网络出版时间:2025-11-26 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.05.002

外施芥子酸对猕猴桃叶片光合特性及果实品质的影响

田海花,王水莲,魏晓钰,祝令成,李明军
(西北农林科技大学 园艺学院,陕西 杨凌 712100)

[摘 要] 【目的】探究芥子酸对猕猴桃光合特性及果实品质的影响,为猕猴桃果实品质提升提供理论依据和技术支撑。【方法】以美味猕猴桃优系'23-1'为研究材料,设置0.25,0.5和1.0 mmol/L 3个芥子酸浓度梯度,采用喷施和根灌2种方式处理,系统探究芥子酸对猕猴桃光合特性以及果实外观和内在品质的影响。【结果】芥子酸处理可提高猕猴桃各发育阶段叶片叶绿素含量,以0.5 mmol/L根灌处理效果最显著;提高猕猴桃叶片净光合速率、胞间CO_2浓度及气孔导度,改善叶片光合效率,其中以1.0 mmol/L喷施处理效果最明显。根灌和喷施1.0 mmol/L芥子酸均可显著提升果实成熟期单果质量,且效果优于其他处理,增幅分别达到17.8%和15.9%;0.5 mmol/L芥子酸喷施处理的后熟后果实可溶性固形物含量显著提高了9.76%,但维生素C与类黄酮含量显著降低。1.0 mmol/L根灌处理的后熟后果实可溶性固形物、维生素C含量分别提高了9.05%和54.71%。【结论】综合分析芥子酸对猕猴桃叶片光合特性和果实品质的影响,认为1.0 mmol/L芥子酸根灌处理效果最佳。

[关键词] 猕猴桃;芥子酸;喷施;根灌;果实品质;叶片光合特性
[中图分类号] S663.4 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)05-0013-08

Effects of exogenous application of sinapic acid on hotosynthetic characteristics of kiwifruit leaves and fruit quality

TIAN Haihua, WANG Shuilian, WEI Xiaoyu, ZHU Lingcheng, LI Mingjun
(*College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: 【Objective】 This study investigated the effects of sinapic acid treatment on photosynthetic characteristics and fruit quality of kiwifruit, to provide a theoretical foundation and technical support for improving kiwifruit fruit quality. 【Method】 Using the superior line '23-1' of Actinidia deliciosa as experimental material, three sinapic acid concentration gradients (0.25, 0.5, and 1.0 mmol/L) were established and two treatment methods (foliar spraying and root irrigation) were applied in this study to systematically analyze the effects of sinapic acid on the photosynthetic characteristics of kiwifruit plants and the external/internal quality of the fruits. 【Result】 The application of sinapic acid enhances chlorophyll content in kiwifruit leaves across various developmental stages, with the 0.5 mmol/L root irrigation showing the most significant effect. The treatment improved leaf photosynthetic efficiency by increasing net photosynthetic rate, intercellular CO_2 concentration, and stomatal conductance, with the 1.0 mmol/L foliar spraying showing the most significant effect. Both root irrigation and foliar spraying treatments with 1.0 mmol/L sinapic acid significantly enhanced individual fruit weight during maturation stage, with increases of 17.8% and 15.9%, respectively, outperforming other treatments. Post-ripe-

[收稿日期] 2025-03-06 [修回日期] 2025-04-15
[基金项目] 中国博士后科学基金项目(2023M742870);陕西省博士后科研项目(2023BSHTBZZ24)
[作者简介] 田海花(1998—),女(回族),宁夏中卫人,硕士,主要从事猕猴桃果实品质研究。E-mail:thh1991331942@163.com
[通信作者] 李明军(1981—),男,甘肃泾川人,教授,博士,博士生导师,主要从事苹果果实品质研究。E-mail:limingjun@nwsuaf.edu.cn

ning fruits treated with 0.5 mmol/L foliar spraying exhibited a notable increase of 9.76% in soluble solids content, though accompanied by significant reductions in vitamin C and flavonoid content. Conversely, 1.0 mmol/L root irrigation treatment elevated post-ripening fruit quality by increasing soluble solids and vitamin C content by 9.05% and 54.71%, respectively. 【Conclusion】 Based on the integrated analysis of overall effects of sinapic acid on the photosynthetic characteristics of kiwi leaves and fruit quality, the 1.0 mmol/L root irrigation treatment was determined to be the most effective.

Key words: kiwifruit; sinapic acid; spraying; root irrigation; fruit quality; photosynthetic characteristics

猕猴桃属于猕猴桃科(Actinidiaceae)猕猴桃属(*Actinidia* Lindl)木质藤本植物[1]。猕猴桃果实富含维生素C、膳食纤维、多种矿物质及氨基酸等[2],其较高的营养价值和别具一格的风味,广受消费者青睐。中国猕猴桃产业起步于20世纪70年代,并于90年代进入快速发展期,如今我国猕猴桃的种植面积和产量均位居全球第一。但我国猕猴桃产业发展仍面临三重挑战:果实品质与产业发达国家相比仍有提升空间[3],产地收购价持续走低致果农收益下滑[4],国际市场拓展面临瓶颈。作为产业发展的核心要素,果实品质不仅直接关系果农的经济收益和果实的市场竞争力,更制约着整个产业的发展进程,因此提升猕猴桃果实品质已成为推动我国猕猴桃产业实现可持续、高质量发展亟待解决的关键问题[5]。

芥子酸(sinapic acid),即白芥酸,化学名3,5-二甲氧基-4-羟基肉桂酸($C_{11}H_{12}O_5$),在植物界广泛存在,常见于香料、水果、蔬菜、谷物以及油料作物中,其中菜籽粕中芥子酸含量高达12.81 mg/g[6]。近年来研究发现,芥子酸及其衍生物在植物种子萌发、幼苗生长、气孔运动和根系发育等方面发挥着重要作用。BI等[7]研究发现,外源施加低浓度(0.1~1 mmol/L)芥子酸不仅能显著促进拟南芥种子的萌发,还可部分逆转脱落酸(ABA)对种子萌发的抑制作用。王红[8]研究证实,紫外线B处理能够诱导拟南芥叶片中芥子酰苹果酸(sinapoyl malate)的积累,进而通过调控保卫细胞离子通道而影响气孔的关闭。李坤等[9]研究发现,紫外线B(UV-B)辐射芥子酸合成代谢相关基因(如*BRT1*和*SNG1*)缺失突变的拟南芥材料,叶片气孔开度显著低于野生型对照材料,进一步证实了芥子酸代谢在气孔运动中的调控作用。在根系发育方面,王红[8]研究显示,外源施加芥子酸能够显著影响拟南芥幼苗根的向重力性生长,抑制主根生长,同时促进侧根的发育。芥子酸及其衍生物还在植物的抗氧化防御、抗菌和抗逆境胁迫等方面发挥重要作用。例如,芥子酸能够清除自由基,抑制脂质过氧化,增强植物的抗氧化能力[10];芥子酸可以抑制灰霉病菌等病原菌菌丝扩展,抑菌率达60%以上[11];朱四元等[12]通过大田试验证实,芥子酸可以显著提高苎麻的农艺性状、根系活力、叶绿素含量及抗氧化系统酶活性等指标,有效缓解苎麻的连作障碍。

芥子酸可调控植物叶片气孔运动,提高叶绿素含量,提升植物叶片光合作用,影响果实品质,而目前关于芥子酸对猕猴桃品质影响的研究尚未见报道。本试验以本课题组自主选育的美味猕猴桃(*Actinidia deliciosa*)优系'23-1'为试材,对其外源施加梯度浓度芥子酸,系统监测果实发育过程中单果质量、纵横径、硬度等外观品质参数,以及可溶性固形物、可滴定酸、抗氧化类物质等内在品质指标,解析芥子酸对猕猴桃果实品质性状的影响,以期为猕猴桃果实品质改良技术体系的建立提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材 料

试验在西北农林科技大学杨凌综合试验示范站进行,试验站地理位置为东经107°59′—108°08′、北纬34°17′—34°20′。试验材料为本课题组通过杂交育种筛选获得的美味猕猴桃优良单株'23-1',株行距为3 m×4 m,架型为双主蔓"T"字形,即每个植株保留1个主干和2条主蔓,配套常规化果园管理措施。

1.2 试验设计

在猕猴桃园中选取140株生长状况、生态环境和栽培管理条件均相同的猕猴桃树,均分为对照组(CK)和T1~T6组,从2024-05-15开始每隔15 d处理1次,共处理5次。CK组喷施清水,5 L/棵;T1~T3分别喷施0.25,0.50和1.00 mmol/L芥子酸溶液,5 L/棵,芥子酸溶液需均匀喷至叶片正反两面至液滴下坠为准;T4~T6分别根灌0.25,0.50和1.00 mmol/L芥子酸溶液,5 L/棵,芥子酸溶液在距

离主干两侧 30 cm 处开沟灌入。

于授粉后 30 d 开始采集叶片，每隔 30 d 采 1 次，共采 3 次，每个处理选择长势一致的猕猴桃树 5 株，从每株树东、南、西、北 4 个方向选取新梢中部成熟叶各采 1 片，放冰盒带回实验室测叶绿素含量。果实于授粉后 30，45，60，75，90，120，140 d 采样，从每株树东、南、西、北 4 个方向均匀随机采摘果实 4 个，3 株为一个生物学重复，每个生物学重复 12 个果实，采摘的果实无病虫害，编号标记。将成熟期采摘果实放置自然常温条件软熟后测定其各项品质指标。果实品质基础指标测定完成后，用于测定抗坏血酸、总酚及类黄酮等含量的样品立即放入液氮中速冻后，在－80 ℃冰箱中保存，备用。

1.3　测定指标及方法

1.3.1　叶片叶绿素含量　参照郝建军等[13]的乙醇-丙酮联合提取法并加以改进。具体操作如下：取新鲜猕猴桃叶片，使用 5 mm 打孔器沿叶脉间区域取样，每个处理重复取样 20 个叶盘，放入含有 10 mL 浸提液（V（体积分数 95% 乙醇）：V（体积分数 80% 丙酮）=1∶1）的容量瓶中，避光浸提 24 h，每 12 h 颠倒混匀 1 次，直至叶片完全脱色，用紫外-可见光分光光度计测定提取液在 665 和 649 nm 波长处的吸光值 A_{665}、A_{649}。

叶绿素含量计算公式如下：

单位面积叶绿素 a 含量（mg/cm^2）=（13.95A_{665}－6.88A_{649}）×提取液体积/叶片面积，

单位面积叶绿素 b 含量（mg/cm^2）=（24.96A_{649}－7.32A_{665}）×提取液体积/叶片面积。

1.3.2　叶片光合参数　2024-08-20 09：00－11：00（天气晴朗，光合有效辐射强度≥1 800 μmol/（m·s）测定叶片的光合参数。使用便携式光合仪（Li-6800，LI-COR Biosciences，USA），按以下规范采集数据：每个处理组中选取 5 株生长状况一致的样树，在每株树冠层中部的东、南、西、北 4 个方位各选择 1 片发育良好的成熟叶片，避开叶脉测定叶片的光合特性相关指标。

1.3.3　成熟期果实外观品质　取成熟期猕猴桃果实，使用千分之一电子天秤称量单果质量，使用数显游标卡尺测量果实的横径（D）、纵径（L），并计算出果形指数（L/D）；使用 GY-4 型硬度计（配备 10.00 mm 柱形探头），以穿刺模式（穿刺速度 2 mm/s，下压深度 8 mm）测定果实硬度，取赤道部 3 点测量，结果取平均值。

1.3.4　果实内在品质　可溶性固形物（TSS）、可滴定酸（TA）测定分别用便携式数显折光仪（AL-1ATAGO，日本）、果实酸度仪（GMK-835F，韩国）测定。

1.3.5　果实抗氧化指标　软熟果实的还原性抗坏血酸（维生素 C，Vc）含量测定：称取约 0.5 g 猕猴桃果实冻干样粉末，加入 1 mL 预冷的提取液，进行冰浴匀浆，室温静置 10 min 后，4 ℃下 12 000 r/min 离心 10 min，取上清液，采用还原性抗坏血酸维生素 C 试剂盒（ADS-W-V004，艾迪生）测定 Vc 含量。总酚、类黄酮含量测定：将猕猴桃冷冻样本粉碎，分别称取约 0.1 和 0.02 g 加入 2 mL 提取液，60 ℃振荡提取 2 h。25 ℃下 10 000 r/min 离心 10 min，取上清液，用提取液定容至 2 mL，分别采用总酚（Tp）试剂盒（ADS-W-KY008-96，艾迪生）、植物类黄酮试剂盒（YX-W-A506，艾迪生）测定总酚和类黄酮含量。

糖酸协同调控效率（carbohydrate-acid coordination efficiency，CE）是复合评价指标，可量化处理措施对果实糖分积累与有机酸代谢的协同调控能力，其计算公式为：

$$CE=\frac{|\Delta TSS|\times|\Delta TA|}{(\Delta TSS)^2}\times\sqrt{\frac{R_{TSS/TA}}{R_{baseline}}}。$$

式中：ΔTSS、ΔTA 分别为可溶性固形物和可滴定酸的变化量，通常以百分比单位表示；$R_{TSS/TA}$ 为糖酸比；$R_{baseline}$ 为基准糖酸比，指试验对照组或理想状态下的糖酸比[14]。

1.4　数据处理

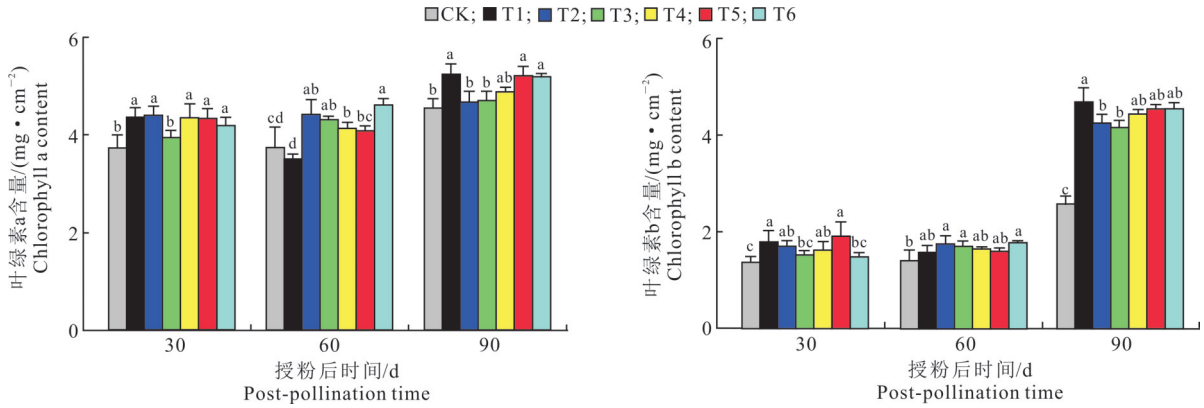
利用 Microsoft Office Excel 2019（Microsoft Corp.）软件对数据进行处理，基于 SPSS Statistics 27.0（IBM Corp.）软件进行方差分析，检验组间差异显著性（$P<0.05$），用 Graphpad Prism 9.0.0（GraphPad Software）生成统计图表。

2　结果与分析

2.1　芥子酸对猕猴桃叶片叶绿素含量的影响

图 1 表明，大部分芥子酸处理提高了猕猴桃叶片叶绿素 a、b 含量。授粉后 30 d，与对照组相比，喷施芥子酸处理猕猴桃叶片叶绿素 a 含量提高了 5.8%～17.4%，叶绿素 b 含量提高了 12.2%～32.5%，其中 T1 处理对叶绿素 a、b 的提高幅度最大（$P<0.05$）；根灌处理叶绿素 a 含量提高了 11.8%～16.4%，叶绿素 b 含量提高了 8.7%～39.8%，其中 T5 处理提高最多。授粉后 60 d，芥子酸喷施处理叶

绿素a(除T1组外)、b含量较对照分别增加了15.2%～17.8%和12.4%～23.4%,以T2处理提高幅度最大;根灌处理以T6组叶绿素a、b含量提高幅度最大;从叶绿素平均提高幅度来看,根灌处理效果优于喷施处理。授粉后90 d,芥子酸喷施处理中T1组叶绿素a含量较CK提高幅度最大(15.57%)($P<0.05$),叶绿素b含量提高亦最显著(83.2%)($P<0.05$);芥子酸根灌处理中,T5组叶绿素a含量增幅最高(14.47%)($P<0.05$),叶绿素b含量增幅亦最高;根灌处理叶绿素含量平均提高效果优于喷施处理。从整个时期看,芥子酸处理对叶绿素a含量的平均提高幅度表现为:T6(16.3%)>T5(13.3%)>T1(12.9%)>T2(12.6%)>T4(11.2%)>T3(8.1%),对叶绿素b含量的平均提高幅度表现为T5(43.9%)>T1(42.6%)>T2(38.4%)>T6(36.7%)>T4(35.9%)>T3(31.4%)。



图柱上标不同小写字母表示同一时间不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Different lowercase letters above the bars indicate significant differences among treatments at the same time point ($P<0.05$). The same below.

图1 芥子酸处理对猕猴桃叶片叶绿素含量的影响

Fig. 1 Effects of sinapic acid treatment on chlorophyll content in kiwifruit leaves

2.2 芥子酸处理对猕猴桃叶片光合作用的影响

表1表明,外源芥子酸处理可改善猕猴桃叶片的光合性能。喷施处理(T1、T2、T3)P_n、C_i均显著高于对照,其中T3处理效果最好,其P_n、C_i较对照分别显著提高了48.5%和5.2%($P<0.05$);喷施处理G_s与对照无显著差异。根灌处理(T4、T5、T6)P_n、C_i和G_s均显著高于对照,其中T6处理对P_n作用最明显,较对照提高了33.2%($P<0.05$);T5处理对C_i和G_s作用最明显,较对照分别提高了4.9%和30.0%。喷施与根灌相比,喷施处理P_n平均增幅较根灌高6.45%,根灌处理G_s平均增幅较喷施高10.25%,但两者C_i提升幅度差异不足1%。所有处理对蒸腾速率(T_r)均无显著影响。

表1 芥子酸处理对猕猴桃叶片净光合速率、胞间二氧化碳浓度、气孔导度和蒸腾速率的影响

Table 1 Effects of sinapic acid treatments on net photosynthetic rate, intercellular carbon dioxide concentration, stomatal conductance, and transpiration rate of kiwifruit

组别 Groups	净光合速率(P_n) Net photosynthetic rate	胞间CO_2浓度(C_i) Intercellular CO_2 concentration	气孔导度(G_s) Stomatal conductance	蒸腾速率(T_r) Transpiration rate
CK	12.58±1.54 c	314.38±5.50 d	494.77±35.06 c	1.67±0.11 a
T1	16.92±1.44 ab	324.50±4.11 bc	560.40±58.68 bc	1.69±0.18 a
T2	15.89±1.39 b	321.95±3.91 c	518.63±42.02 bc	1.61±0.09 a
T3	18.69±1.30 a	330.99±2.54 a	555.75±38.66 bc	1.65±0.14 a
T4	16.18±1.42 b	327.56±4.42 abc	590.19±66.54 ab	1.63±0.19 a
T5	16.14±1.28 b	329.87±5.52 ab	643.40±61.70 a	1.72±0.17 a
T6	16.76±1.21 b	322.75±4.47 c	553.30±57.69 bc	1.64±0.13 a

注:同列数据后标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下表同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$). The same below.

2.3 芥子酸处理对成熟期猕猴桃果实外观品质的影响

由表2可以看出,喷施处理(T1、T2、T3)单果质量均增大,其中T3处理效果最好,较对照显著增加了15.9%;T2和T3处理果实硬度与对照无显著性差异,T1处理显著降低了17.2%;果实纵径、横

径以及果形指数与对照无显著差异。根灌处理（T4、T5、T6）单果质量均显著高于对照，其中 T6 处理效果最好，较对照显著提高了 17.8%（$P<0.05$）；果实硬度 T4 和 T6 处理与对照无显著差异，T5 处理较 CK 显著提高了 19.1%；果实纵径、横径以及果形指数与对照均无显著差异。与喷施处理相比，根灌处理对单果质量的提高效果更好。

表 2　芥子酸处理对成熟期猕猴桃单果质量、纵径、横径、果形指数、硬度的影响

Table 2　Effects of sinapic acid treatment on single fruit mass, longitudinal diameter, transverse diameter, fruit shape index, and firmness of kiwifruit

组别 Groups	单果质量/g Single fruit mass	纵径/mm Longitudinal diameter	横径/mm Transverse diameter	果形指数 Fruit Shape index	硬度/(kg·cm^{-2}) Firmness
CK	69.84±4.60 c	61.44±2.55 ab	50.44±3.11 a	1.22±0.06 a	3.65±0.4 bc
T1	72.27±6.17 c	59.55±2.97 b	50.13±2.25 a	1.19±0.08 a	3.02±0.3 d
T2	73.79±4.13 bc	62.66±4.15 ab	50.01±2.71 a	1.26±0.09 a	3.73±0.4 bc
T3	81.01±7.78 a	61.90±3.22 ab	52.52±2.27 a	1.18±0.08 a	3.26±0.4 cd
T4	80.23±5.90 ab	62.97±2.59 ab	50.65±2.70 a	1.25±0.09 a	3.45±0.5 bcd
T5	81.51±5.63 a	62.75±2.10 ab	51.64±2.81 a	1.22±0.09 a	4.35±0.5 a
T6	82.29±4.88 a	64.42±3.41 a	51.04±3.03 a	1.27±0.11 a	3.78±0.4 b

2.4　芥子酸对各时期猕猴桃果实内在品质的影响

芥子酸处理对猕猴桃果实可溶性固形物、可滴定酸含量及固酸比的影响见图 2。

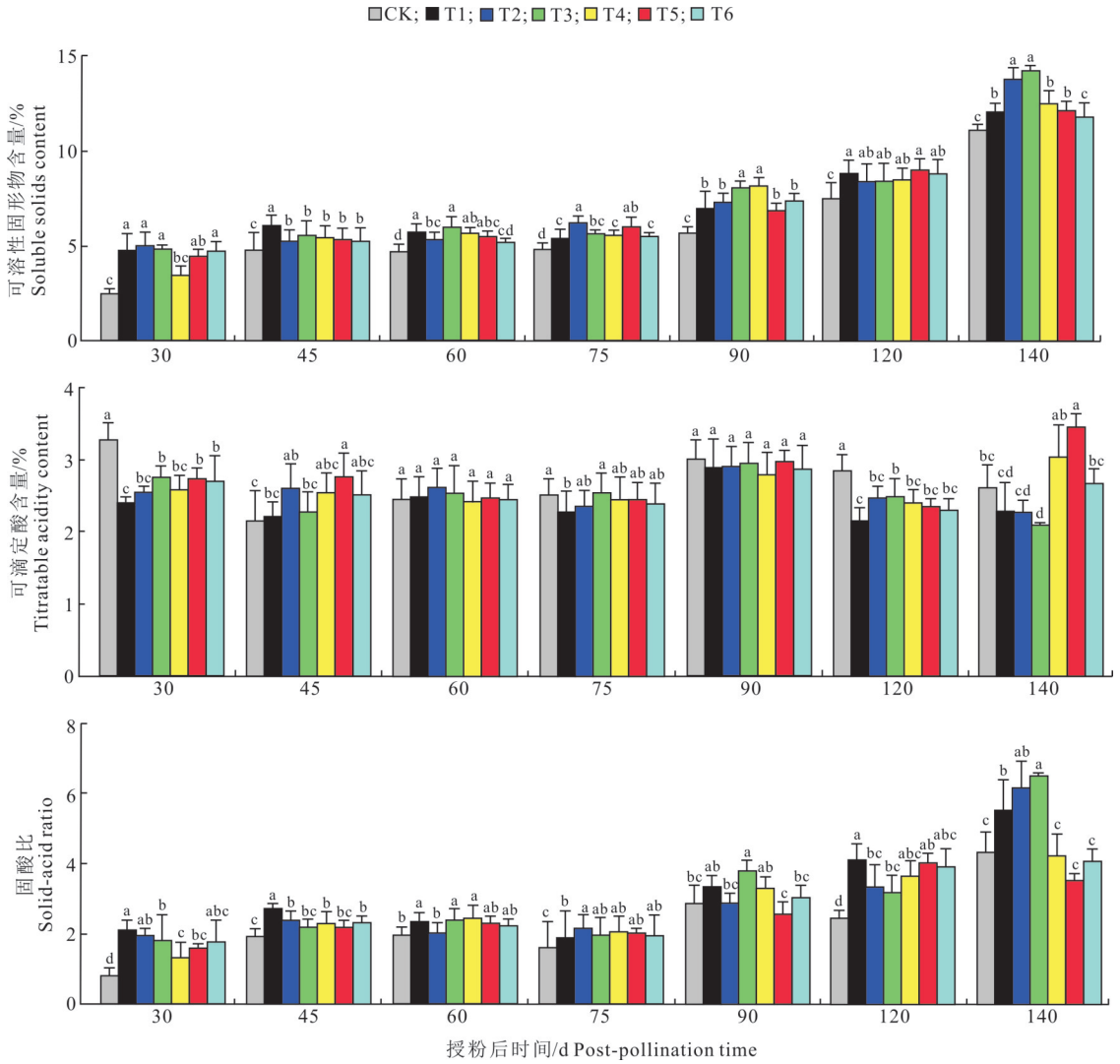


图 2　芥子酸处理对猕猴桃果实可溶性固形物、可滴定酸含量和固酸比的影响

Fig. 2　Effects of sinapic acid treatment on soluble solids, titratable acid content and solid-acid ratio of kiwifruit

由图2可知,在猕猴桃果实不同发育阶段芥子酸大多可显著提高果实可溶性固形物含量,对果实可滴定酸含量大多无显著影响,对固酸比无明显影响规律。喷施处理T3组在整个果实发育期可溶性固形物含量较对照平均提高34.37%,显著优于其他浓度喷施处理。根灌处理在果实发育不同阶段呈现不同调控效应,在果实膨大期(授粉至90 d)T6组可溶性固形物含量平均增幅最高(30.72%);在成熟期(授粉90 d后)T5组可溶性固形物含量整体提高最多,平均为14.78%。授粉后30和120 d时,芥子酸处理可滴定酸含量显著低于CK。

2.5 芥子酸对猕猴桃后熟果实品质的影响

表3显示,在果实硬度标准化条件(选择硬度在0.3~0.4 kg/cm^{2}的果实进行测定)下,芥子酸处理显著提高了后熟果实可溶性固形物含量,降低了可滴定酸含量,提高了固酸比。芥子酸喷施处理中以T2组效果最好,其可溶性固形物含量较对照提高了9.76%,可滴定酸含量降低39.2%,固酸比提升72.3%。根灌处理中T6组效果较好,其可溶性固形物含量较对照提高了9.05%($P<0.05$),可滴定酸含量降低了33.3%,固酸比提高了94.5%($P<0.05$)。计算芥子酸喷施、根灌处理的糖酸协同调控效应,结果分别为0.61和0.83。上述结果表明,芥子酸根灌处理可溶性固形物含量平均提高幅度与喷施处理相当,但CE明显优于喷施处理,喷施处理在降低可滴定酸含量和提高固酸比方面更具优势。

表3 芥子酸处理对猕猴桃后熟果实硬度、可溶性固形物和可滴定酸含量及固酸比的影响

Table 3 Effects of sinapic acid treatments on differential firmness, soluble solids, titratable acid, and solid-acid ratio of soft ripe kiwifruit

组别 Groups	硬度/(kg·cm^{-2}) Firmness	可溶性固形物含量/% Soluble solids content	可滴定酸含量/% Titratable acid content	固酸比 Solid-acid ratio
CK	0.34±0.06 a	18.44±0.76 b	0.51±0.14 a	40.21±15.02 c
T1	0.39±0.04 a	19.30±0.53 ab	0.36±0.11 ab	55.11±13.91 bc
T2	0.31±0.02 a	20.24±0.51 a	0.31±0.09 b	69.28±23.07 ab
T3	0.38±0.04 a	19.57±0.63 a	0.42±0.14 ab	51.89±30.7 bc
T4	0.32±0.05 a	19.80±0.67 a	0.39±0.09 ab	49.88±10.91 bc
T5	0.36±0.03 a	19.70±0.57 a	0.39±0.13 ab	52.25±15.87 bc
T6	0.34±0.05 a	20.11±1.01 a	0.34±0.15 ab	78.19±33.30 a

2.6 芥子酸处理对猕猴桃果实抗氧化物质的影响

芥子酸处理对猕猴桃果实中抗坏血酸、总酚、类黄酮含量(鲜质量计)的影响见表4。

表4 芥子酸处理对猕猴桃果实中抗坏血酸、总酚、类黄酮含量(鲜质量计)的影响

Table 4 Effects of sinapic acid treatment on ascorbic acid, total phenolics, and flavonoid contents (on a fresh weight basis) in kiwifruit

组别 Group	抗坏血酸/(mg·hg^{-1}) Ascorbic acid	总酚/(mg·g^{-1}) Total phenols	类黄酮/(mg·g^{-1}) Flavonoids
CK	275.23±12.22 b	0.97±0.02 a	0.72±0.03 ab
T1	142.50±10.65 c	1.06±0.06 a	0.46±0.06 c
T2	135.31±8.33 c	0.92±0.07 a	0.49±0.04 c
T3	267.22±23.14 b	1.02±0.11 a	0.49±0.05 c
T4	425.63±28.33 a	0.95±0.07 a	0.78±0.06 a
T5	392.50±35.23 a	0.92±0.08 a	0.69±0.05 ab
T6	425.83±44.44 a	1.07±0.15 a	0.60±0.07 bc

由表4可知,芥子酸喷施处理猕猴桃果实抗坏血酸含量均低于对照,其中T1、T2组分别显著降低了48.22%和50.8%($P<0.05$);果实的类黄酮含量均显著下降,降幅为31.9%~36.11%($P<0.05$)。芥子酸根灌处理猕猴桃果实抗坏血酸含量均显著高于对照组,其中T6组提高幅度最大,为54.71%;类黄酮含量随芥子酸浓度的升高而降低。芥子酸处理对总酚含量无显著影响。

3 讨 论

作为具有植物生长调节作用的天然成分,芥子酸已在相关领域得到应用。本研究系统分析了不同浓度芥子酸及施用方式对猕猴桃不同发育阶段果实品质的影响,结果表明,芥子酸可提高猕猴桃叶片叶绿素含量、净光合速率、胞间CO_2浓度以及气孔导度,增强其光合效率;可显著提升果实可溶性固形物含量,明显降低后熟果实可滴定酸含量;对猕猴桃单果质量、抗坏血酸和总黄酮含量也有一定影响。

叶绿素是光合作用的关键色素,其生物合成与积累过程受到多重因素的调控。本研究中,芥子酸提高了猕猴桃叶片叶绿素含量,提升了光合效能,

这是因为植物叶绿素含量高低与叶片光合作用的强弱呈正相关[15]，叶绿素含量升高，叶绿素-蛋白复合体的光捕获能力增强，植物能够维持更优的净光合速率（P_n）和光系统Ⅱ量子产量（F_v/F_m）[16]，进而促进叶片光合作用。

果实外观品质是评价果实商品性的关键指标之一。胡斌等[17]研究发现，喷施酚酸类物质阿魏酸可提高番茄果实的单果质量。本研究表明，作为酚酸类物质的芥子酸可提高猕猴桃果实的单果质量，这是因为芥子酸通过增强叶片光合效率，促进光合产物的合成与积累，光合产物主要以蔗糖形式通过韧皮部运输到果实中，从而促使果实单果质量增加。果实质地特性和风味品质是果实评价的核心指标。王春恒等[18]研究表明，葡萄果实喷施咖啡酸可提升蔗糖磷酸合成酶（SPS）活性，增加果实可溶性固形物含量。本研究发现，芥子酸可提高不同发育时期以及后熟后猕猴桃果实的可溶性固形物含量。芥子酸提高不同发育时期猕猴桃果实可溶性固形物含量可能是其通过激活SPS活性，促进光合产物向蔗糖转化[19]，从而提高可溶性固形物含量；芥子酸提高后熟后果实可溶性固形物含量的机理，一方面可能是芥子酸通过上调猕猴桃果实中的α-淀粉酶和β-淀粉酶活性或者通过促进乙烯的生物合成而提高淀粉降解酶的活性，导致淀粉的降解[20]，从而增加可溶性固形物的积累；另一方面可能是由于芥子酸处理增强了呼吸代谢强度[21]，加速了有机酸的氧化分解。同时，芥子酸可降低猕猴桃后熟后果实的可滴定酸含量，这可能是芥子酸通过调节激素信号通路，影响液泡质子泵活性，改变有机酸的区隔化存储[22]，从而导致果实的可滴定酸含量下降。

猕猴桃因富含抗坏血酸、多酚、类黄酮等生物活性物质而备受消费者青睐，这些物质的含量已成为衡量果实营养品质的关键指标[23]。本研究中，芥子酸不同处理方式对果实抗坏血酸含量有不同影响，喷施处理显著降低了抗坏血酸含量，而根灌处理则显著提高抗坏血酸含量。这可能是喷施的芥子酸通过角质层渗透后直接进入叶肉细胞质外体，干扰AsA合成前体（*L*-半乳糖）的跨膜运输[24]，导致抗坏血酸含量降低；而根灌芥子酸经根系共质体运输，通过木质部递送至地上部，渐进性激活*L*-半乳糖内酯脱氢酶表达，促进AsA生物合成[25]，导致抗坏血酸含量升高。总体而言，芥子酸处理对猕猴桃果实品质的调控受到施用方式和浓度的双重影响，其可能通过对抗氧化物质代谢途径的调控实现对果实生长发育和品质的影响。

[参考文献]

[1] 黄宏文. 猕猴桃属分类资源驯化栽培[M]. 北京：科学出版社，2013.
HUANG H W. *Actinidia* taxonomy germplasm domestication cultivation[M]. Beijing：Science Press，2013.

[2] 黄宏文，龚俊杰，王圣梅，等. 猕猴桃属（*Actinidia*）植物的遗传多样性[J]. 生物多样性，2000，8(1)：1-12.
HUANG H W，GONG J J，WANG S M，et al. Genetic diversity in the genus *Actinidia*[J]. Chinese Biodiversity，2000，8(1)：1-12.

[3] 钟彩虹，黄文俊，赵婷婷，等. 基于国内外期刊论文分析全球猕猴桃研究与应用进展[J]. 植物科学学报，2023，41(6)：820-834.
ZHONG C H，HUANG W J，ZHAO T T，et al. Analysis of global *Actinidia* research and application progress based on domestic and international journal papers[J]. Plant Science Journal，2023，41(6)：820-834.

[4] 何鹏，刘强，郭耀辉. 我国猕猴桃市场与产业调查分析报告[J]. 农产品市场，2021(21)：46-48.
HE P，LIU Q，GUO Y H. Investigation and analysis report on kiwifruit market and industry in China[J]. Agricultural Products Market，2021(21)：46-48.

[5] 高敏霞，冯新，赖瑞联，等. 猕猴桃果实内在品质评价指标及影响因素研究进展[J]. 东南园艺，2018，6(4)：39-44.
GAO M X，FENG X，LAI R L，et al. Research advances in the intrinsic quality evaluation indexes and impact factors of kiwifruit (*Actinidia chinensis*) fruit[J]. Southeast Horticulture，2018，6(4)：39-44.

[6] CHEN C Y. Sinapic acid and its derivatives as medicine in oxidative stress-induced diseases and aging[J]. Oxidative Medicine and Cellular Longevity，2016，2016：3571614.

[7] BI B D，TANG J L，HAN S，et al. Sinapic acid or its derivatives interfere with abscisic acid homeostasis during *Arabidopsis thaliana* seed germination[J]. BMC Plant Biology，2017，17(1)：99.

[8] 王红. 拟南芥芥子酸酯代谢调控气孔运动和根发育的机制初探[D]. 河南开封：河南大学，2018.
WANG H. Preliminary study on the mechanism of mustard acid ester metabolism regulating stomatal movement and root development in *Arabidopsis thaliana*[D]. Kaifeng，Henan：Henan University，2018.

[9] 李坤，苗雨晨，郭敬功，等. 芥子酸在植物气孔开闭调节中的应用：CN113969289A[P]. 2022-01-25.
LI K，MIAO Y C，GUO J G，et al. Application of sinspic acid in the regulation of stomatal opening and closing in plants：CN113969289A[P]. 2022-01-25.

[10] PANDI A，KALAPPAN V M. Pharmacological and therapeutic applications of sinapic acid：an updated review[J]. Molecu-

lar Biology Reports,2021,48(4):3733-3745

[11] 马丛丛,许继取,韩领,等. 芥子酸及其生物活性研究进展[J]. 中国油脂,2016,41(5):75-79.
MA C C,XU J Q,HAN L,et al. Advance in sinapic acid and its biological activities[J]. China Oils and Fats,2016,41(5):75-79.

[12] 朱四元,扶雅芬,王延周,等. 一种芥子酸植物生长调节剂及其应用:CN119054693A[P]. 2024-12-03.
ZHU S Y,FU Y F,WANG Y Z,et al. A mustard acid plant growth regulator and its application: CN119054693A [P]. 2024-12-03.

[13] 郝建军,刘延吉. 植物生理实验技术[M]. 沈阳:辽宁科学技术出版社,2007.
HAO J J,LIU Y J. Experimental techniques in plant physiology[M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 2007.

[14] ZHANG G,GUO W,ZHENG H,et al. Identifying and tuning coordinated water molecules for efficient electrocatalytic water oxidation[J]. Nature Communications,2024,15:10845.

[15] LI Z Q,CHEN Q J,XIN Y Y,et al. Analyses of the photosynthetic characteristics, chloroplast ultrastructure, and transcriptome of apple (*Malus domestica*) grown under red and blue lights[J]. BMC Plant Biology,2021,21(1):483.

[16] LU Z F,LU J W,PAN Y H,et al. Anatomical variation of mesophyll conductance under potassium deficiency has a vital role in determining leaf photosynthesis[J]. Plant, Cell & Environment,2016,39(11):2428-2439.

[17] 胡斌,潘洁,陈丽,等. 阿魏酸处理对番茄采后果实品质和青霉病害的影响[J]. 保鲜与加工,2019,19(1):14-18,24.
HU B,PAN J,CHEN L,et al. Effect of ferulic acid treatment on postharvest quality and blue mold in tomato fruit[J]. Storage and Process,2019,19(1):14-18,24.

[18] 王春恒,韩爱民,张立梅,等. 外源γ-氨基丁酸对蛇龙珠葡萄叶片碳氮代谢的影响[J]. 果树学报,2023,40(7):1386-1398.
WANG C H,HAN A M,ZHANG L M,et al. Effect of exogenous γ-aminobutyric acid on carbon and nitrogen metabolism in leaves of *Basui sauvignon*[J]. Acta Fruit Sinica,2023,40(7):1386-1398.

[19] 刘凌霄,沈法富,卢合全,等. 蔗糖代谢中蔗糖磷酸合成酶(SPS)的研究进展[J]. 分子植物育种,2005,3(2):275-281.
LIU L X,SHEN F F,LU H Q, et al. Research progress on sucrose phosphate synthetase (SPS) in sucrose metabolism [J]. Molecular Plant Breeding,2005,3(2):275-281.

[20] 冉欣雨,黄文俊,钟彩虹. 猕猴桃果实淀粉代谢研究进展[J]. 果树学报,2024,41(2):325-337.
RAN X Y,HUANG W J,ZHONG C H. Advance in starch metabolism research of kiwifruit[J]. Journal of Fruit Science, 2024,41(2):325-337.

[21] 李莹,朱云琦,董官勇,等. 6个猕猴桃品种的果实贮藏与品质评价[J]. 热带亚热带植物学报,2023,31(5):653-659.
LI Y,ZHU Y Q,DONG G Y,et al. Fruit storage and quality evaluation of six kinds of *Actinidia deliciosa*[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany,2023,31(5):653-659

[22] GUO Z H,LIU H,ZHENG S Q,et al. Effects of exogenous GA,IAA,ABA and ethylene on pear (*Pyrus pyrifolia*) fruit during different development stages[J]. Plant Growth Regulation,2024,104(1):549-561.

[23] LIAO G L,XU Q,ALLAN A C,et al. *L*-Ascorbic acid metabolism and regulation in fruit crops[J]. Plant Physiology, 2023,192(3):1684-1695.

[24] 管玉格,王怡,袁宁,等. 鲜切果蔬酚类物质生物合成机制及抗氧化活性研究进展[J]. 中国食品学报,2024,24(2):397-406.
GUAN Y G,WANG Y,YUAN N,et al. Research progress on the biosynthesis mechanism and antioxidant activity of phenolic substances in fresh-cut fruits and vegetables[J]. Chinese Journal of Food Science,2024,24(2):397-406.

[25] YANG Q,DENG X,LIU T, et al. Abscisic acid root-to-shoot translocation by transporter AtABCG25 mediates stomatal movements in *Arabidopsis*[J]. Plant Physiology,2024,195(1):671-684.

(责任编辑:马秋明)