

外源 14-羟基芸苔素甾醇对桃座果率和果实品质的影响

侍 婷¹, 王 杰¹, 张 瑞², 高志红^{1*}

(1. 南京农业大学园艺学院, 江苏 南京 210095 2. 江苏省连云港市东海县狮峰农业开发有限公司, 江苏 连云港 222300)

摘要:为了应对低温座果率低导致桃树减产,该研究在桃树盛花期和幼果期喷施不同质量分数的芸苔素甾醇,研究其对桃树座果率的影响效果和合适作用质量分数。供试材料为桃品种‘中油金铭’,利用0.01% 14-羟基芸苔素甾醇500倍液(高质量分数)和1000倍(低质量分数)液处理,以清水为对照,分别在桃树的盛花期和幼果期喷施2次,处理前统计花的数量,处理后每隔两周随机抽样,记录幼果数并统计座果率,至落花后第7周为止。果实成熟后测定果实品质相关的生理指标,包括果径、果核径、单果质量、果核质量、可溶性固形物含量及可滴定酸含量,通过方差分析确定芸苔素甾醇对果实品质的影响。结果表明,施用芸苔素甾醇可以显著提高桃树的座果率、单果质量和可溶性固形物含量,同时增加果核大小,降低可滴定酸含量。施用高质量分数和低质量分数芸苔素处理桃树后,座果率相比对照分别提升了83.40%和83.74%,单果质量分别增加了34.8%和46.5%,可溶性固形物含量分别提高了10.00%和23.44%,可滴定酸含量分别降低了16.46%和39.24%。喷施高质量分数的芸苔素甾醇可以提高桃果皮的光洁度,而低质量分数的芸苔素甾醇可能会降低桃果皮着色度。相关性分析表明,桃果皮的 L^* 值与 a^* 值呈现显著的正相关性,与 b^* 值呈现显著的负相关性,而与可溶性固形物和可滴定酸含量均无相关性。 a^* 值与可滴定酸含量成正相关, b^* 值与可滴定酸含量成负相关,与可溶性固形物均无相关性。该研究为采用14-羟基芸苔素甾醇提高在低温逆境中桃树的座果率和提高果实品质提供了一定的理论依据。

关键词:桃;促花促果;芸苔素甾醇;果实品质;座果率

中图分类号:Q945.6⁺5;Q946.885.⁺9;S662.1 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1001-7380.2023.03.002

Effects of exogenous 14-hydroxylated brassinosteroid on fruit set percentage and fruit quality of peach

Shi Ting¹, Wang Jie¹, Zhang Rui², Gao Zhihong^{1*}

(1. College of Horticulture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;
2. Chongfeng Agricultural Development Co., Ltd., Donghai County, Lianyungang 222300 China)

Abstract:To reduce the negative impact of low temperature on fruit set and yield of peach tree, the effects and optimal concentration of brassinolide (BR) application during the blooming and young fruit stages of the peach variety ‘Zhongyou Jin-ming’ were studied. Two levels (500-fold and 1000-fold dilutions) of 14-hydroxylated brassinosteroid (0.01%) were used with water as CK. Two applications were made at each stage, and the number of flowers was counted before treatment. After treatment, the fruit set was recorded every two weeks, and fruit quality-related physiological indicators, including fruit diameter, pit diameter, fruit weight, pit weight, soluble solids content, and titratable acidity, were measured after the fruit matured. Analysis of variance was used to determine the effects of BR on fruit quality. The results showed that BR significantly increased fruit set, fruit weight, and soluble solids content while increasing pit size and decreasing titratable acidity. Compared to CK, high and low levels of BR increased fruit set by 83.40% and 83.74%, respectively, and increased fruit

收稿日期:2023-03-05;修回日期:2023-04-21

基金项目:国家重点研发计划(2020YFE0202900,2020YFD1000203);江苏现代农业产业技术体系建设专项资金(JATS[2023]);江苏省苏北科技专项(SZ-LYG202106)

作者简介:侍 婷(1986-),女,江苏东海人,副教授,硕士生导师。研究方向为果树发育生物学。

* 通信作者:高志红(1971-),天津人,教授,博士生导师。研究方向为果树发育生物学、基因组学以及果树优质高效和轻简化栽培。

weight by 34.8% and 46.5%, respectively. Soluble solids content increased by 10.00% and 23.44%, respectively, and titratable acidity decreased by 16.46% and 39.24%, respectively. High-level BR application enhanced peach fruit surface smoothness while low-BR application could reduce fruit coloration. Correlation analysis showed a significant positive correlation between L and a values of the peach fruit skin and a significant negative correlation between L and b values, while L had no correlation with soluble solids content or titratable acidity. There was a positive correlation between a value and titratable acidity, and a negative correlation between b value and titratable acidity without correlation with soluble solids content. This study provides a theoretical basis for using 14-hydroxylated brassinosteroid to improve fruit set and quality under low-temperature stress.

Key words: Peach; Flower-promoting and fruit-retaining; Brassinosteroid; Fruit quality; Fruit set percentage

桃(*Prunus persica* L.)是原产于我国的一种落叶小乔木果树,在中国的落叶果树中,桃的栽培面积仅次于苹果、梨,居第3位^[1]。桃树花量大且自花结实,座果率直接影响桃树产量,如果因不良天气造成大规模的落花落果现象,就会造成桃园严重减产,还会影响来年果园的座果和产量,所以桃生产栽培中因环境因素造成落花落果严重的问题亟待解决。大小年现象^[2]和花期低温冻害^[3]会导致桃花在发育的过程中产生子房败育、受精不良或没有受精等现象造成落花落果。为减小不良外界因素对桃坐果率的影响,在生产上通常使用赤霉素和硼砂来促进开花和结果,起到一定促花保果的效果,但赤霉素的大量使用,严重透支了树势,缩短树体寿命,同时导致桃品质下降,盛果期缩短等,不利于桃园的长远发展^[4],所以植物生长调节剂在桃生产上的应用问题还需进一步解决。

芸苔素甾醇(Brassinosteroids,简称BRs),是植物体内芸苔素甾醇类似物(包括表芸苔素内酯、14-羟基芸苔素甾醇等)的总称,对植物的生长发育具有重要的调节作用。1970年,Mitchell等在油菜花粉中发现了一种可以使菜豆幼苗产生异常生长现象的生长物质,并将其命名为“芸苔素”^[5]。1979年,Grove等^[6]通过提纯和X-射线晶体衍射技术分析,确定了芸苔素的结构为多羟基的甾醇类化合物^[6]。之后,各国科学家陆续从其他植物中提取出各种芸苔素甾醇类似物。第16届国际生长物质学会会议正式认定,芸苔素是继生长素、赤霉素、细胞分裂素、脱落酸和乙烯之后的第6大植物生长调节剂^[7]。芸苔素甾醇参与调控植物的多种生长发育过程,如细胞的伸长和分裂、花期调控、光响应以及植物抗逆性等^[8-14]。

座果是影响果树产量的直接因素,稳定的座果率可以便于果园的日常管理,延长树体寿命,提高果园的产量^[15]。落花落果是普遍存在与植物界的

一种自然现象,是植物自身保护,降低外界不利因素对树体伤害以及平衡生长的一种手段,但是严重的落花落果现象会严重影响到果园的经济效益,缩短果树寿命^[16],因此在果园的管理中要合理控制果树的座果率,进行一些保花保果的措施来应对严重的落花落果现象。使用植物生长调节剂提高果树座果率是在果树生产中一种常见的手段,研究表明,90 mg/L的GA₃可以显著提高轮台白杏的座果率^[4],40 mg/L的萘乙酸可以显著提高石榴的座果率^[17],萌芽前喷施1 000倍的芸苔素甾醇可以提高甜樱桃的树体抗逆性,预防严重的落花落果现象^[16]。在桃树遭受低温冻害后,喷施8 000倍的‘碧护’(有效成分为芸苔素内酯)可以快速恢复树势,促进新梢生长^[3]。本试验将以‘中油金铭’为材料,研究14-羟基芸苔素甾醇对桃座果率和果实品质的影响。

1 材料和方法

1.1 材料与处理

试验供试材料为油桃,品种为‘中油金铭’,树龄为6 a;试验在南京农业大学白马教学科研基地的桃园进行。土壤和树体管理为常规栽培,土壤为中质土,肥力均匀。试验药品为0.01% 14-羟基芸苔素甾醇,成都新朝阳公司,农药号PD20070288。

试验以田间栽培桃树‘中油金铭’为材料,分为高质量分数处理组(H)、低质量分数处理组(L)和对照组(CK),每组为生长健壮的8年生桃树5株。H组和L组的药品质量分数分别为0.01% 14-羟基芸苔素甾醇500倍液和1 000倍液,CK组喷施同等液体量的清水,分别在盛花期(2023年3月8日)和幼果期(2023年3月21日2次重复)。在进行药剂的喷施前,对试验组的每株树随机选取3个不同方向的结果枝进行取样,用标签标记试验组以及样本树的编号,记录每个样本的初始总花量(包括花朵和花蕾),至

落花后第 49 d(2023 年 5 月 5 日)统计座果率。

1.2 方法

1.2.1 测定指标与方法 至落花后第 63 天果实达到商品成熟度时进行采收,每个处理组完全随机采收 8 个果实,并于采摘当天对果实的品质进行测定。首先,去除所有果实样本的果柄,以及果实表面的污渍或果胶,并进行初步处理。之后,在 3 个试验组中每组随机选取 3 个样品进行拍照,记录果实的外观。采用日本柯尼卡美能达 CR400/410 色差仪测定每个果实的果皮色泽参数,在果实赤道部选取 3 个方位测定色泽指标后,取平均值。所有指标测定均在果实采摘当天完成。色泽指标中, L^* 表示光泽明亮度, L^* 越大表示果面亮度越高,反之越低; a^* 、 b^* 表示颜色组分,取值范围为, a^* 为正值红色, a^* 为负值绿色, b^* 为正值黄色, b^* 为负值蓝。

主要测定指标及方法如下:用电子天平称得的 8 个果实的质量总和除以 8 即可得到平均单果质量;用数显式游标卡尺测量果实的纵径、横径和侧径,每个果实测量 3 次,取平均值;以电子天平测量 8 个果核的质量总和;以数显式游标卡尺测量果核的纵径、横径和侧径,每个果核测量 3 次,取平均值;以数显式糖度计(LH-B55)测量果汁的可溶性固形物含量,每个样本测量 3 次,取平均值。以滴定法测定果汁的可滴定酸含量,每个样本测量 3 次,取平均值。

1.2.2 数据分析 采用 SPSS 26.0 软件对不同处理的试验数据进行差异显著性分析和相关性分析,用 Excel 2016 和 GraphPad Prism9.0 软件进行数据处理和制图。

2 结果和分析

2.1 不同质量分数芸苔素甾醇对桃座果率的影响

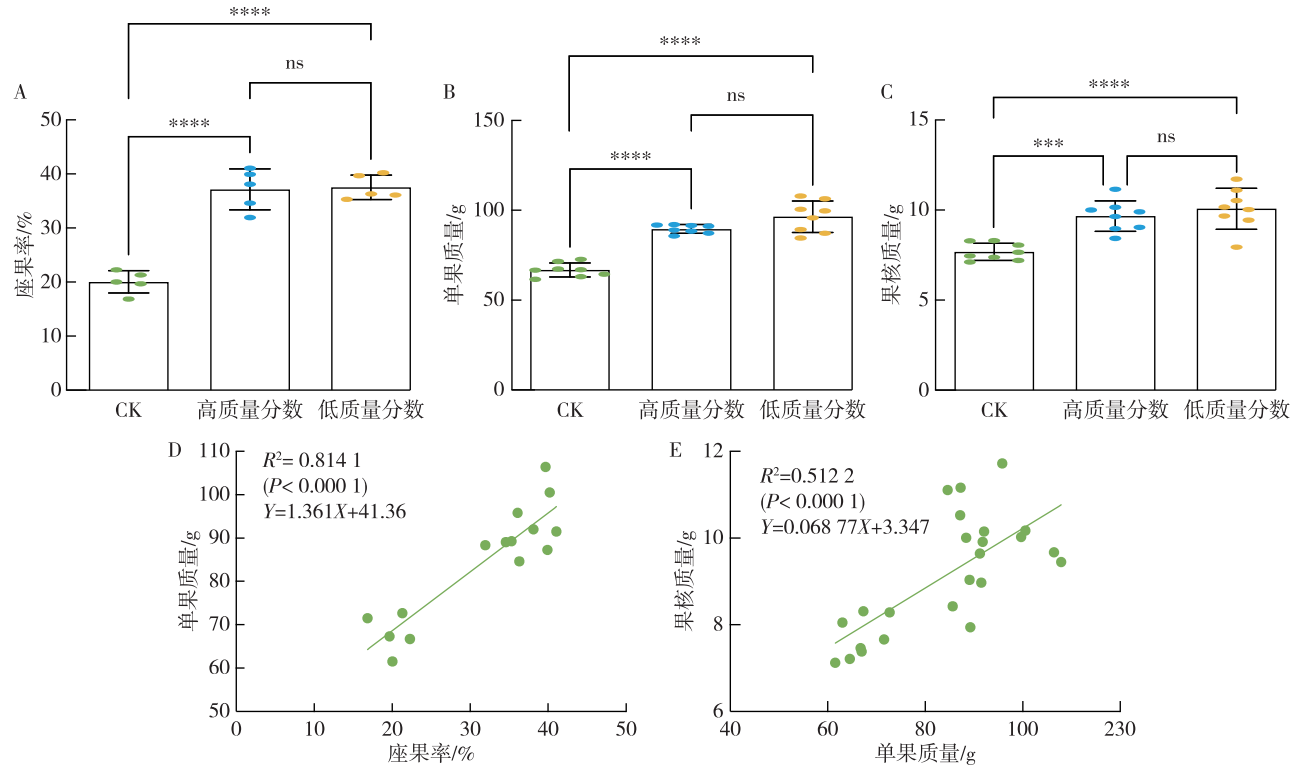
不同质量分数的芸苔素甾醇对桃座果率的影响如图 1A 所示,相较于对照组的平均座果率 20.33%,施用芸苔素甾醇可以提高桃树的座果率,高质量分数处理平均座果率为 37.15%,低质量分数处理的平均座果率为 37.28%,与对照相比分别提升 83.40% 和 83.74%,但高质量分数处理和低质量分数处理之间的差异并不显著。可以看出,2 个质量分数的芸苔素甾醇对于桃树的坐果都有促进作用,但在促进效果上面的差异并不明显。

2.2 不同质量分数芸苔素甾醇对桃单果质量和果核质量的影响

根据图 1 所示,喷施不同质量分数的芸苔素甾醇对桃的单果质量和果核质量均有显著影响。对照组的平均单果质量 66.47 g(见图 1B),高质量分数处理和低质量分数处理的平均单果质量分别为 89.71 g 和 97.42 g,比对照分别增加了 34.8% 和 46.5%。同时,高质量分数处理和低质量分数处理的平均果核质量分别为 9.42,10.48 g,相较于对照的平均果核质量 7.95 g(见图 1C),增加了 18.6% 和 31.8%。然而,高质量分数与低质量分数处理之间的差异并不显著。此外,对座果率与单果质量以及单果质量与果核质量的相关性分析结果表明,施用了芸苔素甾醇后可以在提高座果率的同时增加果实的单果质量(见图 1D),但是果核的质量也随之增加(见图 1E)。因此,喷施适量的芸苔素甾醇可以提高桃的单果质量和总产量,但需要注意果核质量的增加。

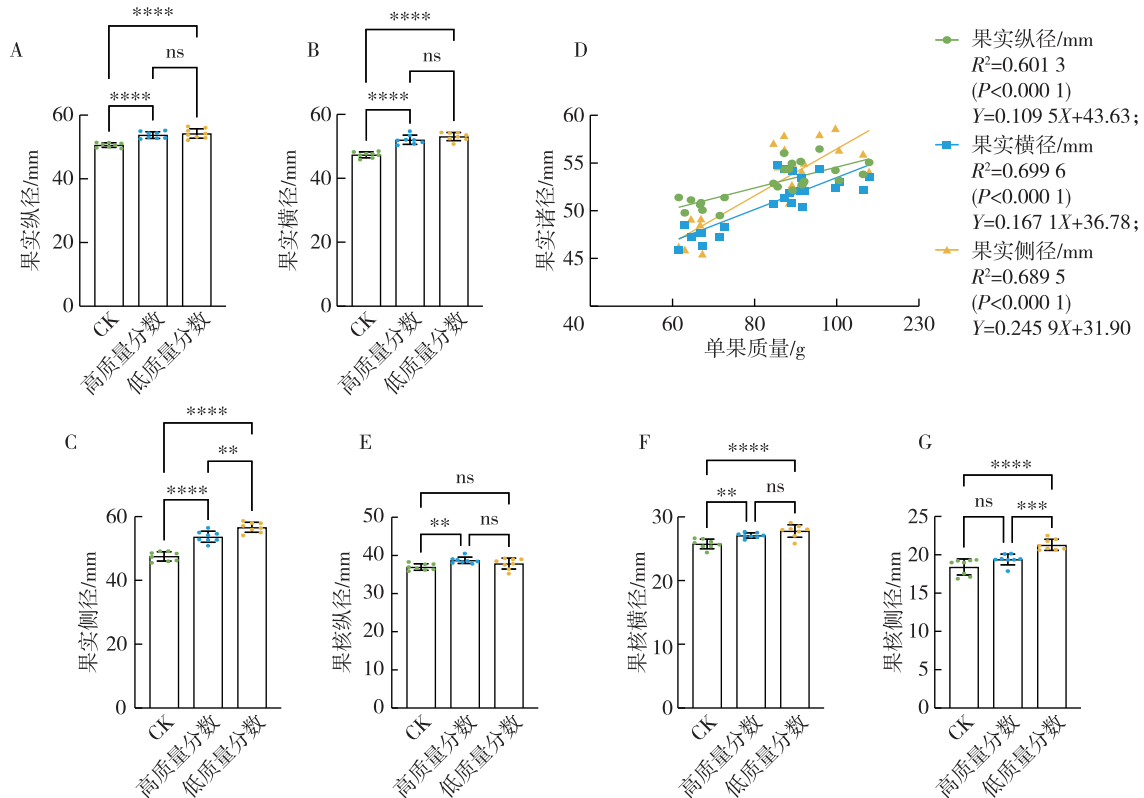
2.3 不同质量分数芸苔素甾醇对桃果实和果核大小的影响

不同质量分数芸苔素甾醇对桃果实大小的影响如图 2 所示,可以看出对于果实纵径,对照的平均果实纵径为 50.93 mm,高质量分数处理的平均果实纵径为 53.64 mm,低质量分数处理的平均果实纵径为 54.93 mm,对照与高质量分数和低质量分数处理之间的差异显著,高质量分数处理与低质量分数处理之间的差异并不显著(见图 2A)。对于果横径,对照的平均果横径为 47.14 mm,高质量分数处理的平均果横径为 52.31 mm,低质量分数处理的平均果横径为 53.27 mm,对照与高质量分数处理,对照与低质量分数处理之间的差异显著,高质量分数处理与低质量分数处理之间的差异并不显著(见图 2B)。对于果侧径,对照组的平均果侧径为 47.16 mm,高质量分数处理的平均果侧径为 54.32 mm,低质量分数处理的平均果侧径为 56.97 mm。相较于对照,低质量分数处理和高质量分数处理的果纵径分别提高了 7.39% 和 5.12%,果横径分别提高了 12.60% 和 10.98%,果侧径分别提高了 20.62% 和 15.15%,3 者之间差异显著(见图 2C)。由此可见,相较于对照,芸苔素甾醇可以提高桃果实的果径,其中,低质量分数芸苔素甾醇可以更好地增加果实侧径,此外,果实质量与果实侧径大小的相关性更强(见图 2D)。



A. 座果率;B. 单果质量;C. 果核质量。A-C 中 * * * 代表 $P < 0.001$, * * * * 代表 $P < 0.0001$, ns 为不存在显著性差异。D. 座果率与单果质量的相关性分析;E. 单果质量与果核质量的相关性分析

图1 芸苔素甾醇对桃座果率、单果质量和果核质量的影响



A. 果实纵径;B. 果实横径;C. 果实侧径;D. 单果质量与果径的相关性分析;E. 果核纵径;F. 果核横径;G. 果核侧径。* * 代表 $P < 0.01$, * * * 代表 $P < 0.001$, * * * * 代表 $P < 0.0001$, ns 为不存在显著性差异

图2 不同质量分数芸苔素甾醇对桃果实和果核大小的影响

不同质量分数芸苔素甾醇对桃果核大小的影响如图 2 所示,对照的平均果核纵径为 36.74 mm,高质量分数处理的平均果核纵径为 38.94 mm,低质量分数处理的平均果核纵径为 38.10 mm,高质量分数处理和低质量分数处理的平均果核纵径分别增加了 5.78% 和 3.15%,对照与高质量分数处理差异显著、高质量分数处理与低质量分数处理以及低质量分数处理与对照均不存在显著差异(见图 2E)。

对于果核横径,对照的平均果核横径为 25.57 mm,高质量分数处理的平均果核横径为 26.96 mm,低质量分数处理的平均果核横径为 27.95 mm,高质量分数处理和低质量分数处理的平均果核横径分别增加了 5.37% 和 9.10%,对照与处理之间的差异显著,高质量分数处理与低质量分数处理之间的差异并不显著(图 2F)。

对于果核侧径,对照的平均果核侧径为 18.22 mm,高质量分数处理的平均果核侧径为 19.54 mm,低质量分数处理的平均果核侧径为 21.16 mm。高质量分数处理和低质量分数处理的平均果核侧径分别增加了 7.50% 和 16.00%,对照与低质量分数处理以及高质量分数处理与低质量分数处理组之间的差异显著,对照与高质量分数处理之间不存在显著差异(见图 2G)。

由此得出,相较于对照,高质量分数芸苔素甾醇可以提高桃核纵径,而低质量分数芸苔素甾醇可以有效提高桃核横径和侧径。

2.4 不同质量分数芸苔素甾醇对桃果皮色泽和品质的影响

不同质量分数芸苔素甾醇对桃果实外观的影响如图 3A,对照和高质量分数处理的果实普遍大小显著小于低质量分数处理果实,对果实性状也有显著影响,前者为卵圆形,后者近圆形,除此之外还可以看出只有高质量分数处理的着色率最高,着色较为均匀,颜色呈现红色至紫红色。对照的着色率次之,低质量分数处理的着色率最低,对照和低质量分数处理的果实表面存在果锈,光洁度不及高质量分数处理。利用色差仪对果皮色泽测定后发现,与对照相比,高质量分数处理的光泽明亮度 L^* 值和代表红色的 a^* 值最高,低质量分数处理的 L^* 值和 a^* 值最低(如图 3B 和 C),而代表黄色的 b^* 值中,则是低质量分数处理最高,高质量分数处理最低(如图 3D),差异显著,综上所述,喷施高质量分数芸苔素甾醇可以提高桃果皮的光洁度,而低质量分数的芸

苔素甾醇可能会降低桃果皮着色度。

为了进一步探究不同质量分数芸苔素甾醇对桃果实品质的影响,测定了对照和处理桃果实的可溶性固形物和可滴定酸含量并对果皮色泽和果实内在品质进行了相关性分析。结果表明,对照的平均可溶性固形物含量为 10.45%,高质量分数处理的平均可溶性固形物含量为 11.58%,低质量分数处理的平均可溶性固形物含量为 12.94%,相较于对照,低质量分数处理和高质量分数处理的平均可溶性固形物含量分别提高了 23.44% 和 10.00%,3 个处理之间存在显著差异(如图 3E)。此外,3 个处理中可滴定酸含量最高的为对照 7.9%,高质量分数处理的平均可滴定酸含量为 6.6%,低质量分数处理的平均可滴定酸含量为 4.8%。相较于对照,低质量分数处理和高质量分数处理的平均可滴定酸含量分别减少了 39.24% 和 16.46%,其中对照与低质量分数处理和高质量分数处理之间的差异均显著(如图 3F)。相关性分析表明,本研究中利用芸苔素甾醇处理桃树后,桃果皮的 L^* 值与 a^* 值呈现显著的正相关性,与 b^* 值呈现显著的负相关性,而与可溶性固形物和可滴定酸含量均无相关性(如图 3G)。 a^* 值与可滴定酸含量成正相关(如图 3H), b^* 值与可滴定酸含量成负相关(如图 3I),与可溶性固形物均无相关性。

3 讨论和结论

3.1 芸苔素甾醇对桃树果实品质的影响

芸苔素甾醇对植物的生长和发育、代谢和逆境抗性等方面都有促进作用。在果树中,芸苔素甾醇也被发现能够促进果实的生长和发育,提高果实品质^[17-18]。天然提取的 14-羟基芸苔素甾醇母液中通常含有多种芸苔素甾醇结构类似物,具有比人工合成的芸苔素内酯更佳的活性^[19],已被证明可以有效提高红心猕猴桃^[20]、柑橘等果树的座果率^[4]。芸苔素内酯可促进双子叶植物的下胚轴和上胚轴部位伸长,还可促进单子叶植物的花轴、胚芽鞘和中胚轴的伸长,植物增加了花粉管就可以提高植物的受精率,进而提高结实率和座果率,提高成熟作物的粒数和粒质量^[17]。本研究结果表明,施用芸苔素甾醇可以显著提高桃树的座果率、单果质量和可溶性固形物含量,同时增加果核大小,降低可滴定酸含量。其中,低质量分数处理和高质量分数处理的坐果率分别提高了 83.4% 和 83.74%,单果质量分别

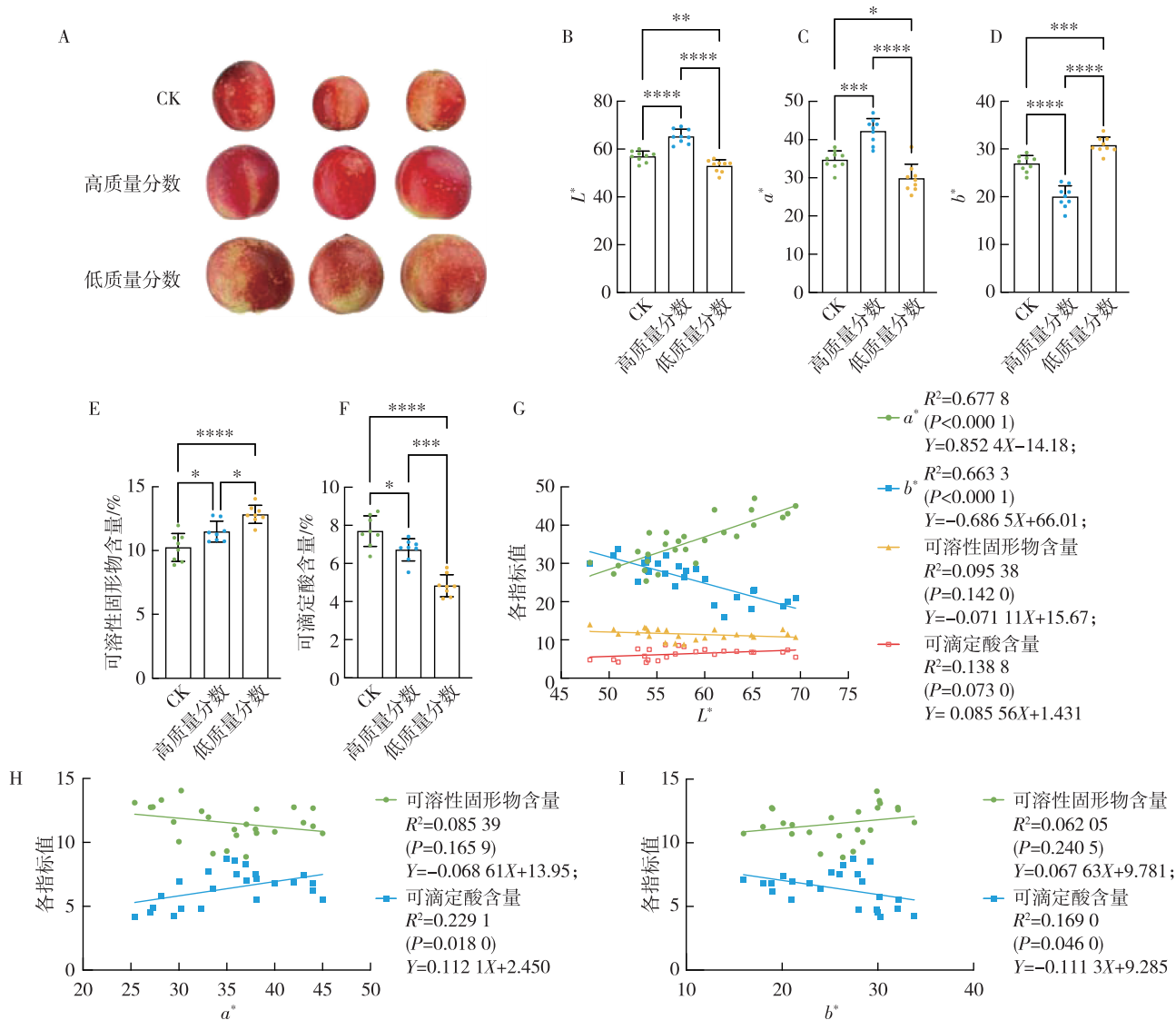


图3 不同质量分数芸苔素甾醇对桃色泽和品质的影响

提高了 46.5% 和 34.8%, 可溶性固形物含量分别提高了 23.44% 和 10.00%, 果核大小分别增加了 3.15% 和 5.78%。因此, 14-羟基芸苔素甾醇对桃树果实品质具有重要的促进作用。其中, 14-羟基芸苔素甾醇能够提高座果率, 这可能是因为芸苔素甾醇能够促进花粉萌发、花粉管生长和授粉等过程, 从而提高了果实的受精率和座果率^[21]。此外, 14-羟基芸苔素甾醇还能够提高果实的单果质量和可溶性固形物含量, 这可能是因为芸苔素甾醇能够促进果实的细胞分裂和扩张, 增加果实的生长速度和大小, 并且能够促进果实的糖代谢和积累, 提高果实的甜度和口感。

此外, 本研究结果还表明, 14-羟基芸苔素甾醇能够增加果核大小, 降低可滴定酸含量。可能是因为芸苔素甾醇能够影响果实细胞壁的合成和降解, 从而影响果实的质地和品质, 未来还需要进一步的研究探究其原因。

3.2 最佳芸苔素甾醇质量分数的研究

在本研究中, 施用 14-羟基芸苔素甾醇的最佳质量分数需要进一步研究。发现对照与低质量分数处理之间的差异显著, 而高质量分数处理与低质量分数处理之间的很多品质参数差异则不显著。因此, 在实际应用中, 需要找到最佳的施用质量分数, 以达到最佳促进果实品质的效果。在进一步研

究芸苔素甾醇质量分数对桃树果实品质的影响时,需要注意以下几点:首先,芸苔素甾醇含量过低可能无法达到最佳促进果实品质的效果,而芸苔素甾醇含量过高则可能限制桃树的生长和发育,影响果实品质。因此,在确定最佳施用质量分数时,需要进行一定的试验和调节,以找到最佳的施用含量。其次,不同品种的桃树可能对芸苔素甾醇含量的反应不同,因此在实际应用中需要根据不同品种的特点确定最佳施用含量。同时,还需要考虑不同季节和环境条件的影响,以确定最佳的施用含量和施用时间。最后,芸苔素甾醇的施用方式和时间也需要进行进一步的研究,以确定最佳的施用方式和时间。例如,可以研究不同施用方式(如喷雾、灌溉、土壤施用等)对果实品质的影响,以及不同施用时间(如开花前、开花后、果实膨大期等)对果实品质的影响^[17, 22]。

3.3 芸苔素甾醇对果实品质的机理研究

芸苔素甾醇对桃树果实品质的影响机理尚未完全阐明,但目前已有一些研究表明,可能与以下几个方面有关:首先是调节植物激素的合成和代谢。植物激素是植物生长和发育的重要调节因子,包括生长素、赤霉素、细胞分裂素等。研究表明,芸苔素甾醇能够促进植物激素的合成和代谢,从而影响果实发育和品质。其次是影响果实细胞壁的合成和降解。果实细胞壁是果实质地和品质的重要组成部分,包括纤维素、半纤维素、木质素等。研究表明,芸苔素甾醇能够影响果实细胞壁的合成和降解,从而影响果实的质地和品质。最后是调节果实的代谢途径。果实的代谢途径包括糖代谢、酸代谢、脂类代谢等。研究表明,芸苔素甾醇能够促进果实的糖代谢和积累,提高果实的甜度和口感。

总的来说,芸苔素甾醇施用量对桃树果实品质的影响是一个复杂的问题,需要综合考虑多个因素,以确定最佳的施用量和方式,提高果实品质和产量。本研究结果表明芸苔素甾醇对桃树果实品质具有明显的促进作用,这为果树生长调控和果实品质提高提供了新的思路和方法。未来也需要进一步研究芸苔素甾醇对桃树果实品质的影响机理,以更好地理解芸苔素甾醇的促进作用,并为果树生长调控和果实品质提高提供更深入的理论基础。

参考文献:

[1] 俞明亮,王力荣,王志强,等.新中国果树科学研究 70 年——桃[J].果树学报,2019,36(10): 1283-1291.

[2] 胡恩旗.海南油茶克服大小年的保花保果与施肥技术研究[D].海口:海南大学,2017.

[3] 薛琴琴,袁嘉玮,张健,等.春季果园晚霜冻害对果树的影响及防御措施[J].山西果树,2019, 3(3): 51-53.

[4] 白霜. 40%赤霉素·14-羟基芸苔素甾醇可溶粒剂的研制[D].雅安:四川农业大学,2019.

[5] MITCHELL J, MANDAVA N, WORLEY J, et al. Brassins—a new family of plant hormones from rape pollen [J]. Nature, 1970, 225(5237): 1065-1066.

[6] GROVE M D, SPENCER G F, ROHWEDDER W K, et al. Brassinolide, a plant growth-promoting steroid isolated from *Brassica napus* pollen [J]. Nature, 1979, 281(5728): 216-217.

[7] MANDAVA N B. Plant growth-promoting brassinosteroids [J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1988, 39(1): 23-52.

[8] FARIDUDDIN Q, YUSUF M, AHMAD I, et al. Brassinosteroids and their role in response of plants to abiotic stresses [J]. Biologia Plantarum, 2014, 58(5): 9-17.

[9] GUDESBLAT G E, RUSSINOVA E. Plants grow on brassinosteroids [J]. Current Opinion in Plant Biology, 2011, 14(5): 530-537.

[10] BAJGUZ A, HAYAT S. Effects of brassinosteroids on the plant responses to environmental stresses [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2009, 47(1): 1-8.

[11] KUTSCHERA U, WANG Z Y. Brassinosteroid action in flowering plants: a Darwinian perspective [J]. Journal of Experimental Botany, 2012, 63(10): 3511-3522.

[12] LI Z C, HE Y H. Roles of brassinosteroids in plant reproduction [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2020, 21(3): 872.

[13] BAJGUZ A, TRETYN A. The chemical characteristic and distribution of brassinosteroids in plants [J]. Phytochemistry, 2003, 62(7): 1027-1046.

[14] BAJGUZ A. Metabolism of brassinosteroids in plants [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2007, 45(2): 95-107.

[15] 汪耀辉,龙晓莉,杜卉芳.生长调节剂和营养类物质对大樱桃坐果率的影响[J].北方果树,2020, 6(6): 13-14.

[16] 郑奇志.植物生长调节剂对上海地区甜樱桃座果率及果实品质的影响[D].上海:上海交通大学,2019.

[17] 孙陈铭,蔡岩,苗志伟.新型绿色植物生长调节剂——芸苔素内酯的研究进展[J].化学教育(中英文), 2022, 43(6): 1-8.

[18] 孙石昂,何发林,姚向峰,等.芸苔素内酯可提高玉米幼苗的抗旱性[J].植物生理学报,2019,55(6): 829-836.

[19] HE Q M. Preparation method, agricultural composition and applications of natural brassinolide analogs: US, 201214371216 [P]. 2016-05-03.

[20] 李玉珠,王艳玲,吴丹,等.天然植物生长调节剂 14-羟基芸苔素甾醇在猕猴桃授粉中的应用 [J]. 北方果树, 2021, 5(5): 5-8.

[21] 刘北城.外源 14-羟基芸苔素甾醇对冬小麦穗花发育与结实的影响[D].郑州:河南农业大学, 2021.

[22] 刘北城,张艳艳,戎亚思,等.干旱胁迫下喷施 14-羟基芸苔素甾醇对冬小麦穗花发育及碳氮代谢的调控[J].植物营养与肥料学报,2021,27(6): 1004-1015.