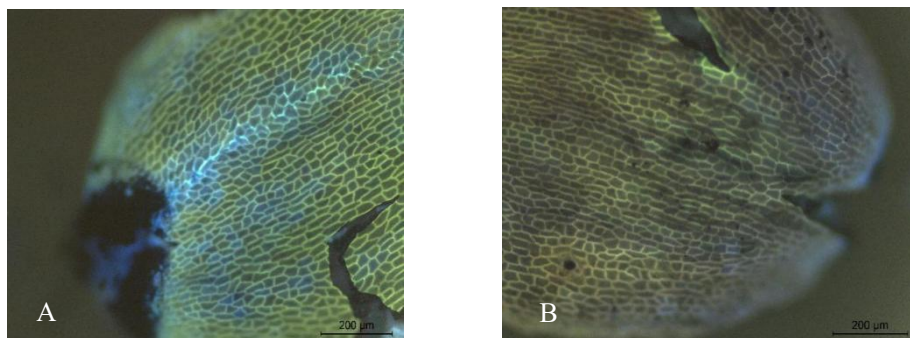
200 bunches of females with the same plant and inflorescence pollination number of fruits sitting in a total of 9 not to be counted.

图 1 2022 年授粉品种对桂热 1 号产量及坐果情况的影响

Fig. 1 Effects of pollen sources on the yield and fruit setting of Guire No.1 in 2022

2.2 不同授粉品种对授粉有效性的影响

由表 2 可知，在相同授粉方式和条件下，不同授粉品种授粉有效率存在差异，在荧光显微镜下观察，花粉萌发的花粉管呈蓝色荧光（图 2）。用 JW 授粉，有效授粉率最高，为 70%，用 A16 授粉，有效授粉率最低，为 40%（表 3）。这个结果或许也是影响 14 d 后平均坐果数的原因。



A. 花粉管萌发；B. 花粉管未萌发。

A. Pollen tube germination; B. Pollen tube not germination.

图 2 桂热 1 号柱头花粉管萌发情况

Fig. 2 Germination pollen tube in the stigma of Guire No. 1

表 3 不同授粉品种授粉有效率

Table 3 Pollination efficiency of different pollen sources

授粉品种	花粉萌发花朵数	总花朵数	授粉有效率
Pollination cultivar	Number of pollen sprouting flowers	Total number of flowers	Pollination efficiency/%

O.C	19	30	63.3
A16	12	30	40.0
695	20	30	66.7
JW	21	30	70.0

2.3 不同授粉品种对桂热 1 号果实外观性状的影响

不同品种授粉，在果皮颜色、果顶乳头状突起、壳果腹缝线和壳果斑纹没有明显差异，均表现桂热 1 号母本的生物性状。对青皮果和壳果的单果质量和纵、横径进行方差分析，结果见表 4。由表 4 可见，用 A16 授粉的青皮果和壳果单果质量最大，平均为 21.97 g 和 11.23 g，与 O.C 和 JW 有显著差异，与 695 无显著差异。用 A16、O.C、695 授粉的青皮果纵径和壳果纵、横径无显著差异，但均显著大于用 JW 授粉的青皮果纵径和壳果纵、横径。JW 授粉的青皮果果形指数最大，与 A16 和 695 有显著差异，但壳果果形指数，不同授粉品种间无显著差异。数据说明：不同品种授粉，在青皮果和壳果的单果质量，纵、横径上以及青皮果果形指数上存在花粉直感效应。

表 4 授粉品种对桂热 1 号果实形态特征的影响

Table 4 Effects of pollen sources on the morphological characteristics of Guire No. 1 Fruit

授粉品种 Pollination cultivar	果皮颜色 Pericarp color	果顶乳头状突起 Size of apical point	壳果腹缝线 Shell belly suture	壳果斑纹 Shell fruit stripes
O.C	绿色	不明显	明显	少，较分散
A16	绿色	不明显	明显	少，较分散
695	绿色	不明显	明显	少，较分散
JW	绿色	不明显	明显	少，较分散

授粉品种 Pollination cultivar	青皮果Fresh fruits				壳果Shell fruit			
	单果质量 Single fruit quality/g	纵径 Longitudinal diameter/mm	横径 Transverse diameter/mm	果形指数 Fruit shape index	单果质量 Single fruit quality/g	纵径 Longitudinal diameter/mm	横径 Transverse diameter/mm	果形指数 Fruit shape index
O.C	18.22±1.63 bc	35.7±1.68 a	31.49±1.22 b	1.13 ab	10.04±1.08 ab	25.03±1.31 a	25.67±1.24 a	0.98 a
A16	21.97±3.17 a	36.43±2.25 a	32.56±1.74 a	1.12 b	11.23±1.69 a	25.31±1.51 a	25.93±1.62 a	0.98 a
695	20.35±2.42 ab	35.62±1.70 a	32.43±1.75 a	1.10 b	10.56±1.41 a	25.39±0.90 a	26.10±1.11 a	0.97 a
JW	16.64±2.00 c	34.10±1.30 b	29.91±1.02 c	1.14 a	9.07±1.18 b	23.33±1.17 b	24.10±1.15 b	0.97 a

2.4 不同授粉品种对桂热 1 号果仁品质的影响

2.4.1 对果仁质量、出仁率及一级果仁率的影响

由表 5 可知，不同授粉处理间，对一级果仁率无显著影响，而对出仁率和单个果仁质量存在显著差异。用 O.C 和 695 授粉的出仁率平均为 33.87%，高于用 JW 授粉的出仁率约 4.10%，存在显著差异。从单个果仁质量来看，用 O.C、695、A16 授粉单果仁质量间无显著差异，平均果仁质量为 2.82 g，用 JW 授粉单个果仁质量为 2.08 g，显著低于其他授粉组。

表 5 授粉品种对桂热 1 号果仁品质的影响

Table 5 Effects of pollinated varieties on the quality of kernels of Guire No. 1

授粉品种 Pollination cultivar	单个果仁质量 Single kernel mass/g	出仁率 Kernel rate/%	一级果仁率 First-grade kernel rate/%
O.C	2.83 a	34.22 a	100
A16	2.79 a	31.37 bc	100
695	2.84 a	33.51 ab	100
JW	2.08 b	29.77 c	100

2.4.2 对粗脂肪、总糖、粗蛋白及矿质元素的影响

方差分析结果表明,粗脂肪、钾元素、镁元素的含量在各授粉品种间无显著性差异,在总糖、粗蛋白、磷元素、铁元素和钙元素的含量在各授粉品种间有显著性差异(表 6)。用 695 和 JW 授粉的粗蛋白含量平均为 9.29%,比用 O.C 和 A16 授粉的粗蛋白含量平均为 8.58%,高出 0.71%;用 O.C 和 A16 授粉的总糖含量平均为 157.46 mg·g⁻¹,比用 695 和 JW 授粉的总糖含量平均为 130.95 mg·g⁻¹,高出 20.24%;用 695 和 JW 授粉的磷元素含量平均值为 1 825.92 mg·kg⁻¹,比用 O.C 和 A16 授粉的磷元素含量平均值为 1 522.12 mg·kg⁻¹,高出 19.96%;用 695 和 JW 授粉的钙元素含量平均值为 544.19 mg·kg⁻¹,比用 O.C 和 A16 授粉的钙元素含量平均值为 375.08 mg·kg⁻¹,高出 45.09%。用 A16 授粉的铁元素含量最低,为 13.08 mg·kg⁻¹,由此可知,在粗蛋白、总糖、矿质 P 元素、矿质 Fe 元素和矿质 Ca 元素有明显的花粉直感效应,这与贺熙勇等人的研究结果有所差异。

表 6 授粉品种对桂热 1 号果仁粗脂肪、粗蛋白及矿质元素等含量的影响

Table 6 Effects of pollen sources on the content of crude fat, crude protein, and mineral elements in kernels of Guire No. 1

授粉品种 Pollination cultivar	粗脂肪 Crude fat/%	粗蛋白 Crude protein/%	总糖 Total sugar/ (mg·g ⁻¹)	钾K / (mg·kg ⁻¹)	磷P / (mg·kg ⁻¹)	镁Mg / (mg·kg ⁻¹)	铁Fe / (mg·kg ⁻¹)	钙Ca / (mg·kg ⁻¹)
O.C	72.39±2.43 a	8.5±0.06 b	163.41±4.74 a	3 179.41±199.24 a	1 447.59±75.40 b	996.65±27.17 a	20.06±1.79 b	382.77±5.81 b
A16	70.89±2.92 a	8.65±0.10 b	151.51±12.46 a	3 023.73±102.57 a	1 596.64±118.14 b	1 026.49±55.86 a	13.08±2.45 c	367.39±38.94 b
695	73.16±1.11 a	9.31±0.04 a	125.32±4.07 b	3 289.67±173.20 a	1 788.93±66.29 a	1 010.92±43.65 a	24.17±1.41 a	555.69±37.98 a
JW	72.84±0.44 a	9.26±0.10 a	136.58±5.98 b	3 079.23±95.27 a	1 862.91±106.52 a	1 065.54±84.01 a	22.28±1.36 ab	532.69±35.27 a

2.4.3 对果仁脂肪酸含量的影响

由表 7 可知,4 组澳洲坚果授粉处理中检测出 11 种脂肪酸,其中 5 种 SFA、3 种 MUFA、和 3 种 PUFA,脂肪酸中 MUFA 含量最高,平均占比 71.03%,而油酸又是 MUFA 中占比最高,平均占比 68.80%。从脂肪酸组成结构可以看出,澳洲坚果果仁含有丰富不饱和脂肪酸

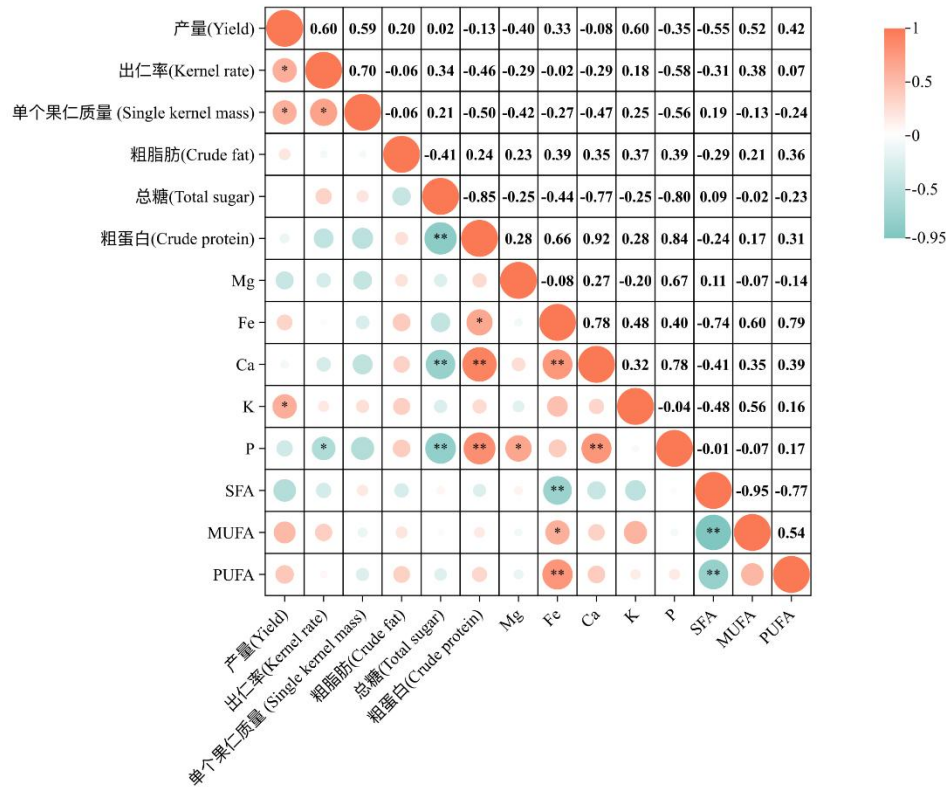
平均占比 82.32%，食用对人体健康有一定促进作用。棕榈酸、棕榈油酸、十七碳烯酸和亚油酸的含量在不同品种间有显著差异 ($p < 0.05$)，其他脂肪酸含量无显著差异。用 A16 授粉的果仁中棕榈酸含量为 13.49%，显著高于其他 3 个品种，其他 3 个授粉品种间棕榈酸无显著差异，平均含量为 8.97%。用 695、JW 和 O.C 授粉的果仁中棕榈油酸和亚油酸含量间无显著差异，平均含量分别为 18.08%和 7.04%，用 A16 授粉的果仁中棕榈油酸和亚油酸含量分别为 15.71%和 5.59%，均显著低于其他 3 个授粉品种。十七碳烯酸的含量用 O.C 授粉的果仁中含量最高，为 6.03%，用 A16 授粉的果仁中含量最低，为 3.57%。由此可见，脂肪酸含量方面不同授粉品种间也存在一定的花粉直感效应。

表 7 授粉品种对桂热 1 号果仁脂肪酸含量的影响

Table 7 Effects of pollination varieties on the fatty acid content of Guire No. 1 nut								/%
授粉品种 Pollination cultivar	月桂酸 Lauric acid C12:0	肉豆蔻酸 Myristic acid C14:0	棕榈酸 Palmitic acid C16:0	棕榈油酸 palmitoleic acid C16:1	十七碳烯酸 10-Heptacenoic acid C17:1	油酸 Oleic acid C18:1	亚油酸 Linoleic acid C18:2	
O.C	0.11 a	2.44 a	8.34 b	18.15 a	6.03 a	48.29 a	7.08 a	
A16	0.11 a	2.53 a	13.49 a	15.71 b	3.57 c	49.48 a	5.59 b	
695	0.11 a	2.48 a	9.41 b	18.02 a	4.79 b	48.65 a	6.93 a	
JW	0.12 a	2.60 a	9.17 b	18.06 a	4.29 bc	49.08 a	7.11 a	
授粉品种 Pollination cultivar	花生酸 Arachidic acid C20:0	亚麻酸 Linolenic acid C18:3	山嵛酸 Behenic acid C22:0	二十碳三烯酸 Eicosatrienoic acid C20:3	饱和脂肪酸 Saturated fatty acids (SFA)	单不饱和脂肪 酸 Monounsaturate d fatty acids (MUFA)	多不饱和脂肪 酸 Polyunsaturate d fatty acids (PUFA)	
O.C	4.77 a	3.20 a	0.17 a	1.42 a	15.83 b	72.47 a	11.70 a	
A16	4.75 a	3.13 a	0.17 a	1.47 a	21.06 a	68.76 b	10.19 b	
695	4.85 a	3.22 a	0.16 a	1.38 a	17.01b	71.46 a	11.53 a	
JW	4.78 a	3.15 a	0.17 a	1.48 a	16.83b	71.43 a	11.74 a	

2.5 不同授粉品种果实品质指标相关性分析

由图 3 可看出，不同品种授粉果实的产量与出仁率、单个果仁质量和矿质 K 元素呈显著正相关；出仁率与单个果仁质量呈显著正相关，与矿质 P 元素呈显著负相关；总糖含量与粗蛋白和矿质 P、Ca 元素呈极显著负相关；粗蛋白与矿质 P、Ca 元素呈极显著正相关，与矿质 Fe 元素呈显著正相关；矿质 Mg 元素与矿质 P 元素呈显著正相关；矿质 Fe 元素与多不饱和脂肪酸 PUFA 呈极显著正相关和单不饱和脂肪酸 MUFA 呈显著正相关，与饱和脂肪酸 SFA 呈极显著负相关；矿质 Ca 元素与矿质 P、Fe 元素呈极显著正相关；饱和脂肪酸 SFA 与单不饱和脂肪酸 MUFA 和多不饱和脂肪酸 PUFA 呈极显著负相关。



**表示在 0.01 水平上极显著相关；*表示在 0.05 水平上显著相关。

** indicates a highly significant correlation at the $p < 0.01$ level; * Significant correlation at the $p < 0.05$ level.

图 3 不同授粉组合果实产量与品质指标间的相关性

Fig. 3 The correlation between fruit yield and quality indicators of different pollination combinations

2.6 不同授粉品种对桂热 1 号果实综合评价

为进一步明确不同品种授粉对桂热 1 号澳洲坚果产量和果实品质的影响,对授粉后产量及果实品质 14 项指标进行主成分分析。各项指标数据进行标准化处理,根据 PCA 降维的思想,将指标划分为若干主成分。选择特征值大于 1,各因子载荷绝对值大于 0.7 作为解释变量,14 项指标共提取出 3 个主成分,结果如表 8 所示。第 1 主成分贡献率为 28.301%,其中粗蛋白(0.851)、矿物质 Ca 元素(0.804)和矿物质 P 元素(0.815)为 PC1 中正向特征值较高的指标,总糖(-0.924)为 PC1 中负向特征值较高的指标。第 2 主成分贡献率为 26.302%,主要正向特征值指标为矿物质 Fe 元素(0.770)、MUFA(0.875)和 PUFA(0.831),负向特征值指标为 SFA(-0.962),可将 PC2 概括为脂肪酸及矿物质 Fe 元素指标。第 3 主成分贡献率为 22.712%,正向特征值指标为产量(0.826)、出仁率(0.717)和单个果仁质量(0.883)。根据各主成分对应的方差贡献率为权重,对 3 个主成分得分和相应权重进行线性加权求和,构建果实品质综合评价函数 $F = (28.301 \times F_1 + 26.302 \times F_2 + 22.712 \times F_3) / 77.315$,分别计算出 4 个授粉品种综合评价得分,由表 9 可知,用 695 授粉得分最高,更适合做桂热 1 号授粉树。

表 8 不同授粉组合果实综合品质主成分旋转载荷矩阵和方差贡献率

Table 8 Principal component rotation load matrix and variance contribution rate of comprehensive quality of fruits from different pollination combinations

品质指标 Quality index	主成分 Principal component		
	PC1	PC2	PC3
产量 Yield	0.039	0.407	0.826
出仁率 Kernel rate	-0.333	0.192	0.717
单个果仁质量 Single kernel mass	-0.160	-0.338	0.883
粗脂肪 Crude fat	0.568	0.191	0.169
总糖 Total sugar	-0.924	-0.008	0.091
粗蛋白 Crude protein	0.851	0.248	-0.320
Mg	0.331	-0.140	-0.509
Fe	0.523	0.770	0.034
Ca	0.804	0.405	-0.255
K	0.437	0.333	0.609
P	0.815	0.010	-0.528
SFA	-0.097	-0.962	-0.181
MUFA	0.048	0.875	0.239
PUFA	0.167	0.831	-0.010
特征值 Eigenvalues	5.343	4.037	1.444
方差贡献率 Variance contribution/%	28.301	26.302	22.712
累积方差贡献率 Cumulative contribution rate/%	28.301	54.603	77.315

表 9 不同授粉组合主成分因子得分及果实品质综合得分

Table 9 Principal component factor scores and comprehensive fruit quality scores for different pollination combinations

授粉品种 Pollination cultivar	因子得分 Factor score			综合得分 Comprehensive score, <i>F</i>	排名 Rank
	<i>F</i> ₁	<i>F</i> ₂	<i>F</i> ₃		
O.C	-1.080	0.809	0.762	0.104	2
A16	-0.520	-1.534	-0.147	-0.755	4
695	1.239	0.105	0.785	0.720	1
JW	0.360	0.620	-1.400	-0.068	3

3 讨论

Urata^[16]早在 1954 年的授粉试验中就发现澳洲坚果并不是完全自交不亲和的植物，依然存在部分自交亲和的现象，因此在研究澳洲坚果花粉直感效应时也应考虑黏在自身柱头上花粉的影响。笔者曾尝试进行开花前去雄，而相较于其他物种，澳洲坚果花朵小且在花序上排列紧密^[18]，其去雄步骤繁琐、难度大，需要耗费大量时间、精力。根据两年的试验结果，桂热 1 号澳洲坚果在同株同花序授粉下表现出了明显的自交不亲和现象，因此本试验虽未做去雄处理，但是得到的果实仍然可以视为是杂交授粉的坐果，满足研究需求。

笔者在本研究中发现异花授粉能够显著提高澳洲坚果坐果率，这与前人研究结果一致

[19-20], 而人工授粉有效性的差异一方面可能是由人工授粉操作产生, 另一方面也可能与品种间杂交亲和性有关, 即花粉虽落在花柱上但并不会萌发^[21]。根据 2022 年授粉 14 d 坐果情况和产量发现, 初始坐果数量和最终产量有一定关联, 其中用 O.C、A16、695 授粉的初始坐果数量高低也决定了最终产量的高低, 但出乎意料的是用 JW 授粉的初始坐果数量在本次试验最高, 但是产量却很低。这一结果也让笔者注意到, 提高初始坐果率虽然是提高产量的重要关注点, 但是不同花粉源造成果实后期生理落果不同的原因也值得笔者注意。生理落果往往伴随内源激素的改变。曾辉^[22]研究发现, 高产品种南亚 2 号澳洲坚果相较于低产品种 B3/74 落果率低可能是因为果实内含有较高的 IAA、GA₃ 和 ZR 含量及较低的 ABA 含量。李穆等^[23]也在最近的研究中发现, 桂热 1 号早期落果果柄中相较于正常果柄中有较低浓度 IAA 和高浓度 ABA。以上试验结果都证明激素对落果有着举足轻重的影响。花粉本就是花粉直感的源头, 不同基因型花粉的遗传信息通过转移和表达引起种子内激素或类似于激素的可溶性物质发生改变, 随后扩散到母本植物的组织中并对这些组织产生特定的影响, 而这些特定的影响取决于父本(花粉)^[24-25]。因此, 不同品种花粉如何影响种子内激素的变化值得笔者进一步去研究。在本研究中, 2022 年试验地发生倒春寒气候, 由于花期授粉昆虫减少, 果园整体产量较去年减产约 1/3。然而试验中不同品种人工授粉 40 串花的产量(5 年生桂热 1 号整株澳洲坚果花序约 300~400 串)不仅显著高于自然授粉的整株树产量, 且用 695 授粉 40 串产量可达 6.42 kg, 与常规气候条件下 5 年生桂热 1 号产量相当。目前, 也有很多研究证实如蓝莓、椰枣等作物上运用人工授粉能带来较高的产量和经济效益^[26-27], 由此可见, 澳洲坚果人工授粉的生产潜力和避免不利自然因素影响的能力, 值得笔者去挖掘利用。

澳洲坚果花粉直感对果实品质方面影响的研究报道仍较少, 本试验中不同品种的花粉对桂热 1 号果实影响表现于多个方面: 坐果率、产量、青皮果和壳果的纵、横经和单果质量、青皮果果形指数、单个果仁质量、出仁率、粗蛋白、总糖、矿质 P、Fe、Ca 元素含量以及脂肪酸中的棕榈酸、棕榈油酸、十七碳烯酸、亚油酸含量等方面, 有显著的花粉直感效应。与贺熙勇等^[13]的研究结果有所差异, 其主要差异在于粗蛋白、矿质 P、Fe、Ca 元素含量以及棕榈酸、棕榈油酸、十七碳烯酸含量等方面他们的结果并没有表现出花粉直感效应, 而在油酸含量方面本试验结果没有表现出明显的花粉直感效应。澳洲坚果作为木本油料树种之一, 果仁含油量可高达 70%~80%, 其丰富的单/多不饱和脂肪酸能防治动脉硬化、降低胆固醇、调节肥胖, 对人体的健康有积极的作用, 因此脂肪酸的组成结构也是衡量品种搭配的重要指标^[28-30]。笔者在本研究中发现, 不同授粉品种对脂肪酸组成结构有显著影响, 用 A16 授粉的果仁饱和脂肪酸比其他 3 个品种占比要高, 与之对应的不饱和脂肪酸比其他 3 个品种占比要低, 且通过品质指标间相关性分析发现, 矿质 Fe 元素与单不饱和脂肪酸 MUFA 呈显著正相关且与多不饱和脂肪酸 PUFA 呈极显著正相关, 相反的与饱和脂肪酸 SFA 呈极显著负相关。笔者由此推测, 或许是花粉直感效应引起了一些与矿质 Fe 元素有关的物质的差异, 从而影响果仁中脂肪酸的积累及转化。有研究表明, 缺铁条件下三角褐指藻诱变株中饱和脂肪

酸发生累积,且在一定范围内,随着铁浓度的增加可以促进饱和脂肪酸向不饱和脂肪酸的转化,其原因是脂肪酸双键的形成是由去饱和酶催化完成的,而 Fe^{2+} 与3个保守的组氨酸簇形成了脂肪酸去饱和酶的活性中心^[31-32]。因此,澳洲坚果花粉直感效应可能是改变了果实对矿质Fe元素的吸收效率,从而影响澳洲坚果去饱和酶的活性,进而影响澳洲坚果脂肪酸的组成,然而,这一推测仍需进一步验证。

笔者在本研究中利用主成分分析法从14项品质指标中提取了3个主成分,累积贡献率达到77.315%,涵盖大部分品质信息。根据主成分得分和载荷值,发现第1主成分正向增长有利于提高粗蛋白、矿质Ca、P元素的含量,第2主成分正向增长有利于提高单不饱和脂肪酸MUFA、多不饱和脂肪酸FUFA、矿质Fe元素的含量,第3主成分正向增长有利于提高产量、出仁率、单个果仁质量。根据果实综合评价函数得分结果为 $695 > O.C > JW > A16$,因此,用695作桂热1号授粉树,能够提高产量、且果仁品质较优,适宜做广西桂热1号授粉品种。

4 结论

人工异花授粉能显著提高桂热1号澳洲坚果的产量,同时一定程度上能缓解特殊气候带来的不利影响。通过广西种植面积次之的4个品种对桂热1号进行授粉后产量和果实品质综合评价得出,695最适宜做广西桂热1号授粉品种。

参考文献 References:

- [1] SHABALALA M, TOUCHER M, CLULOW A. The *Macadamia* bloom—what are the hydrological implications?[J]. *Scientia Horticulturae*, 2022, 292: 110628.
- [2] 黄锦媛. 桂热1号等澳洲坚果的品种特性及其栽培技术[J]. *中国南方果树*, 2014, 43(3): 134.
HUANG Jinyuan. Variety characteristics and Cultivation Techniques of macadamia nuts such as Guire No. 1[J]. *South China Fruits*, 2014, 43(3): 134.
- [3] 王文林, 谭秋锦, 陈海生. 广西澳洲坚果产业现状·优势与发展对策[J]. *安徽农业科学*, 2018, 46(35): 199-201.
WANG Wenlin, TAN Qiujin, CHEN Haisheng. Industry status, advantages and development countermeasures of Guangxi *Macadamia* Nut[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2018, 46(35): 199-201.
- [4] KLATT B K, HOLZSCHUH A, WESTPHAL C, CLOUGH Y, SMIT I, PAWELZIK E, TSCHARNTKE T. Bee pollination improves crop quality, shelf life and commercial value[J]. *Proceedings of the Royal Society B*, 2013, 281(1775): 20132440.
- [5] ELLIS A M, MYERS S S, RICKETTS T H. Do pollinators contribute to nutritional health?[J]. *PLoS One*, 2015, 10(1): e114805.
- [6] 杨琴, 刘雅兰, 张婷婷, 彭舒, 田鑫. 果树花粉直感效应形成机理研究进展[J]. *经济林研究*, 2020, 38(2): 235-240.
YANG Qin, LIU Yalan, ZHANG Tingting, PENG Shu, TIAN Xin. Research progress on formation mechanism of xenia effect in fruit trees[J]. *Non-wood Forest Research*, 2020, 38(2): 235-240.
- [7] 戚行江, 郑锡良, 任海英, 梁森苗, 颜鸿鹏, 吴阳春. 花粉直感对杨梅果实品质及不同蔗糖代谢酶活性的影响[J]. *果树学报*, 2017, 34(7): 861-867.

- QI Xingjiang, ZHENG Xiliang, REN Haiying, LIANG Senmiao, YAN Hongpeng, WU Yangchun. Effect of xenia on fruit quality and sucrose metabolism enzyme activity in red bayberry[J]. Journal of Fruit Science, 2017, 34(7): 861-867.
- [8] 杨技超, 韩振诚, 何茂梅, 罗充, 李良良, 李苇洁. ‘红阳’猕猴桃花粉直感效应研究[J]. 中国果树, 2021(6): 7-12.
- YANG Jichao, HAN Zhencheng, HE Maomei, LUO Chong, LI Liangliang, LI Weijie. Effect of pollen xenia on ‘Hongyang’ kiwifruit[J]. China Fruits, 2021(6): 7-12.
- [9] 刘婉君, 张莹, 张玉星, 杜国强. 18 个品种授粉 ‘鸭梨’ 果实品质和香气成分分析与评价[J]. 食品科学, 2022, 43(2): 294-302.
- LIU Wanjun, ZHANG Ying, ZHANG Yuxing, DU Guoqiang. Analysis and evaluation of fruit quality and aroma components of ‘Yali’ pear (*Pyrus bretschneideri* Rehd.) pollinated with eighteen pollinizers[J]. Food Science, 2022, 43(2): 294-302.
- [10] 王宝侠, 韩永增, 包敖民, 辛亚坤, 刘中奇, 李志军. 授粉品种对 ‘塞外红’ 苹果果实品质的影响[J]. 经济林研究, 2023, 41(4): 22-30.
- WANG Baoxia, HAN Yongzeng, BAO Aomin, XIN Yakun, LIU Zhongqi, LI Zhijun. Effects of fruit quality of ‘Saiwaihong’ apple fruit pollinated with different pollination cultivars[J]. Non-wood Forest Research, 2023, 41(4): 22-30.
- [11] 徐祥增, 邓乐晔, 张小娇, 王勇方, 高世德. 柚和葡萄柚花粉直感对东试早柚果实生长及品质的影响[J]. 果树学报, 2024, 41(4): 665-678.
- XU Xiangzeng, DENG Yueye, ZHANG Xiaojiao, WANG Yongfang, GAO Shide. Effects of grapefruit and pummelo pollens on fruit growth and quality of Dongshizao pummelo[J]. Journal of Fruit Science, 2024, 41(4): 665-678.
- [12] 王文林, 张涛, 汤秀华, 许鹏, 韦媛荣, 韦哲君, 陆宇明. 中国澳洲坚果产业概况与发展模式探索[J]. 农业研究与应用, 2022, 35(4): 44-50.
- WANG Wenlin, ZHANG Tao, TANG Xiuhua, XU Peng, WEI Yuanrong, WEI Zhejun, LU Yuming. Overview and development model exploration of *Macadamia* industry in China[J]. Agricultural Research and Application, 2022, 35(4): 44-50.
- [13] 贺熙勇, 陶丽, 倪书邦, 陈丽兰, 张海文, 孔广红. 花粉直感对澳洲坚果 ‘O. C’ 果实形态和品质性状的影响[J]. 经济林研究, 2016, 34(1): 76-82.
- HE Xiyong, TAO Li, NI Shubang, CHEN Lilan, ZHANG Haiwen, KONG Guanghong. Effects of pollen xenia on nut morphological characteristics and quality of ‘O. C’ cultivar in *Macadamia* spp.[J]. Non-wood Forest Research, 2016, 34(1): 76-82.
- [14] 孔广红, 陶丽, 贺熙勇, 倪书邦, 陈丽兰, 肖晓明. 不同授粉组合对澳洲坚果良种 HAES863 坐果及果实大小的影响[J]. 中国果树, 2024(3): 93-97.
- KONG Guanghong, TAO Li, HE Xiyong, NI Shubang, CHEN Lilan, XIAO Xiaoming. Effects of different pollination combinations on fruit setting and fruit size of *Macadamia* variety ‘HAES863’ [J]. China Fruits, 2024(3): 93-97.
- [15] 解季明, 丁新颖, 张宇杰, 汪正祥, 戴璨. 野慈姑 (*Sagittaria trifolia*) 人工授粉的有效性: 授粉工具与花粉保存[J]. 生态学报, 2021, 41(13): 5446-5453.
- XIE Jiming, DING Xinying, ZHANG Yujie, WANG Zhengxiang, DAI Can. Efficacy of artificial pollination in *Sagittaria trifolia*: pollination tools and pollen preservation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(13):

5446-5453.

- [16] URATA U. Pollination requirements of macadamia[J]. Hawaii Agricultural Experiment Station Technical Bulletin, 1954(22): 1-40.
- [17] 宋海云, 张涛, 王文林, 郑树芳, 何铎扬, 杜鸿平, 覃振师, 贺鹏. 澳洲坚果果仁脂肪酸分析及评价[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(21): 128-136.
- SONG Haiyun, ZHANG Tao, WANG Wenlin, ZHENG Shufang, HE Xianyang, DU Hongping, QIN Zhenshi, HE Peng. Analysis and evaluation of fatty acids in *Macadamia* Kernels[J]. Food Research and Development, 2021, 42(21): 128-136.
- [18] 万继锋, 曾辉, 杨为海, 张汉周, 陆超忠, 陈倪, 陈菁, 罗炼芳. 澳洲坚果种质资源花序表型多样性研究[J]. 福建农业学报, 2019, 34(11): 1255-1261.
- WAN Jifeng, ZENG Hui, YANG Weihai, ZHANG Hanzhou, LU Chaozhong, CHEN Ni, CHEN Jing, LUO Lianfang. Phenotypic diversity on inflorescence of *Macadamia* spp. Germplasms[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2019, 34(11): 1255-1261.
- [19] 陶丽, 陈丽兰, 杨帆, 陶亮, 倪书邦, 张海文, 贺熙勇. 7个澳洲坚果品种的授粉组合选配与自花结实性研究[J]. 中国南方果树, 2018, 47(1): 55-58.
- TAO Li, CHEN Lilan, YANG Fan, TAO Liang, NI Shubang, ZHANG Haiwen, HE Xiyong. Study on pollination combination selection and self flowering fruiting of 7 Australian nut varieties[J]. South China Fruits, 2018, 47(1): 55-58.
- [20] HERBERT S W, WALTON D A, WALLACE H M. Pollen-parent affects fruit, nut and kernel development of *Macadamia*[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 244: 406-412.
- [21] 孔广红, 余文才, 柳颀. 自花授粉花柱提取物对澳洲坚果品种间杂交亲和性的影响[J]. 果树学报, 2023, 40(4): 615-629.
- KONG Guanghong, YU Wencai, LIU Jin. Effects of self-pollination style extracts on the crossing-compatibility among *Macadamia* varieties[J]. Journal of Fruit Science, 2023, 40(4): 615-629.
- [22] 曾辉. 澳洲坚果落果规律及早期生理落果的机理研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- ZENG Hui. A study on fruit drop pattern and the mechanisms of early fruit drop in macadamia[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016.
- [23] 李穆, 黄思婕, 谭秦亮, 黄锦媛, 赵渊, 巫辅民, 曾黎明. 澳洲坚果内源激素含量与其生理落果的关系[J]. 中国南方果树, 2024, 53(3): 96-101.
- LI Mu, HUANG Sijie, TAN Qinliang, HUANG Jinyuan, ZHAO Yuan, WU Fumin, ZENG Liming. Relationship between endogenous hormone content and physiological fruit drop of *Macadamia*[J]. South China Fruits, 2024, 53(3): 96-101.
- [24] DORCEY E, URBEZ C, BLÁZQUEZ M A, CARBONELL J, PEREZ-AMADOR M A. Fertilization-dependent auxin response in ovules triggers fruit development through the modulation of gibberellin metabolism in *Arabidopsis*[J]. Plant Journal, 2009, 58(2): 318-332.
- [25] 洪俊彦, 黄仁, 黄春颖, 王建华, 徐一帆, 李佩佩, 胡渊渊, 黄坚钦, 李岩. 植物花粉直感的研究进展及展望[J]. 植物生理学报, 2020, 56(2): 151-162.
- HONG Junyan, HUANG Ren, HUANG Chunying, WANG Jianhua, XU Yifan, LI Peipei, HU Yuanyuan, HUANG Jianqin, LI Yan. Research progress and prospects of xenia[J]. Plant Physiology Journal, 2020, 56(2): 151-162.
- [26] BENJAMIN F E, WINFREE R. Lack of pollinators limits fruit production in commercial blueberry

- (*Vaccinium corymbosum*)[J]. Environmental Entomology, 2014, 43(6): 1574-1583.
- [27] BOUGHEDIRI L, CERCEAU-LARRIVAL M T, DORÉ J C. Significance of freeze-drying in long term storage of date palm pollen[J]. Grana, 1995, 34(6): 408-412.
- [28] 康专苗, 郭广正, 王代谷, 何凤平, 王文林, 曾辉, 涂行浩. 石漠化地区澳洲坚果果实品质及产量的综合评价[J]. 经济林研究, 2024, 42(1): 67-76.
- KANG Zhuanmiao, GUO Guangzheng, WANG Daigu, HE Fengping, WANG Wenlin, ZENG Hui, TU Xinghao. Comprehensive evaluation of fruit quality and yield of *Macadamia* nuts in rocky desertification areas[J]. Non-wood Forest Research, 2024, 42(1): 67-76.
- [29] 谭秋锦, 韦媛荣, 黄锡云, 张涛, 许鹏, 宋海云, 王文林, 郑树芳. 10 份澳洲坚果种质果实性状与营养成分分析[J]. 果树学报, 2021, 38(5): 672-680.
- TAN Qiujin, WEI Yuanrong, HUANG Xiyun, ZHANG Tao, XU Peng, SONG Haiyun, WANG Wenlin, ZHENG Shufang. Analysis of fruit characteristics and nutrients of 10 accessions of *Macadamia integrifolia*[J]. Journal of Fruit Science, 2021, 38(5): 672-680.
- [30] 贺鹏, 张涛, 宋海云, 谭秋锦, 郑树芳, 覃振师, 黄锡云, 汤秀华, 王文林. 广西澳洲坚果果实品质分析与综合评价[J]. 食品科学, 2021, 42(24): 242-251.
- HE Peng, ZHANG Tao, SONG Haiyun, TAN Qiujin, ZHENG Shufang, QIN Zhenshi, HUANG Xiyun, TANG Xiuhua, WANG Wenlin. Quality analysis and comprehensive evaluation of the fruit of *Macadamia integrifolia* Grown in Guangxi Province[J]. Food Science, 2021, 42(24): 242-251.
- [31] 魏东, 张学成. 微藻脂肪酸去饱和酶及其基因表达的生态调控研究新进展[J]. 海洋科学, 2000, 24(8): 42-46.
- WEI Dong, ZHANG Xuecheng. New advances on fatty acid desaturase and regulation of these genes expression by ecological factors in microalgae cells[J]. Marine Sciences, 2000, 24(8): 42-46.
- [32] 梁晶晶, 蒋霞敏, 叶丽, 韩庆喜. 氮、磷、铁对三角褐指藻诱变株生长、总脂及脂肪酸的影响[J]. 生态学杂志, 2016, 35(1): 189-198.
- LIANG Jingjing, JIANG Xiamin, YE Li, HAN Qingxi. Effects of nitrogen, phosphorus and iron on the growth, total lipid content and fatty acid composition of *Phaeodactylum tricornutum* mutant strain[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(1): 189-198.