

嫁接砧木对设施西瓜品质影响的转录组学与代谢组学分析

杨万邦¹, 王晓媛², 于蓉¹, 郭松¹, 岳贞¹, 杜慧莹¹, 田梅¹

(1. 宁夏农林科学院园艺研究所 银川 750002; 2. 宁夏回族自治区农业技术推广总站 银川 750001)

摘要: 为了明确不同类型嫁接砧木对设施西瓜品质的影响, 筛选适宜宁夏设施栽培西瓜的嫁接砧木, 以宁美2号(NM2)西瓜为接穗, 宁砧2号(南瓜, NZ2)、强根(葫芦, QG)、宁砧3号(野生西瓜, NZ3)为砧木, 通过研究嫁接后西瓜品质变化, 结合转录组学和代谢组学分析, 比较3种类型砧木对设施西瓜品质的影响。结果表明, 不同类型砧木嫁接后显著影响设施西瓜的基因表达、生理生化特性和果实品质。其中, NZ2嫁接后西瓜中心可溶性固形物含量增加了0.2个百分点, 维生素C含量提高了2.7%; 同时也影响了蛋白质加工通路, 可能通过增强天然防御机制改善品质特性。QG嫁接后对西瓜的基因表达和代谢物变化影响最显著, 但果实品质略差。NZ3嫁接后西瓜的粗纤维含量最高, 比NM2高65.79%。通过转录组和代谢组技术研究嫁接后果实品质变化, 为科学筛选砧木和提高嫁接西瓜品质提供了理论依据。通过综合分析, 南瓜型砧木NZ2可作为适宜的砧木品种。

关键词: 西瓜; 嫁接砧木; 转录组; 代谢组; 品质

中图分类号: S651

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2025)08-015-11

Transcriptomic and metabolomic analysis of the effects of grafting stocks on the quality of greenhouse watermelon

YANG Wanbang¹, WANG Xiaoyuan², YU Rong¹, GUO Song¹, YUE Zhen¹, DU Huiying¹, TIAN Mei¹

(1. Research Institute of Horticulture, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, Ningxia, China;

2. Ningxia Hui Autonomous Region Agricultural Technology Extension General Station, Yinchuan 750001, Ningxia, China)

Abstract: To clarify the effects of different types of rootstocks on the quality of watermelon cultivated in greenhouse and screen suitable rootstocks for watermelon cultivation in Ningxia facilities, Ningmei 2 (NM2) watermelon was used as scion, and Ningzhen 2 (pumpkin, NZ2), Qianggen (gourd, QG), Ningzhen 3 (wild watermelon, NZ) as rootstocks, to investigate post-grafting changes in watermelon quality. By combining transcriptomic and metabolomic analyses, the influence of the three rootstock types on watermelon quality was compared. The results showed that different rootstock types significantly affected gene expression, physiological and biochemical properties, and fruit quality of watermelon cultivated in greenhouse. Among them, NZ2 grafting increased the central soluble solids content by 0.2 percentage points, and the vitamin C content by 2.7%. It also significantly influenced protein processing pathways, potentially enhancing quality by bolstering natural defense mechanisms. QG grafting had the most significant influence on gene expression and metabolite changes but resulted in slightly inferior fruit quality. NZ3 grafted watermelon exhibited the highest crude fiber content, 65.79% higher than that of NM2. The application of transcriptomic and metabolomic techniques to study the changes of fruit quality after grafting provides a theoretical basis for scientific screening of rootstocks and improving the quality of grafted watermelon. Through comprehensive analysis, the pumpkin rootstock NZ2 was considered as a suitable rootstock variety.

Key words: Watermelon; Grafting rootstock; Transcriptome; Metabolome; Quality

收稿日期: 2024-12-12; 修回日期: 2025-06-03

基金项目: 宁夏回族自治区自然科学基金(2022AAC03442); 国家重点研发计划(2018YFD0201308); 宁夏重点研发计划(2018BBF02019, 2022BBF02025); 宁夏农林科学院科技创新项目(NKYG-22-03, NGSB-2021-7-03); 国家西甜瓜产业技术体系专项(CARS-25)

作者简介: 杨万邦, 男, 助理研究员, 研究方向为西瓜、甜瓜育种与栽培。E-mail: yangwanbang-6@163.com

通信作者: 田梅, 女, 副研究员, 研究方向为西瓜、甜瓜育种与栽培。E-mail: tmei-2002@163.com

随着设施农业的不断发展,宁夏北部引黄灌区已成为设施栽培西瓜的重要生产基地,该地区的西瓜以优异的品质在国内市场上享有盛誉。由于土地资源有限、产业集中度高、经济效益驱动等因素影响,限制了设施栽培西瓜的轮作倒茬,加剧了连作障碍问题^[1-2]。嫁接栽培作为一种有效的技术手段,已被广泛应用于缓解连作障碍和减少土传病害的不利影响^[3-6]。研究表明,嫁接不仅能有效避免土传病害危害,还能增强植株的逆境耐受性,包括对低温和高温的抗性^[7]。

在嫁接对西瓜果实品质的影响方面,李俊玲^[3]的研究表明,南瓜砧木嫁接能够显著提高西瓜的产量和品质,增加果实中番茄红素和可溶性糖含量,同时促进植株的根系发育和矿质营养吸收。Aslam等^[8]通过比较分析未嫁接和南瓜嫁接西瓜在果实发育过程中的主要代谢物和转录组变化,揭示了嫁接通过调节次生代谢物质的含量来影响西瓜的果实品质。这些研究结果表明,选择合适的砧木对改善西瓜品质具有积极作用。转录组学与代谢组学的联合应用,为深入研究嫁接西瓜的生理机制及品质调控提供了强有力的分析手段。利用全长转录组测序技术,研究人员已成功揭示了设施西瓜果实品质形成的分子机制,研究了不同品系嫁接西瓜果肉口感、颜色和品质的分子基础,并挖掘到与果实口感和颜色相关的差异基因,如蔗糖合成基因以及类胡萝卜代谢基因等^[9-11]。此外,前人研究还发现,在设施西瓜果实发育过程中,控制糖和有机酸代谢的 7 个关键基因的表达量与果实中的糖酸含量呈显著正相关^[12],这些基因可以作为调控嫁接西瓜果实发育过程中糖和有机酸合成的候选基因。

笔者选取了生产上常用的南瓜、葫芦、野生西瓜三种类型西瓜嫁接砧木,进行嫁接栽培试验,同

时以自根嫁接西瓜作为对照,采用转录组学和代谢组学的综合分析方法深入探究嫁接后西瓜品质的变化特征,并评估不同类型砧木在设施栽培环境中的适应性。研究结果将为科学选择嫁接砧木提供理论支持,以期提升嫁接西瓜果实品质,增强其市场竞争力。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

嫁接西瓜种植试验位于宁夏回族自治区吴忠市利通区高闸镇设施农业园区,地处引黄灌区,海拔 1132 m,年平均降水量 193 mm,年平均蒸发量 2014 mm,属温带大陆性半干旱气候。当地土壤类型为典型的灰钙土,土壤 pH 值 8.14、有机质含量(w,下同)17.15 g·kg⁻¹、全盐含量 0.98 g·kg⁻¹、全氮含量 0.92 g·kg⁻¹、全磷含量 0.95 g·kg⁻¹、全钾含量 21.12 g·kg⁻¹、水解氮含量 67.60 mg·kg⁻¹、有效磷含量 39.04 mg·kg⁻¹、速效钾含量 172.12 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计及供试材料

试验所用砧木及接穗品种详见表 1。嫁接育苗在银川实一农业科技开发有限公司日光温室进行,砧木于 2023 年 1 月 20 日播于 50 孔育苗穴盘(54 cm×28 cm×4.6 cm),接穗 1 月 27 日播于育苗方盘(54 cm×27 cm×6 cm),2 月 5 日开始嫁接,采用顶插接法,其他管理同常规。田间试验在宁夏吴忠高闸镇设施农业园区温室进行,试验采用随机区组设计,设 4 个处理,以宁美 2 号自根嫁接为对照,3 次重复,小区面积 12.5 m²,每小区 20 株,起垄趴地栽培,垄宽 1.70 m、沟宽 0.50 m、垄高 0.15 m、株距 0.50 m。于 2023 年 3 月 15 日嫁接苗长到 3 叶 1 心期定植,采用“品”字形错位定植方式,瓜蔓对爬,栽植密度为 16 000 株·hm⁻²。采用双蔓整枝,人工授粉保留第 2 节位雌花,单株留 1 瓜,水肥及其他管理措施均遵

表 1 供试材料
Table 1 Experimental materials

砧木类型 Rootstock type	品种 Variety	特性 Characteristic	来源 Source
南瓜型 Pumpkin-type rootstock	宁砧 2 号 Ningzhen 2 (NZ2)	白籽、杂交种 White-seed pumpkin, hybrid	宁夏农林科学院园艺研究所 Research Institute of Horticulture, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences
葫芦型 Gourd-type rootstock	强根 Qianggen (QG)	小籽、杂交种 Small seed, hybrid	先正达种业科技(中国)有限公司 Syngenta Seed Technology (China) Co., LTD.
野生西瓜型 Wild-type rootstock	宁砧 3 号 Ningzhen 3 (NZ3)	花皮、杂交种 The peel is green in colour with black stripes, hybrid	宁夏农林科学院园艺研究所 Research Institute of Horticulture, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences
接穗(西瓜) Scion (watermelon)	宁美 2 号 Ningmei 2 (NM2)	花皮、杂交种、圆果形、中熟品种 The peel is green in colour with black stripes, hybrid, mid-ripening variety with round fruit shapes	宁夏农林科学院园艺研究所 Research Institute of Horticulture, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences

循当地种植习惯,6月5日左右开始采收。

1.3 试验方法与数据分析

1.3.1 品质指标测定与分析 在西瓜成熟季节,全部收获并按照试验区计算产量。每小区选取成熟度一致的3个瓜,测定果肉可溶性固形物(中心和边缘)、总糖、总酸、维生素C以及粗纤维含量等品质指标。果实可溶性固形物含量用PAL-1型数显糖度计测定;总糖含量用斐林试剂滴定法测定,总酸含量用氢氧化钠滴定法测定,维生素C含量用2,6-二酚靛酚滴定法测定,粗纤维含量用酸性洗涤剂法测定^[13]。试验数据采用GraphPad Prism(版本8.0.2)软件进行统计分析,并通过多重比较检验来评估结果的差异显著性。

1.3.2 样品制备与检测 转录组和代谢物质含量测定:在果实成熟期,每个小区选取成熟度一致的3个瓜,采集中心和边缘果肉,液氮速冻后保存于-80℃冰箱。测定工作由苏州帕诺米克生物医药科技有限公司完成。

UPLC-MS检测样品制备:取适量果肉样本,加入含2-氯-L-苯丙氨酸($4\text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$)的甲醇溶液 $600\text{ }\mu\text{L}$,涡旋振荡后加入钢珠研磨,室温超声处理 15 min ,离心后取上清液,通过 $0.22\text{ }\mu\text{m}$ 膜过滤,所得过滤液用于液相色谱串联质谱检测(UPLC-MS,液相色谱仪 Thermo Vanquish;质谱仪 Thermo Orbitrap Exploris 120)。

RNA提取与测序文库构建:从果肉样本中提取总RNA,利用Oligo(dT)磁珠富集mRNA,离子打断至约 300 bp 片段。以RNA为模板合成cDNA,进行末端修复、加A尾并连接测序接头,富集合适大小的cDNA片段构建文库。文库经PCR扩增和Agilent 2100 Bioanalyzer质检后,根据有效浓度和数据量进行混合,稀释至 $2\text{ nmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 并形成单链文库。最后使用Illumina平台进行双末端(Paired-end,PE)测序。

1.3.3 转录组数据分析 对测序产生的原始数据,使用Fastp去除低质量序列和接头污染,以及筛选高质Reads。随后,通过HISAT2软件将Reads比对至参考基因组,并使用HTSeq统计基因表达量。差异表达分析采用DESeq,筛选标准为 $\log_2\text{Fold-Change}>1$ 和 $P\text{-value}<0.05$ 。利用Pheatmap进行聚类分析,Circlize在基因组水平上可视化差异表达RNA,topGO用于功能富集分析,共表达网络的构建通过Cytoscape软件完成。

1.3.4 代谢组数据分析 使用Proteowizard软件包

(v3.0.8789)中MSConvert工具将原始质谱下机文件转换为mzXML文件格式。结合HMDB、mass-bank、LipidMaps、mzcloud、KEGG及诺米代谢自建标准品库等数据库,设置质量精度偏差 $<30\text{ ppm}$,进行代谢物定性分析。利用RXCMS软件包(v3.12.0)执行峰检测、峰过滤和峰对齐,参数设置包括 $\text{bw}=2$, $\text{ppm}=15$, $\text{peakwidth}=\text{c}(5,30)$, $\text{mzwid}=0.015$, $\text{mzdiff}=0.01$, $\text{method}=\text{"centWave"}$,以获得代谢物定量列表。基于QC样本的支持向量回归校正方法消除系统误差,并在质控过程中排除 $\text{RSD}>30\%$ 的物质,确保数据的可靠性。筛选后的数据用于主成分分析(PCA)、聚类分析、组间差异物筛选及注释数据等后续分析。

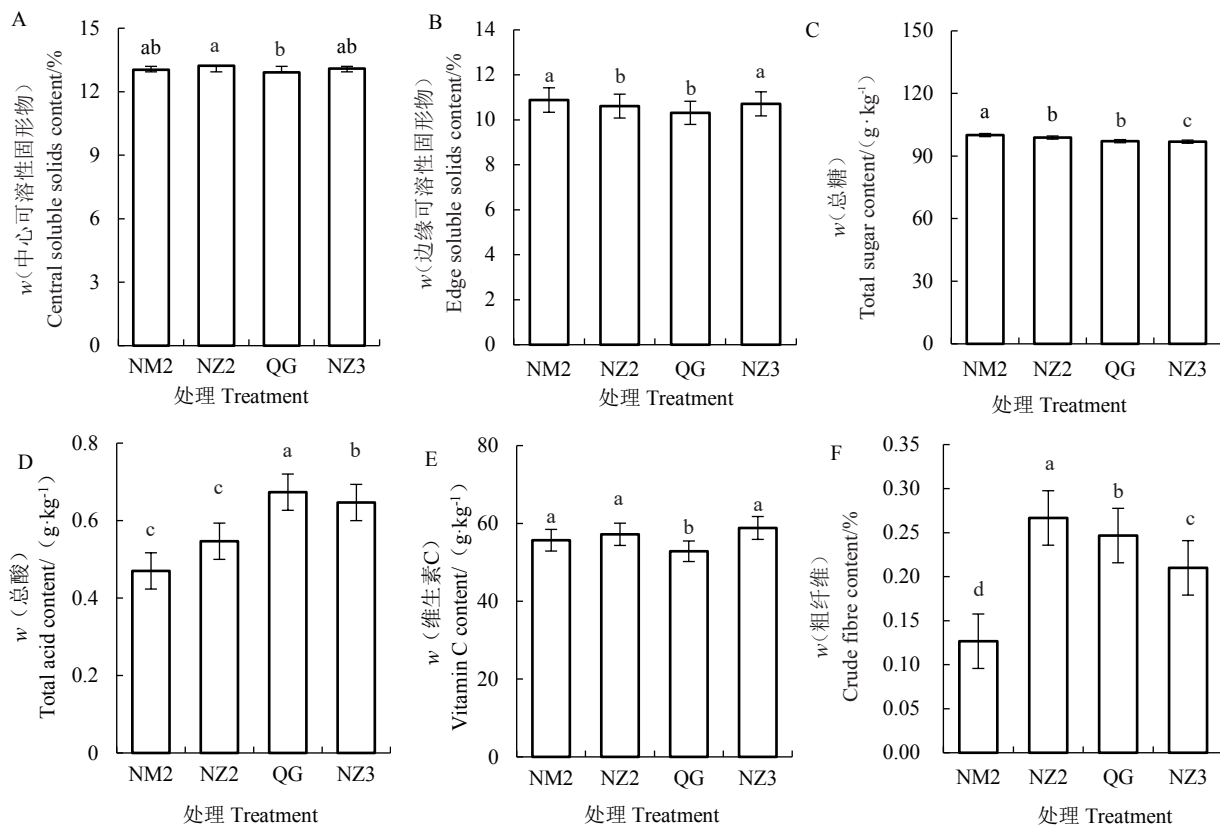
2 结果与分析

2.1 果实品质分析

在不同砧木嫁接对西瓜品质影响的研究中,宁砧2号(NZ2)和宁砧3号(NZ3)对嫁接西瓜的大部分品质指标有显著的正面影响。宁砧2号嫁接瓜中心可溶性固形物含量达 13.23% ,高于自嫁接宁美2号(NM2)。宁砧3号嫁接西瓜中心可溶性固形物含量与宁美2号相当,但边缘可溶性固形物含量在几种嫁接砧木中最高,为 10.71% (图1-A~B)。宁砧2号嫁接瓜总糖含量为 $98.87\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,略低于宁美2号;宁砧3号嫁接西瓜的总糖含量 $96.90\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,略低于宁美2号和宁砧2号嫁接瓜。强根嫁接瓜总糖含量也低于宁美2号(图1-C)。在总酸含量方面,宁美2号自嫁接瓜最低,宁砧2号嫁接西瓜略高,其他两种嫁接瓜显著高于宁美2号(图1-D)。在维生素C含量方面,宁砧2号和宁砧3号嫁接瓜高于其他两种嫁接瓜(图1-E)。在口感方面,宁美2号自嫁接瓜粗纤维含量最低,仅 0.13% ,宁砧2号嫁接瓜粗纤维含量最高,为 0.27% ,3种嫁接瓜粗纤维含量显著增加,可能影响瓜瓤口感细腻度(图1-F)。综上所述,不同砧木多方面影响嫁接西瓜品质,宁砧2号、宁砧3号嫁接提高了西瓜中心可溶性固形物、维生素C含量,提升营养品质,但增加了总酸、粗纤维含量,使嫁接西瓜口感相对变差。

2.2 转录组数据分析

与自嫁接西瓜相比,南瓜型砧木宁砧2号和野生西瓜型砧木宁砧3号嫁接后基因表达变化并不显著。其中,宁砧2号处理组仅检测到105个下调基因和173个上调基因,宁砧3号处理组78个下



注:不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences at 0.05 level.

图 1 不同砧木嫁接对西瓜果实品质的影响

Fig. 1 The impact of different rootstock grafting on watermelon fruit quality

调,188 个上调基因,两组无差异基因数量均超过 19 000 个(图 2-A~B)。然而,葫芦型砧木强根嫁接后基因表达发生显著变化,下调基因数量增加至 623 个,上调基因 244 个(图 2-C)。

2.3 代谢组数据分析

图 3-A~C 结果显示,不同砧木类型对嫁接西瓜生理和生化特性影响各异。宁砧 2 号显著富集“protein processing in endoplasmic reticulum”(内质网中的蛋白质加工)通路,可能调节蛋白质合成与加工,协同强化嫁接西瓜的天然防御机制并改善果实品质。GO 分类富集分析显示“catabolic process”(分解代谢过程)、“response to chemical”(对化学物质的反应)、“cofactor binding”(辅因子结合)以及“carbohydrate metabolic process”(碳水化合物代谢过程)显著富集,进一步揭示了宁砧 2 号对能量代谢、物质循环、酶活性和代谢途径的精细调控作用(图 3-A)。

图 3-B~C 显示,在宁砧 3 号、强根嫁接后,西瓜

基因表达显著富集于“plant hormone signal transduction”(植物激素信号转导)通路,影响嫁接西瓜的激素信号转导途径,对植物生长、发育和环境适应性具有显著作用。GO 分类富集结果表明,宁砧 3 号通过“transmembrane transport”(跨膜运输)相关基因的协同表达,改进西瓜对水分和养分吸收以及对环境压力的适应能力。强根通过膜脂代谢相关项的显著富集,对嫁接西瓜细胞膜的结构和功能产生显著影响,这与西瓜的抗逆性、物质运输等方面有关。

综上所述,宁砧 2 号主要通过影响内质网中的蛋白质加工和苯丙素生物合成通路来调节生理和生化特性;宁砧 3 号和强根则主要通过影响植物激素信号转导途径发挥作用。

2.4 不同类型砧木对嫁接西瓜代谢特性的影响

代谢物表达分析(图 4-A)显示,宁砧 2 号上调的代谢物数量显著多于下调代谢物,这一趋势表明其对西瓜的代谢途径产生了积极影响。火山图和热图(图 4-B~C)鉴定出几种显著上调的代谢物,包

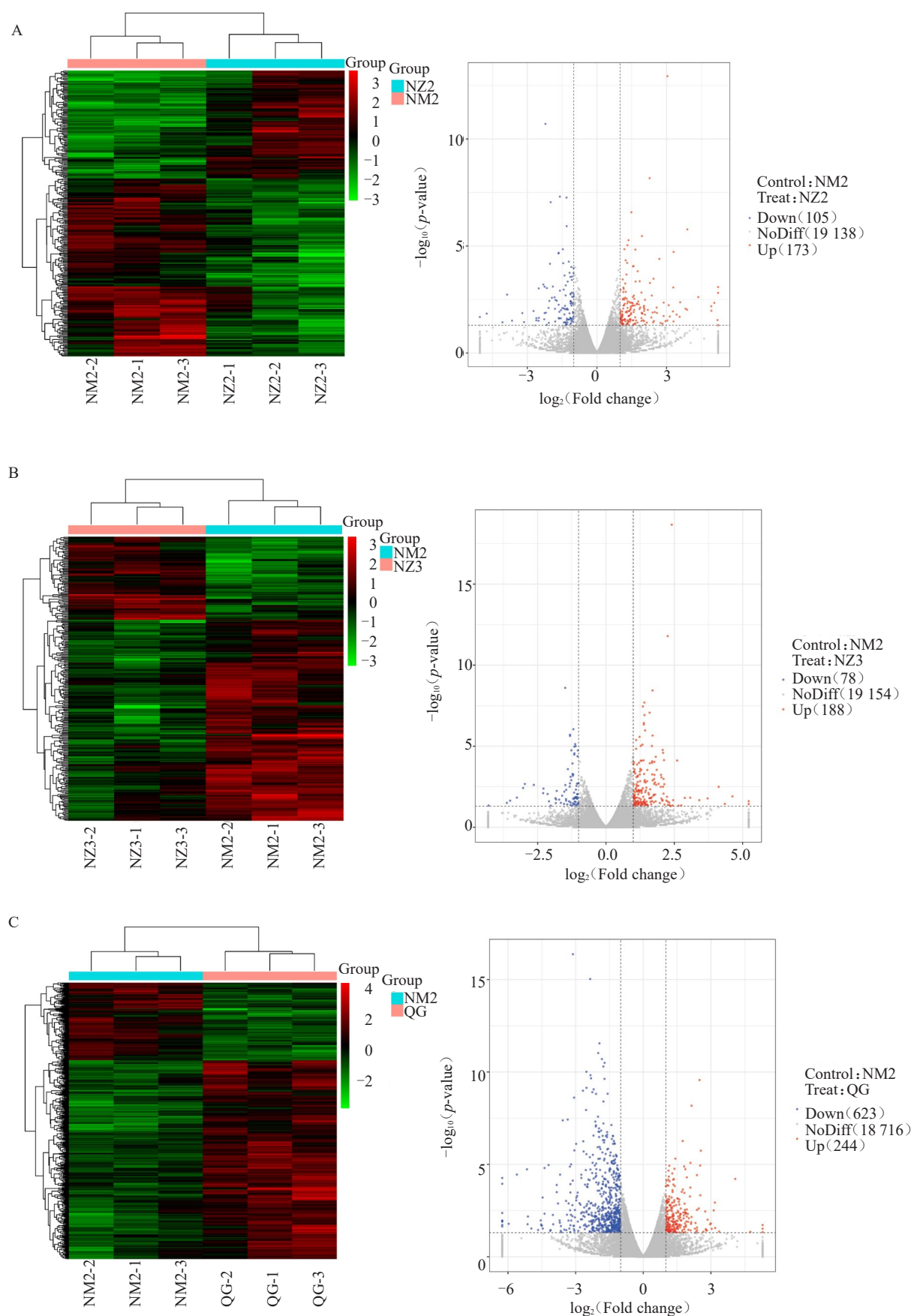
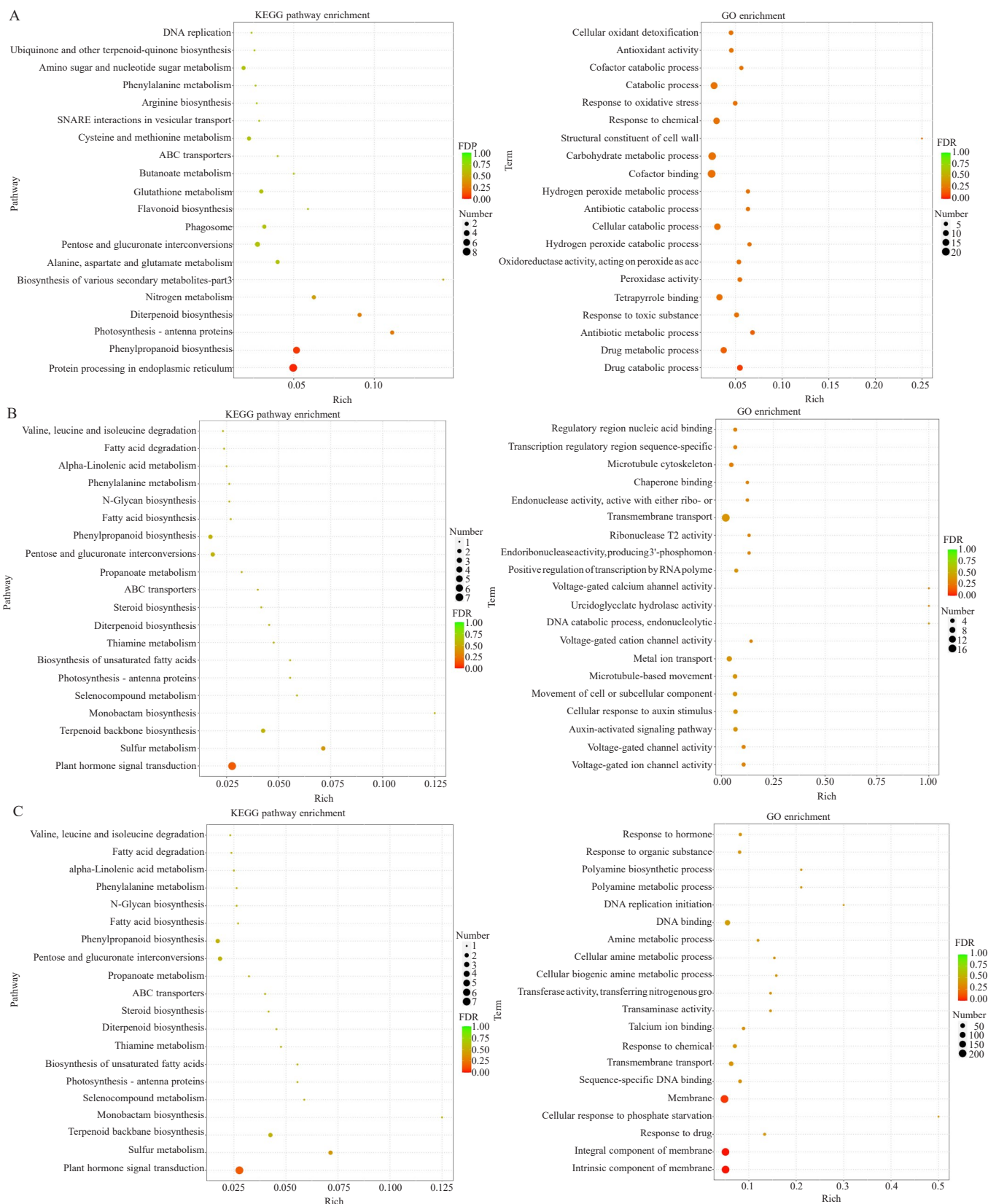


图2 不同砧木嫁接后西瓜基因表达差异的转录组图谱

Fig. 2 Transcriptomic analysis of gene expression differences in watermelon fruit following grafting with various rootstocks



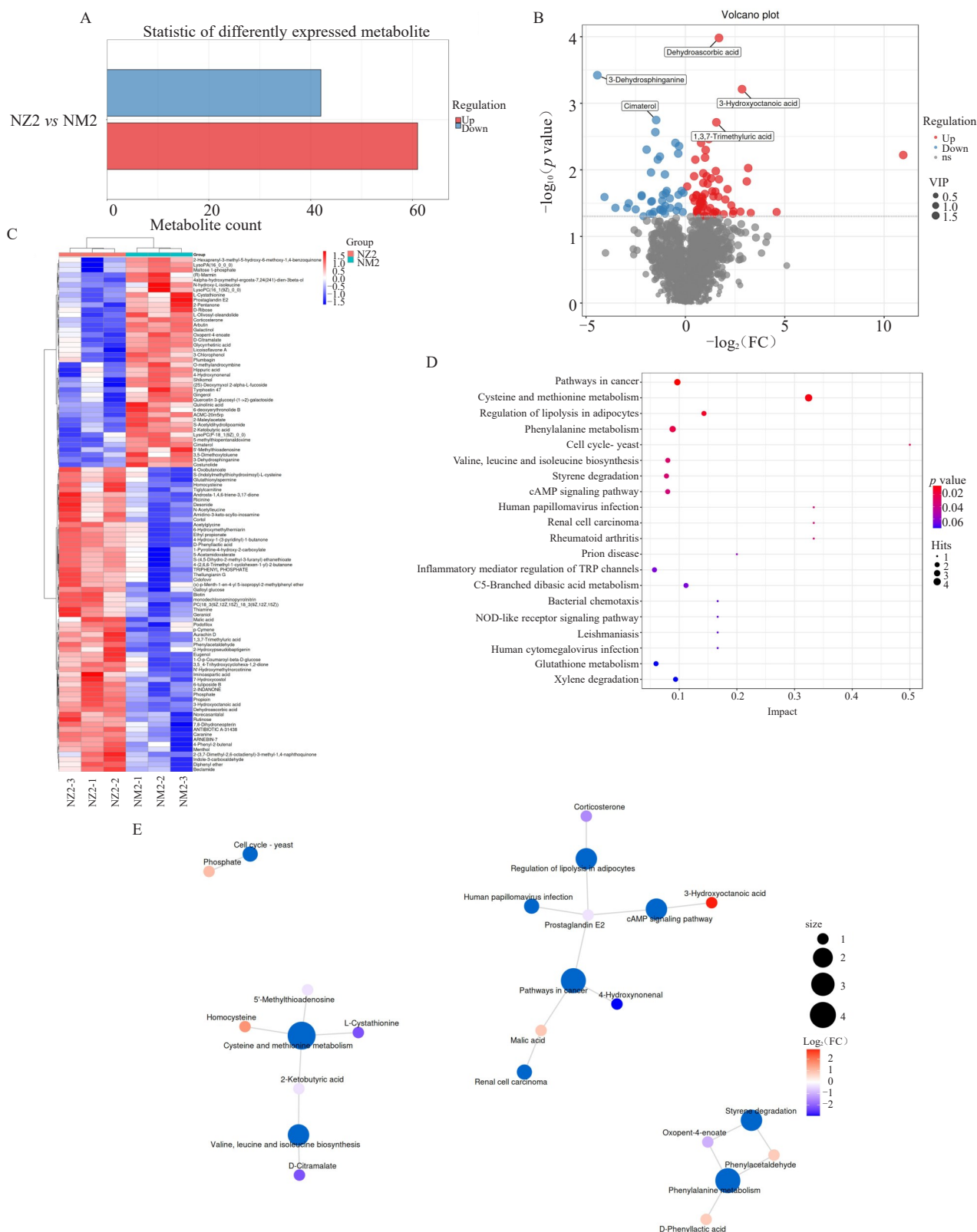
注: A. 南瓜型砧木(NZ2)vs 自嫁接西瓜(NM2); B. 野生型砧木(NZ3)vs 自嫁接西瓜(NM2); C. 葫芦型砧木(QG)vs 自嫁接西瓜(NM2)。

Note: A. Pumpkin-type rootstock (NZ2) vs Self-grafted watermelon (NM2); B. Wild-type rootstock (NZ3) vs Self-grafted watermelon (NM2);

C. Gourd-type rootstock (QG) vs Self-grafted watermelon (NM2).

图3 不同砧木嫁接后西瓜功能基因 KEGG 通路富集差异和 GO 功能分析

Fig. 3 Differential KEGG pathway enrichment and GO functional analysis of functional genes in watermelon after grafting with different rootstocks



注:A. 差异代谢物统计图;B. 差异代谢物火山图;C. 差异代谢物热图;D. 差异代谢物通路富集分析;E. 差异表达代谢物通路网络图。

Note: A. Statistics of differentially expressed metabolites; B. Volcano plot of differentially expressed metabolites; C. Heatmap of differentially expressed metabolites; D. Metabolic pathway enrichment analysis of differentially expressed metabolites; E. Metabolic pathway network of differentially expressed metabolites.

图4 南瓜型砧木(NZ2)嫁接对西瓜代谢物表达的影响

Fig. 4 Effects of pumpkin-type rootstock (NZ2) grafting on watermelon metabolite expression

括 dehydroascorbic acid (脱氢抗坏血酸)、3-hydroxyoctanoic acid (3-羟基辛酸) 和 1,3,7-trimethyluric acid (1,3,7-三甲基尿酸), 揭示宁砧 2 号通过增强抗氧化防御和能量代谢转化能力, 提高植物的应激耐受性和生长效率。同时, 下调应激代谢物, 如 cimaterol (西玛特醇) 和 3-dehydrosphinganine (3-脱氢鞘氨酸), 表明宁砧 2 号通过抑制过度应激反应维持代谢稳态。KEGG 通路富集分析 (图 4-D-E) 结果进一步阐释了宁砧 2 号通过 “Cysteine and methionine metabolism” (半胱氨酸和蛋氨酸代谢)、“Phenylalanine metabolism” (苯丙氨酸代谢)、“Regulation of lipolysis in adipocytes” (脂肪代谢调节) 和 “cAMP signaling pathway” (cAMP 信号通路) 等通路多维度协同调节嫁接西瓜的生理生化特性。

图 5 全面分析了宁砧 3 号对嫁接西瓜代谢物表达的影响, 上调代谢物数量显著多于下调。其中, N2-acetylornithine (N2-乙酰鸟氨酸, 提升抗氧化能力)、17-HDoHE (17-羟基多不饱和脂肪酸, 激活 PPAR γ 信号通路促进脂质 β -氧化) 和 α -L-arabinopyranose (α -L-阿拉伯吡喃糖, 增强细胞壁强度) 等代谢物显著积累, 而 zealexin A1 (玉米黄质 A1)、 α -3-pyridinemethanol (α -3-吡啶甲醇) 下调, 表明砧木通过降低代谢能耗维持系统能量代谢。图 5-D-E 揭示了 sulfur relay system (硫传递系统, 调控氧化还原稳态)、steroid hormone biosynthesis (类固醇激素生物合成)、aldosterone synthesis and secretion (醛固酮合成与分泌)、hormone biosynthesis (激素生物合成)、staurosporine biosynthesis (星孢菌素生物合成, 调节逆境信号转导)、“caffeine metabolism” (咖啡因代谢, 清除环境毒素)、TGF- β signaling pathway (TGF- β 信号通路, 激活细胞扩张基因) 和 caprolactam degradation (己内酰胺降解, 清除环境毒素) 等通路的富集, 构成了层级化调控网络, 影响生理和生化特性。

图 6 深入分析了强根嫁接对西瓜代谢物表达的影响。代谢物组学分析显示, D-柠檬酸 (D-Citramalate)、二氢鞘氨醇 (3-dehydrosphinganine)、酚酸糖苷 (trans-p-Feruloyl- β -D-glucopyranoside)、花青素类化合物 (Peonidin 3-rhamnoside 5-glucoside)、3-羟基辛酸 (3-Hydroxyoctanoic acid) 等物质的积累构成了抗氧化防御的核心。图 6-D-E 揭示了硫传递系统、氧化磷酸化、支链氨基酸生物合成 (增强果实蛋白质合成能力)、cAMP 信号通路、矿物质吸收、

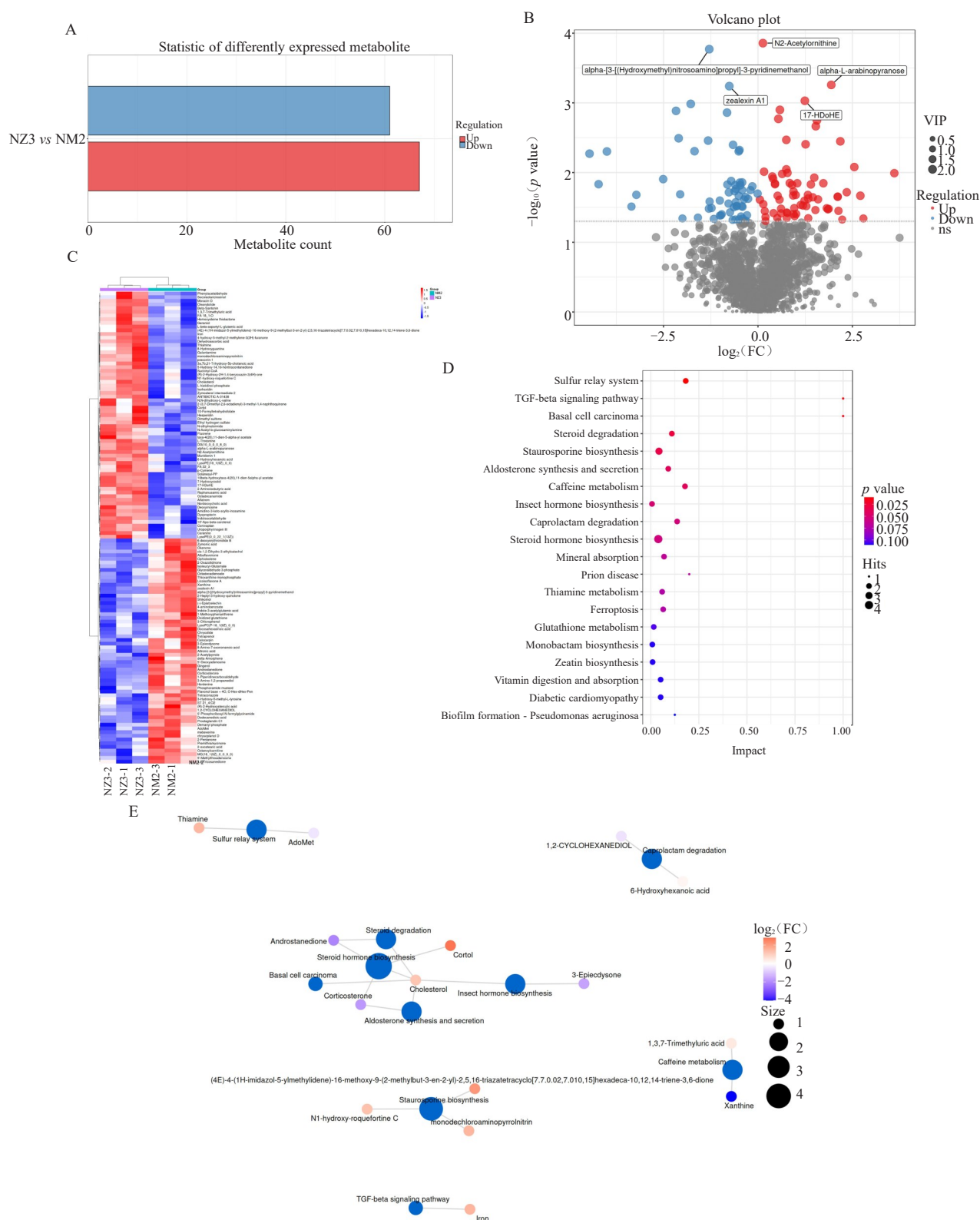
苯乙烯降解 (降低果实重金属残留量) 以及丙氨酸-天冬氨酸-谷氨酸代谢 (维持碳氮代谢平衡) 等通路的激活, 有助于共同提升果实品质。

3 讨论与结论

嫁接栽培在设施西瓜生产中发挥着至关重要的作用, 它不仅有助于解决连作障碍和土传病害问题, 还能显著提高西瓜的抗逆性。现有研究多集中于砧木新品种的选育及其抗病性和抗逆性的提高^[7-8, 14-15], 但对于嫁接如何改变西瓜品质的机制研究还相对较少。笔者采用转录组学和代谢组学的方法, 深入分析了不同砧木类型对设施西瓜品质的影响, 揭示了嫁接西瓜品质变化的分子机制。

转录组数据分析显示, 不同砧木对嫁接西瓜基因表达的影响存在显著差异。其中, 南瓜型砧木和野生西瓜型砧木对基因表达的影响相对较小, 而葫芦型砧木则引发了更强烈的基因响应, 下调基因数量显著增加。这一发现与前人关于砧木类型对嫁接西瓜基因表达调控具有重要影响的研究结果基本一致^[16-17], 这种差异可能与砧木特定的生物学特性或与接穗的相互作用有关。代谢组学分析进一步揭示了不同砧木类型对设施西瓜生理和生化特性的潜在影响。南瓜型砧木显著影响了嫁接西瓜内质网中的蛋白质加工通路, 可能增强了设施西瓜的天然防御机制并改善了品质特性。赵加欣等^[18]的研究也证实了在西瓜/南瓜嫁接体系中接穗对砧木根系碳水化合物代谢的抑制作用及对逆境胁迫响应的促进作用。野生西瓜型砧木和葫芦型砧木处理显著富集了植物激素信号转导通路, 这可能与促进设施西瓜生长、增强抗逆性和改变果实品质密切相关。张玉锦等^[19]的研究证实了野生西瓜砧木显著促进了嫁接苗的生长。而邢乃林等^[20]的研究则发现, 野生砧木提高了设施西瓜中的果糖、番茄红素含量, 葫芦砧木却显著降低了果实葡萄糖和蔗糖含量。

在品质特征方面, 自嫁接西瓜在总糖、总酸和可溶性固形物含量分布上表现较优, 而南瓜型砧木和野生型砧木嫁接西瓜维生素 C 含量较高。自嫁接西瓜的粗纤维含量最低, 有助于提供更细腻的口感, 而不同砧木嫁接后粗纤维含量显著升高, 尤其是野生型嫁接西瓜的粗纤维含量增至 0.21%, 这在一定程度上影响了果肉的口感细腻度。这些结果与代谢组数据相互印证, 进一步支持了砧木类型对设施西瓜代谢途径和果实品质有直接影响的结论。

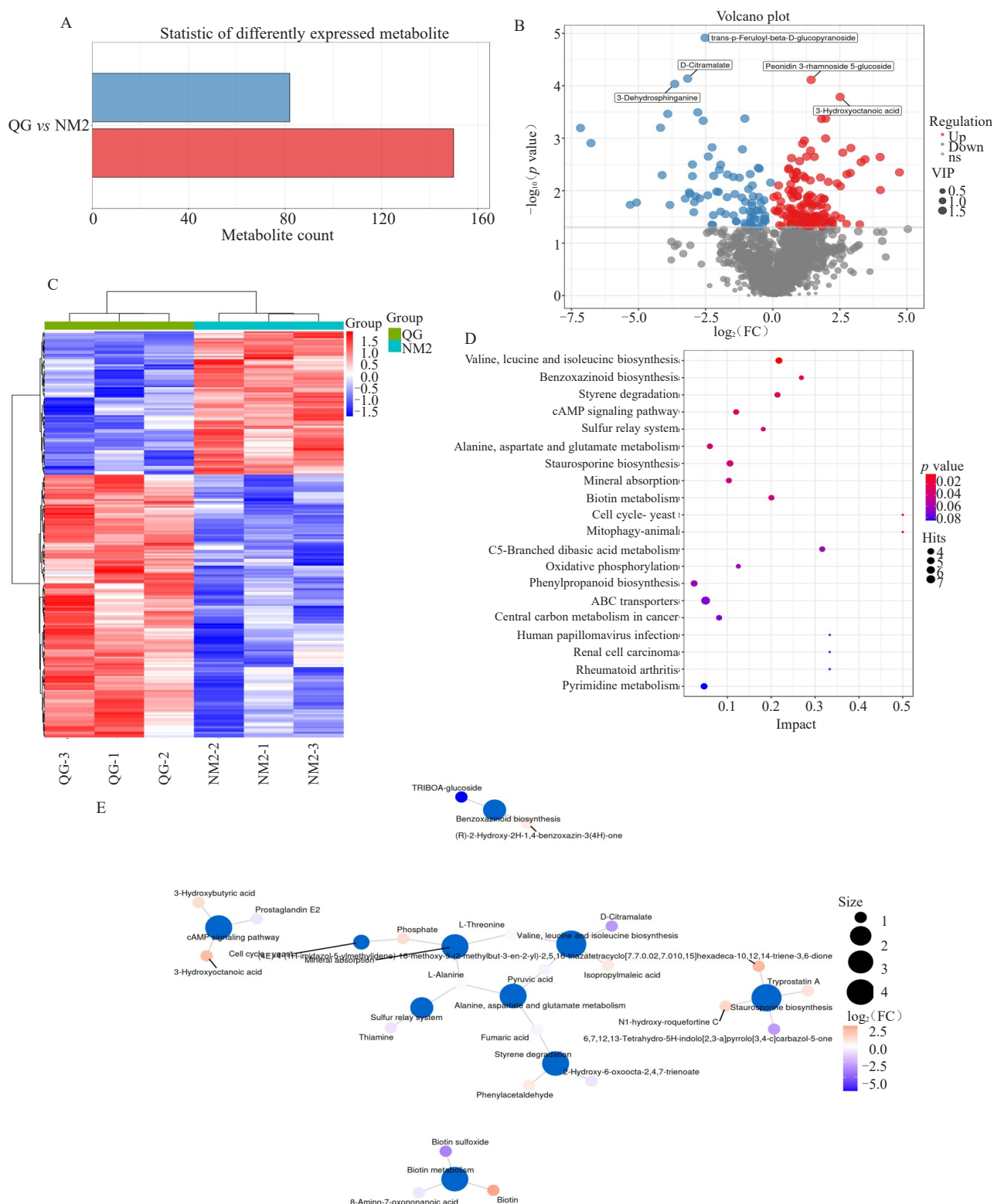


注: A. 差异代谢物统计图; B. 差异代谢物火山图; C. 差异代谢物热图; D. 差异代谢物通路富集分析; E. 差异代谢物通路网络图。

Note: A. Statistics of differentially expressed metabolites; B. Volcano plot of differentially expressed metabolites; C. Heatmap of differentially expressed metabolites; D. Metabolic pathway enrichment analysis of differentially expressed metabolites; E. Metabolic pathway network of differentially expressed metabolites.

图5 野生型砧木(NZ3)嫁接对西瓜代谢物表达的影响

Fig. 5 Effects of wild-type rootstock (NZ3) grafting on watermelon metabolite expression



注: A. 差异表达代谢物统计图; B. 差异表达代谢物火山图; C. 差异表达代谢物热图; D. 差异表达代谢物通路富集分析; E. 差异表达代谢物通路网络图。

Note: A. Statistics of differentially expressed metabolites; B. Volcano plot of differentially expressed metabolites; C. Heatmap of differentially expressed metabolites; D. Metabolic pathway enrichment analysis of differentially expressed metabolites; E. Metabolic pathway network of differentially expressed metabolites.

图6 葫芦型(QG)砧木嫁接对西瓜代谢物表达的影响

Fig. 6 Effects of gourd-type rootstock (QG) grafting on watermelon metabolite expression

综上所述,笔者采用转录组学和代谢组学的综合分析方法,深入探讨了不同砧木类型对设施西瓜品质的影响,揭示了嫁接西瓜品质变化的分子机制。研究发现,砧木类型对嫁接西瓜的基因表达、生理生化特性和果实品质均有显著影响。基于上述发现,结合当地气候、土壤条件及市场需求,南瓜型砧木宁砧2号(NZ2)因其在提高营养品质和抗逆性方面的优势,是比较适合本区域嫁接栽培的砧木品种。

参考文献

- [1] 杨冬艳,冯海萍,曲继松,等.不同类型砧木嫁接对西瓜苗期若干性状的影响[J].中国瓜菜,2014,27(增刊1):69-71.
- [2] 桑婷,杨冬艳,王雪梅,等.不同砧木对日光温室秋冬茬嫁接西瓜产量品质及叶绿素荧光特性的影响[J].东北农业大学学报,2017,48(9):43-50.
- [3] 李俊玲.不同类型砧木嫁接对西瓜果实品质的影响[J].农业工程,2024,14(9):50-54.
- [4] 林听原,别之龙,黄远,等.广西地区不同砧木嫁接对西瓜生长和果实品质的影响[J].中国瓜菜,2025,38(1):102-108.
- [5] 李帅,宋宇,张春雨,等.不同南瓜砧木组合对小果型西瓜生长和果实品质的影响[J].中国瓜菜,2024,37(8):82-91.
- [6] DEVI P, DEVETTER L, KRAFT M, et al. Micrographic view of graft union formation between watermelon scion and squash rootstock[J].Frontiers in Plant Science,2022,13:878289.
- [7] LI H, GUO Y L, LAN Z X, et al. Methyl jasmonate mediates melatonin-induced cold tolerance of grafted watermelon plants[J].Horticulture Research,2021,8(1):57.
- [8] ASLAM A, ZHAO S J, AZAM M, et al. Comparative analysis of primary metabolites and transcriptome changes between ungrafted and pumpkin-grafted watermelon during fruit development[J].PeerJ,2020,8:e8259.
- [9] CHU S P, WANG S S, ZHANG R M, et al. Integrative analysis of transcriptomic and metabolomic profiles reveals new insights into molecular foundation of fruit quality formation in *Citrullus lanatus*(Thunb.)Matsum.& Nakai[J].Food Quality and Safety,2022,6:fyac015.
- [10] HERMANN S A, ZHOU X S, XU Q, et al. Carotenoid pigment accumulation in horticultural plants[J]. Horticultural Plant Journal,2020,6(6):343-360.
- [11] REN Y, LI M Y, GUO S G, et al. Evolutionary gain of oligosaccharide hydrolysis and sugar transport enhanced carbohydrate partitioning in sweet watermelon fruits[J]. Plant Cell,2021,33(5):1554-1573.
- [12] UMER M J, BIN SAFDAR L, GEBREMESKEL H, et al. Identification of key gene networks controlling organic acid and sugar metabolism during watermelon fruit development by integrating metabolic phenotypes and gene expression profiles[J]. Horticulture Research,2020,7(1):193.
- [13] 杨万邦,王晓媛,杜慧莹,等.不同嫁接砧木对旱砂田西瓜生长及品质和产量的影响[J].寒旱农业科学,2022,1(11):119-123.
- [14] LIU Y, ZHANG W H, ELANGO D, et al. Metabolome and transcriptome analysis reveals molecular mechanisms of watermelon under salt stress[J]. Environmental and Experimental Botany,2023,206:105200.
- [15] CHEN S, ZHONG K Q, LI Y Y, et al. Joint transcriptomic and metabolomic analysis provides new insights into drought resistance in watermelon (*Citrullus lanatus*) [J]. Frontiers in Plant Science,2024,15:1364631.
- [16] RASOOL A, MANSOOR S, BHAT K M, et al. Mechanisms underlying graft union formation and rootstock scion interaction in horticultural plants[J]. Frontiers in Plant Science,2020,11:590847.
- [17] JANG Y, MOON J H, KIM S G, et al. Effect of low-temperature tolerant rootstocks on the growth and fruit quality of watermelon in semi-forcing and retarding culture[J]. Agronomy,2023,13(1):67.
- [18] 赵加欣,谢露露,温正阳,等.基于蛋白质组学研究西瓜接穗对嫁接苗根系生长的影响[J].西北农业学报,2024,33(8):1470-1482.
- [19] 张玉锦,耿二康,崔梦娇,等.野生西瓜砧木对西瓜生长及枯萎病抗性的影响[J].江苏农业科学,2023,51(12):135-141.
- [20] 邢乃林,严蕾艳,王毓洪,等.不同类型砧木嫁接对西瓜果实品质和镉含量的影响[J].江西农业学报,2022,34(8):17-21.