

不同植物生长调节剂对核桃果实品质的影响

张涛, 陈晓龙, 乔新派, 丁申, 杨超臣, 赖勇, 张党权

(河南农业大学林学院, 河南 郑州 450046)

摘要:【目的】研究植物生长调节剂处理对核桃核果质量、核仁质量和脂肪酸含量的影响, 为改善核桃品质提供科学依据。【方法】对核桃进行 6-苄氨基嘌呤 (6-BA, 50 mg·L⁻¹)、水杨酸 (SA, 100 mg·L⁻¹) 和多效唑 (PAC, 50 mg·L⁻¹) 涂抹处理, 鉴定果实表型, 并分析油脂含量和脂肪酸组分的变化规律。【结果】6-BA 处理后的核果质量在第 1、7 和 14 天分别显著增加 21.84%、5.96% 和 3.92%; 而含油率在第 1 和 28 天分别显著降低了 16.29% 和 3.44%; 增加了亚油酸的相对含量, 进而增加了多不饱和脂肪酸的积累。SA 处理的核果质量在第 14、28 天和成熟期分别显著降低了 6.31%、7.23% 和 5.17%, 核仁质量在第 7、28 天和成熟期分别显著降低了 8.09%、8.44% 和 4.35%; 并且含油率在第 1 天显著降低了 14.79%, 第 14 天显著提高 3.52%; SA 处理抑制了不饱和脂肪酸和多不饱和脂肪酸的积累, 对油酸合成表现为先抑制后促进, 抑制了亚油酸和亚麻酸的积累。PAC 处理后核仁质量在第 1、14 和 28 天分别显著提高了 5.83%、6.61% 和 4.11%; 含油率在第 1、7 和 14 天分别显著增长了 2.45%、1.21% 和 6.60%; 对多不饱和脂肪酸的作用为先促进后抑制。【结论】3 种植物生长调节剂对核桃果实生长和脂肪酸组分有显著影响, 其中 6-BA 既能提高核桃核果质量又能提高油脂品质。

关键词: 核桃; 6-苄氨基嘌呤; 水杨酸; 多效唑; 含油率; 脂肪酸

中图分类号: S723

文献标志码: A

Effects of different plant growth regulators on walnut fruit quality

ZHANG Tao, CHEN Xiaolong, QIAO Xinpai, DING Shen, YANG Chaochen, LAI Yong, ZHANG

Dangquan

(College of Forestry, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China)

Abstract:【Objective】Through the treatment of walnut fruit with plant growth regulators, the effects on the drupe weight, kernel weight and fatty acid content were identified, which provided a scientific basis for improving the quality of walnut. 【Method】In this study, walnut was treated with 6-BA (50 mg · L⁻¹), salicylic acid (SA, 100 mg · L⁻¹) and paclobutrazol (PAC, 50 mg · L⁻¹) to appraisal the

收稿日期: 2025-03-01

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32001347); 河南省重点研发专项 (251111114200); 河南农业大学高层次人才专项项目 (30501511)

作者简介: 张涛 (2000—), 男, 河南信阳人, 硕士研究生, 主要从事经济林栽培与利用研究, E-mail: z18337601017@163.com。

通信作者: 张党权 (1976—), 男, 江西抚州人, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: zhangdangquan@163.com; 赖勇 (1985—), 男, 湖北广水人, 副教授, 硕士生导师, E-mail: xlaiyong@163.com。

fruit phenotype and analyze the changes of oil content and fatty acid composition. 【Result】 After 6-BA treatment, the drupe weight was significantly increased by 21.84%, 5.96% and 3.92% on the 1st, 7th and 14th day, respectively, and the oil content was decreased by 16.29% and 3.44% on the 1st and 28th day, respectively. The relative content of linoleic acid was increased, and then the accumulation of polyunsaturated fatty acids was increased by 6-BA treatment. After SA treatment, the drupe weight was significantly decreased by 6.31%, 7.23% and 5.17% on the 14th, 28th day and maturity, respectively, and the kernel weight was significantly decreased by 8.09%, 8.44% and 4.35% on the 7th, 28th day and maturity. The oil content was significantly decreased by 14.79% on the 1st day and increased by 3.52% on the 14th day. SA treatment inhibited the accumulation of unsaturated fatty acids and polyunsaturated fatty acids, initially inhibiting and then promoting oleic acid, inhibited the accumulation of linoleic acid and linolenic acid. After PAC treatment, the kernel weight was significantly increased by 5.83%, 6.61% and 4.11% on the 1st, 14th and 28th day. The oil content was increased by 2.45%, 1.21% and 6.60% on the 1st, 7th and 14th day. The action on polyunsaturated fatty acids was firstly promoted and then inhibited. 【Conclusion】 The three plant growth regulators had significant effects on the growth and fatty acid composition of walnut fruit, among which 6-BA could not only increase the drupe weight of walnut fruit but also improve the oil quality.

Key words: walnut; 6-BA; salicylic acid; polyphenols; oil content; fatty acids

核桃 (*Juglans regia* L.) 又称胡桃, 属于胡桃科胡桃属植物, 享有“木本油料之王”的美誉, 其果实与扁桃、榛子、腰果被人们称为世界四大坚果, 不仅营养丰富, 还具有显著的药用功效, 在促进社会经济发展方面发挥着重要作用^[1-2]。中国核桃种植历史悠久, 从西北内陆到东部沿海, 从东北到西南广泛分布。作为中国种植范围最广的木本油料作物, 核桃是开发食用植物油的优质原料。据统计, 2022 年中国核桃的总种植面积为 800.4 万 hm^2 , 干果产量高达 593.46 万 t ^[3-4]。由于国内油料作物无法满足食用油生产的需求, 每年食用油和生产原料进口依赖度高达 70%^[5], 严重影响了中国的食用油供给安全。因此, 深入挖掘核桃的油用潜力, 对于缓解国内食用油供应不足的现状具有深远的意义。

目前, 植物脂肪酸与油脂合成的机制已被解析^[6-9], 但其调控机制仍不清晰。植物生长调节剂在植物产量与品质的调控中均发挥了重要作用, 特别是对脂肪酸含量与构成具有重要影响^[10-12]。任果香^[13]研究发现, 喷施 6-苄氨基嘌呤 (6-BA) 提高了大豆籽粒中蛋白质含量, 并影响了籽粒中脂肪酸的组分含量。DAO 等^[14]发现, 较低剂量 6-BA 增加了微藻 (*Scenedesmus* sp. LX1) 单不饱和脂肪酸含量。LIN 等^[15]发现, 6-BA 处理小球藻显著增加了 DHA、亚麻酸、花生四烯酸和 EPA 的含量。FANG 等^[16]研究发现, 6-BA 处理提高了棉铃种子油含量。GHASSEMI-GOLEZANI 等^[17]发现, 叶面喷施水杨酸 (SA) 和茉莉酸 (JA) 可减少大豆种子中油酸含量、提高亚油酸与亚麻酸含量, 从而改善大豆油脂品质。MORADI 等^[18-19]研究表明, 叶面喷施 1 或 0.5 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SA 处理均可增加油菜籽单不饱和脂肪酸和减少

多不饱和脂肪酸来提高种子品质。XU 等^[20]研究发现, 40 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ SA 处理增加了三角褐指藻(*Phaeodactylum tricornutum*)总脂肪酸含量。NASERVAFAEI 等^[21]研究表明, 施用 2 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SA 可增加龙头籽粒亚油酸和油酸不饱和脂肪酸含量, 同时减少硬脂酸和棕榈酸饱和脂肪酸含量。曹琼等^[22]研究表明, 多效唑(PAC)处理能提高花生脂肪含量及油酸含量。胡博等^[23]研究表明, 150 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ PAC 处理能显著增加红花种子油酸含量。张佳蕾等^[24]研究发现, PAC 和海藻肥配施能显著提高花生的荚果、蛋白和脂肪产量。上述研究显示, 植物生长调节剂显著影响种子中脂肪酸的合成, 且不同植物生长调节剂的调节效果存在差异。杨丽等^[25]通过对核桃油脂转化期的比较转录组分析发现, 大量与脂肪酸合成及激素信号转导相关的基因表现出差异表达, 这表明核桃中同样存在脂肪酸合成的激素调控机制。但目前不同植物生长调节剂对核桃果实性状及油脂合成的具体影响仍不清晰。

河南农业大学经济林实验室前期研究发现, 部分植物生长调节剂处理后, 核桃的含油率及脂肪酸组成会发生变化。表明通过调节剂处理可能提高核桃的含油量, 进而增加核桃油产量, 或优化脂肪酸组成以提升油品质量, 最终提高油用核桃的经济效益^[26]。基于此, 本研究拟在核桃果实油脂合成期进行 6-BA、SA 和 PAC 处理, 探究其对核桃果实性状、核桃仁中油脂和脂肪酸组分的影响, 为核桃油脂品质改良提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料处理

试验材料为‘豫香’核桃, 种植于河南农业大学毛庄科教园区(113.597°E, 34.870°N)的无性系。参考李永涛^[27]对核桃果实发育规律的研究, 分别在核桃油脂合成初期和油脂迅速合成期进行植物生长调节剂处理, 其中, 在 6 月 14 日进行 50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 6-BA 和 100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ SA 处理, 在 7 月 11 日进行 50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ PAC 处理, 每次各处理 3 棵核桃树, 每棵核桃树一半核桃果实进行植物生长调节剂处理, 一半核桃果实作为对照(CK), 调节剂通过均匀涂抹的方式施用于果实表面(涂抹量一致)。依据课题组前期研究^[26, 28], 并在处理后 1、7、14 和 28 d、成熟期(6-BA 和 SA 处理后 80 d、PAC 处理后 60 d)分别采集果实样品。

1.2 果实表型鉴定

将样品置于 100 °C 烘箱中杀青, 然后用陶瓷刀片将果皮和种仁分离后, 在 65 °C 下烘 24 h 至恒定质量, 称量核桃果实的核果质量, 核仁质量, 计算核桃仁的得率(出仁率)。

$$\text{出仁率} = \frac{m}{M} \times 100\% \quad (1)$$

式中: m 为核桃仁质量; M 为核桃核果质量

1.3 核桃含油率测定

核桃油脂的提取和含油率测定: 采用索式提取法分离核桃油脂并计算核桃仁含油率^[29]。并将纯净的核桃仁油倒入玻璃瓶保存, 进行后续试验。

$$\text{核桃仁含油率} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中： m_1 为提取前核桃仁的质量； m_2 为提取后核桃仁的质量。

1.4 核桃脂肪酸组分测定

脂肪酸组分的测定：采用 GC-MS（AgilentTechnologies7890B GC-5977B MS，安捷伦科技有限公司）测定脂肪酸组分。用正己烷通过酯交换法对核桃油进行甲酯化后，进行上机检测^[30]。

色谱条件：Agilent19091S-Rtx-Wax（60 m×250 μm ×0.25 μm ）弹性石英毛细柱。程序升温：柱温：100 $^{\circ}\text{C}$ 。进样口温度：250 $^{\circ}\text{C}$ 。升温程序：初始温度 100 $^{\circ}\text{C}$ 保持 1 min；以 15 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 至 175 $^{\circ}\text{C}$ 保持 12 min；在以 2 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升至 220 $^{\circ}\text{C}$ ，保持 2 min。离子源温度：250 $^{\circ}\text{C}$ 。进样量 0.5 μL ，分流比：50：1。

质谱条件：电子轰击电离源（electron impact, EI），温度 250 $^{\circ}\text{C}$ ；程序扫描质量范围为 50 ~600 AMU；AUX 温度区设定在 250 $^{\circ}\text{C}$ ^[31]。

1.5 数据统计分析

运用 Microsoft Excel 2019 对果实核果质量、核仁质量、出仁率、含油率等指标进行数据统计。采用 SPSS 25 对不同处理核桃的数据进行描述分析、单因素方差齐性检验、相关性分析和回归分析。用 Origin 2021 进行图片绘制。所有统计检验的显著性 α 水平为 $\alpha=0.05$ 。

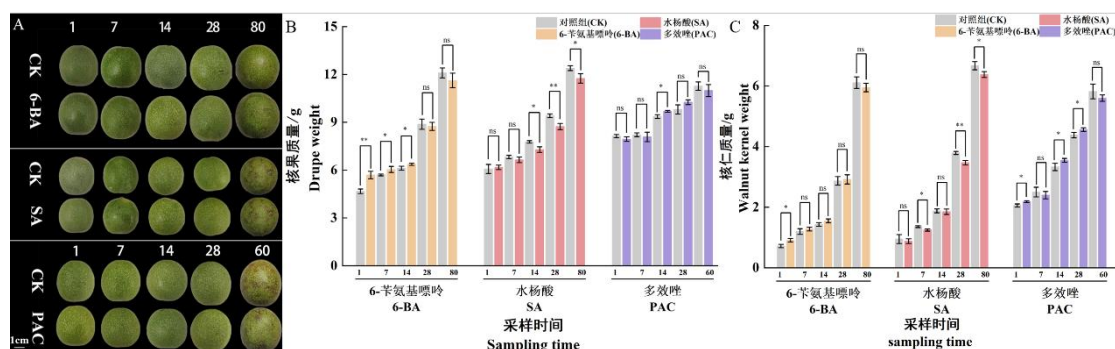
2 结果与分析

2.1 植物生长调节剂处理对核桃青果表型的影响

青果体积大小可以直观地展现出核桃的生长情况。从核桃油脂合成期到成熟期，3 种植物生长调节剂处理对核桃青果的大小没有显著影响（图 1-A）。

核桃核果的质量可以反映出核桃果实内部的生长速率，图 1-B 显示 3 种植物生长调节剂处理后核果质量随时间变化。6-BA 处理在第 1、7 和 14 天核果质量分别显著增加 21.84%、5.96%和 3.92%；SA 处理在第 14 和 28 天及成熟期核果质量分别显著降低了 6.31%、7.23%和 5.17%；PAC 处理在第 14 天时显著提高了 3.53%。说明适量的 6-BA 处理能增加核桃核果质量；SA 处理在核桃生长后期降低了核果质量；PAC 处理也能促进核果质量的生长，但影响小于 6-BA 处理。

核仁质量的变化能间接反映出核桃仁营养物质的积累速度，图 1-C 为 3 种植物生长调节剂处理后核仁质量随时间变化。6-BA 处理后第 1 天核仁质量提高了 26.39%；SA 处理分别第 7 和 28 天及成熟期核仁质量显著降低了 8.09%、8.44%和 4.35%；PAC 处理在第 1、14 和 28 天核仁质量分别显著提高了 5.83%、6.61%和 4.11%。说明 6-BA 和 PAC 均能促进核仁质量的生长，但 6-BA 影响小于 PAC，SA 处理则抑制核仁质量的生长。



注：1 代表第 1 天取样；7 代表第 7 天取样；14 代表第 14 天取样；28 代表第 28 天取样；80 代表 6-BA 和 SA 处理成熟期取样；60 代表 PAC 处理成熟期取样。ns 代表无显著性差异，*、**和***分别代表在 $p < 0.05$ 、 $p < 0.01$ 和 $p < 0.001$ 统计学水平上差异显著。下同。

Note: 1 represents day 1 sampling; 7 represents day 7 sampling; 14 represents day 14 sampling; 28 represents day 28 sampling; 80 represents 6-BA and SA treatment maturity sampling; 60 represents PAC treatment maturity sampling. ns represents no significant difference. *, ** and *** represent significant differences at the statistical level of $p < 0.05$, $p < 0.01$ and $p < 0.001$, respectively. The same as below.

图 1 植物生长调节剂处理核桃果实生长状况 (A) 和核果质量 (B)、核仁质量 (C) 的变化

Fig. 1 Changes in walnut fruit growth condition (A), kernel weight (B) and kernel weight (C) after 6-BA, SA and PAC treatments

2. 2 不同植物生长调节剂处理对核桃出仁率和含油率的影响

3 种植物生长调节剂处理对核桃出仁率和含油率的影响如图 2 所示。从图 2-A 可看出，出仁率仅在 6-BA 处理后第 14 天显著升高了 5.31%，SA 处理后第 1 天显著降低 9.35%，在 PAC 处理后第 1 天显著增加 8.2%、第 7 天显著降低 3.67%。但 3 种处理后的第 28 天和成熟期，出仁率均与 CK 无显著性差异。说明 3 种植物生长调节剂的处理对核桃出仁率的影响较小。

图 2-B 显示，6-BA 处理后的第 1 和 28 天含油率分别比 CK 显著降低了 16.29% 和 3.44%；SA 处理的第 1 天含油率比 CK 显著低了 14.79%，第 14 天比 CK 显著高了 3.52%；PAC 处理后的第 1、7 和 14 天含油率分别显著增长了 2.45%、1.21% 和 6.60%，表现为促进效果。说明 3 种植物生长调节剂对核桃含油率有显著影响，且 6-BA 表现为抑制作用，SA 表现为先抑制后促进作用，PAC 表现为促进作用。

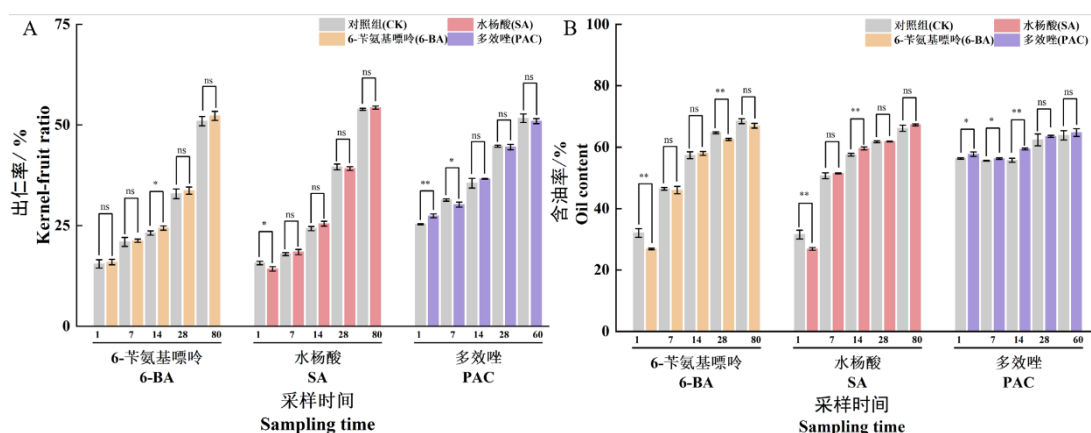


图2 植物生长调节剂处理后核桃出仁率(A)和含油率(B)的变化

Fig. 2 Changes in kernel yield (A) and oil content (B) of walnuts after 6-BA, SA and PAC treatments

2.3 不同植物生长调节剂处理对核桃油不同脂肪酸含量的影响

3种植物生长调节剂对核桃油不同脂肪酸含量的影响如图3所示。图3-A显示,对于饱和脂肪酸,6-BA处理后第28天其含量显著降低了7.76%;SA处理后第1天饱和脂肪酸含量显著降低了19.88%,而第7和28天分别显著提高了5.17%和3.01%;PAC处理没有显著影响。说明6-BA和PAC对核桃的饱和脂肪酸含量的影响较小,SA处理后呈现先抑制后促进的效果。

图3-B为3种植物生长调节剂对不饱和脂肪酸含量的影响。6-BA处理后第7天不饱和脂肪酸含量比CK显著低0.71%,而在第28天比CK显著高1.17%;SA处理后,不饱和脂肪酸含量在第1、7和28天分别比CK显著低0.68%、0.71%、0.41%;PAC处理后的不饱和脂肪酸含量在第1和14天分别比CK显著高1.42%和0.98%。说明6-BA处理对核桃不饱和脂肪酸呈先抑制后促进的效果,SA呈抑制效果,PAC呈促进效果。

3种植物生长调节剂对多不饱和脂肪酸的影响如图3-C所示。6-BA处理后多不饱和脂肪酸含量在1、7和28天分别显著提高了1.64%、1.16%和3.42%;SA处理后多不饱和脂肪酸含量在成熟期显著降低了6.42%;PAC处理后的多不饱和脂肪酸含量在第1和7天分别显著提高了2.41%和4.35%,在第14天和成熟期分别显著降低了2.44%和5.58%。说明6-BA处理对多不饱和脂肪酸的积累呈促进效果,SA处理呈抑制效果,PAC处理表现出先促进后抑制的效果。

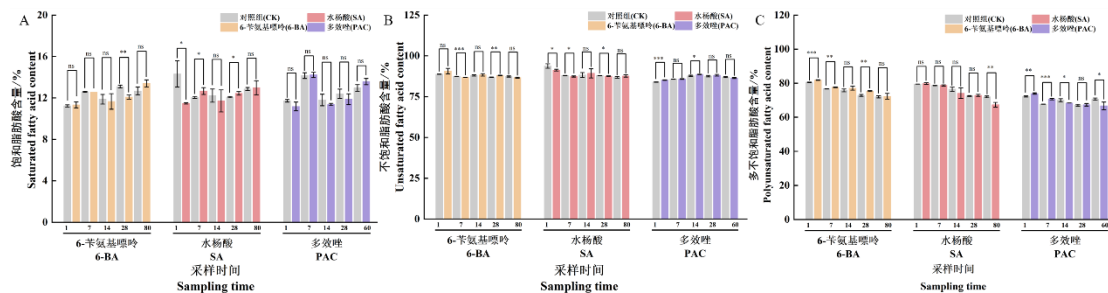


图3 植物生长调节剂处理后不同类型脂肪酸的含量

Fig. 3 Content of different types of fatty acids after 6-BA, SA and PAC treatments

2.4 植物生长调节剂处理对核桃仁中主要脂肪酸含量的影响

3种植物生长调节剂对核桃油中主要脂肪酸含量的影响如图4所示。对于两种主要饱和脂肪酸,图4-A显示6-BA处理对棕榈酸含量没有显著影响;SA处理后的棕榈酸含量在第1和14天分别显著降低了15.97%、4.98%,在第7天显著提高了7.88%;PAC处理后在第7天使棕榈酸含量显著降低了3.16%。说明6-BA对棕榈酸的影响较小,SA呈现先抑制后促进再抑制的效果,PAC呈抑制效果。图4-B显示6-BA处理后的硬脂酸含量在第28天显著降低了25.68%;SA处理后的硬脂酸含量在第1天显著降低了34.17%,在第28天显著提高了5.94%;PAC处理后的硬脂酸含量在第28天显著降低了8.36%。说明6-BA和PAC处理对

硬脂酸的积累呈抑制效果，SA 呈先抑制后促进的效果。

对于 3 种主要不饱和脂肪酸，图 4-C 显示 6-BA 处理的油酸相对含量在第 7 和 8 天分别显著降低了 14.09%和 10.51%；SA 处理在第 7 天显著降低了 7.55%，在第 14 天和成熟期分别显著增加了 29.2%和 37.05%；PAC 处理第 1 和 7 天分别显著降低了 7.43%和 16.03%，在第 14 天显著增加了 14.51%。说明 6-BA 处理对油酸的积累起抑制效果，SA 呈先抑制后促进的效果，PAC 呈现出先抑制后促进的效果。图 4-D 显示 6-BA 处理后亚油酸相对含量在 1、7 和 28 天分别显著增加了 4.94%、1.34%和 5.73%；SA 处理在第 1 天显著增加了 1.51%，在第 14 天和成熟期分别显著降低了 4.94%和 5.61%；PAC 处理在第 7 天显著增加了 3.76%，在成熟期显著降低了 7.39%。说明 6-BA 对亚油酸的积累呈促进效果，SA 呈现出先增加后降低的趋势，抑制亚油酸的积累，PAC 呈现出先促进后抑制的效果。图 4-E 显示 6-BA 处理后，核桃油中亚麻酸在第 1、14 和 28 天分别显著降低了 15.78%、14.91%和 9.66%；SA 处理在第 1 天显著降低了 6.99%；PAC 处理在第 1 和 7 天分别显著增加了 15.32%和 8%，在第 28 天时显著降低了 10%。说明 6-BA 对亚麻酸的积累呈抑制效果，SA 呈抑制效果，PAC 呈现出先促进后抑制的效果。

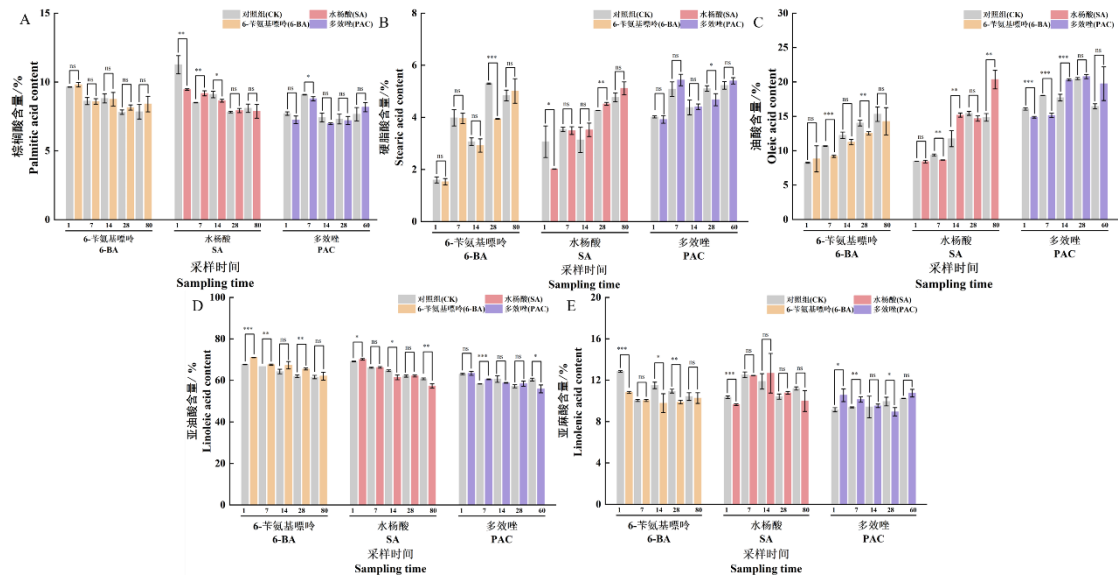


图 4 植物生长调节剂处理后主要脂肪酸的含量

Fig. 4 Content of major fatty acids after 6-BA, SA and PAC treatments

3 结论与讨论

核桃作为重要的木本油料植物，其开发利用对缓解中国食用油紧缺问题具有重要意义。本研究探讨了 6-BA、SA 和 PAC 这 3 种植物生长调节剂在核桃油脂合成期的作用规律，发现它们对核桃果实大小的影响较小，这可能与处理时期的选择有关。核桃果实生长主要集中在 5 月初至 6 月初的膨大期，而本研究处理时果实膨大已基本完成。对核果核桃核果质量影响方面，6-BA 处理显著提高了核果质量，这一结果与 ZHENG 等^[32]关于 6-BA 处理提高谷物产量的研究结果较一致；但本研究中 6-BA 处理抑制了含油率的增长。PAC 处理显著促进

了果实核仁质量和含油率的积累,这一发现与王丹生等^[33]关于 PAC 提高大豆脂肪含量的研究结果较吻合。

植物生长调节剂显著影响了植物脂肪酸的合成。本研究发现 6-BA 处理显著抑制了油酸和亚麻酸的积累,但促进了亚油酸的合成。这说明 6-BA 处理加速了核桃仁中油酸向亚油酸的转化,同时抑制亚麻酸的转化过程,从而显著提高了亚油酸的积累量,降低了单不饱和脂肪酸的相对含量。这一发现与 LIN 等^[15]用 6-BA 处理小球藻增加不饱和脂肪酸含量的研究结果较一致。SA 处理对亚油酸和亚麻酸积累的起抑制作用,导致不饱和脂肪酸和多不饱和脂肪酸相对含量降低。这一结果与 GHASSEMI-GOLEZANI 等^[17]进行叶面喷施 SA 和 JA 可减少大豆种子中油酸含量、提高亚油酸与亚麻酸含量的研究结论相反,可能源于处理质量浓度差异,本实验使用 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 果实表面涂抹,而后者采用叶面喷施法施加 $1.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ SA,但与 MORADI 等^[18]研究发现,叶面喷施 $0.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ SA 可增加油菜籽单不饱和脂肪酸和减少多不饱和脂肪酸的结果较一致。PAC 处理对亚油酸和亚麻酸表现为先促进后抑制,而对油酸则呈现先抑制后促进的作用模式。可能 PAC 通过前期促进油酸转化、后期抑制转化的方式,实现了多不饱和脂肪酸相对含量的先升高后降低的动态变化。这些研究结果为利用植物生长调节剂优化改善油脂品质提供了重要的理论依据和实践指导。

本研究揭示了 3 种植物生长调节剂处理对核桃果实品质的影响规律。6-BA 处理可显著促进核果质量的增加,同时提高亚油酸和不饱和脂肪酸的含量;SA 和 PAC 处理则能有效提升核桃含油率,并通过调控亚油酸和亚麻酸的含量来影响不饱和脂肪酸的组成。研究结果为通过植物生长调节剂调控核桃油脂品质、提升核桃产品的高附加值提供了理论依据。

参考文献 References:

- [1] 刘艳艳,张涛,王媛媛,等.核桃枝的抗氧化、抗菌及抗肿瘤活性研究[J].河南农业大学学报,2025,59(1): 57-67.
- LIU Y Y, ZHANG T, WANG Y Y, et al. Study on the antioxidant, antibacterial, and antitumor activities of walnut branches[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2025, 59(1): 57-67.
- [2] MA J H, LAI Y, HE G X, et al. Superimposed effect of plant essential oil constituents and their biomedical application[J]. Industrial Crops and Products, 2025, 224: 120362.
- [3] 张荣,陶亮.中国核桃生产和贸易现状分析[J].中国果树,2025(1): 147-152.
- ZHANG R, TAO L. Analysis of the production and trade status of walnut in China[J]. China Fruits, 2025(1): 147-152.
- [4] 国家林业和草原局.中国林业和草原统计年鉴-2022[M].北京:中国林业出版社,2023.
- National Forestry and Grassland Administration. China forestry and grassland statistical yearbook[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2023.
- [5] 曹娜,夏飞.我国核桃油产业创新发展机遇、挑战与实现路径[J].中国油脂,2023,48(10): 6-10.
- CAO N, XIA F. Opportunities, challenge and implementation paths for innovation-driven development of walnut oil industry in China[J]. China Oils and Fats, 2023, 48(10): 6-10.
- [6] GISHINI M F S, KACHROO P, HILDEBRAND D. Fatty acid desaturase 3-mediated α -linolenic acid biosynthesis in plants[J]. Plant Physiology, 2025, 197(2): kiaf012.

- [7] YUAN T L, GUO L Q, GAO X, et al. Enzymatic synthesis and characterization of structured lipids: Medium- and long-chain triacylglycerols enriched with lauric acid and diverse long-chain fatty acids[J]. Food Bioscience, 2025, 64: 105956.
- [8] HARWOOD J L. Recent advances in the biosynthesis of plant fatty acids[J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Lipids and Lipid Metabolism, 1996, 1301(1/2): 7-56.
- [9] LI L J, ZHANG D Q, ZHANG Z Y, et al. CRISPR/Cas: a powerful tool for designing and improving oil crops[J]. Trends in Biotechnology, 2025, 43(4): 773-789.
- [10] 张金云, 吴世军, 刘姚, 等. 植物生长调节剂在澳洲坚果上的应用研究进展[J]. 现代园艺, 2024(13): 12-14.
- ZHANG J Y, WU S J, LIU Y, et al. [Research progress on application of plant growth regulators in *Macadamia* nuts](#)[J]. Contemporary Horticulture, 2024(13): 12-14.
- [11] RADEMACHER W. Plant growth regulators: Backgrounds and uses in plant production[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2015, 34(4): 845-872.
- [12] JIANG K, ASAMI T. Chemical regulators of plant hormones and their applications in basic research and agriculture[J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2018, 82(8): 1265-1300.
- [13] 任果香. 烯效唑与 6-BA 对大豆产量与品质的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2008.
- REN G X. The impact of uniconazole and 6-BA on yield and quality of soybean[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2008.
- [14] DAO G H, WANG X X, ZHANG T Y, et al. Enhanced biomass production and fatty acid accumulation in *Scenedesmus* sp. LX1 treated with 6-benzylaminopurine[J]. Algal Research, 2019, 44: 101714.
- [15] LIN B, AHMED F, DU H M, et al. Plant growth regulators promote lipid and carotenoid accumulation in *Chlorella vulgaris*[J]. Journal of Applied Phycology, 2018, 30(3): 1549-1561.
- [16] FANG S, HU W, WANG S S, et al. Exogenous application of 6-BA and GA3 collaboratively improves cottonseed yield and seed quality *via* altering production of carbohydrates in the embryo[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2021, 67(3): 329-341.
- [17] GHASSEMI-GOLEZANI K, FARHANGI-ABRIZ S. Changes in oil accumulation and fatty acid composition of soybean seeds under salt stress in response to salicylic acid and jasmonic acid[J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2018, 65(2): 229-236.
- [18] MORADI S, ALI SAJEDI N, MADANI H, et al. Integrated effects of nitrogen fertilizer, biochar, and salicylic acid on yield and fatty acid profile of six rapeseed cultivars[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2023, 23(1): 380-397.
- [19] MABUDI BILASVAR H, GHASSEMI-GOLEZANI K, MOHAMMADI NASSAB A D. Seed development, oil accumulation and fatty acid composition of drought stressed rapeseed plants affected by salicylic acid and putrescine[J]. Gesunde Pflanzen, 2022, 74(2): 333-345.
- [20] XU J H, FAN X J, LI X X, et al. Effect of salicylic acid on fatty acid accumulation in *Phaeodactylum tricornutum* during stationary growth phase[J]. Journal of Applied Phycology, 2017, 29(6): 2801-2810.
- [21] NASERVAFAEI S, SOHRABI Y, MORADI P, et al. Improving oil content and fatty acid composition in dragon's head grain under drought stress with exogenous salicylic acid application[J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2024, 17: 101232.
- [22] 曹琼, 师辉. 多效唑对花生生理指标影响的田间试验探讨[J]. 湖北植保, 2019(6): 4-6.
- CAO Q, SHI H. Study on field experimental effect of paclobutrazol on physiological indexes of peanut[J]. Hubei Plant Protection, 2019(6): 4-6.
- [23] 胡博, 吴卫, 侯凯, 等. 赤霉素和多效唑对红花生生长和脂肪酸组成的影响[J]. 中国油料作物学报, 2015, 37(4): 498-503.

HU B, WU W, HOU K, et al. Effects of gibberellin acid(GA) and paclobutrazol(PP₃₃₃)utilization on growth and fatty acids of safflower[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2015, 37(4): 498-503.

[24] 张佳蕾, 李向东, 杨传婷, 等. 多效唑和海藻肥对不同品质类型花生产量和品质的影响[J]. 中国油料作物学报, 2015, 37(3): 322-328.

ZHANG J L, LI X D, YANG C T, et al. Effects of foliar application of paclobutrazol and seaweed fertilizer on yield and quality of peanut types[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2015, 37(3): 322-328.

[25] 杨丽, 陈虹, 潘存德, 等. 核桃种子油脂转化期转录组分析[J]. 果树学报, 2017, 34(9): 1084-1094.

YANG L, CHEN H, PAN C D, et al. Transcriptome analysis for walnut seed during oil synthesis period[J]. Journal of Fruit Science, 2017, 34(9): 1084-1094.

[26] 宋宇坤. 多效唑处理对核桃果实生长及核桃仁营养物质的影响机理研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2023.

SONG Y K. Mechanistic study on the effect of paclobutrazol treatment on walnut fruit growth and walnut kernel nutrients[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2023.

[27] 李永涛. 核桃(*Juglans regia*)胚发育及其营养代谢动态研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2011.

LI Y T. Walnut (*Juglans regia*) embryo development and the dynamics of nutrient metabolism[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2011.

[28] 褚治强. 高浓度 6-BA 对核桃果实与脂肪酸的影响研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2022.

CHU Z Q. Effects of high concentration 6-BA on walnut fruit and fatty acids[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2022.

[29] AHMED I A M, AL-JUHAIMI F Y, ÖZCAN M M, et al. Effects of cold-press and soxhlet extraction systems on antioxidant activity, total phenol contents, fatty acids, and tocopherol contents of walnut kernel oils[J]. Journal of Oleo Science, 2019, 68(2): 167-173.

[30] 林源锋, 付杰, 鲁昊, 等. 不同甲酯化方法对裂壶藻产油脂肪酸的影响及 GC-MS 分析[J]. 食品工业科技, 2018, 39(1): 257-261.

LIN Y F, FU J, LU H, et al. Effects of different methyl esterification methods on the production of fatty acids from *Schizochytrium* and GC-MS analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(1): 257-261.

[31] 俞春莲, 王正加, 夏国华, 等. 10 个不同品种的薄壳山核桃脂肪含量及脂肪酸组成分析[J]. 浙江农林大学学报, 2013, 30(5): 714-718.

YU C L, WANG Z J, XIA G H, et al. Fat content and fatty acid composition of ten *Carya illinoensis* cultivars[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2013, 30(5): 714-718.

[32] ZHENG C F, ZHU Y J, WANG C Y, et al. Wheat grain yield increase in response to pre-anthesis foliar application of 6-benzylaminopurine is dependent on floret development[J]. PLoS One, 2016, 11(6): e0156627.

[33] 王丹生, 纪晓东. 多效唑对大豆品质的影响[J]. 丹东师专学报, 1999(1): 54-55.

WANG D S, JI X D. [Effect of paclobutrazol on soybean quality](#)[J]. Journal of Dangdong Teachers College, 1999(1): 54-55.