

伏晓科, 何文, 钟玉蝶, 等. 树冠覆膜与双层套袋对不知火柑橘果实品质的影响[J]. 江苏农业学报, 2026, 42(2): 399-406.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2026.02.019

树冠覆膜与双层套袋对不知火柑橘果实品质的影响

伏晓科¹, 何文², 钟玉蝶³, 向娟¹, 杨俊¹

(1.眉山职业技术学院, 四川眉山 620020; 2.四川农业大学, 四川成都 611130; 3.成都市农业技术推广总站, 四川成都 610041)

摘要: 探究单层套袋加树冠覆膜(SB+PF)处理和双层套袋(DB)处理2种不同防御低温冷害的处理对晚熟柑橘不知火(*Citrus reticulata* ‘Buzhihuo’)果实品质的影响及分子机制。结果表明,与SB+PF处理相比,DB处理极显著提高了单果重,显著降低了果皮厚度,极显著提高了果实横径和纵径。SB+PF处理果实果皮明度(L^*)显著高于DB处理,但2种处理间叶绿素和类胡萝卜素含量差异不显著。与SB+PF处理相比,DB处理果实的可滴定酸含量显著提高,维生素C含量极显著提高。转录组分析发现,DB处理下有133个差异表达基因,其中85个下调,48个上调,这些基因富集在黄酮生物合成、 α -亚麻酸代谢等通路。加权基因共表达网络分析(WGCNA)结果揭示了10个与糖酸代谢相关的转录因子。本研究结果表明,双层套袋通过调控微环境和相关基因表达改善了果实外观品质。

关键词: 套袋; 树冠覆膜; 果实品质; 转录组; 差异表达基因

中图分类号: S666.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2026)02-0399-08

Effects of canopy film-covering and double-layer bagging on fruit quality of *Citrus reticulata* cv. ‘Buzhihuo’

FU Xiaoke¹, HE Wen², ZHONG Yudie³, XIANG Juan¹, YANG Jun¹

(1. Meishan Vocational and Technical College, Meishan 620020, China; 2. Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 3. Chengdu Agricultural Technology Promotion General Station, Chengdu 610041, China)

Abstract: This study compared single-layer bagging plus canopy film-covering (SB+PF) treatment and double-layer bagging (DB) treatment to investigate their effects on fruit quality and molecular mechanisms for cold injury prevention in *Citrus reticulata* cv. ‘Buzhihuo’. The results showed that, (1) compared with SB+PF treatment, DB treatment extremely significantly increased single-fruit weight and significantly reduced peel thickness, while extremely significantly increased fruit transverse and longitudinal diameters. SB+PF treatment resulted in significantly higher peel brightness (L^* value) compared with DB treatment, but no significant differences were observed in chlorophyll content or carotenoid content. (2) Compared with SB+PF treatment, DB treatment increased fruit titratable acid content significantly, and increased vitamin C content extremely significantly. (3) Transcriptome analysis revealed a total of 133 differentially expressed genes (DEGs) under DB treatment conditions, among which 85 were down-regulated genes and 48 were up-regulated genes. These genes showed enrichment in pathways such as flavonoid biosynthesis and α -linolenic acid metabolism. Through Weighted Gene Co-expression Network Analysis (WGCNA), ten transcription factors related to sugar-acid metabolism were screened out. The study demonstrates that double-layer bagging improves fruit appearance quality by regulating the micro-environment and gene expression.

Key words: bagging; canopy film-covering; fruit quality; transcriptome; differentially expressed gene

收稿日期: 2025-10-14

基金项目: 四川省科普培训项目(科普作品创作类)(2025JDKP0-118); 眉山市指导性科技计划项目(2023KJZD083)

作者简介: 伏晓科(1993-), 男, 甘肃秦安人, 硕士, 讲师, 主要从事果树栽培与采后生理研究。(E-mail) 1175912581@qq.com

通讯作者: 杨俊, (E-mail) scmsyangjun@qq.com

柑橘(*Citrus reticulata*)是世界和中国重要的水果之一^[1]。四川是重要的柑橘产区之一,其中晚熟柑橘种植面积占四川柑橘种植面积的一半以上。晚熟柑橘自然成熟期一般为次年 1 月至 5 月,果实需越冬发育,但冬季常出现持续的阴雨和低温冷害,成为四川晚熟柑橘稳产增收的突出问题之一^[2]。生产实践中常采用树冠覆膜技术抵御低温^[3-6],研究表明,柑橘树冠覆膜会引起果皮重量增加、可溶性固形物含量升高、可滴定酸含量受到影响,并使冻害发生率显著降低。树冠覆膜可提高塔罗科血橙(*Citrus sinensis* Osbeck)果面亮度^[6],使砂糖橘(*Citrus reticulata* Blanco)可溶性固形物含量提高 1.37%~3.37%、固酸比提高 1.87~8.12^[7]。但树冠覆膜会显著降低光合效率,在金柑(*Fortunella crassifolia* Swingle)生产中,树冠覆膜下叶片的净光合速率较对照下降 21.39%^[5]。树冠覆膜也会引起单果重降低,并且由于树冠覆膜后采收期的延长,将会增加果实腐烂率、加快失重速率、增加果实浮皮率^[8]。近些年生产实践中发展出了双层套袋技术,旨在同时降低果实冻害发生率和提升果品质量。然而,与树冠覆膜相比,该技术增加了人工成本且具体效果缺乏充分的数据支撑。

目前针对树冠覆膜影响果实品质的分子机制已开展了部分研究,结果显示,包括蜡质合成相关基因 *CER1*、*CER26* 等在覆膜条件下表达模式发生显著改变^[7],而双层套袋的作用机制尚待解析。基于此,本研究拟以四川主栽柑橘品种不知火(*Citrus reticulata* ‘Buzhihuo’)为试验材料,深入研究 2 种不同抵御低温冷害的技术对柑橘果实品质的影响,阐明双层套袋与树冠覆膜对果实品质影响的作用机制,以明晰四川产区晚熟柑橘适宜的抵御低温的栽培技术,助力四川晚熟柑橘产业可持续发展。

1 材料与方 法

1.1 试验材料及处理

试验于眉山职业技术学院实践基地进行,所选果园属于平地果园。供试材料为生长一致的 6 年生不知火(*C. reticulata* ‘Buzhihuo’),砧木为红橘(*Citrus reticulata*)。于 2024 年 10 月底,选取 60 株长势一致的树,对其中 30 株进行树冠覆膜加单层套袋(SB+PF 处理),另 30 株采用双层套袋(DB 处理),具体如图 1 所示。于 2025 年 4 月 7 日,果实留树保鲜末期进行采样,每个处理从每株树的东南西北 4

个方向各采集 3 个大小相近、健康完整的果实,每 10 株为 1 个重复,共计 3 个生物学重复。

1.2 果实外观品质分析

擦净果皮后,使用精确度为百分之一的电子天平测定单果重(单位为 g)。使用 C-400 Colorimeter 色差仪(柯尼卡美能达株式会社产品)测定果皮的 L^* (明度)、 a^* (红/绿度)和 b^* (黄/蓝度)。

1.3 果实内在品质分析

在每个样果对称部位切取 2 块,除去果皮,立即用干净纱布包裹,然后挤压果汁于洁净干燥的烧杯中,混合搅拌均匀后用于测定相关指标。使用 PAL-1 手持式折光仪(广州市爱宕科学仪器有限公司产品)测定可溶性固形物含量。采用 0.1 mol/L NaOH 通过滴定法测定可滴定酸含量,采用 2,6-二氯酚靛酚滴定法测定维生素 C 含量^[9]。

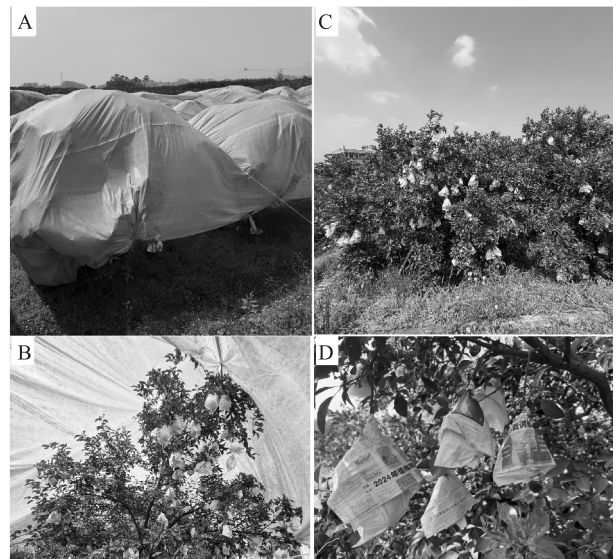


图 1 树冠覆膜加单层套袋(A和B)和双层套袋(C和D)处理田间照片

Fig.1 Field photographs of canopy film-covering plus single-layer bagging (A and B) and double-layer bagging (C and D) treatments

1.4 RNA 提取、文库构建及生物信息学分析

使用植物总 RNA 提取试剂盒(天根生化科技有限公司产品)提取各个样品的总 RNA。使用 BeyoRT™ III cDNA 第一链合成试剂盒(碧云天生物技术有限公司产品)将各样品总 RNA 反转录为 cDNA,于 -80 °C 保存,用于转录组测序(RNA-seq)文库建立及实时定量聚合酶链式反应(qRT-PCR)分析。

质量检测合格后,使用 MGI-T7 测序平台对树冠覆膜加单层套袋和双层套袋处理后的果实(每个处理 3 个生物学重复,共 6 份样品)进行测序。测序得到的原始数据,经 Trimmomatic^[10] 软件进行质量控制处理后,使用 hisat2 软件将 clean reads 比对到 *Citrus reticulata* 参考基因组^[11],利用 R 包 htseq-count^[12]、GenomicFeatures^[13] 和 DESeq2^[14] 分别计算片段数(Reads counts)、FPKM(每千碱基转录本长度每百万映射读段的片段数)值并进行差异基因分析,筛选标准设置为错误发现率(Q) <0.1 以及 $|\log_2(FC)| > 1.0$ (FC 为表达倍数),使用 WGCNA^[15] 对基因进行模块分析,利用 KEGG(京都基因与基因组百科全书)对

DEG(差异表达基因)进行富集分析。

1.5 定量分析

引物用 Primer 5 设计完成,具体信息见表 1,内参基因选用 *GAPC2*^[16],所有引物由生工生物工程(上海)股份有限公司合成。实时定量聚合酶链式反应(RT-qPCR)在 CFX96 Touch™ 荧光 PCR 检测系统[伯乐生命医学产品(上海)有限公司产品]上完成。荧光定量反应体系(10 μ L)的配制和程序设置根据 PerfectStart™ Green qPCR SuperMix 试剂盒(全氏金生物技术股份有限公司产品)的操作说明进行。基因表达量数据采用 $2^{-\Delta\Delta Ct}$ 计算。

表 1 16 个差异表达基因实时定量 PCR(qRT-PCR)的引物序列

Table 1 Primer sequences for quantitative real-time PCR (qRT-PCR) analysis of 16 differentially expressed genes

基因名称	基因家族	基因注释	引物序列(5'→3')
MSYJ182070	ERF	AP2 家族蛋白	F:GACCTTGGGGCAAATGGGCA R:GCCATGGCTGCATCTTCAGC
MSYJ118880	GRAS	类 SCARECROW-8 蛋白	F:GTTGCGGAACGTGTTGGAGT R:GCTCCACCAACGTCACCACA
MSYJ136700	GRAS	GRAS 家族蛋白	F:GCAGAGTGCCTCGACTCGAA R:GAGATGACTTGTCCGCCGAG
MSYJ210830	HD-ZIP	HD-ZIP 家族蛋白	F:GGCTTTGTGACCGAGGCTTC R:CAACACATCAGTGTGGCAG
MSYJ165300	HSF	热激转录因子 A6B	F:GGGCAGCAACAGCTTTGTTG R:CTGTGAGGCTGAAGACTGCG
MSYJ264270	MIKC_MADS	类 AGAMOUS 蛋白	F:CGAGCCTGCAACTGCTGAAA R:ACCAAAGATGCCCAATGAGC
MSYJ112650	MYB	MYB 结构域蛋白	F:GCCCAGTAGAACCGACAATG R:TTTAAAGCTGCCGTTGTCCC
MSYJ074500	ARR-B	响应调节因子 12	F:TGTGTACAGCCTATGGCGAT R:CCTGTCCACCTTCTCCAGC
MSYJ182320	B3	B3 家族蛋白 B3	F:GGGGCTCTTGGCCTTCTAAA R:GGCTGACCTTCCCTGGACAG
MSYJ110110	BES1	β -淀粉酶 7	F:ATTTTGTGCTGCCACGCCCTAT R:CCCCACCAGCAATCGACCAT
MSYJ243890	BES1	β -淀粉酶 2	F:GCCAGTTGGTTGATCCCCGAG R:GTCAACACCCCATGAGAGGC
MSYJ018840	C2H2	C2H2 家族蛋白	F:GTCTTTCCCGACAACGTCGG R:CGGCACCGGCTTTGTGTGTA
MSYJ004870	ERF	ERF 家族蛋白	F:GGGCCGAAAGCACGTACAAA R:CGCTTGAGAGATGCCATGT
MSYJ051170	ERF	ERF 家族蛋白	F:AGGGAGCCAAACAGGGGAAA R:TTAAGCCGTGCACAAGGACC
MSYJ110310	FAR1	FAR1 家族蛋白	F:GATGCAACCGTTGTTGAGGC R:ACTGCCAAGTAAAGCCTCCC
MSYJ237210	FAR1	FAR1 家族蛋白	F:CCGTAICTGCTCTAAACGTG R:AAGCACTGCTCTGACCCCT

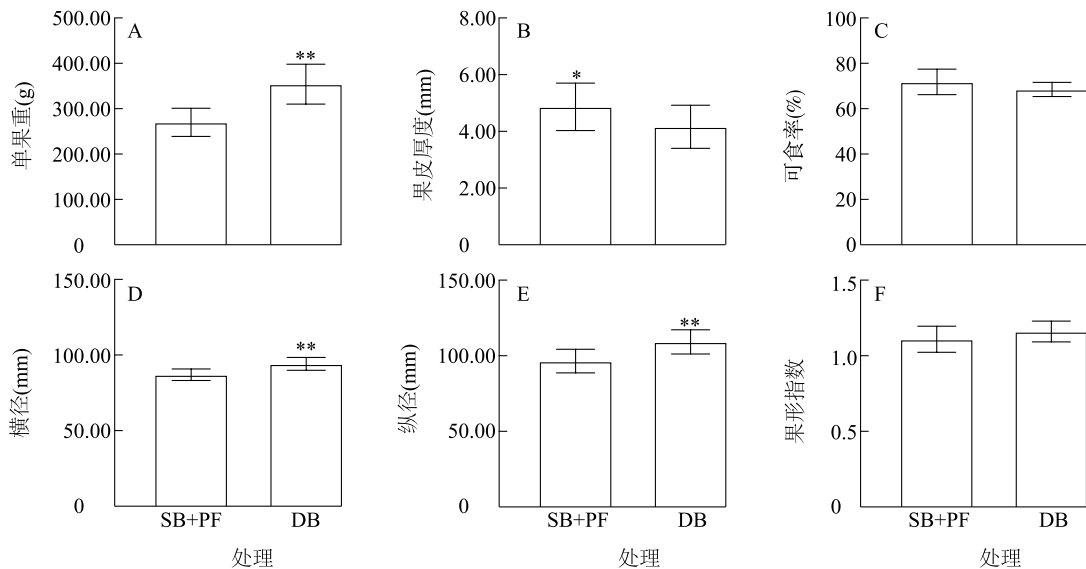
1.6 数据统计与分析

数据统计与分析使用 Excel 和 IBM SPSS Statistics 20.0 软件进行,图表使用 GraphPad Prism(v 10.2.0)和 TTools^[17]绘制。

2 结果与分析

2.1 单层套袋加树冠覆膜和双层套袋处理对柑橘果实外观品质的影响

如图 2 所示,与单层套袋加树冠覆膜(SB+PF)



A:单果重;B:果皮厚度;C:可食率;D:果实横径;E:果实纵径;F:果形指数。*表示处理间差异显著($P<0.05$);**表示处理间差异极显著($P<0.01$)。SB+PF:单层套袋加树冠覆膜;DB:双层套袋。

图 2 不同处理对柑橘果实外观品质的影响

Fig.2 Effects of different treatments on external fruits quality of *Citrus reticulata*

果皮色泽是衡量果实外观品质的重要指标。 L^* (明度)、 a^* (红/绿度)、 b^* (黄/蓝度)是国际照明委员会制定的 CIELAB 颜色空间的核心参数。如表 2 所示,SB+PF 处理果实果皮的 L^* 显著高于 DB 处理果实果皮的 L^* ,说明树冠覆膜能够提升果皮亮

表 2 单层套袋加树冠覆膜和双层套袋处理对柑橘果皮色泽的影响

Table 2 Effects of single-layer bagging plus canopy film-covering treatment and double-layer bagging treatment on fruit peel color of *Citrus reticulata*

处理方式	L^* (明度)	a^* (红/绿度)	b^* (黄/蓝度)	类胡萝卜素含量 (mg/g)	叶绿素 a 含量 (mg/g)	叶绿素 b 含量 (mg/g)	总叶绿素含量 (mg/g)
SB+PF	66.12±1.97a	32.68±1.17a	73.27±2.41a	36.69±9.96a	0.20±0.01a	0.38±0.02a	1.17±0.05a
DB	65.18±4.51b	31.78±1.93a	73.78±4.49a	37.13±9.62a	0.20±0.01a	0.38±0.02a	1.15±0.04a

同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。SB+PF:单层套袋加树冠覆膜;DB:双层套袋。

2.2 单层套袋加树冠覆膜和双层套袋处理对柑橘果实内在品质的影响

如图 3 所示,DB 处理柑橘果实的可溶性固形物

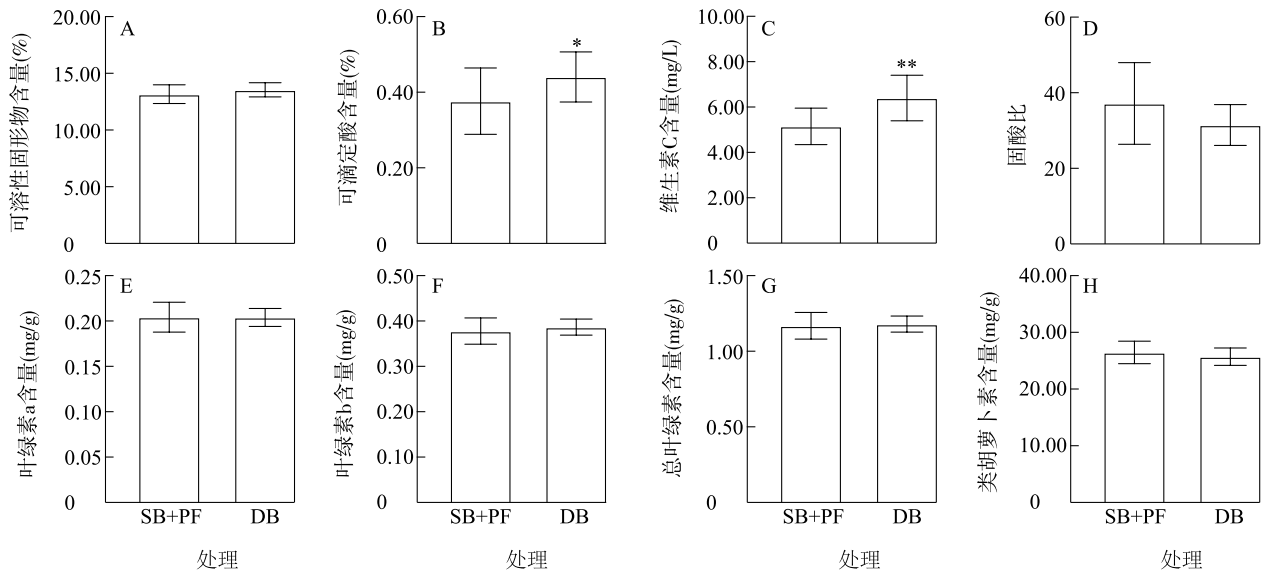
处理的单果重(270.10 g)相比,双层套袋(DB)处理柑橘果实的单果重(354.21 g)极显著提高,果皮厚度从 4.87 mm 显著降低至 4.16 mm。单层套袋加树冠覆膜和双层套袋处理的果形指数无显著差异,但 DB 处理的果实横径(94.19 mm)和纵径(109.20 mm)均较 SB+PF 处理的果实横径(87.00 mm)和纵径(96.48 mm)极显著提高,表现出 DB 处理的果实较 SB+PF 处理的果实更大。

度。SB+PF 处理果实果皮的 a^* 与 DB 处理差异不显著,分别为 32.68 和 31.78。2 种不同的处理下,果实果皮的 b^* 没有显著差异,果实果皮的叶绿素含量和类胡萝卜素含量变化与 a^* 变化趋势相符。

含量较 SB+PF 处理高 4.5%(图 3A),差异不显著;DB 处理果实的可滴定酸含量和维生素 C 含量分别提高 12.8%和 16.9%(图 3B、图 3C),差异分别达到

显著和极显著水平;SB+PF 处理果实的固酸比较 DB 处理果实高 18.1%,为 37.18(图 3D)。2 种处理

下的果实果汁色泽无显著差异(图 3E~图 3H)。



A:可溶性固形物含量;B:可滴定酸含量;C:维生素C含量;D:固酸比;E:叶绿素a含量;F:叶绿素b含量;G:总叶绿素含量;H:类胡萝卜素含量。*表示处理间差异显著($P < 0.05$);**表示处理间差异显著($P < 0.01$)。SB+PF:单层套袋加树冠覆膜;DB:双层套袋。

图3 单层套袋加树冠覆膜和双层套袋处理对柑橘果实内在品质的影响

Fig.3 Effects of single-layer bagging plus canopy film-covering treatment and double-layer bagging treatment on internal fruit quality of *Citrus reticulata*

2.3 差异表达 mRNA 分析

实时荧光定量 PCR (qRT-PCR) 结果与 RNA 测序(RNA-Seq)的基因表达水平结果呈现良好的正相关($R^2 = 91.90\%$)。转录组数据分析结果表明,2 个处理间共鉴定到 133 个差异表达基因($|\log_2(FC)| > 1.0$)。其中 DB 处理的果实较 SB+PF 处理的果实中有 85 个 mRNA 下调表达,48 个 mRNA 上调表达(图 4A),包括 6 个转录因子,分别为 1 个 *ERF* 家族基因(*MSYJ182070*)、1 个 *HSF* 家族基因(*MSYJ165300*)、2 个 *GRAS* 家族基因(*MSYJ118880* 和 *MSYJ136700*)、1 个 *MIKC_MADS* 家族基因(*MSYJ264270*)和 1 个 *HD-ZIP* 家族基因(*MSYJ210830*)。

通过分析 DB 处理的果实和 SB+PF 处理的果实的差异表达基因 KEGG 富集情况(图 4B),本研究发现了 16 条通路,其中 9 条通路与代谢相关,4 条通路与遗传信息处理有关,1 条通路与环境信息处理相关,1 条通路参与细胞过程,剩余 1 条通路与有机体系统有关。

2.4 加权基因共表达网络分析

对 2 个处理组果实样品的 6 份转录组数据展

开分析,将表达矩阵中变异程度较低的基因进行过滤,随后筛选出 5 003 个基因用于加权基因共表达网络分析(WGCNA),最终成功获得 19 个基因共表达模块(表 3),不同模块内包含的基因数量存在明显差异,其中青绿色模块内基因数量最多(1 050 个);而浅黄色模块内基因数量最少(40 个)。

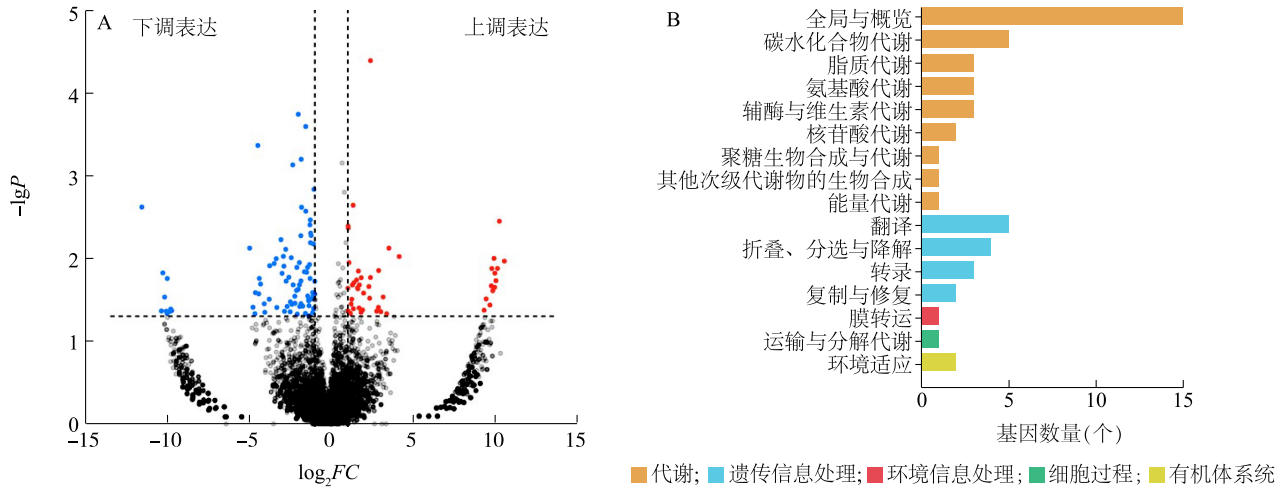
将 19 个基因共表达模块分别与果实的可溶性固形物含量、可滴定酸含量、维生素 C 含量、固酸比、类胡萝卜素含量和叶绿素含量进行相关性分析,依据 r (相关性系数) > 0.85 且 $P < 0.05$ 的标准进行筛选,浅绿色模块与可溶性固形物含量呈显著负相关($r = -0.940, P = 0.006$),黑色模块与可滴定酸含量呈显著负相关($r = -0.860, P = 0.030$),黄绿色模块与固酸比呈显著负相关($r = -0.870, P = 0.020$)。

2.5 基因共表达模块的 KEGG 分析

选取与可滴定酸含量和可溶性固形物含量呈显著负相关的黑色模块和浅绿色模块进行 KEGG 分析。依据 Q 值筛选出 KEGG 富集前 20 条通路,结果表明黑色模块的基因主要富集在酪氨酸代谢通路、异喹啉类生物碱生物合成通路和玉米素(细胞

分裂素)生物合成通路(图 5A)。浅绿色模块的基因主要富集在核质转运通路、叶酸介导的一碳库通

路和核糖体通路(图 5B)。



P :假设检验的显著性 P 值; FC :表达倍数。

图 4 2 种处理下差异表达基因火山图 (A) 和 KEGG 通路功能注释 (B)

Fig.4 Volcano plot of differentially expressed genes (A) and KEGG pathway annotation (B) under two treatments

表 3 模块与表型的相关性分析

Table 3 Correlation analysis between modules and phenotypes

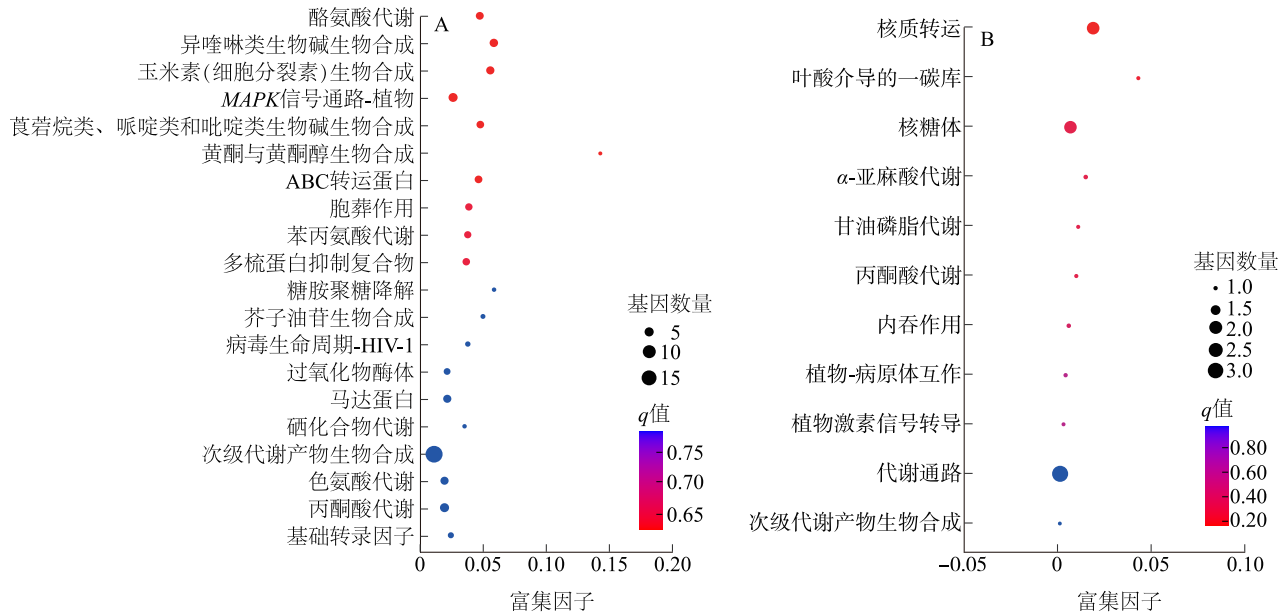
模块名称	可溶性固形物含量	可滴定酸含量	维生素 C 含量	固酸比	类胡萝卜素含量	叶绿素含量
浅黄色	0.074(0.900)	0.760(0.080)	0.420(0.400)	-0.140(0.800)	0.360(0.500)	0.250(0.600)
午夜蓝	0.610(0.200)	-0.600(0.200)	0.019(1.000)	0.220(0.700)	-0.570(0.200)	-0.210(0.700)
青色	0.056(0.900)	0.650(0.200)	-0.160(0.800)	0.066(0.900)	0.710(0.100)	0.410(0.400)
黄色	0.610(0.200)	-0.340(0.500)	-0.230(0.700)	0.460(0.400)	0.084(0.900)	-0.280(0.600)
品红色	0.760(0.080)	0.310(0.600)	0.150(0.800)	0.290(0.600)	0.130(0.800)	0.250(0.600)
黄绿色	-0.160(0.800)	0.170(0.800)	0.770(0.070)	-0.870(0.020)	-0.470(0.300)	0.054(0.900)
灰 60 度	0.016(1.000)	0.026(1.000)	-0.021(1.000)	-0.450(0.400)	-0.061(0.900)	0.340(0.500)
鲑鱼色	-0.300(0.600)	0.550(0.300)	-0.420(0.400)	0.420(0.400)	0.650(0.200)	0.410(0.400)
浅青色	-0.550(0.300)	-0.560(0.300)	-0.790(0.060)	-0.130(0.800)	0.380(0.500)	-0.280(0.600)
棕褐色	-0.660(0.200)	-0.260(0.600)	-0.078(0.900)	-0.780(0.060)	0.360(0.500)	-0.550(0.300)
浅绿色	-0.940(0.006)	-0.480(0.300)	-0.280(0.600)	-0.450(0.400)	0.140(0.800)	-0.570(0.200)
绿色	0.120(0.800)	-0.770(0.070)	-0.220(0.700)	0.002(1.000)	-0.350(0.500)	-0.390(0.400)
黑色	-0.240(0.600)	-0.860(0.030)	-0.380(0.500)	-0.120(0.800)	0.120(0.800)	-0.920(0.008)
青绿色	0.250(0.600)	-0.490(0.300)	0.350(0.500)	-0.510(0.300)	-0.350(0.500)	-0.540(0.300)
棕色	0.490(0.300)	0.140(0.800)	0.590(0.200)	-0.340(0.500)	-0.170(0.700)	-0.100(0.800)
蓝色	0.210(0.700)	0.160(0.800)	0.660(0.200)	-0.660(0.200)	-0.220(0.700)	-0.087(0.900)
紫色	0.450(0.400)	0.270(0.600)	0.300(0.600)	0.570(0.200)	-0.460(0.400)	0.430(0.400)
红色	0.095(0.900)	-0.120(0.800)	-0.044(0.900)	0.018(1.000)	0.430(0.400)	-0.590(0.200)
粉红色	-0.250(0.600)	-0.260(0.600)	-0.740(0.090)	0.540(0.300)	0.680(0.100)	-0.400(0.400)

括号外为相关性系数(r),括号内为显著性系数(P)。

同时,我们在黑色模块中筛选出 9 个转录因子, 包括 1 个 *ARR-B* 家族基因(*MSYJ074500*)、1 个 *B3*

家族基因 (*MSYJ182320*)、2 个 *BES* 家族基因 (*MSYJ110110* 和 *MSYJ243890*)、1 个 *C2H2* 家族基因 (*MSYJ018840*)、2 个 *ERF* 家族基因 (*MSYJ004870* 和 *MSYJ051170*) 以及 2 个 *FAR* 家族基因 (*MSYJ110310*

和 *MSYJ237210*),在浅绿色模块中筛选出 1 个 *MYB* 转录因子 (*MSYJ112650*)。这 10 个转录因子可能在套袋状态下的糖酸代谢中起关键作用。



MAPK: 丝裂原活化蛋白激酶; ABC: ATP 结合盒; HIV-1: I 型人类免疫缺陷病毒。

图 5 黑色模块 (A) 和浅绿色模块 (B) 基因共表达模块的 KEGG 富集分析

Fig.5 KEGG enrichment analysis of black (A) and lightgreen (B) gene co-expression modules

3 讨论与结论

本研究对晚熟柑橘不知火进行单层套袋加树冠覆膜与双层套袋处理,结果表明,双层套袋(DB)处理的果实果皮厚度显著降低,可能由于DB处理下更稳定的微环境改变了表皮细胞及表皮层结构,这一结果与苹果套袋后果皮发育的生理响应模式相似^[18-19]。DB处理较单层套袋加树冠覆膜(SB+PF)处理果实的纵径、横径极显著增大,这可能由于树冠覆膜影响植株的光合作用^[20],进而影响果实发育。色泽参数是反映果实着色变化最直观的指标之一^[21],SB+PF处理果实果皮 L^* 显著高于DB处理,主要原因可能是树冠覆膜状态下果面温度更高,进而影响了色素的合成^[22],同时不同的光照度和波长,使花色苷的形成受到影响,从而造成了单层套袋加树冠覆膜和双层套袋处理在果实着色上的差异^[23]。双层套袋(DB)处理一定程度上阻止了不知火中可滴定酸的降解,与在椪柑上的研究结果^[24]一致。

前人研究结果表明,树冠覆膜可以改变沙糖橘蜡质合成相关基因的表达,如*CER1*、*CER26*等的表达量在树冠覆膜条件下显著上升^[7]。本研究中转录组分析发现,SB+PF处理的果实与DB处理的果实存在133个差异表达基因(DEG),其中*HD-ZIP*基因家族基因(*MSYJ210830*)可能参与调控果实成熟^[25],*GRAS*(*MSYJ118880*和*MSYJ136700*)在信号转导中发挥重要作用^[26],*MIKC_MADS*家族基因(*MSYJ264270*)影响叶绿素和类胡萝卜素的合成与分解^[27]。利用WGCNA筛选出10个与糖酸代谢相关的转录因子,其中*BES*家族基因(*MSYJ110110*和*MSYJ243890*)可能参与淀粉代谢进而调控糖酸积累^[28]。*ARR-B*家族基因(*MSYJ074500*)和*ERF*家族基因(*MSYJ004870*和*MSYJ051170*)可能分别参与细胞分裂素代谢^[29]、乙烯代谢^[30]和脱落酸代谢途径^[31],通过调控内源激素含量进而影响糖酸代谢。

近年来,极端低温频发导致四川柑橘损失严重^[2]。果农常用套袋改善果皮农艺性状,同时利用树冠覆膜抵御低温胁迫,但树冠覆膜会降低光合作

用进而影响植株和果实发育^[5]。近些年发展出双层套袋技术,以期改善果皮性状同时抵御低温胁迫,田间走访调查结果表明,双层套袋处理物料成本每公顷可降低6 000元,人工成本每公顷将增加15 000元。本研究以晚熟柑橘不知火为材料,分析了2种抗寒处理对果实外观和内在品质的影响差异,结果表明,双层套袋处理能改善果实外观,具备良好的推广应用价值。

参考文献:

- [1] 邓秀新. 中国柑橘育种60年回顾与展望[J]. 园艺学报, 2022, 49(10): 2063-2074.
- [2] 曾瑶, 杨万云, 陈德勇, 等. 2020-2021年冬季眉山晚熟柑桔冻害调查[J]. 中国南方果树, 2021, 50(5): 50-53.
- [3] 王敏, 杨蕾, 洪林, 等. 砧木和覆膜对爱媛28果实营养品质的影响[J]. 南方农业学报, 2022, 53(10): 2971-2979.
- [4] 范七君, 牛英, 陈传武, 等. 树冠覆膜对沃柑果实颜色及激素含量的影响[J]. 南方园艺, 2024, 35(1): 1-5.
- [5] 范七君, 陈传武, 邓崇岭, 等. 树冠覆膜对金柑光合作用及果实品质的影响[J]. 广西植物, 2020, 40(7): 1046-1053.
- [6] 刘雪峰, 袁项成, 马晓丽, 等. 树冠覆盖材料对塔罗科血橙果实品质的影响[J]. 果树资源学报, 2024, 5(1): 35-39.
- [7] 朱智锋, 刘萍, 许让伟, 等. 树冠覆膜对沙糖橘采后保鲜性能的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(12): 2630-2643.
- [8] 牛英, 陈传武, 刘冰浩, 等. 果实大小与留树保鲜时间对沙糖桔果实浮皮和糖酸变化的影响[J]. 中国南方果树, 2019, 48(6): 1-6.
- [9] 熊庆娥. 植物生理学实验教程[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2003.
- [10] BOLGER A M, LOHSE M, USADEL B. Trimmomatic: a flexible trimmer for Illumina sequence data[J]. Bioinformatics, 2014, 30(15): 2114-2120.
- [11] WANG X, XU Y T, ZHANG S Q, et al. Genomic analyses of primitive, wild and cultivated *Citrus* provide insights into asexual reproduction[J]. Nature Genetics, 2017, 49(5): 765-772.
- [12] ANDERS S, PYL P T, HUBER W. HTSeq: a Python framework to work with high-throughput sequencing data[J]. Bioinformatics, 2015, 31(2): 166-169.
- [13] LAWRENCE M, HUBER W, PAGÈS H, et al. Software for computing and annotating genomic ranges[J]. PLoS Computational Biology, 2013, 9(8): e1003118.
- [14] LOVE M I, HUBER W, ANDERS S. Moderated estimation of fold change and dispersion for RNA-seq data with DESeq2[J]. Genome Biology, 2014, 15(12): 550.
- [15] LANGFELDER P, HORVATH S. WGCNA: an R package for weighted correlation network analysis[J]. BMC Bioinformatics, 2008, 9(1): 559.
- [16] MAFRA V, KUBO K S, ALVES-FERREIRA M, et al. Reference genes for accurate transcript normalization in *Citrus* genotypes under different experimental conditions[J]. PLoS One, 2012, 7(2): e31263.
- [17] CHEN C J, WU Y, LI J W, et al. TBtools-II: a "one for all, all for one" bioinformatics platform for biological big-data mining[J]. Molecular Plant, 2023, 16(11): 1733-1742.
- [18] 魏树伟, 王宏伟, 王金政, 等. 套袋对红将军苹果果皮结构的影响[J]. 山东农业科学, 2010, 42(10): 58-61.
- [19] 陈军, 高文胜, 吕德国, 等. 套袋红富士苹果果皮发育进程研究[J]. 果树学报, 2009, 26(2): 217-221.
- [20] 王振兴, 彭良志, 淳长品, 等. 树冠直接覆膜对清见橘橙树冠内环境因子的影响[J]. 果树学报, 2011, 28(2): 199-203.
- [21] 吴世涛, 余文琴, 李水祥, 等. 套袋对'三红蜜柚'果实着色的影响[J]. 果树学报, 2020, 37(5): 687-695.
- [22] 马创举, 吴群, 孙建城, 等. 套袋对柑橘果实微环境及品质的影响[J]. 中国果树, 2025(1): 77-82.
- [23] 黄海, 段军娜, 刘荣, 等. 不同果袋微环境对芒果果实品质的影响[J]. 江西农业学报, 2022, 34(7): 9-13.
- [24] 石莹, 陈思怡, 曾译可, 等. 套袋提升槿柑果实品质的作用机制[J]. 中国农业科学, 2023, 56(14): 2776-2786.
- [25] GE X X, LIU Z, WU X M, et al. Genome-wide identification, classification and analysis of *HD-ZIP* gene family in *Citrus*, and its potential roles in somatic embryogenesis regulation[J]. Gene, 2015, 574(1): 61-68.
- [26] ZHANG H, MI L M, XU L, et al. Genome-wide identification, characterization, interaction network and expression profile of *GRAS* gene family in sweet orange (*Citrus sinensis*) [J]. Scientific Reports, 2019, 9: 2156.
- [27] ZHU K J, CHEN H Y, MEI X H, et al. Transcription factor CsMADS3 coordinately regulates chlorophyll and carotenoid pools in *Citrus hesperidium* [J]. Plant Physiology, 2023, 193(1): 519-536.
- [28] LLOYD J R, KOSSMANN J, RITTE G. Leaf starch degradation comes out of the shadows[J]. Trends in Plant Science, 2005, 10(3): 130-137.
- [29] TAKATSUKA H, AMARI T, UMEDA M. Cytokinin signaling is involved in root hair elongation in response to phosphate starvation[J]. Plant Signaling & Behavior, 2024, 19(1): 2305030.
- [30] ZHANG L X, LI Z F, QUAN R D, et al. An *AP2* domain-containing gene, *ESE1* targeted by the ethylene signaling component EIN3 is important for the salt response in *Arabidopsis* [J]. Plant Physiology, 2011, 157(2): 854-865.
- [31] JE J, CHEN H, SONG C, et al. *Arabidopsis* DREB2C modulates ABA biosynthesis during germination[J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 2014, 452(1): 91-98.

(责任编辑: 陈海霞)