

基于广泛靶向代谢组学分析桃果体内代谢物对异常威克汉姆酵母的响应

李军¹, 周娅丽², 陈夕飞², 张晓云², 赵利娜^{2*}, 张红印^{2*}

(1. 江苏大学公共实验与服务中心, 江苏镇江 212013) (2. 江苏大学食品与生物工程学院, 江苏镇江 212013)

摘要: 该研究主要探究采后桃果实对异常威克汉姆酵母 (*Wickerhamomyces anomalus*) 处理后的响应机制, 明确桃果实体内的代谢物种类变化, 以期为异常威克汉姆酵母处理提高桃果实抗病机制提供理论依据。利用广泛靶向代谢组学技术, 结合 UPLC-MS/MS 方法, 对 *W. anomalus* 处理组与对照组的差异代谢物进行定性和定量分析。通过应用正交偏最小二乘-判别分析 (OPLS-DA), 构建判别模型, 并据此筛选出关键的差异代谢物。最后通过绘制聚类热图、KEGG 富集分析、主成分分析和相关性分析等, 确定异常威克汉姆酵母处理后桃果体内关键差异代谢物质的变化。研究结果显示: *W. anomalus* 处理组共筛选出 175 个差异代谢物, 具体表现为 115 种代谢物含量增加, 60 种含量减少。这些差异代谢物涵盖了萜类、黄酮类、酚酸类化合物、生物碱、木脂素以及香豆素等多种类型。与抑菌、抗氧化、抵御生物和非生物胁迫、促进植物生长、抗植物衰老等功能相关的萜类、黄酮类、酚酸类、生物碱类次生代谢物质的积累, 提高了桃果实的抗病能力。这些结果为未来拮抗酵母制剂的开发提供了可用信息。

关键词: 桃果; 生物防治; 异常威克汉姆酵母; 代谢组学; 差异代谢物

文章编号: 1673-9078(2026)01-53-60

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.1.1550

Response of Metabolites in Peach Fruit to *Wickerhamomyces anomalus* Based on Extensive Targeted Metabonomics Analysis

LI Jun¹, ZHOU Yali², CHEN Xifei², ZHANG Xiaoyun², ZHAO Lina^{2*}, ZHANG Hongyin^{2*}

(1. Public Experiment & Service Center, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

(2. School of Food Science and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: The response mechanisms of postharvest peach fruit to the treatment with *Wickerhamomyces anomalus* were primarily investigated in this study. The changes in the types of metabolites within the peach fruit were clarified, to provide a theoretical basis for the antifungal mechanism underlying the *Wickerhamomyces anomalus* treatment for enhancing the disease resistance of peach fruit. Using the extensive targeted metabonomics technology, in combination with UPLC-MS/MS/MS, qualitative and quantitative analyses were conducted on the differential metabolites between the *W. anomalus* treatment group and the control group. A discriminant model was established by applying orthogonal partial least squares-discriminant analysis (OPLS-DA), and then

引文格式:

李军,周娅丽,陈夕飞,等.基于广泛靶向代谢组学分析桃果体内代谢物对异常威克汉姆酵母的响应[J].现代食品科技, 2026,42(1):53-60.

LI Jun, ZHOU Yali, CHEN Xifei, et al. Response of metabolites in peach fruit to *Wickerhamomyces anomalus* based on extensive targeted metabonomics analysis [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(1): 53-60.

收稿日期: 2024-10-18; 修回日期: 2025-02-10; 接受日期: 2025-02-14

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (32372401; 32272383)

作者简介: 李军 (1978-), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向: 食品微生物, E-mail: lij_023@163.com

通讯作者: 赵利娜 (1986-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 食品微生物, E-mail: linabobo0706@163.com; 共同通讯作者: 张红印 (1972-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品微生物, E-mail: zhanghongyin126@126.com

key differential metabolites were screened accordingly. Finally, the changes of key differential metabolites in peach fruit following the *W. anomalus* treatment were determined through cluster thermography, KEGG enrichment analysis, principal component analysis and correlation analysis. The results showed that 175 different metabolites were screened out in the *W. anomalus* treatment group, with contents of 115 metabolites increasing and contents of 60 metabolites decreasing. These differential metabolites include terpenoids, flavonoids, phenolic acids, alkaloids, lignans and coumarins. The accumulation of secondary metabolites such as terpenoids, flavonoids, phenolic acids and alkaloids associated with bacteriostasis, antioxidation, defense against abiotic and biotic stresses, plant growth promotion, and plant senescence resistance, has improved the disease resistance of peach fruit. These results provide useful information for the development of antagonistic yeast preparations in the future.

Key words: peach fruit; biological control; *Wickerhamomyces anomalus*; metabonomics; differential metabolites

桃 (*Prunus persica*) 是一种核果类植物, 属于蔷薇科和桃属。桃果不仅鲜美多汁, 香气扑鼻, 口感细腻, 色泽艳丽, 而且营养丰富, 果实的蛋白质与矿物质含量高, 还富含多酚、可溶性糖分、有机酸、维生素和人体必需的氨基酸等营养元素, 拥有较高的食用及药用价值, 是我国最受欢迎的时令水果之一^[1]。我国是世界最大的桃生产国, 拥有最广泛的桃树种植面积和产量, 并培育出 1 000 余个不同品种^[2]。

桃果是典型的呼吸跃变型水果, 采后代谢十分旺盛, 具有质地柔软、果皮薄弱的特点, 在贮运及销售过程中, 极易遭受病原菌的侵染而导致腐烂变质, 尤其是受到机械损伤的果实, 腐烂更为严重^[3]。世界范围内的桃果采后病害主要是由致病性真菌侵染引起的, 这严重降低了桃果的商品价值和食用价值, 对桃果产业造成巨大的经济损失。传统上控制桃果采后病害的方法为使用化学杀菌剂, 以及使用低温^[4]、热处理^[5]、气调贮藏^[6]、臭氧处理^[7]等物理方法。这些方法虽然抑制效果好, 但也存在毒性大、污染环境、设备昂贵、成本高等劣势, 而生物防治作为一种绿色安全的方法越来越受到各国研究者的重视和青睐。

植物体内的代谢物是反映其生理状况及代谢活跃度的直接指标, 且因物种、组织类型及所处环境有所差异。植物在应对逆境胁迫时涉及多种代谢物质的积累变化^[8]。随着数据库的不断积累和生物信息学快速发展, 代谢组学已广泛应用于植物抗病性研究, 可从多层面分析显著差异代谢物的积累模式, 绘制代谢调控网络图, 找出差异代谢通路上的差异基因, 研究其功能与作用机理, 在植物体响应生物和非生物胁迫反应的机理解析中起着关键作用^[9]。

目前, 代谢组学技术在水果采后病害生物防治机制研究中具有广泛的应用。Zeng 等^[10]通过代谢组发现柚皮苷通过促进橙皮油素、butin、柚皮素和木犀草素代谢物的积累, 延缓柑橘果实采后腐烂。Yang 等^[11]利用代谢组学技术对指状青霉 (*Penicillium digitatum*)

侵染后的柑橘伤口处的代谢物分析发现, 有机酸、酯类、氨基酸、D-葡萄糖等物质含量大幅增高。Shen 等^[12]发现在扩展青霉感染过程中, 大多数糖类物质减少, 而大多数有机酸, 氨基酸和肽类增加。酚类物质和脂肪酸及其衍生物含量的增加可能提高了果实抗病性。

之前的研究发现, 异常威克汉姆酵母能够显著控制桃果采后由美澳型核果褐腐病菌 (*Monilinia fructicola*) 引起的褐腐病、黑曲霉 (*Aspergillus niger*) 引起的曲霉病和匍枝根霉 (*Rhizopus stolonifer*) 引起的软腐病的发生, 同时能够显著提高桃果体内防御相关酶活性、防御相关物质含量、抗氧化相关酶活性等^[13]。但桃果响应异常威克汉姆酵母处理的具体物质基础尚不清楚, 因此本文基于广泛靶向代谢组学技术采用 UPLC-MS/MS 定性定量分析 *W. anomalus* 处理组与对照组之间的差异代谢物, 通过应用正交偏最小二乘-判别分析 (OPLS-DA), 构建判别模型, 并据此筛选出关键的差异代谢物, 最后通过绘制聚类热图、KEGG 富集分析、主成分分析和相关性分析等, 确定异常威克汉姆酵母处理后桃果体内关键差异代谢物质的变化。探讨异常威克汉姆酵母 (*Wickerhamomyces anomalus*) 对采后桃果代谢物质的影响, 为拮抗酵母处理提高桃果实抗病机制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

(1) 培养基: NYDB 培养基 (配制方法: 准确称取酵母浸膏 5 g, 牛肉浸膏 8 g, 葡萄糖 10 g, 超声溶解完全后用蒸馏水定容至 1 L, 然后于 115 °C 高压灭菌 20 min) (2) 桃果: 桃果 (品种: 突围) 从镇江农副产品批发市场购买。(3) *W. anomalus*: *W. anomalus* 为本课题组前期筛选得到, 保藏于中国典型培养物保藏中心 (CCTCC)。保藏地址: 湖北省武汉市武昌区武汉大学校内; 保藏编号: CCTCCC M2018053。(4) 所需

试剂：甲醇和乙腈购自 Merck 公司，甲酸购自 Aladdin 公司，均为色谱级。

1.2 设备与仪器

ExionLC™ AD 超高效液相色谱，日本岛津公司；Applied Biosystems 6500 QTRAP 串联质谱，赛默飞世尔科技公司；Scientz-100F 型冻干机，宁波新芝生物科技股份有限公司；MM 400 Retsch 型研磨仪，弗尔德（上海）仪器设备有限公司；Agilent SB-C18 色谱柱，安捷伦科技有限公司；GR85DA 全自动高压灭菌锅，致微（厦门）仪器有限公司；HYL-C 型组合式摇床，太仓市强乐试验设备有限公司；WYS-CX23 光学显微镜，上海缔伦光学仪器有限公司；5810R 高速冷冻离心机，德国 Eppendorf 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 桃果预处理

选择无病虫害、无机械损伤、商业成熟度、色泽和大小基本一致的桃果进行研究。桃果用体积分数为 0.5% 的次氯酸钠溶液浸泡 5 min 后用自来水冲洗桃果表面，然后将其随机摆放在塑料框（49 cm×38 cm×14 cm）内，在室温下自然风干。

1.3.2 *W. anomalus* 菌悬液制备

将保存的 *W. anomalus* 接种在含有 50 mL NYDB 的锥形瓶中，在 28 ℃，180 r/min 下培养 24 h。然后按体积分数为 1% 的接种量将第一次活化的 *W. anomalus* 接种在新的含有 50 mL NYDB 的锥形瓶中，在 28 ℃，180 r/min 下培养 24 h。培养完成后用无菌水清洗两次，8.5 g/L 的无菌生理盐水清洗一次，然后用 8.5 g/L 的无菌生理盐水重悬。在试验之前，借助血细胞计数器将酵母浓度调节至每毫升 1×10⁸ cells。

1.3.3 桃果组织样品的制备

在桃果表面用无菌打孔器等距离造成三个伤口（深 4 mm×直径 5 mm），将 30 μL 的 *W. anomalus* 菌悬液注射到每个桃果伤口，无菌生理盐水作对照。自然晾干后置于 25 ℃，相对湿度为 95% 的恒温恒湿培养箱中贮藏，48 h 后取样。将取好的样品放于 50 mL 灭菌离心管中，液氮速冻后置于 -80 ℃冰箱中保存。对照组和 *W. anomalus* 处理组各取三个样本，每个样本由 12 个桃果伤口处的果肉组成。对照组三个样本命名为 CK1、CK2、CK3，*W. anomalus* 处理组三个样本命名为 Y1、Y2、Y3。

1.3.4 桃果组织样品中代谢物的提取

样品先经冷冻机进行真空冷冻干燥处理，随后利

用研磨仪（30 Hz，1.5 min）研磨，直至形成精细的粉末状。接着，精确称量 50 mg 粉末，并使用 1.2 mL 体积分数为 70% 的甲醇溶液进行溶解。溶解期间，每隔 30 min 进行一次涡旋混合，每次持续 30 s，共进行 6 次。完成提取后，12 000 r/min 离心 3 min，然后通过 0.22 μm 的微孔滤膜过滤上清液，并将其保存在进样瓶中，以备后续的 UPLC-MS/MS 分析使用。

1.3.5 代谢物检测

数据采集利用超高效液相色谱（UPLC）和串联质谱（MS/MS）进行。液相分析选用的色谱柱为 Agilent SB-C18（1.8 μm，2.1 mm×100 mm），柱温设置为 40 ℃，进样量设置为 2 μL。流动相组成包含 A 相与 B 相两种。其中，A 相为添加了体积分数为 0.1% 甲酸的超纯水，而 B 相则是添加了体积分数为 0.1% 甲酸的乙腈溶液。洗脱程序见表 1。质谱分析条件按表 2 所述参数进行设置，在三重四极杆中，通过优化去簇电压（DP）和碰撞能（CE）检测每个离子。

表 1 洗脱程序

Table 1 The elution procedure			
时间/min	流量/(mL/min)	A 相比例/%	B 相比例/%
0.00	0.35	95	5
9.00	0.35	5	95
10.00	0.35	5	95
11.01	0.35	95	5
14.00	0.35	95	5

表 2 MS/MS分析条件及参数

Table 2 MS/MS analysis conditions and parameters	
质谱条件	参数
电喷雾离子源	500 ℃
离子喷雾电压（IS）（正离子模式）	5 500 V
离子喷雾电压（IS）（负离子模式）	-4 500 V
离子源气体 I（GSI）	0.34 MPa
离子源气体 II（GSII）	0.41 MPa
气帘气（CUR）	0.17 MPa
碰撞诱导电离参数	高
QQQ 扫描	MRM 模式
碰撞气体（氮气）	中等

1.3.6 数据处理

质谱数据利用软件 Analyst 1.6.3 处理。使用京都基因与基因组百科全书（Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes, KEGG）数据库和自建数据库 MWDB（Metware database）数据库对鉴定出的代谢物进行注释。采用 *t* 检验进行显著性分析，并计算代谢物

在两组间的差异倍数 (Fold change, FC)。差异代谢物筛选的标准为 $VIP \geq 1$ 且 $Fold\ change \geq 2$ 和 $Fold\ change \leq 0.5$ 。OPLS-DA 模型验证中 $P < 0.05$ ，说明模型稳健性好，不存在过拟合现象。采用 Excel 软件绘制图表。

2 结果与讨论

2.1 测序数据及质量

2.1.1 总离子流图

将质谱数据与 MWDB 数据库比对，共有 821 个代谢物被检测到。代谢物提取与检测技术的可信度，通过针对多种质量控制 (QC) 样本实施质谱分析及总离子流图 (TIC 图) 的重叠比对来评估，如图 1 所示。不同质控样本的 TIC 图展现出良好的重叠性，这反映了信号的高稳定性，从而确保了检测结果的可靠性。

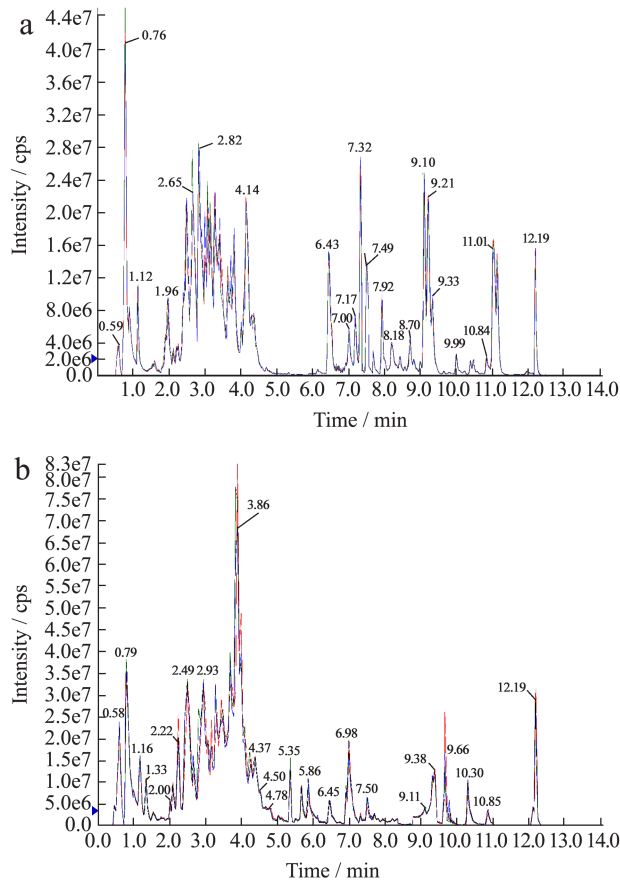


图 1 QC 样本质谱检测 TIC 重叠图

Fig.1 Detection of TIC overlay by QC sample mass spectrometry

注: N 代表负离子模式; P 代表正离子模式。

2.1.2 主成分分析

分组样品组间和组内的变异度大小通过主成分分析 (PCA) 观察，如图 2 所示。在 PC1 上，各分组组内样品间距离较小，说明检测结果可靠。

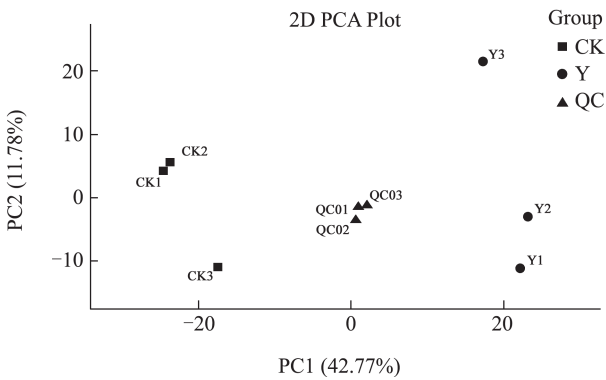


图 2 分组样品与质控样品 PCA 得分图

Fig.2 PCA score chart of grouped samples and quality control samples

注: CK 代表无菌水处理; Y 代表 *W. anomalus* 处理。

2.2 OPLS-DA构建及模型验证

2.2.1 OPLS-DA模型概要

OPLS-DA 是 PLS-DA (偏最小二乘回归分析法) 的衍生算法，结合了正交信号校正 (OSC) 和 PLS-DA 方法，能够将 X 矩阵信息分解成与 Y 相关和不相关的两类信息，通过去除不相关的差异来筛选差异变量。从图 3 可以看出，CK 和 Y 在 X 轴上出现明显的簇且间距较大，说明处理组和对照组间产生的代谢物存在较大差异。

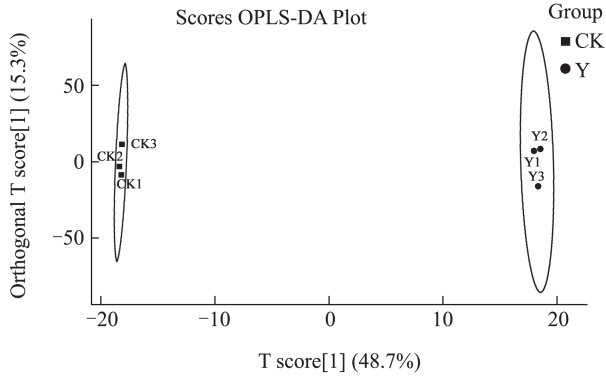


图 3 OPLS-DA 得分图

Fig.3 OPLS-DA score chart

注: CK 代表无菌水处理; Y 代表 *W. anomalus* 处理。

2.2.2 OPLS-DA模型验证

OPLS-DA 评估模型采用 R^2X 、 R^2Y 及 Q^2 作为关键预测参数。具体而言， R^2X 衡量模型对 X 矩阵 (自变量) 的解释能力; R^2Y 评估模型对 Y 矩阵 (因变量) 的解释程度; 而 Q^2 则代表模型的预测精度。这些参数值越接近 1，意味着模型越加稳健且可靠。当 Q^2 值超过 0.5 时，模型被视为有效; 若 Q^2 值超过 0.9，则模型为出色模型。从图 4 可以看出 $R^2X=0.64$ ， $R^2Y=1$ 和 $Q^2=0.921$ ，说明该模型稳定可靠，为出色的模型。且

R^2Y 和 Q^2 的 P 值均小于 0.005, 说明模型稳健性好, 不存在过拟合现象。

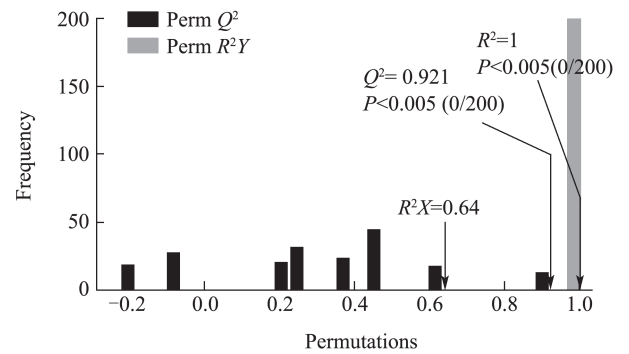


图 4 OPLS-DA 验证图

Fig.4 OPLS-DA verification diagram

2.3 差异代谢物筛选

以 $VIP \geq 1$ 且 $Fold\ change \geq 2$ 和 $Fold\ change \leq 0.5$ 为筛选标准, 共筛选出 175 个差异代谢物, 其中 115 个上调, 60 个下调。筛选到的差异代谢物主要包括萜类、黄酮类、酚酸类、生物碱、木脂素和香豆素、醌类和鞣质 (表 3)。

表 3 差异代谢物类别统计表

Table 3 Statistics of different kinds of significant differentially metabolites							
metabolites							
物质类别	总数	上调	下调	物质类别	总数	上调	下调
合计	175	115	60	木脂素和香豆素	6	3	3
萜类	66	65	1	醌类	1	0	1
黄酮	54	15	39	鞣质	1	0	1
酚酸类	28	21	7	其它类	8	6	2
生物碱	11	5	6				

2.4 显著差异代谢物的KEGG富集分析

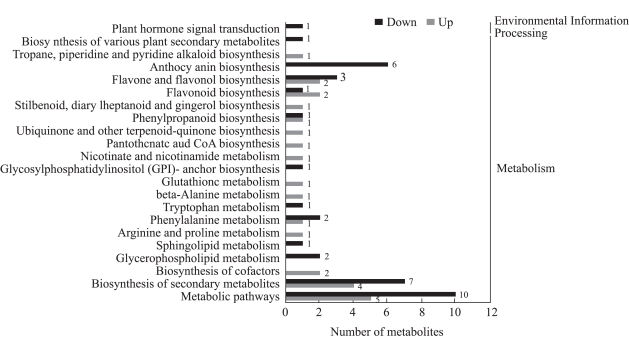


图 5 桃果中差异代谢物的 KEGG 富集分析结果

Fig.5 KEGG enrichment analysis results of differential metabolites in peach fruit

桃果中差异代谢物的 KEGG 富集分析结果如图 5 所示, 25 个差异代谢物被富集到 22 个亚类, 主要富

集到的通路为代谢途径、次生代谢产物的生物合成、花青素生物合成、类黄酮生物合成、黄酮和黄酮醇生物合成、苯丙氨酸代谢等。

2.5 显著差异代谢物功能分析

从筛选到的差异代谢物中, 挑选出与 *W. anomalus* 诱导提高桃果抗病能力相关的关键差异代谢物进行详细分析, 分类结果如表 4 所示。主要分为萜类、黄酮、酚酸、生物碱四类, 具体涉及的功能有抑菌、抗氧化、细胞毒性、抵御生物和非生物胁迫、促进植物生长、抗植物衰老等。

表 4 关键差异代谢物统计表

Table 4 Statistics of key differentiated metabolites						
Index	物质	Type	物质分类			
抑菌、抗氧化、细胞毒性						
MWSmce312	常春藤皂苷元	up	萜类			
pmf0443	小白菊内酯	up				
Zmcn009787	常春藤酮酸	up				
HJN110	白桦脂酸	up				
Wbmn011269	牡荆内酯	up				
Hmjn003948	马达积雪草酸	up				
Lmzn006169	坡模酸	up				
mws4053	熊果酸	up				
Lmjp102215	委陵菜酸	up				
Hmjp003546	羟基积雪草酸	up				
Lskp211450	阿江榄仁素	up	黄酮			
Lhwp110121	蔷薇酸	up				
抑菌、抗氧化、抗逆境胁迫、促进植物生长						
pmb3006	芹菜素-7-O-葡萄糖苷	up	黄酮			
mws0355	儿茶素没食子酸酯	up				
mws1397	表儿茶素没食子酸酯	up				
Smgp004575	槲皮素-5-O-β-D-葡萄糖苷	up				
mws0036	橙皮苷	up				
抑菌、抗氧化、促进植物生长						
pmb3074	5-O-对香豆酰奎宁酸	up	酚酸类			
pma6460	4-O-对香豆酰奎宁酸	up				
pmn001421	3-O-对香豆酰奎宁酸	up				
MWSHY0033	[6]-姜烯酚	up				
Cmzn005970	樟叶越桔苷 A	up				
mws0458	香草醛	up				
MWSmce040	异香草醛	up				
抵御生物和非生物胁迫、促进植物生长、抑菌、抗植物衰老						
MWSmce088	玫瑰树碱	up			生物碱	
mws0018	精胺	up				

五环三萜类化合物是一类重要的天然化合物，五环三萜类化合物及其衍生物具有显著的抗菌活性。五环三萜按照苷元的不同，可分为齐墩果烷型、羽扇豆烷型、木栓烷型、乌苏烷型、3,4-开环羽扇豆烷型。常春藤皂苷元属于齐墩果烷型五环三萜类化合物，具有抗肿瘤、抗菌、抗氧化等多种药理作用和生物活性。Ndjateu 等^[14]从 *Barteria fistulosa* 中分离得到的常春藤皂苷元对粪肠球菌 (*Enterococcus faecalis*) 和金黄色葡萄球菌 (*Staphylococcus aureus*) 具有很强的抑制作用，并具有一定的抗氧化活性。研究发现，齐墩果烷型三萜常春藤皂苷元对变形链球菌 (*Streptococcus mutans*) 具有显著的抑菌作用^[15]。结构修饰会导致皂苷的活性功能改变，常春藤酮酸是由齐墩果烷型三萜皂苷常春藤皂苷元的 C-3 氧化产生的，表现出弱的抗菌活性^[6]。阿江榄仁素、白桦脂酸属于羽扇豆烷型五环三萜化合物。白桦脂酸具有显著的细胞毒性，阿江榄仁素对 *S. aureus*、大肠杆菌 (*Escherichia coli*) 和 *E. faecalis* 具有中等抗菌活性 (最低抑菌浓度范围为 64~256 $\mu\text{g/mL}$)^[17]。蔷薇酸、铁冬青酸、坡模酸、熊果酸、委陵菜酸、积雪草酸等属于乌苏烷型五环三萜化合物。坡模酸具有一定的细胞毒性，且对 *S. aureus*、枯草芽孢杆菌 (*Bacillus subtilis*) ATCC 6633 等具有抑制作用^[18,19]。熊果酸对 *S. aureus*，蜡样芽孢杆菌 (*B. cereus*)，*B. subtilis* 和 *E. coli* 等均有抑制活性^[20,21]。委陵菜酸对 *S. aureus*、*E. coli* 等具有抑制作用，MIC 分别为 128 和 256 $\mu\text{g/mL}$ ^[21]。积雪草苷、羟基积雪草苷、积雪草酸和羟基积雪草酸、马达积雪草酸等是积雪草中主要的五环三萜类成分，具有抗炎，抗菌，细胞毒等作用^[22,23]。铁冬青酸对 *B. subtilis* (MIC=5 $\mu\text{g/mL}$) 具有抑制作用^[24]。小白菊内酯是一种植物源性的倍半萜内酯化合物，具有多种生物活性，比如抗增殖、抗炎、抑菌和细胞毒性等。曹妍^[25]的研究结果表明小白菊内酯对水稻白叶枯病菌 (*Xanthomonas pv. oryzae*) 具有强烈的抑菌活性，对油菜菌核病菌 (*Sclerotinia sclerotiorum*)、玉米小斑病菌 (*Helminthosporium maydis*) 与水稻细菌性条斑病菌 (*Xanthomonas oryzae pv.oryzicola*) 也有较高的抑制活性。在本研究中，*W. anomalus* 处理提高了桃果体内齐墩果烷型五环三萜类化合物常春藤皂苷元、丝石竹皂苷元、常春藤酮酸；羽扇豆烷型五环三萜化合物阿江榄仁素、白桦脂酸；乌苏烷型五环三萜化合物蔷薇酸、铁冬青酸、坡模酸、熊果酸、委陵菜酸、积雪草酸；倍半萜内酯化合物小白菊内酯等代谢物的含量，从而提高了桃果的抑菌和抗氧化能力。

植物黄酮类化合物，作为次生代谢的重要产物，

在调控植物应对生物及非生物环境因素的响应中发挥着关键作用。例如，它们参与水果和花朵的着色以吸引动物，保护植物免受生物应激源 (如食草动物、细菌、真菌) 和非生物环境应激源 (如干旱、盐度和重金属暴露、紫外线吸收) 的影响^[26]。盘柳依^[27]通过对抗病和感病两个樱桃品种接种黑斑病菌 (*Alternaria alternata*) 后 0、1 和 5 d 取病健交接处植物组织进行代谢组分析，结果发现代谢物槲皮素-5-O- β -D-葡萄糖苷可能是导致抗病、感病樱桃品种分离的重要变量之一。李程程^[28]发现芹菜素-7-O-葡萄糖苷能够有效抑制 *E. coli* 和 *S. aureus* 生物被膜的形成。表儿茶素没食子酸酯是一种具有广谱抗菌作用的活性物质，能通过改变细菌细胞膜的通透性和完整性，使细胞外的小分子容易进入以及引起细胞内的小分子物质泄漏而抑制 *E. coli*、肠炎沙门氏菌 (*Salmonella enteritidis*)、*S. mutans*、绿脓杆菌 (*P. aeruginosa*)、*B. subtilis*、*S. aureus* 等的活性^[29]。橙皮苷是一种二氢黄酮衍生物，广泛存在于柑橘属水果中，也少量存在其他植物中，具有多种生物活性。*W. anomalus* 处理的桃果体内橙皮苷含量显著上升，对提高桃果的抗病性及抗氧化能力具有有益作用。橙皮苷可有效抑制 *S. aureus*、*E. coli*、铜绿假单胞菌 (*P. aeruginosa*) 和 *B. subtilis* 的生长，其抑菌机制为改变细胞膜的通透性，从而起抑菌效果^[30]。Fevzi 等^[31]的研究发现橙皮苷能调节生理生化特性、叶绿体抗氧化酶、抗坏血酸-谷胱甘肽 (ASA-GSH) 循环减轻砷诱导的玉米植株的氧化损伤而赋予玉米抗性。本研究中，*W. anomalus* 处理后桃果体内槲皮素-5-O- β -D-葡萄糖苷、芹菜素-7-O-葡萄糖苷、儿茶素没食子酸酯、表儿茶素没食子酸酯、橙皮苷含量显著上升，推测这些具有显著生物活性的黄酮类化合物的积累可能提高了桃果的抗病性及抗氧化能力。

酚酸类物质是高等植物中广泛分布的含有酚羟基和羧基的一类次生代谢产物，除了具有清除自由基、抗氧化、抑菌作用外，还可作为信号分子在植物生长发育、植物与微生物的共生、植物防御等方面起重要作用^[32]。通过对 *W. anomalus* 处理的桃果组织代谢组分析发现酚酸类物质如：5-O-对香豆酰奎宁酸、4-O-对香豆酰奎宁酸、3-O-对香豆酰奎宁酸、[6]-姜烯酚、樟叶越桔苷 A、香草醛、异香草醛、丁香醛等代谢物的含量显著增加。研究发现，5-O-对香豆酰奎宁酸可以清除或捕获存活细胞中因紫外线诱导的 DNA 光损伤而形成的活性氧^[33]。姜辣素是生姜、干姜等姜类物质中主要的活性成分，主要包括姜酚类、姜烯酚类、姜酮酚类和姜油酮类等成分，具有多种生物活性，包括抗癌、抗氧化、抗菌、抗炎和抗过敏，以及各种中枢

神经系统活性等。姜烯酚可以由姜酚经过脱水转化而来,其抗氧化活性更强。此外,6-姜烯酚还具有一定的抑制病原微生物的能力。Takahashi 等^[34]发现 6-姜烯酚可以有效抑制白色念珠菌(*Candida albicans*)的菌丝生长。木质素是一种天然的酚类大分子,由苯丙素类单元[对羟基苯基(H)、愈创木基(G)和紫丁香基(S)]在苯环上的多个点上聚合而成。在植物细胞中,木质素有助于提高木质部组织的硬度和强度,防止微生物和水分破坏^[35]。对羟基苯基、愈创木基和丁香基的解聚能产生阿魏酸、香草醛、丁香醛等多种化合物,具有很高的抗氧化和抗菌潜力,可以改善肠道微生物群^[36]。丁香醛可作为外源信号分子影响植物的生长发育。李振双等^[37]发现丁香醛处理能显著提高檀香幼苗根系发育、养分吸收以及光合能力。香草醛因其天然、安全、有效的抗菌特性,近些年来被越来越多的学者广泛关注。香草醛对细菌、酵母和霉菌均具有良好的抑制作用。在最近的另一项研究中,香草醛在质量浓度为 750 mg/L 时显示出对从患病高粱和大麦中分离的 *A. alternata* 良好的抗真菌作用^[38]。桃果体内这些与抑菌、抗氧化、促进植物生长相关的酚酸类物质的积累显示了拮抗酵母 *W. anomalus* 在提高果实抗病性方面的潜力。

生物碱在植物中广泛存在,可通过多种代谢途径合成,具有广泛的生物活性,比如细胞毒性、抵御生物和非生物胁迫和抗炎活性。玫瑰树碱是一种呋喃生物碱,该化合物对恶性疟原虫、*E. coli*、*P. aeruginosa*、*S. aureus* 等均有显著的体外抑菌作用^[39,40]。多胺是具有两个、三个或更多氨基的低分子量线性碱性含氮化合物,在促进生长和花芽分化、提高植物抗逆特性、延缓病变衰老等方面起着重要的作用。精胺是具有脂肪族氨基的低分子量多胺,位于植物多胺合成途径的末端。精胺在植物的生长和发育过程中以及对生物和非生物胁迫的防御反应中起关键作用^[41]。研究表明,精胺通过调节植物中脱落酸的生物合成和胁迫反应赋予拟南芥盐胁迫抗性^[42]。外源精胺处理能有效控制番茄、豆类和拟南芥灰葡萄孢引起的灰霉病^[43]。*W. anomalus* 处理后桃果体内玫瑰树碱、精胺等生物碱类物质含量的积累,提高了桃果抵御生物和非生物胁迫的能力。

3 结论

植物在外界环境改变的条件下,其体内的有机酸、萜类化合物、黄酮类化合物、酚类化合物等代谢物质也会随之变化。筛选到的差异代谢物共注释到 22 条代谢通路,主要富集到的通路为代谢途径、次生代谢产物的生物合成、花青素生物合成、类黄酮生物合成、黄

酮和黄酮醇生物合成、苯丙氨酸代谢等。*W. anomalus* 处理上调了桃果体内齐墩果烷型五环三萜类化合物常春藤皂苷元、丝石竹皂苷元、常春藤酮酸;羽扇豆烷型五环三萜化合物阿江榄仁素、白桦脂酸;乌苏烷型五环三萜化合物蔷薇酸、铁冬青酸、坡模酸、熊果酸、委陵菜酸、积雪草酸;倍半萜内酯化合物小白菊内酯等萜类化合物的含量;槲皮素-5-O- β -D-葡萄糖苷、芹菜素-7-O-葡萄糖苷、儿茶素没食子酸酯、表儿茶素没食子酸酯等黄酮类化合物的含量;5-O-对香豆酰奎宁酸、4-O-对香豆酰奎宁酸、3-O-对香豆酰奎宁酸、[6]-姜烯酚、樟叶越桔苷 A、香草醛、异香草醛、丁香醛等酚酸类物质的含量;玫瑰树碱、精胺等生物碱的含量,从而提高桃果抑菌、抗氧化、抵御生物和非生物胁迫、促进植物生长、抗植物衰老等的能力。

参考文献

- [1] BENTO C, GONÇALVES A C, SILVA B, et al. Peach (*Prunus persica*): Phytochemicals and health benefits [J]. Food Reviews International, 2020, 38(8): 1703-1734.
- [2] 武琳霞,李玲,习佳林,等.桃品质的无损检测技术研究进展[J].食品科学,2022,43(15):367-377.
- [3] RUDKE C R M, ZIELINSKI A A F, FERREIRA S R S. From biorefinery to food product design: Peach (*Prunus persica*) by-products deserve attention [J]. Food and Bioprocess Technology, 2023, 16(6): 1197-1215.
- [4] FIDANOGLU B T, MESTAY B, ÖZKILINC H. A case study of the effect of temperature on aggressiveness in the Monilinia-peach pathosystem [J]. European Journal of Plant Pathology, 2023, 167(1): 1-10.
- [5] JEMRIC T, IVIC D, FRUK G, et al. Reduction of postharvest decay of peach and nectarine caused by *Monilinia laxa* using hot water dipping [J]. Food and Bioprocess Technology, 2010, 4(1): 149-154.
- [6] MALAKOU A, NANOS G D. A combination of hot water treatment and modified atmosphere packaging maintains quality of advanced maturity Caldesi 2000 nectarines and Royal Glory peaches [J]. Postharvest Biology and Technology, 2005, 38(2): 106-114.
- [7] PALOU L, CRISOSTO C H, SMILANICK J L, et al. Effects of continuous 0.3 ppm ozone exposure on decay development and physiological responses of peaches and table grapes in cold storage [J]. Postharvest Biology and Technology, 2002, 24(1): 39-48.
- [8] YANG M, YANG J, SU L, et al. Metabolic profile analysis and identification of key metabolites during rice seed germination under low-temperature stress [J]. Plant Science, 2019, 289: 110282.
- [9] 黄海皎,李杨,高小丽,等.不同品质青稞种子的广泛靶向代谢组学研究[J].干旱地区农业研究,2024,42(1):43-53,107.
- [10] ZENG J K, CHEN C Y, CHEN M, et al. Comparative transcriptomic and metabolomic analyses reveal the delaying

- effect of naringin on postharvest decay in citrus fruit [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 1045857.
- [11] YANG Q, QIAN X, ROUTLEDGE M N, et al. Metabonomics analysis of postharvest citrus response to *Penicillium digitatum* infection [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 152: 112371.
- [12] SHEN Y, LIU M, NIE J, et al. Metabolite changes of apple *Penicillium expansum* infection based on a UPLC-Q-TOF metabonomics approach [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021, 181: 111646.
- [13] ZHOU Y, ZHAO L, CHEN Y, et al. Study on the control effect and physiological mechanism of *Wickerhamomyces anomalus* on primary postharvest diseases of peach fruit [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2024, 413: 110575.
- [14] NDJATEU F S T, TSAFACK R B N, NGANOU B K, et al. Antimicrobial and antioxidant activities of extracts and ten compounds from three Cameroonian medicinal plants: *Dissotis perkinsiae* (Melastomaceae), *Adenocarpus mannii* (Fabaceae) and *Barteria fistulosa* (Passifloraceae) [J]. *South African Journal of Botany*, 2014, 91: 37-42.
- [15] ZHAO W W, ZAN K, WU J Y, et al. Antibacterial triterpenoids from the leaves of *Ilex hainanensis* Merr [J]. *Natural Product Research*, 2019, 33(17): 2435-2439.
- [16] LI H X, XIE W B, GAO X J, et al. Design and synthesis of novel hederagonic acid analogs as potent anti-inflammatory compounds capable of protecting against LPS-induced acute lung injury [J]. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 2024, 263: 115941.
- [17] GOSSAN D P A, ALABDUL MAGID A, YAO-KOUASSI P A, et al. Antibacterial and cytotoxic triterpenoids from the roots of *Combretum racemosum* [J]. *Fitoterapia*, 2016, 110(0): 89-95.
- [18] ZHAI H J, YU J H, ZHANG Q, et al. Cytotoxic and antibacterial triterpenoids from the roots of *Morinda officinalis* var. *officinalis* [J]. *Fitoterapia*, 2019, 133: 56-61.
- [19] 刘桂娟.朝药板栗叶提取物及其有效成分的抗菌活性研究[D]. 延边:延边大学,2018.
- [20] 罗应,徐巧林,董丽梅,等.阔叶丰花草的三萜酸类化学成分研究[J].热带亚热带植物学报,2015,23(4):463-468.
- [21] NGEZAHAYO J, POTTIER L, RIBEIRO S O, et al. *Plastotoma rotundifolium* aerial tissue extract has antibacterial activities [J]. *Industrial Crops and Products*, 2016, 86: 301-310.
- [22] MOHAPATRA P, RAY A, JENA S, et al. Influence of extraction methods and solvent system on the chemical composition and antioxidant activity of *Centella asiatica* L. leaves [J]. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2021, 33: 101971.
- [23] KUNJUMON R, JOHNSON A J, BABY S. *Centella asiatica*: Secondary metabolites, biological activities and biomass sources [J]. *Phytomedicine Plus*, 2022, 2(1): 100176.
- [24] NGUYEN H T, HO D V, VO H Q, et al. Antibacterial activities of chemical constituents from the aerial parts of *Hedyotis pilulifera* (Article) [J]. *Pharmaceutical Biology*, 2017, 55(1): 787-791.
- [25] 曹妍.小白菊内酯对水稻白叶枯病菌的生物学活性及其应用研究[D].南京:南京农业大学,2019.
- [26] SHEN N, WANG T, GAN Q, et al. Plant flavonoids: Classification, distribution, biosynthesis, and antioxidant activity [J]. *Food Chemistry*, 2022, 383: 132531.
- [27] 盘柳依.樱桃对黑斑病菌 (*Alternaria alternata*) 侵染的应答机制及抗性相关基因筛选[D].杨凌:西北农林科技大学,2023.
- [28] 李程程.牡丹花酚类成分提取纯化及其对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌生物被膜抑制活性研究[D].无锡:江南大学,2020.
- [29] 陈星卉.表儿茶素没食子酸酯抑菌活性的研究[J].黑龙江医药科学,2017,40(6):129-30,32.
- [30] 汪晓辉,郭溶,聂晓彬,等.佛手抗菌活性及其药效成分橙皮苷对金黄色葡萄球菌的作用机制研究[J].中国抗生素杂志,2021, 46(5):437-441.
- [31] FEVZI E, BUSRA A, CEYDA O, et al. Hesperidin and chlorogenic acid mitigate arsenic-induced oxidative stress via redox regulation, photosystems-related gene expression, and antioxidant efficiency in the chloroplasts of *Zea mays* [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2024, 208: 108445.
- [32] 陈志杰,吴嘉琪,马燕,等.植物食品原料中酚酸的生物合成与调控及其生物活性研究进展[J].食品科学,2018,39(7):321-328.
- [33] CERULLI A, MASULLO M, MARI A, et al. Phenolics from *Castanea sativa* leaves and their effects on UVB-induced damage [J]. *Natural Product Research*, 2018, 32(10): 1170-1175.
- [34] TAKAHASHI M, INOUE S, ABE S. Anti-*Candida* and radical scavenging activities of essential oils and oleoresins of *Zingiber officinale* Roscoe and essential oils of other plants belonging to the family Zingiberaceae [J]. *Drug Discoveries and Therapeutics*, 2011, 5(5): 238-245.
- [35] DAS A K, MITRA K, CONTE A J, et al. Lignin-A green material for antibacterial application-A review [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 261(2): 129753.
- [36] OKONKWO C E, HUSSAIN S Z, ONYEAKA H, et al. Lignin polyphenol: From biomass to innovative food applications, and influence on gut microflora [J]. *Industrial Crops and Products*, 2023, 206: 117696.
- [37] 李振双,王倩,朱媛,等.外源信号物质对檀香幼苗生长和光合特性的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2022,46(6):271-278.
- [38] ROMERO-CORTES T, ESPAÑA V H P, PÉREZ P A L, et al. Antifungal activity of vanilla juice and vanillin against *Alternaria alternata* [J]. *CyTA-Journal of Food*, 2019, 17(1): 375-383.
- [39] MONTOIA A, ROCHA E S L F, TORRES Z E, et al. Antiplasmodial activity of synthetic ellipticine derivatives and an isolated analog [J]. *Bioorganic and Medicinal Chemistry Letters*, 2014, 24(12): 2631-2634.
- [40] 刘曼莉,舒芬,张亚妮,等.利用Connectivity Map数据库筛选抗菌药物的初步研究[J].湖北农业科学,2021,60(24):101-104.
- [41] SEIFI H S, SHEL P B J. Spermine differentially refines plant defense responses against biotic and abiotic stresses [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 117.
- [42] MARCO F, BUSÓ E, LAFUENTE T, et al. Spermine confers stress resilience by modulating abscisic acid biosynthesis and stress responses in *Arabidopsis* plants [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 972.
- [43] SEIFI H S, ZAREI A, HSIANG T, et al. Spermine is a potent plant defense activator against gray mold disease on *Solanum lycopersicum*, *Phaseolus vulgaris*, and *Arabidopsis thaliana* [J]. *Phytopathology*, 2019, 109(8): 1367-1377.