李昭丽, 刘雄利, 郭东贵, 等. 黄毛草莓果实的化学成分、抗氧化活性及作用机制 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(17): 494−505. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080331

LI Zhaoli, LIU Xiongli, GUO Donggui, et al. Chemical Composition, Antioxidant Activity and Mechanism of *Fragaria nilgerrensis* Schltdl. Fruit[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(17): 494−505. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080331

· 营养与保健 ·

黄毛草莓果实的化学成分、抗氧化活性及作用机制

李昭丽[1], 刘雄利[1,2], 郭东贵[2,3], 彭礼军[1,2], 王慧娟[2,*]

（1.贵州大学酿酒与食品工程学院, 贵州 贵阳 550025;
2.西南药食两用资源开发利用技术国家地方联合工程研究中心, 贵州 贵阳 550025;
3.贵州理工学院, 贵州 贵阳 550025）

摘　要: 为探究黄毛草莓果实抗氧化作用的物质基础及机制，本研究以黄毛草莓果实为原料，经回流提取法制备其水提物（FWE）和醇提物（FAE）；通过紫外-可见分光光度法测定提取物的总酚酸和总黄酮含量，并利用液相色谱-质谱联用（LC-MS/MS）技术对提取物化学成分进行解析；采用体外抗氧化实验评价其抗氧化活性，并构建 H_2O_2 诱导的酿酒酵母氧化应激模型进一步探究其抗氧化能力；最后结合网络药理学及分子对接技术，阐明黄毛草莓果实的抗氧化作用机制。结果表明，FAE 和 FWE 的总酚酸含量分别为 216.84±0.66、191.90±6.67 mg GAE/g，总黄酮含量分别为 149.30±2.99、120.81±26.32 mg CE/g；黄毛草莓果实提取物中含有酚类、黄酮类、氨基酸及多糖类化合物等 35 种化合物。FAE 和 FWE 清除 DPPH 自由基的 IC_{50} 分别为 2.89±0.26、6.50±0.79 μg/mL，清除 $ABTS^+$ 自由基的 IC_{50} 分别为 6.42±0.67、7.58±1.02 μg/mL。此外两种提取物可延长酿酒酵母生长稳定期，增强酿酒酵母的抗氧化胁迫能力，并且在氧化应激状态下能增加细胞内超氧化物歧化酶（SOD）活力、提高还原性谷胱甘肽（GSH）水平、降低活性氧（ROS）及丙二醛（MDA）含量。网络药理学分析结果显示，槲皮素、山柰酚、柚皮素、甘草次酸及鞣花酸等为抗氧化关键化学成分，其作用机制可能是通过调控 AKT1、IL6、ALB、ESR1、EGFR、TNF 等靶点，激活 PI3K-AKT、MAPK 和 HIF-1 等信号通路实现的。本研究证实黄毛草莓果实提取物具有较好的抗氧化潜力，为其作为功能性食品开发应用提供了科学依据。

关键词: 黄毛草莓, 抗氧化, 成分, 机制, 网络药理学, 分子对接

中图分类号: TS201.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)17−0494−12

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080331

本文网刊:

Chemical Composition, Antioxidant Activity and Mechanism of *Fragaria nilgerrensis* Schltdl. Fruit

LI Zhaoli[1], LIU Xiongli[1,2], GUO Donggui[2,3], PENG Lijun[1,2], WANG Huijuan[2,*]

（1.School of Liquor and Food Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;
2.National & Local Joint Engineering Research Center for the Exploration of Homology Resources of Southwest Medicine and Food, Guiyang 550025, China;
3.Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550025, China）

Abstract: To investigate the material basis and mechanisms underlying the antioxidant activity of *Fragaria nilgerrensis* Schlecht. fruits, water extract (FWE) and ethanol extracts (FAE) were prepared from the fruit material using reflux extraction. The total phenolic and flavonoid contents of the extracts were determined by UV-Vis spectrophotometry, and their

收稿日期: 2025−09−01

基金项目: 贵州省高层次创新型人才项目（百层次人才）; 贵州省科学技术基金项目资助（黔科合基础-ZK[2022] 一般 173）。

作者简介: 李昭丽（1998−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 1594044959@qq.com。

*** 通信作者:** 王慧娟（1981−）, 女, 博士, 讲师, 研究方向: 药食同源产品研究, E-mail: xuchwhj@163.com。

chemical compositions were analyzed using liquid chromatography-tandem mass spectrometry (LC-MS/MS). The antioxidant activities were evaluated through *in vitro* assays, and a hydrogen peroxide induced oxidative stress model in *Saccharomyces cerevisiae* was constructed to further investigate their antioxidant capacity. Finally, network pharmacology and molecular docking techniques were employed to clarify the antioxidant mechanism of *Fragaria nilgerrensis* Schlecht. fruits. The results showed that the total phenolic acid contents of FAE and FWE were 216.84±0.66 and 191.90±6.67 mg GAE/g, respectively, while the total flavonoid contents were 149.30±2.99 and 120.81±26.32 mg CE/g, respectively. A total of 35 compounds, including phenolics, flavonoids, amino acids, and polysaccharides, were identified in the extracts. The IC_{50} values of FAE and FWE for DPPH radical scavenging were 2.89±0.26 and 6.50±0.79 μg/mL, respectively, and for $ABTS^{+}$ radical scavenging were 6.42±0.67 and 7.58±1.02 μg/mL, respectively. Additionally, both extracts prolonged the stationary growth phase of *Saccharomyces cerevisiae*, enhanced its resistance to oxidative stress, increased intracellular superoxide dismutase (SOD) activity, elevated reduced glutathione (GSH) levels, and decreased reactive oxygen species (ROS) and malondialdehyde (MDA) contents under oxidative stress. Network pharmacology analysis revealed that quercetin, kaempferol, naringenin, glycyrrhetinic acid and ellagic acid were the key antioxidant components, with potential antioxidant effects mediated through regulation of targets such as AKT1, IL6, ALB, ESR1 and EGFR and activation of signaling pathways including PI3K-AKT, MAPK and HIF-1. This study confirms the antioxidant potential of *Fragaria nilgerrensis* Schlecht. fruits extracts and provides a scientific basis for their development as functional foods.

Key words: *Fragaria nilgerrensis* Schlecht.; antioxidant; components; mechanism; network pharmacology; molecular docking

氧化应激是导致细胞损伤、衰老及相关疾病的重要诱因，其核心机制涉及活性氧（ROS）的过度积累与抗氧化防御系统的失衡。天然植物提取物因富含多酚、黄酮类等活性成分，能高效清除自由基、调节氧化还原稳态，近年来已成为功能性食品的研究热点。

黄毛草莓（*Fragaria nilgerrensis* Schltdl. ex J. Gay），是蔷薇科草莓属植物，又名白草莓、白蕉、白蒲草等[1−2]。其果实香味浓郁，酸甜适口，营养成分丰富[3]。作为西南地区重要的野生草莓种质资源，保留了人工培育品种中缺失的多种生物活性化合物[4]。因此，开展黄毛草莓的相关研究，对于挖掘其抗氧化能力、推动其向功能性食品转化，具有重要的指导意义。

近年来，对黄毛草莓抗氧化活性的研究已从单纯的活性物质提取与体外评价，逐步深入到对其关键功能组分、代谢调控网络及分子机制的探索。Duan 等[5] 研究表明，黄毛草莓的维生素 C 与类黄酮含量均显著高于常见栽培品种；栽培草莓中活跃的 MYB66 因子可促进花青素合成，而黄毛草莓中特有的 MYB44-like 转录因子则呈现高度特异性表达，并与新橙皮苷、忍冬苷等抗氧化类黄酮的积累显著正相关。尽管这些发现凸显了黄毛草莓的独特价值，但现有研究多集中于化学组分分析与转录调控初探[6]，其活性成分的抗氧化效果以及具体作用机制仍未被充分阐明。

因此，本研究以黄毛草莓果实为原料，采用紫外-可见分光光度法、LC-MS/MS 技术对黄毛草莓果实提取物的总酚酸、总黄酮含量和化学成分进行分析。采用体外抗氧化实验评估其抗氧化潜力，并构建 H_2O_2 诱导的酿酒酵母氧化应激模型，在细胞水平上验证其抗氧化保护功效；最后结合网络药理学及分子对接技术，阐释其抗氧化作用机制及活性物质基础。本研究不仅为黄毛草莓的高值化利用提供了理论基础，也为其功能性食品开发提供了科学依据。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

黄毛草莓（*Fragaria nilgerrensis* Schltdl.）　云南省楚雄彝族自治州；S288C 酿酒酵母　贵州理工大学刘晓柱教授惠赠；DPPH　东京化成工业株式会社；芦丁、没食子酸、福林酚、ABTS、YPD 培养基、活性氧（ROS）含量检测试剂盒、总超氧化物歧化酶（SOD）试剂盒、还原性谷胱甘肽（GSH）试剂盒、蛋白定量 BCA 试剂盒　均购于北京索莱宝科技有限公司；三氯乙酸、硫代巴比妥酸　均购于上海阿拉丁生化科技股份有限公司；过氧化氢（6%）　西陇化工股份有限公司。

XPE205 电子分析天平　METTLER TOLEDO；LGJ-12 真空冷冻干燥机　江苏恒敏仪器制造有限公司；YXQ-LS-50SS Ⅱ立式压力蒸汽灭菌锅　上海博讯医疗生物仪器股份有限公司；UV-6100 紫外可见分光光度计　上海元析仪器有限公司；SW-CJ-2FD 超净工作台　上海博讯实业有限公司；TGL-20M 高速离心机　长沙平凡仪器仪表有限公司；Orbitrap Exploris 120 超高效液相色谱-四极杆-静电场轨道阱质谱联用仪　Thermo Fisher。

1.2　实验方法

1.2.1　黄毛草莓果实提取物的制备　参考王越等[7] 实验方法并适当修改。称取适量黄毛草莓果实，按照 1∶8 的料液比分别加入 70% 乙醇或纯水进行加热回流提取，减压浓缩后进行冷冻干燥，即得到黄毛草莓果实醇提物（FAE）和水提物（FWE）。

1.2.2 黄毛草莓果实提取物总酚酸和总黄酮含量测定

1.2.2.1 总酚酸含量测定 采用福林酚法[8],以没食子酸为对照品对黄毛草莓果实提取物的总酚酸含量进行测定。标准曲线制作:量取 0.5 mL 不同浓度的没食子酸对照品溶液(12.86、25.72、38.58、51.44、64.30、77.16、90.02、102.88 μg/mL),加入 2.5 mL 福林酚溶液反应 4 min,再加入 2 mL 的碳酸钠溶液(7.5%)反应 60 min,以相应试剂作为空白对照,于 760 nm 处测定吸光度值。以没食子酸质量浓度(mg/mL)为横坐标,吸光度值为纵坐标,绘制标准曲线。

样品测定:称取 30 mg 样品于 5 mL 容量瓶中,加入蒸馏水超声溶解并定容至刻度,即得样品溶液。量取 100 μL 样品溶液于试管中,补加蒸馏水至总体积达到 0.5 mL,采用标准曲线测定方法测定样品总酚含量。含量测定结果以没食子酸当量(mg GAE/g)表示,按式(1)计算样品的总酚酸含量:

$$\text{总酚酸含量(mg/g)} = \frac{CVT}{M} \qquad \text{式(1)}$$

式中:C:样品对应标曲的没食子酸浓度(mg/mL);T:稀释倍数;M:样品质量(g);V 样品体积(mL)。

1.2.2.2 总黄酮含量测定 采用亚硝酸钠-硝酸铝比色法[9],并以芦丁为对照品对黄毛草莓果实提取物中的总黄酮含量进行测定。标准曲线制作:称取 6.72 mg 芦丁对照品于 25 mL 容量瓶中,加入 70% 乙醇溶液至刻度,吸取 0.5、1、1.5、2、2.5、3 mL 的芦丁对照品溶液,置于 10 mL 容量瓶中,补加 70% 乙醇溶液至 5 mL。混匀后注入 400 μL 亚硝酸钠溶液(5%)反应 6 min,加入 400 μL 硝酸铝溶液(10%)反应 6 min,加入 4 mL 氢氧化钠溶液(4%)并用蒸馏水补足至刻度,摇匀后静置反应 15 min,以相应试剂作为空白对照,于 510 nm 处测定吸光度值。以芦丁质量浓度(mg/mL)为横坐标,吸光度值为纵坐标,绘制标准曲线。

样品测定:称取 30 mg 样品于 5 mL 容量瓶中,加入 70% 乙醇超声溶解并定容至刻度,即得样品溶液。量取 100 μL 样品溶液于试管中,补加 70% 乙醇至 5 mL,采用芦丁标准曲线测定方法测定样品总黄酮含量。结果以芦丁当量(mg CE/g)表示。按式(2)计算样品的总黄酮含量:

$$\text{黄酮含量(mg/g)} = \frac{CVT}{M} \qquad \text{式(2)}$$

式中:C:样品对应标曲的芦丁浓度(mg/mL);T:稀释倍数;M:样品质量(g);V 样品体积(mL)。

1.2.3 黄毛草莓果实提取物的成分分析 将 FAE 和 FWE 样品分别用 70% 甲醇溶液和 50% 甲醇溶液溶解,用于 LC-MS/MS 分析。色谱条件与质谱条件依据文献 [10] 的方法并作部分修改。液相色谱条件为:Waters ACQUITY HSS T3 色谱柱(2.1 mm×100 mm,1.8 μm);流动相 A(水相):0.1% 甲酸水;流动相 B(有机相):0.1% 甲酸乙腈;柱温:40 ℃;上样量:5 μL;洗脱程序为:0~3 min, 95%A; 3~5 min, 95%~90%A; 5~34 min, 90%~60%A; 34~44 min, 60%~40%A; 44~54 min, 40%~5%A; 54~56 min, 5%A。HESI 离子源参数:喷雾电压+3.5 kV/−3.0 kV;辅助气加热温度 330 ℃;鞘气体积流量 50 arb;辅助气体积流量 10 arb;离子传输管温度 330 ℃;扫描模式为一级质谱全扫描结合自动触发二级质谱扫描模式(Full MS/dd-MS^2),一级分辨率 60000,二级分辨率 15000,离子扫描范围 m/z 100~1500。使用 Xcalibur 软件处理化学成分的质谱数据,并通过比较 mzVault、mzCloud、ChemSpider 和 MassList 等数据库进行鉴定。

1.2.4 黄毛草莓果实提取物体外抗氧化活性测定

1.2.4.1 DPPH 自由基清除率 参考 SILVA 等[11] 实验方法并作出了适当修改。按 1∶1 的体积比将黄毛草莓果实提取物溶液和 DPPH 溶液(0.08 mmol/L)混合,避光孵育 30 min,于 517 nm 处测定吸光度值。以 BHT 作为阳性对照药,根据公式(3)计算清除率。

$$\text{清除率(\%)} = \left(1 - \frac{AS - AB}{AR}\right) \times 100 \qquad \text{式(3)}$$

式中:AS 为实验组吸光度(样品溶液与反应溶液混合);AB 为空白组吸光度(样品溶液与溶剂混合);AR 为对照组吸光度(反应溶液与溶剂混合)。

1.2.4.2 $ABTS^+$自由基清除率 参考 RUMPF 等[12] 实验方法并适当修改。按 1∶10 的体积比分别加入黄毛草莓果实提取物样品溶液和 ABTS 溶液,避光孵育 10 min,于 734 nm 处测定吸光度值。以 BHT 作为阳性对照药,根据公式(3)计算清除率。

1.2.4.3 铁离子还原能力测定 参考卢跃红等[13] 实验方法进行测定。取不同浓度黄毛草莓果实提取物溶液 20 μL,加入 180 μL 现配的 FRAP 工作液,37 ℃孵育 10 min,于 593 nm 处测定吸光度值。以 BHT 作为阳性对照,铁离子还原能力以 $FeSO_4$ 当量表示。

1.2.5 黄毛草莓果实提取物对 H_2O_2 诱导下酿酒酵母细胞生长及氧化应激的影响

1.2.5.1 酿酒酵母细胞生长曲线的测定 参考林清凡等[14] 实验方法进行测定。根据预实验结果,FAE 和 FWE 均选择 250、62.5、7.8 μg/mL 无毒浓度进行生长曲线测定。实验设置空白对照组、低浓度剂量组(7.8 μg/mL)、中浓度剂量组(62.5 μg/mL)和高浓度剂量组(250 μg/mL)。将生长至对数期的酿酒酵母细胞稀释至 OD_{600} 值为 0.2,实验组 96 孔板中每孔按照 1∶1 的体积比分别加入菌液和药物,最后加入无菌水调整每孔的体积,空白对照组仅含有菌液。每组设 3 个复孔,每 8 h 测定一次 OD_{600} 值,连续测

定 96 h。以 OD_{600} 值表示菌液浓度作为纵坐标，时间为横坐标，绘制生长曲线。

1.2.5.2　酵母细胞抗氧化胁迫能力测定　参考杨力等[15]实验方法进行测定。将生长至对数期的酵母细胞稀释至 OD_{600} 值为 1，随机分为对照组、模型组和实验组（7.8、62.5、250 μg/mL）。将酵母菌液以 1∶9 的体积比与对应培养基（实验组为含药 YPD，模型组与对照组为 YPD）混合，在 28 ℃、200 r/min 下培养 2 h。随后收集细胞并将菌悬液 OD_{600} 调整至 0.3。分别取 10 mL 菌液，实验组与模型组加入 500 μL H_2O_2 溶液（6%），对照组加入 500 μL YPD 培养基，培养 30 min 和 60 min 后，将各组酵母细胞逐级稀释 10 倍，然后依次点样于 YPD 固体培养基上，倒置于 28 ℃ 培养 48 h 进行观察。

1.2.5.3　活性氧（ROS）测定　采用 ROS 试剂盒进行测定。收集各组酵母细胞，调整酵母菌液 OD_{600} 值为 0.5，加入 10 μmol/L 的 DCFH-DA 探针溶液，28 ℃ 避光孵育 60 min。收集酵母细胞并用 PBS 清洗两次，更换新鲜的 YPD 液体培养基，实验组和模型组加入 500 μL H_2O_2 溶液，培养 60 min（28 ℃），使用荧光酶标仪在 488 nm 激发波长和 525 nm 发射波长下进行测定。

1.2.5.4　酵母细胞粗酶液制备　细胞前处理同 1.2.5.2。酵母细胞 28 ℃ 培养 60 min 离心收集菌体（12000 r/min，5 min），并用无菌水清洗 2 次，然后加入 1 mL 提取液，置于冰水浴中超声处理 7 min（功率 300 W，工作 3 s，间歇 10 s）。将细胞破碎液于 4 ℃，12000 r/min 条件下离心 5 min，取上清即得到粗酶液。

1.2.5.5　抗氧化指标分析　取 1.2.5.4 的粗酶液，BCA 法测定蛋白含量。按照相应试剂盒的检测方法分别测定酵母细胞 SOD 活力和 GSH 水平，采用硫代巴比妥酸法[16]测定 MDA 含量。

1.2.6　网络药理学预测黄毛草莓果实提取物抗氧化作用机制

1.2.6.1　化学成分筛选及靶点预测和收集　通过 LC-MS/MS 分析获得黄毛草莓果实提取物的化学成分，利用 pubchem（https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/）、SwissADME 数据库（http://www.swissadme.ch/）确定有效化学成分，利用 SwissTargetPrediction 在线工具（http://swisstargetprediction.ch/）预测筛选有效化学成分的成分靶点。在 Genecards（https://www.genecards.org/）、OMIM（https://omim.org/）和 DisGeNET（https://www.disgenet.com/）数据库中，以“Antioxidant activity”“Oxidation resistance”“Antioxidant”为关键词进行搜索，获得抗氧化相关靶点，将不同数据库收集到的抗氧化相关靶点合并，去除重复值后得到黄毛草莓抗氧化相关靶点。利用在线网站 Venny2.1.0，绘制黄毛草莓化学成分相关靶点与抗氧化相关靶点的韦恩图，通过取交集的方法获得黄毛草莓化学成分抗氧化的共同靶点。

1.2.6.2　药物-成分-靶点网络图和 PPI 蛋白相互作用网络图的构建　将黄毛草莓化学成分、化学成分抗氧化共同靶点作为节点，通过 Cytoscape 3.10.0 软件构建“药物-成分-靶点”网络图。将黄毛草莓化学成分抗氧化的共同靶点上传至 STRING 数据库（https://cn.string-db.org），限定物种为“Homo sapiens”得到 PPI 数据，将数据导入 Cytoscape 3.9.1，运用 CyoNCA 插件计算度中心性（DC）、介度中心性（BC）和接近中心性（CC），以这三个指标为阈值来筛选，筛选得到的靶点为核心靶点，构建核心靶点的 PPI网络。

1.2.6.3　GO 功能和 KEGG 通路富集分析　将核心靶点上传 DAVID 数据库（https://davidbioinformatics.nih.gov/home.jsp），进行基因本体（GO）功能注释和京都基因与基因组百科全书（KEGG）富集分析，以 $P<0.05$ 为条件。获得生物过程（BP）、细胞成分（CC）、分子功能（MF）和 KEGG 关键信号通路的富集信息，并对结果进行可视化分析。

1.2.6.4　黄毛草莓抗氧化关键成分与关键靶点的分子对接验证　在“药物-成分-疾病靶点”网络图中根据 Degree 值筛选排名靠前的化学成分，在 PPI 蛋白网络互作图中根据 Degree 值筛选排名靠前的关键靶点，将化学成分与关键靶点进行分子对接验证。根据结合能绘制热图，分析结合能的大小，并使用 Pymol 软件对最佳对接结果进行可视化。

1.3　数据处理

采用 GraphPad Prism 8.0 和 SPSS 26.0 软件进行数据分析及绘图，结果以“平均数±标准差”表示。

2　结果与分析

2.1　黄毛草莓果实提取物总酚酸和总黄酮含量测定

总酚酸与总黄酮是天然植物发挥抗氧化活性的重要组分，测定其含量对评估植物抗氧化功能价值至关重要[17−18]。分别以没食子酸和芦丁为对照品，采用紫外-可见分光光度法测定了 FAE 和 FWE 中总酚酸和总黄酮的含量。没食子酸对照品溶液在 0.64~10.29 μg/mL 范围内线性关系良好，回归方程为：$y=0.1344x-0.0343$，$R^2=0.999$；芦丁对照品溶液在 6.72~107.52 μg/mL 范围内的线性关系良好，回归方程为：$y=0.011x+0.006$，$R^2=0.997$。由表 1 所示，参照标准曲线计算出 FAE 和 FWE 总酚酸含量分别为 216.84±0.66、191.90±6.67 mg GAE/g，总黄酮含量分

表 1　FAE 和 FWE 总酚酸和总黄酮含量

Table 1　Content of total phenolic acids and total flavonoids in FAE and FWE

样品	总酚酸含量（mg GAE/g）	总黄酮含量（mg CE/g）
FAE	216.84±0.66[a]	149.30±2.99[a]
FWE	191.90±6.67[b]	120.81±26.32[a]

注：同列不同字母标注表示差异显著（$P<0.05$）；表3同。

别为 149.30±2.99、120.81±26.32 mg CE/g。结果表明，FAE 和 FWE 含有丰富的酚类和黄酮类化合物，可作为黄毛草莓功能活性产品开发的潜在来源。

2.2 黄毛草莓果实提取物的化学成分分析

LC-MS/MS 原始数据通过 Xcalibur 软件进行处理，通过比较 mzVault、mzCloud、ChemSpider 和 MassList 等数据库及文献进行鉴定。具体鉴定数据详见图 1、图 2 和表 2 所示。

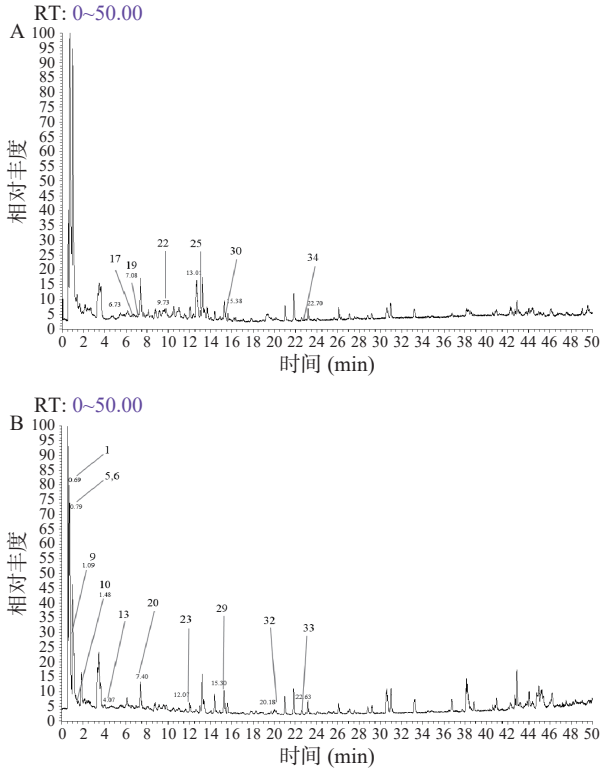


图 1 FAE 负离子模式(A)和正离子模式(B)总离子流图

Fig.1 Total ion flow diagram in FAE negative ion mode (A) and positive ion mode (B)

从黄毛草莓果实提取物中共鉴定出 35 种化合物，主要包括酚类、黄酮类、氨基酸、核酸类及多糖类化合物等。其中酚酸类化合物 10 种：没食子酸、鞣花酸、绿原酸、对羟基苯甲醛、焦性没食子酸等；黄酮类化合物 12 种：三叶豆苷、槲皮素、柚皮素、花旗松素、金丝桃苷等；氨基酸类化合物 4 种：脯氨酸、L-酪氨酸、异亮氨酸、D-色氨酸。这些结果表明，黄毛草莓营养组成多样，且富含多种生物活性成分。

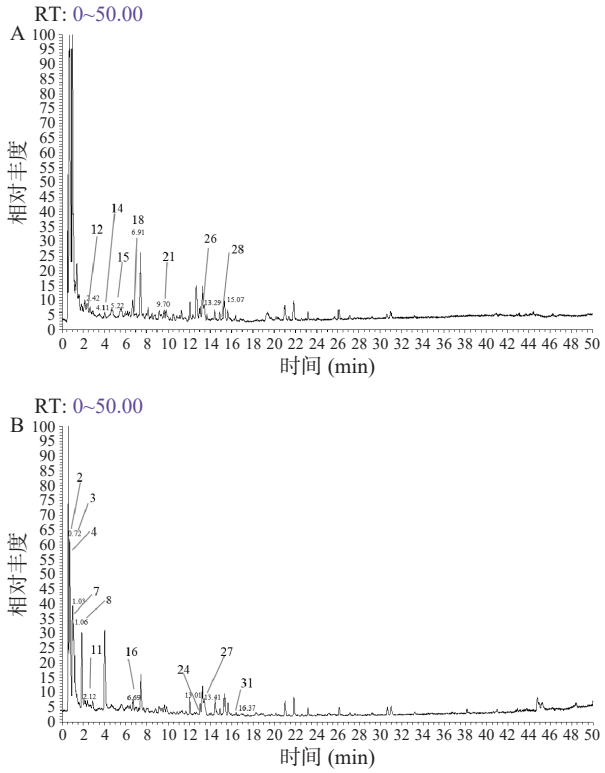


图 2 FWE 负离子模式(A)和正离子模式(B)总离子流图

Fig.2 Total ion flow diagram in FWE negative ion mode (A) and positive ion mode (B)

2.3 黄毛草莓果实提取物体外抗氧化作用

本研究采用 DPPH、$ABTS^+$自由基清除和铁离子还原能力实验，评估了 FAE 与 FWE 的体外抗氧化活性。FAE 和 FWE 对 DPPH、$ABTS^+$自由基的清除能力如表 3 所示。结果表明，FAE 对 DPPH 自由基的清除能力优于 FWE（$P<0.05$）；FAE 和 FWE 对 $ABTS^+$自由基清除能力与合成抗氧化剂 BHT 相

表 2 LC-MS/MS 鉴定黄毛草莓提取物中的化学成分

Table 2 Identification of phytochemical compounds in *Fragaria nilgerrensis* Schltdl. extract by LC-MS/MS

序号	保留时间 (min)	分子式	m/z	检测模式	MS^2 碎片离子	MzCloud	化学成分	FAE	FWE
1	0.69	$C_7H_7NO_2$	138.0549	$[M+H]^+$	94.0651、78.0342、67.0542、53.0384	99.8	胡芦巴碱[19]	√	√
2	0.70	$C_5H_9NO_2$	116.0705	$[M+H]^+$	74.0238、70.0651	99.8	脯氨酸[20]	–	√
3	0.71	$C_9H_{13}N_3O_5$	244.0927	$[M+H]^+$	112.0505、95.0240	99.7	阿糖胞苷	–	√
4	0.72	$C_5H_5N_5$	136.0617	$[M+H]^+$	119.0353、109.0508、94.0401	99.7	腺嘌呤[20]	–	√
5	0.73	$C_{10}H_{13}N_5O_4$	268.1039	$[M+H]^+$	250.0922、136.0618、85.0285、55.0180	99.7	腺苷[21]	√	√
6	0.73	$C_5H_{11}NO_2$	118.0861	$[M+H]^+$	72.0807、59.0729、55.0543	99.7	甜菜碱	√	√
7	1.03	$C_9H_{11}NO_3$	182.0809	$[M+H]^+$	165.0544、136.0756、123.0440、119.0491、95.0491、91.0542	99.1	L-酪氨酸[22]	√	√
8	1.06	$C_5H_5N_5O$	152.0566	$[M+H]^+$	135.0301、128.0455、110.0349	99.7	鸟嘌呤	–	√
9	1.09	$C_6H_{13}NO_2$	132.1017	$[M+H]^+$	86.0964、69.0699	81.1	异亮氨酸	√	√
10	1.48	$C_7H_6O_5$	169.0141	$[M-H]^-$	125.0244、97.0295、81.0348	95.5	没食子酸[22]	√	√
11	2.12	$C_6H_6O_3$	127.0389	$[M+H]^+$	109.0284、81.0335、53.0387	96.7	焦性没食子酸	√	√

续表 2

序号	保留时间（min）	分子式	m/z	检测模式	MS^2 碎片离子	MzCloud	化学成分	FAE	FWE
12	2.42	$C_9H_{17}NO_5$	218.1033	$[M-H]^-$	146.0823、129.0557、116.0716、99.0453、88.0405、71.0503、59.0138	78.5	泛酸	√	√
13	4.07	$C_{11}H_{12}N_2O_2$	205.0969	$[M+H]^+$	188.0706、170.0603、159.0917、146.0601、143.0729、132.0808、118.0652、91.0545	96.7	D-色氨酸[23]	√	√
14	4.11	$C_6H_8O_7$	191.0197	$[M-H]^-$	173.0093、154.9991、146.9386、129.0195、102.9488、87.0088、85.0296	80.5	柠檬酸[23]	–	√
15	5.22	$C_7H_6O_4$	153.0193	$[M-H]^-$	151.0041、109.0296	87.6	龙胆酸	–	√
16	6.69	$C_{15}H_{14}O_6$	291.0858	$[M+H]^+$	207.0651、165.0548、147.0441、139.0389、123.0441	99.1	表儿茶素	√	√
17	6.73	$C_{15}H_{14}O_6$	289.0716	$[M-H]^-$	271.0595、245.0809、221.0813、205.0501、188.0471、179.0346、161.0601、151.0394、137.0239、123.0446、109.0291	87.4	儿茶素	√	√
18	6.91	$C_{16}H_{18}O_9$	353.0875	$[M-H]^-$	191.0562、161.0246、85.0297、59.0137	88.9	绿原酸[24]	–	√
19	7.08	$C_7H_6O_2$	121.0294	$[M-H]^-$	108.0219、92.0268	99.2	对羟基苯甲醛	√	√
20	7.40	$C_{14}H_6O_8$	303.0134	$[M+H]^+$	285.0032、275.0181、257.0079	99.1	鞣花酸	√	–
21	9.70	$C_9H_8O_3$	163.0401	$[M-H]^-$	119.0502、93.0348	99.2	2-羟基肉桂酸	–	√
22	9.73	$C_9H_{10}O_5$	197.0454	$[M-H]^-$	124.0166、97.0292	70.1	丁香酸	√	–
23	12.07	$C_{15}H_{12}O_7$	305.0654	$[M+H]^+$	259.0598、241.0488、231.0651、195.0286、153.0181、123.0439、111.0441	89.9	花旗松素[25]	√	√
24	13.01	$C_{21}H_{20}O_{12}$	465.1025	$[M+H]^+$	303.0498、285.0393、229.0494、153.0181、85.0283	95.0	槲皮素-3-β-D-葡萄糖苷[26]	√	√
25	13.07	$C_{27}H_{30}O_{16}$	609.1458	$[M-H]^-$	300.0275、271.0248、255.0299、243.0298、227.0352、151.0036、108.0217	94.5	芦丁[27]	√	√
26	13.29	$C_{21}H_{18}O_{13}$	477.0671	$[M-H]^-$	301.0352、255.0293、178.9986、151.0036、121.0294	90.7	槲皮素-3-O-葡糖醛酸[26]	√	√
27	13.41	$C_{21}H_{20}O_{12}$	465.1024	$[M+H]^+$	303.0498、285.0393、229.0488、153.0183、97.0286	90.4	金丝桃苷[28]	–	√
28	15.07	$C_9H_{16}O_4$	187.0976	$[M-H]^-$	143.1076、125.0972、97.0658	97.6	壬二酸[29]	–	√
29	15.30	$C_{15}H_{10}O_6$	287.0547	$[M+H]^+$	258.0527、213.0545、165.0186、153.0182、121.0286、105.0343、68.9971	98.0	山柰酚[30]	√	√
30	15.38	$C_{21}H_{20}O_{11}$	447.0929	$[M-H]^-$	284.0326、255.0299	98.5	三叶豆苷	√	√
31	16.37	$C_9H_8O_3$	165.0545	$[M+H]^+$	147.0439、119.0491、91.0545	94.9	对香豆酸[31]	√	√
32	20.18	$C_{15}H_{10}O_7$	303.0497	$[M+H]^+$	285.0395、257.0439、229.0492、201.0543、165.0180、153.0181、121.0283	98.60	槲皮素[26]	√	√
33	22.63	$C_{15}H_{12}O_5$	273.0756	$[M+H]^+$	153.0183、147.0441、123.0443、119.0492、107.0495、91.0541、67.0179	97.9	柚皮素查尔酮	√	√
34	22.70	$C_{15}H_{12}O_5$	271.0611	$[M-H]^-$	151.0037、145.0289、119.0503、107.0139、93.0346	80.0	柚皮素[29]	√	–
35	44.73	$C_{30}H_{46}O_4$	471.3465	$[M+H]^+$	425.3424、235.1699、189.1633	92.7	甘草次酸	√	–

表 3　黄毛草莓提取物清除自由基的 IC_{50} 值

Table 3　IC_{50} values of free radical scavenging of *Fragaria nilgerrensis* Schltdl. extract

样品	IC_{50}值（μg/mL）	
	DPPH	$ABTS^+$
FAE	2.89±0.26^b	6.42±0.67^a
FWE	6.50±0.79^a	7.58±1.02^a
BHT	1.78±0.31^c	5.25±0.93^a

当；FAE 和 FWE 对铁离子还原能力见图 3（A）所示，相同浓度的 FAE 和 FWE 的 $FeSO_4$ 当量均高于对照组 BHT。综上，FAE 和 FWE 表现出较强的 DPPH 和 $ABTS^+$ 自由基清除能力以及铁离子还原能力，且 FAE 的抗氧化活性优于 FWE。这可能与 FAE 中更高的总酚酸与总黄酮含量相关，这些活性成分通过提供氢原子（供体）直接清除自由基[32]，可有效缓解氧化应激对细胞的损伤。这与向云亚等[33] 在水蓑衣中的发现一致，其结果表明，总黄酮和总酚酸含量与抗氧化活性呈显著正相关。此外，和文婧等[34] 对松茸醇提物的研究也得出相似结论，进一步印证了酚类与黄酮类成分在抗氧化过程中的关键作用。

2.4　黄毛草莓果实提取物对 H_2O_2 诱导下酿酒酵母细胞寿命及氧化应激的影响

2.4.1　FAE 和 FWE 可延长酿酒酵母细胞生长稳定期　如图 3 所示，实验组酵母细胞进入生长稳定期后，生长曲线高于空白对照组，说明 FAE 和 FWE 可维持酵母细胞的活力稳定性，延长酵母细胞的生长稳定期。这一结果可能归因于黄毛草莓果实提取物中含有维生素、多糖和氨基酸等[35]，可以为酵母细胞生长提供营养支撑，减缓稳定期因营养耗竭导致的衰亡。

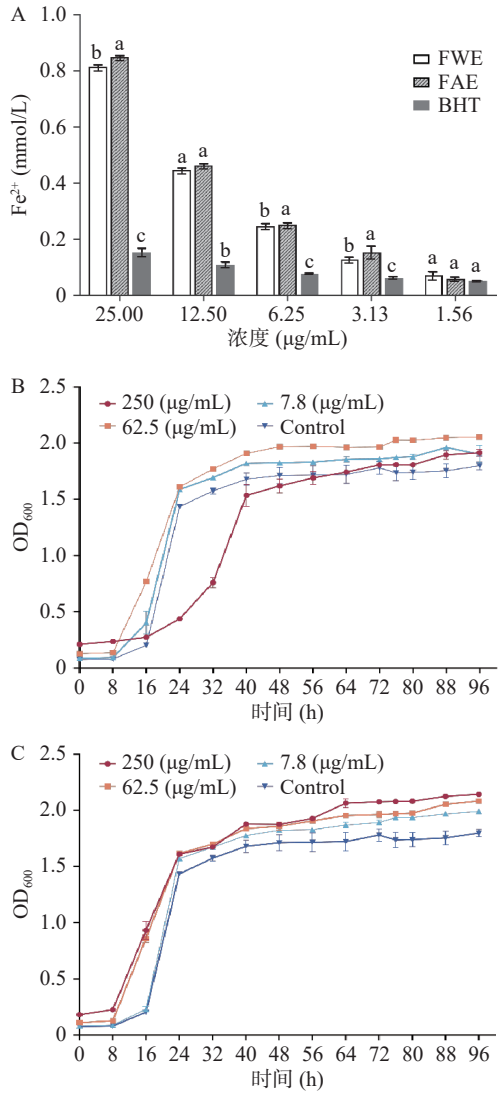


图 3　铁离子还原能力和酿酒酵母生长曲线

Fig.3　Iron ion reduction capability and *Saccharomyces cerevisiae* growth curve

注：(A)铁离子还原能力；(B)FAE 对酿酒酵母生长的影响；(C)FWE 对酿酒酵母生长的影响；同组不同字母标注表示差异显著(P<0.05)，图 5 同。

2.4.2　FAE 和 FWE 增强酿酒酵母细胞抗氧化胁迫能力　由图 4 所示，通过比较实验组与模型组对 H_2O_2 引起的氧化胁迫抵抗能力，发现当加入 H_2O_2 30 min，实验组酵母细胞存活数与模型组相比无明显差异，说明实验组抗氧化胁迫能力增强不明显；当加入 H_2O_2 氧化损伤 60 min，与模型组相比，实验组抗氧化胁迫能力有一定增强，其中 FAE(250 μg/mL)组作用最为明显。这一结果与体外抗氧化实验结果一致，可能是与 FAE 中含有较高的酚类成分(如没食子酸、鞣花酸、绿原酸)和黄酮类化合物(如槲皮素、柚皮素、金丝桃苷)等有关，这些物质可以清除自由基和酵母代谢过程中产生的过量活性氧，保护细胞膜、蛋白质和 DNA 免受氧化损伤[36]，从而增强细胞抗氧化胁迫能力，延缓细胞衰老。具体而言，鞣花酸[37] 是一种存在于多种天然植物中的多酚二内酯，具有很强的清除氧自由基、羟自由基和抗氧化的能力。槲皮

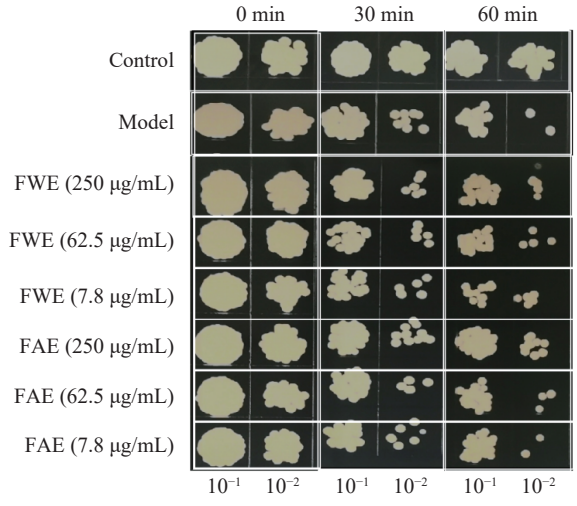


图 4　FAE 和 FWE 对酿酒酵母抗氧化胁迫能力的影响

Fig.4　Effects of FAE and FWE on antioxidant stress resistance in *Saccharomyces cerevisiae*

素[38] 一种广泛存在于自然界的类黄酮化合物，可通过维持氧化平衡表达其抗氧化活性，主要表现为清除氧自由基、螯合金属离子及提高抗氧化酶活性等。

2.4.3　FAE 和 FWE 对 H_2O_2 诱导的酿酒酵母细胞抗氧化指标的影响　活性氧(ROS)过量积累是导致细胞氧化损伤的关键因素，过量的 ROS 能引起胞内脂质、蛋白质及核酸等大分子的损伤积累，最终导致细胞功能障碍甚至死亡[39]。脂质过氧化是 ROS 诱发的重要损伤之一，其终产物 MDA 的含量常用于评估氧化损伤程度[40]。因此，细胞内 ROS 和 MDA 的水平可直观反映细胞所受氧化损伤的程度。根据 2.4.2 实验结果，选择 250 μg/mL 剂量组进行后续实验。

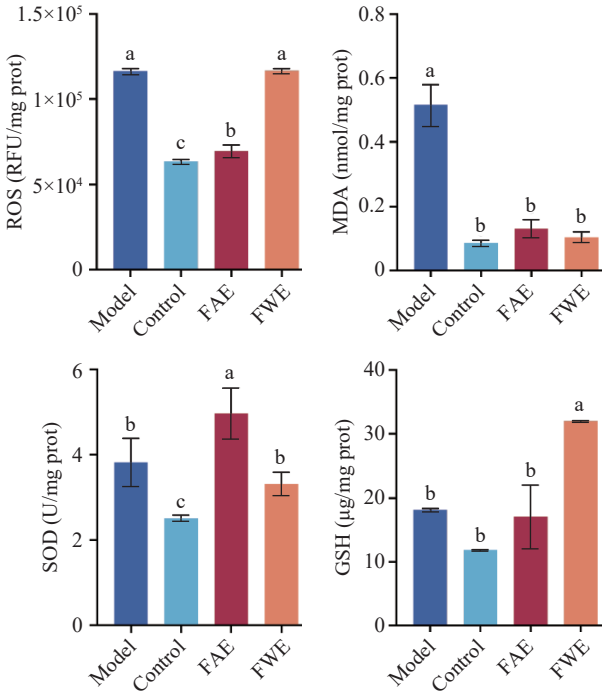


图 5　FAE 和 FWE 对酿酒酵母氧化应激的影响

Fig.5　Effects of FAE and FWE on oxidative stress in *Saccharomyces cerevisiae*

结果如图 5 所示，添加 H_2O_2 诱导后，模型组细胞的 ROS 和 MDA 含量较对照组显著升高（P<0.05），分别达到对照组的 1.82 倍和 5.93 倍。酵母细胞经 FAE 干预后，细胞内 ROS 和 MDA 水平较模型组显著降低（P<0.05）；经 FWE 干预后，细胞内 ROS 下降不明显，但 MDA 含量显著降低（P<0.05）。结果表明，黄毛草莓提取物能够有效缓解 H_2O_2 诱导的酿酒酵母细胞内 ROS 积累和脂质过氧化反应，从而减轻氧化损伤。

当细胞受到活性氧（ROS）攻击导致其氧化还原平衡被打破时，内源性抗氧化系统会被激活以清除过量的自由基。该系统通过生成多种酶促抗氧化剂来调控 ROS 的产生与扩散[41]，从而减轻氧化损伤。如图 5 所示，经 H_2O_2 诱导后，模型组酵母细胞的 SOD 活性显著高于对照组（P<0.05），达到对照组的 1.51 倍；模型组酵母细胞的 GSH 水平是对照组的 1.53 倍，但未见显著统计学差异。这一结果与已有研究一致：杨钰昆等[42] 研究表明，镉胁迫可诱导酿酒酵母中 SOD、POD、CAT 及 GSH 等多种抗氧化酶活性显著上升。酵母细胞经 FAE 干预处理后 SOD 活性显著提高（P<0.05），达到 4.97±0.60 U/mg prot；而 FWE 处理则显著提高了 GSH含量（P<0.05），达到 31.99±0.09 μg/mg prot。结果表明，黄毛草莓提取物可通过上调 SOD 活力和 GSH含量，增强氧化应激条件下细胞的抗氧化能力，从而有效保护细胞免受氧化损伤。

2.5　网络药理学分析黄毛草莓果实提取物的抗氧化作用机制

2.5.1　黄毛草莓果实提取物抗氧化作用潜在靶点

经过 Swiss ADME、Swiss Target Prediction、Genecards、OMIM 和 DisGeNET 数据库分析与数据处理，收集到黄毛草莓提取物的化学成分 22 个，如表 4 所示，化学成分靶点 387 个、抗氧化靶点 3554 个。将成分靶点和疾病靶点上传至在线网站 Venny2.1.0 取交集，得到 235 个交集基因，如图 6 所示，表明黄毛草莓提取物可能通过这些基因调控抗氧化作用。

表 4　黄毛草莓提取物的有效化学成分

Table 4　Effective chemical ingredients of *Fragaria nilgerrensis* Schltdl. extract

序号	化合物	序号	化合物
Huang0	葫芦巴碱	Huang11	对羟基苯甲醛
Huang1	腺嘌呤	Huang12	鞣花酸
Huang2	D-脯氨酸	Huang13	邻香豆酸
Huang3	L-酪氨酸	Huang14	丁香酸
Huang4	鸟嘌呤	Huang15	壬二酸
Huang5	异亮氨酸	Huang16	山奈酚
Huang6	没食子酸	Huang17	对香豆酸
Huang7	焦性没食子酸	Huang18	槲皮素
Huang8	泛酸	Huang19	柚皮素
Huang9	D-色氨酸	Huang20	甘草次酸
Huang10	原儿茶酸	Huang21	柚皮素查尔酮

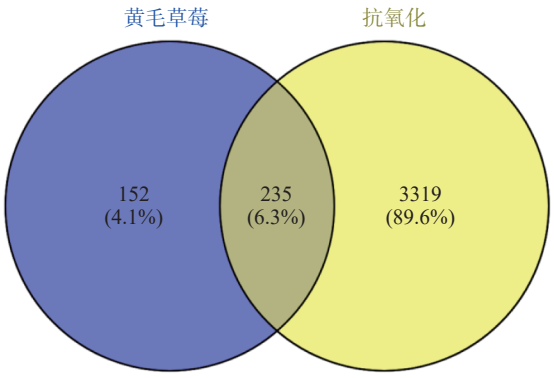


图 6　成分靶点与抗氧化靶点的交集韦恩图

Fig.6　Venn diagram of the intersection between compound targets and antioxidant targets

2.5.2　药物-成分-靶点网络图和 PPI 网络图的构建

通过 Cytoscape 3.10.0 软件构建“药物-成分-靶点”网络图。如图 7 所示，在该网络图中，绿色代表黄毛草莓、红色代表化学成分、橙色代表疾病靶点。按照 Degree 值对化学成分进行排序，排名靠前的化学成分为槲皮素、山奈酚、柚皮素、甘草次酸、鞣花酸和壬二酸，说明这几种化合物为黄毛草莓发挥抗氧化作用的主要化学成分。

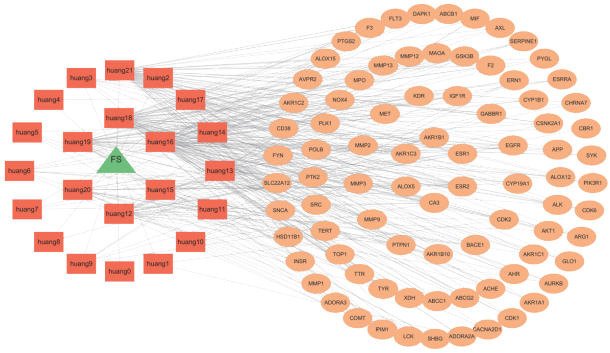


图 7　药物-成分-靶点网络图

Fig.7　Drug-ingredient-target network diagram

将 235 个抗氧化的潜在作用靶点上传至 STRING 平台，构建蛋白互作网络图；将数据导入 Cytoscape3.10.0，利用 CytoNCA 插件计算度值（Degree）、介数中心性（Betweenness）和接近中心性（Closeness），并以 Degree>28.58、Betweenness>253.17 和 Closeness>0.002 进行筛选。根据网络拓扑分析结果，图中节点的大小和颜色深度与靶标蛋白的重要性呈正相关。通过筛选共获得 45 个核心靶点，其可视化分析结果如图 8 所示。其中，节点大小和颜色深度与 Degree 值成正比，表明这些靶点具有更高的网络连接度和更核心的网络位置。基于此，预测 AKT1、IL6、ALB、BCL2、TNF 和 PPARG 等为黄毛草莓提取物中最关键的抗氧化作用靶点。分子机制分析表明，AKT1 作为 PI3K/AKT 信号通路的

核心调控蛋白，可通过磷酸化激活转录因子 NRF2，进而促进抗氧化基因的表达[43]。促炎因子 IL6 和 TNF 则通过 NF-κB 信号通路双重调控氧化应激：一方面诱导活性氧生成，另一方面抑制超氧化物歧化酶（SOD）等抗氧化酶的活性[44]。此外，血清白蛋白（ALB）凭借其分子中的游离巯基可直接清除自由基，并通过螯合过渡金属离子（如 Fe^{2+}/Cu^{2+}）阻断 Fenton 反应，从而减轻氧化损伤[45]。

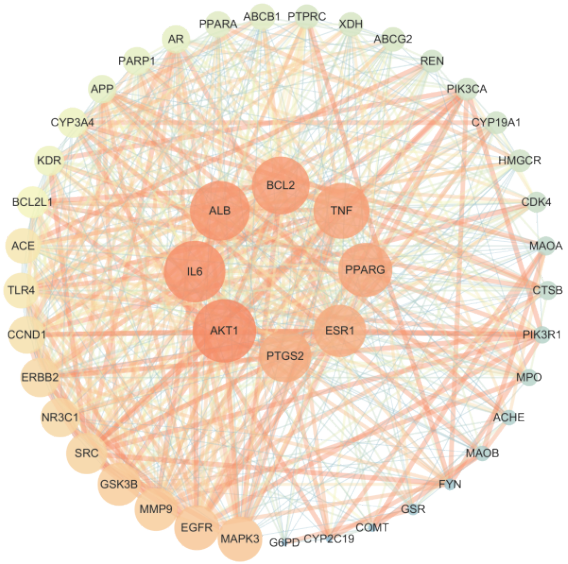


图 8　黄毛草莓抗氧化核心靶点可视化 PPI 网络图

Fig.8　Visual PPI network diagram of *Fragaria nilgerrensis* Schltdl. antioxidant core targets

2.5.3　GO 功能和 KEGG 通路富集分析　GO 和 KEGG 富集分析共鉴定到 1255 个显著条目（P<0.05），包括 726 个生物过程（BP）、111 个细胞组分（CC）、252 个分子功能（MF）以及 166 条 KEGG 通路。根据 P 值显著性排序，选取 BP、MF 和 CC 的前 10 个条目以及与抗氧化作用相关的 KEGG 前 10 条通路进行可视化分析，如图 9 和图 10 所示。在生物过程层面，显著富集的条目主要涉及信号转导调控（如细胞凋亡负调控、细胞增殖正调控、基因表达

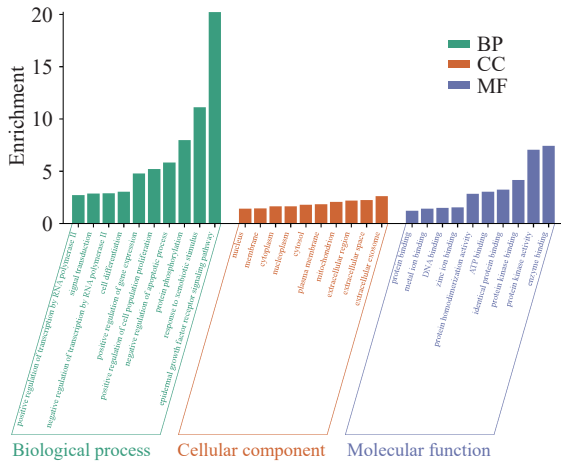


图 9　GO 功能富集分析图

Fig.9　Analysis of GO functional enrichment

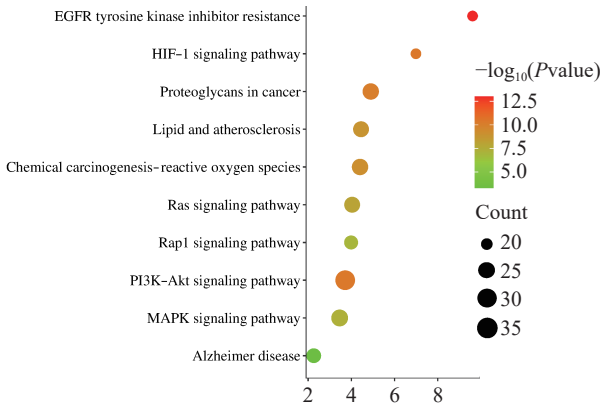


图 10　KEGG 通路富集气泡图

Fig.10　KEGG pathway enrichment bubble diagram

正调控），表明黄毛草莓提取物可能通过多靶点参与细胞稳态的调控；细胞组分分析显示，靶蛋白主要定位在细胞膜（受体活性）、细胞核（转录调控）及线粒体（能量代谢）等关键亚细胞结构；分子功能富集结果显示，靶点蛋白显著参与蛋白质结合（包括酶结合、ATP 结合）和蛋白激酶活性，这与植物多酚类物质的典型作用模式相符[46]。KEGG 通路分析进一步揭示，黄毛草莓提取物的抗氧化作用可能通过以下核心通路介导：PI3K-AKT 信号通路，调控 NRF2 介导的抗氧化反应[47]；MAPK 信号通路，通过调控 NF-κB 减少促炎因子 TNF-α、IL-6 释放，间接缓解氧化应激诱导的炎症损伤[48]；HIF-1 信号通路，在低氧状态下激活糖酵解关键酶 HK_2、PDK_1，减少线粒体 ROS 产生[49]。这些通路之间相互作用，形成一个复杂的抗氧化调控网络。

2.5.4　分子对接验证　基于网络药理学筛选结果，选取了“药物-成分-靶点”网络图中的前 6 种化学成分与 PPI 蛋白网络图中 Degree 值排名前 10 的关键靶点进行分子对接验证，并利用 Pymol 软件将对接的最佳构象进行可视化分析，结果如图 11、图 12 所示。结果表明，除壬二酸外，其余化学成分与靶点的

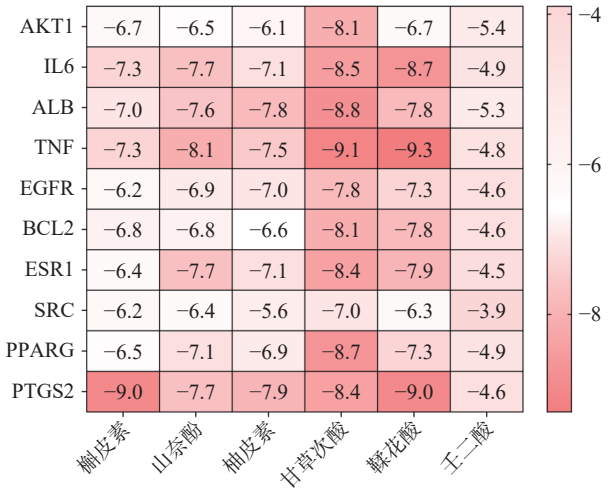


图 11　分子对接结合能热图

Fig.11　Molecular docking and binding energy heat map

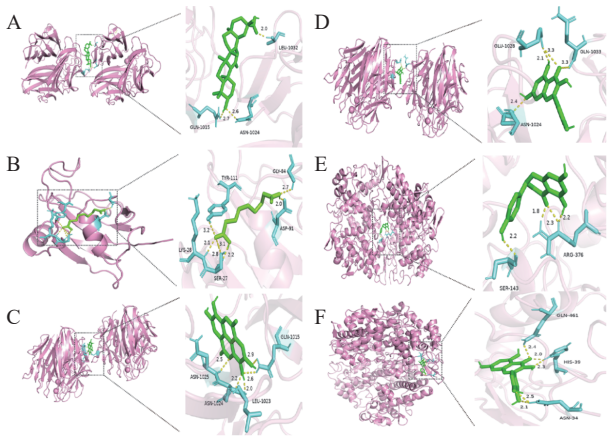


图 12　活性成分与靶点蛋白最优结合模式

Fig.12　Optimal binding mode of target protein and chemical ingredients

注：(A)甘草次酸和 TNF；(B)壬二酸和 AKT1；(C)鞣花酸和 TNF；(D)山奈酚和 TNF；(E)柚皮素和 PTGS2；(F)槲皮素和 PTGS2。

对接结合能均小于−5 kcal/mol，其中甘草次酸、鞣花酸和山奈酚与 TNF 的结合能最高，分别为−9.1、−9.3 和−8.1 kcal/mol。槲皮素和柚皮素则与 PTGS2 结合能更高，分别为−9.0 和−7.9 kcal/mol。表明这些化学成分与靶点蛋白具有较好的结合亲和力，并且这些复合物可能具有较高的构象稳定性。

图 12 结果所示，甘草次酸、鞣花酸和山奈酚与 TNF 发生相互作用，其中甘草次酸与 LEU-1032、ASN-1024 和 GLN-1015 形成氢键，同时还存在疏水相互作用。鞣花酸与 GLN-1015、LEU-1023、ASN-1024、ASN-1025 之间形成 5 个氢键，山奈酚与 GLN-1033、ASN-1024 和 GLU-1028 之间形成 4 个氢键，这些高亲和力结合可有效抑制 TNF-α，从源头上减少炎症诱导的活性氧(ROS)生成，并打破“炎症-氧化应激”恶性循环[50]。柚皮素、槲皮素与 PTGS2 发生相互作用，其中柚皮素与 ARG-376 和 SER-143 形成 4 个氢键，槲皮素与 GLN-461、HIS-39 和 ASN-34 形成氢键。柚皮素与槲皮素通过氢键网络抑制 PTGS2(COX-2)的酶活性。这不仅减少了炎症介质的产生，也降低了其催化过程中伴随的 ROS 产生，从而缓解氧化应激[51]。壬二酸可与 AKT1 的多个残基形成氢键。作为 PI3K/AKT 信号通路的核心，AKT1 受到抑制后，可间接影响下游的 Nrf2 等抗氧化信号通路，进而调节超氧化物歧化酶(SOD)等内源性抗氧化酶的活性[47]。综上所述，这些化合物通过作用于 TNF-α、PTGS2 及 AKT1 等不同关键靶点，形成了一个多靶点的抗氧化与抑制 ROS 生成的调控网络，是黄毛草莓发挥活性作用的重要物质基础。

3　结论

本研究通过抗氧化活性评价发现，黄毛草莓提取物 FAE 和 FWE 表现出良好的 DPPH、$ABTS^{+}$自由基清除能力及铁离子还原能力，具有良好的抗氧化效果，且 FAE 的抗氧化活性优于 FWE，这可能与 FAE 中更高的总酚酸与总黄酮含量相关。进一步研究表明，FAE 和 FWE 处理可延长酿酒酵母的生长稳定期，增强其抗氧化胁迫能力，降低细胞内 MDA 和 ROS 水平，同时提高 SOD 活力和 GSH 水平从而缓解氧化损伤、增强细胞抗氧化能力。利用 LC-MS/MS 技术对黄毛草莓果实提取物的化学成分进行分析，从中鉴定出酚类、黄酮类、氨基酸及核苷类共 35 种化合物。网络药理学分析提示，槲皮素、山奈酚、柚皮素及鞣花酸等为关键抗氧化成分，其抗氧化作用可能通过调控 AKT1、IL6、ALB、ESR1、EGFR、TNF 等靶点，激活 PI3K-AKT、MAPK 和 HIF-1 等信号通路实现。分子对接结果与网络药理学预测基本一致，表明黄毛草莓提取物可能通过多成分、多靶点、多通路的协同作用发挥抗氧化作用。本研究证实黄毛草莓提取物具有良好的抗氧化潜力，为其在功能性食品中的应用提供了重要的科学依据。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 张华，李姗，邓言欢，等. 贵州产民族药白草莓药材质量标准研究[J]. 黔南民族医专学报，2023，36(4)：235−237. [ZHANG Hua, LI Shan, DENG Yanhuan, et al. Quality standards research of ethnic medicinal plant yellowhairy strawberry grown in Guizhou Province[J]. Journal of Qiannan Medical College for Nationalities, 2023, 36(4): 235−237.]

[2] STAUCT G. The species of *Fragaria*, their taxonomy and geographical distribution[J]. Acta Horticulturae, 1989(265): 23−34.

[3] 李桂香，吕建召，肖湘滇，等. 云南野生黄毛草莓鲜果的营养成分分析[J]. 大理大学学报，2017，2(6)：64−67. [LI Guixiang, LÜ Jianzhao, XIAO Xiangdian, et al. Analysis of nutritional compositions of Yunnan wild *Fragaria nilgerrensis* Schlecht fresh fruit[J]. Journal of Dali University, 2017, 2(6): 64−67.]

[4] 赵倩，杨京，周丽免，等. 云南野生黄毛草莓的营养价值评价和香气成分分析[J]. 现代食品科技，2020，36(9)：277−283. [ZHAO Qian, YANG Jing, ZHOU Limian, et al. Evaluation of nutritional value and detection of aroma components of wild *F. nilgerrensis* Schlecht in Yunnan[J]. Modern Food Science & Technology, 2020, 36(9): 277−283.]

[5] DUAN Mingzheng, JIANG Ting, WANG Xi, et al. LC-MS/MS reveals variation in bioactive flavonoid profiles and MYB regulatory networks in wild vs. cultivated strawberries (white, pink, red)[J]. LWT, 2025, 231: 118319.

[6] CAO Qiang, ZHU Ni, LAN Genqian, et al. Multi-omics analysis of peach-like aroma formation in fruits of wild strawberry (*Fragaria nilgerrensis*)[J]. Horticultural Plant Journal, 2026, 12(1): 99−113.

[7] 王越，王慧颖，姜岩，等. 不同浓度细叶地榆乙醇提取物抗氧化活性分析[J]. 安徽农业科学，2025，53(14)：163−166. [WANG Yue, WANG Huiying, JIANG Yan, et al. Analysis of antioxidant activity of ethanol extract of *Sanguisorba tenuifolia* at different concentrations[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2025, 53(14): 163−166.]

[8] 尚艳，胡慧敏，赵振羽，等. 福林酚比色法对保健食品中茶多

酚含量的测定分析[J]. 中国食品工业, 2024(5): 89−91. [SHANG Yan, HU Huimin, ZHAO Zhenyu, et al. Determination and analysis of tea polyphenols in health food by Folin phenol colorimetry[J]. China Food Industry, 2024(5): 89−91.]

[9] 林鹤霏, 徐丽丽, 方琦, 等. 银杏叶茶总黄酮含量测定及抗氧化活性研究[J]. 广州化工, 2025, 53(2): 16−19. [LIN Hefei, XU Lili, FANG Qi, et al. Determination of total flavonoid content and antioxidant activity of *Ginkgo biloba* leaf tea[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2025, 53(2): 16−19.]

[10] ZELENA E, DUNN W B, BROADHURST D, et al. Development of a robust and repeatable UPLC-MS method for the long-term metabolomic study of human serum[J]. Analytical Chemistry, 2009, 81(4): 1357−1364.

[11] SILVA V, FALCO V, DIAS M I, et al. Evaluation of the phenolic profile of *Castanea sativa* Mill. by-products and their antioxidant and antimicrobial activity against *Multiresistant bacteria*[J]. Antioxidants, 2020, 9(1): 87.

[12] RUMPF J, BURGER R, SCHULZE M. Statistical evaluation of DPPH, ABTS, FRAP, and Folin-Ciocalteu assays to assess the antioxidant capacity of lignins[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 233: 123470.

[13] 卢跃红, 王斌, 刘偲, 等. 沙葱多酚提取物抗氧化活性及其对消化酶的抑制作用[J]. 中国食品学报, 2024, 24(8): 164−177. [LU Yuehong, WANG Bin, LIU Cai, et al. Antioxidant activities and inhibitory effects on digestive enzyme of polyphenolic extracts from *Allium mongolicum* Regel[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(8): 164−177.]

[14] 林清凡, 张丽萍. 人参皂苷 Rg1 对过氧化氢诱导氧化应激下酵母的影响[J]. 福建轻纺, 2024(6): 23−28. [LIN Qingfan, ZHANG Liping. Effect of ginsenoside Rg1 on yeast under oxidative stress induced by hydrogen peroxide[J]. The Light & Textile Industries of Fujian, 2024(6): 23−28.]

[15] 杨力, 闫孟利, 刘科. 蝉花提取物促进酿酒酵母寿命延长的机制研究[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2020, 57(1): 169−173. [YANG Li, YAN Mengli, LIU Ke. Study on the mechanism of *Cordyceps cicadae* extracts promote longevity in *Saccharomyces cerevisiae*[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2020, 57(1): 169−173.]

[16] 潘军航. 酿酒酵母耐铝机制中可能包含抗氧化作用[D]. 杭州: 浙江大学, 2005. [PAN Junhang. The involvement of antioxidant in *Saccharomyces cerevisiae* aluminum tolerance[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.]

[17] 赵盈, 於天, 郑志刚, 等. 多酚在植物中的分布及其生物活性研究进展[J]. 中草药, 2023, 54(17): 5825−5832. [ZHAO Ying, YU Tian, ZHENG Zhigang, et al. Research progress on distribution and bioactivity of polyphenols in plants[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2023, 54(17): 5825−5832.]

[18] 林春草, 陈大伟, 戴均贵. 黄酮类化合物合成生物学研究进展[J]. 药学学报, 2022(5): 1322−1335. [LIN Chuncao, CHEN Dawei, DAI Jungui. Advances of synthetic biology of flavonoids[J]. Acta Pharmaceutica Sinica, 2022(5): 1322−1335.]

[19] LIANG Lu, LIU Zhongwei, XU Weixiang, et al. Discovery and identification of natural alkaloids with potential to impact insulin resistance syndrome in *Cyclocarya paliurus*. (Batal) leaves by UPLC-QTOF-MS combined with HepG2 cells[J]. Food Research International, 2024, 190: 114545.

[20] FU Shuai, CHENG Rongrong, DENG Zixin, et al. Qualitative analysis of chemical components in Lianhua Qingwen capsule by HPLC-Q Exactive-Orbitrap-MS coupled with GC-MS[J]. Journal of Pharmaceutical Analysis, 2021, 11(6): 709−716.

[21] LI Yun, YU Xiaofei, LIU Yezhi, et al. Pharmacodynamic components and molecular mechanism of *Gastrodia elata* Blume in treating hypertension: Absorbed components, network pharmacology analysis, molecular docking and *in vivo* experimental verification[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2025, 345: 119583.

[22] 曾宇骄, 罗玉婷, 张琨, 等. 基于超高效液相色谱-四极杆-静电场轨道阱高分辨质谱技术的藏药八味小檗皮胶囊化学成分分析研究[J]. 成都中医药大学学报, 2023, 46(1): 32−40. [ZENG Yujiao, LUO Yuting, ZHANG Kun, et al. Chemical composition analysis of Tibetan medicine Bawei Xiaobopi capsules based on UPLC-Q-exacutive orbitrap MS technology[J]. Journal of Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, 2023, 46(1): 32−40.]

[23] 王静, 姚长良, 张建青, 等. 基于 UPLC-Q-TOF-MS 的人参配方颗粒化学成分及指纹图谱研究[J]. 中草药, 2022, 53(11): 3286−3294. [WANG Jing, YAO Changliang, ZHANG Jianqing, et al. Study on chemical components and chromatographic fingerprints of ginseng dispensing granules based on UPLC-Q-TOF-MS[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2022, 53(11): 3286−3294.]

[24] ITO K, KIKUCHI T, IKUBE K, et al. LC-MS profiling of kakkonto and identification of ephedrine as a key component for its anti-glycation activity[J]. Molecules, 2023, 28(11): 4409.

[25] TEREKHOV R P, SAVINA A D, PANKOV D I, et al. Insights into the stereoisomerism of dihydroquercetin: Analytical and pharmacological aspects[J]. Frontiers in Chemistry, 2024, 12: 1439167.

[26] ZOU Yanfang, LÜ Yangbin, PENG Xin, et al. A novel strategy by combining "magnified" matrix solid phase dispersion extraction with high-speed countercurrent chromatography for the rapid and efficient isolation of flavonoids isomers with anti-inflammatory effect from *Lindera aggregata* (Sims) Kosterm leaves[J]. Sustainable Chemistry and Pharmacy, 2023, 33: 101073.

[27] 李凯琳, 刘玲, 邹宇凤, 等. 基于 UHPLC-Q-Exactive Orbitrap MS 技术的天山雪莲口服液化学成分快速表征[J]. 中国现代中药, 2025, 27(2): 210−218. [LI Kailin, LIU Ling, ZOU Yufeng, et al. Rapid identification of chemical constituents in sasussured involucrata oral liquid based on UHPLC-Q-exactive orbitrap MS technology[J]. Modern Chinese Medicine, 2025, 27(2): 210−218.]

[28] 张敏, 朱先宏, 石芸, 等. 五神汤中化学成分研究[J]. 中草药, 2024, 55(18): 6131−6143. [ZHANG Min, ZHU Xianhong, SHI Yun, et al. Chemical constituents in Wushen decoction[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2024, 55(18): 6131−6143.]

[29] 刘渝辰, 余迎利, 甘思逸, 等. 联合 UPLC-QTOF-MS 与 HS-SPME-GC-MS 测定赣南脐橙果肉化学成分[J]. 食品科学, 2023, 44(14): 216−228. [LIU Yuchen, YU Yingli, GAN Siyi, et al. Identification of chemical components in Gannan navel orange pulp by UPLC-QTOF-MS coupled with HS-SPME-GC-MS[J]. Food Science, 2023, 44(14): 216−228.]

[30] ZHANG Yao, LÜ Xin, WANG Dan, et al. Metabolomics combined with biochemical analyses revealed phenolic profiles and antioxidant properties of rapeseeds[J]. Food Chemistry, 2025, 466: 142250.

[31] 葛娴, 赵洪婷, 陈利, 等. 基于 UPLC-Q-Exactive Orbitrap-MS/MS 技术分析加味二妙方的活性成分与代谢产物[J]. 南京中医药大学学报, 2025, 41(8): 998−1010. [GE Xian, ZHAO Hongting, CHEN Li, et al. Analysis of active components and metabolites of modified Ermiao decoction based on UPLC-Q-exactive orbitrap-MS/MS technology[J]. Journal of Nanjing University

of Traditional Chinese Medicine, 2025, 41(8): 998−1010.］
［32］ 黄韵璇, 李海峰, 黄泽波. 天然药物抗氧化活性物质研究进展[J]. 广东药学院学报, 2016, 32(4): 532−536. ［HUANG Yunxuan, LI Haifeng, HUANG Zebo. Recent progress on antioxidant products from natural sources[J]. Journal of Guangdong Pharmaceutical University, 2016, 32(4): 532−536.］
［33］ 向云亚, 张可擎, 姚茵茵, 等. 水蓼衣醇提物不同萃取部位的体外抗氧化活性研究[J]. 辽宁中医药大学学报, 2024, 26(11): 52−56. ［XIANG Yunya, ZHANG Keqing, YAO Yinyin, et al. Study on antioxidant activity of different extraction parts of ethanol extract from *Hygrophila salicifolia* herba *in vitro*[J]. Journal of Liaoning University of Traditional Chinese Medicine, 2024, 26(11): 52−56.］
［34］ 和文婧, 黄张君, 熊燕飞, 等. 松茸醇提物的抗氧化活性及对 *α*-葡萄糖苷酶的抑制作用[J]. 现代食品科技, 2025, 41(8): 104−111. ［HE Wenjing, HUANG Zhangjun, XIONG Yanfei, et al. Antioxidant and *α*-glucosidase inhibitory activities of ethanollic extracts from *Tricholoma matsutake*[J]. Modern Food Science & Technology, 2025, 41(8): 104−111.］
［35］ 华玮, 熊丽娜, 张永鑫, 等. 草莓多酚提取工艺优化及抗氧化性分析[J]. 果树资源学报, 2023, 4(6): 17−22. ［HUA Wei, XIONG Lina, ZHANG Yongxin, et al. Optimization of extraction technology of polyphenols in strawberry and its antioxidant capacity[J]. Journal of Fruit Resources, 2023, 4(6): 17−22.］
［36］ 傅青, 王英, 李玲玉, 等. 不同草莓品种发酵过程中品质指标及抗氧化活性的变化[J]. 中国酿造, 2023, 42(4): 175−180. ［FU Qing, WANG Ying, LI Lingyu, et al. Changes of quality indexes and antioxidant activity of different varieties of strawberry during fermentation[J]. China Brewing, 2023, 42(4): 175−180.］
［37］ 王佳鸾, 赵俸艺, 张春红, 等. 鞣花酸提取、纯化及其生物活性研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(13): 416−424. ［WANG Jialuan, ZHAO Fengyi, ZHANG Chunhong, et al. Research progress of extraction, purification and bioactivity of ellagic acid[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(13): 416−424.］
［38］ 王亚茹, 袁满, 张丽, 等. 槲皮素抗氧化作用及相关机制研究进展[J]. 营养学报, 2022, 44(2): 204−208. ［WANG Yaru, YUAN Man, ZHANG Li, et al. Research progress on antioxidant actions and related mechanisms of quercetin[J]. Acta Nutrimenta Sinica, 2022, 44(2): 204−208.］
［39］ 王敏, 廖林锋, 孙晓宇, 等. 延衰组合物对酵母细胞寿命及氧化应激的研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(12): 1−7. ［WANG Min, LIAO Linfeng, SUN Xiaoyu, et al. Effects of combined anti-aging extracts on lifespan and oxidative stress in yeast cells[J]. Food Research and Development, 2021, 42(12): 1−7.］
［40］ YUAN F. Study on anti-aging of yeast[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
［41］ MARKIEWICZ E, IDOWU O C. DNA damage in human skin and the capacities of natural compounds to modulate the bystander signalling[J]. Open Biology, 2019, 9(12): 190208.
［42］ 杨钰昆, 杨文飞, 常媛媛, 等. 硒对镉胁迫下酿酒酵母抗氧化活性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(22): 129−134. ［YANG Yukun, YANG Wenfei, CHANG Yuanyuan, et al. Effects of selenium on antioxidant activity of *Saccharomyces cerevisiae* under cadmium stress[J]. Food Science, 2018, 39(22): 129−134.］
［43］ WANG Jianping, ZHANG Tao, WAN Chunpeng, et al. The effect of theabrownins on the amino acid composition and antioxidant properties of hen eggs[J]. Poultry Science, 2023, 102(11): 102717.
［44］ GU Mengdi, SU Wen, DAI Jiangqin, et al. Jingfang granule alleviates *Pseudomonas aeruginosa*-induced acute lung inflammation through suppression of STAT3/IL-17/NF-*κ*B pathway based on network pharmacology analysis and experimental validation[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2024, 318: 116899.
［45］ HASSANIN S O, HEGAB A M M, MEKKY R H, et al. Combining *in vitro*, *in vivo*, and network pharmacology assays to identify targets and molecular mechanisms of *Spirulina*-derived biomolecules against breast cancer[J]. Marine Drugs, 2024, 22(7): 328.
［46］ 王京雅. 茶叶中多糖及多酚类成分的理化性质及活性研究[D]. 天津: 天津大学, 2017. ［WANG Jingya. Studies on the physicochemical propertiesand bioactivities of tea polysaccharides andtea polyphenols[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.］
［47］ ZHANG Bingxin, ZHAO Zishen, MENG Xiaoyin, et al. Hydrogen ameliorates oxidative stress via PI3K-Akt signaling pathway in UVB-induced HaCaT cells[J]. International Journal of Molecular Medicine, 2018: 3653−3661.
［48］ LEE J, UDDIN S, JEONG C, et al. Methanol extract of *Euphorbia cotinifolia* L. leaf attenuates inflammation and oxidative stress in RAW 264.7 macrophages via TAK1-mediated suppression of NF-*κ*B/MAPK and activation of Nrf2 pathways[J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2025, 190: 118372.
［49］ KIRITO K, HU Yongzhen, KOMATSU N. HIF-1 prevents the overproduction of mitochondrial ROS after cytokine stimulation through induction of PDK-1[J]. Cell Cycle, 2009, 8(17): 2844−2849.
［50］ TANG Lu, LI Mingquan, PIAO Songlan, et al. Activation of the Keap1/Nrf2/HO-1 pathway by "Tianyu" pairing: Implications for inflammation and oxidative stress in rheumatoid arthritis[J]. Endocrine, Metabolic & Immune Disorders-Drug Targets, 2025, 25(6): 479−491.
［51］ HE Jianglong, LI Yuqi, JIANG Xueping, et al. Unraveling mulberry anthocyanins' antioxidant mechanism and biosafety via computational modeling[J]. Food Bioscience, 2025, 73: 107678.