章开, 曾姝, 魏斐, 等. 阿魏酸缓解小清蛋白致敏性的效果评价 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(11): 426−432. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060021

ZHANG Kai, ZENG Shu, WEI Fei, et al. Evaluation of the Effect of Ferulic Acid in Alleviating the Sensitization of Parvalbumin[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(11): 426−432. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060021

· 营养与保健 ·

阿魏酸缓解小清蛋白致敏性的效果评价

章　开[1], 曾　姝[1], 魏　斐[1], 刘　俊[2,*]

（1.江西省肿瘤医院药学部, 江西南昌 330029;
2.江西师范大学生命科学学院, 江西南昌 330022）

摘　要: 本文采用网络药理学、Swiss Target Prediction 等数据库获取阿魏酸和食物过敏反应的关联靶点，基于 GO 及 KEGG 通路富集预测阿魏酸缓解食物过敏的关键靶点及作用途径，通过分子对接技术进一步验证阿魏酸与关键靶点的结合能力；最后在细胞和动物水平上探究阿魏酸对 KU812 细胞脱颗粒、小清蛋白致敏小鼠过敏症状和血清特异抗体含量的影响，评价阿魏酸对小清蛋白引起食物过敏反应的缓解效果。结果表明：筛选出阿魏酸缓解食物过敏的重要潜在靶点有 46 个，关联靶点富集在 Th17、JAK-STAT 和炎症性肠病等通路，阿魏酸与 NAKB1、STAT3、IL2、JAK2 靶蛋白有较好的结合活性，结合能均低于−4.0 kJ/mol；同时阿魏酸可以降低敏化 KU812 细胞释放组胺和 IL-6 的含量，减轻小清蛋白诱导的致敏小鼠过敏症状以及显著降低血清中特异抗体含量，缓解其过敏反应。阿魏酸具有潜在缓解食物过敏的能力，研究结果为研发抗过敏类药物治疗食物过敏提供理论依据。

关键词: 阿魏酸, 致敏性, 网络药理学, 分子对接

中图分类号: TS252.1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)11−0426−07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060021　　本文网刊:

Evaluation of the Effect of Ferulic Acid in Alleviating the Sensitization of Parvalbumin

ZHANG Kai[1], ZENG Shu[1], WEI Fei[1], LIU Jun[2,*]

（1.Department of Pharmacy, Jiangxi Cancer Hospital, Nanchang 330029, China;
2.College of Life Sciences, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China）

Abstract: Network pharmacology and Swiss Target Prediction were used to retrieve the associated targets of ferulic acid in relation to food hypersensitivity in this paper, and the key targets and action pathways of ferulic acid in alleviating food allergies were identified by conducting enrichment prediction of GO and KEGG pathways. The binding ability of ferulic acid to these key targets was further validated via molecular docking technology. Finally, the effects of ferulic acid on degranulation of KU812 cells, allergic symptoms and serum specific antibody contents of the sensitized mice by parvalbumin were investigated at the cellular and animal levels, thereby evaluating the efficacy of ferulic acid in alleviating parvalbumin sensitization. The results indicated that 46 crucial targets of ferulic acid for alleviating food allergy were identified. The relevant targets were significantly enriched in pathways including Th17, JAK-STAT, and inflammatory bowel disease. Ferulic acid exhibited favorable binding activity with target proteins NAKB1, STAT3, IL2, and JAK2, and the binding energy all lower than −4.0 kJ/mol. Meanwhile, ferulic acid significantly reduced the release ability of histamine and interleukin-6 in sensitized KU812 cells, mitigated allergic symptoms, decreased the contents of specific antibodies and allergic mediators in the serum of parvalbumin-induced sensitized mice, thereby alleviating their allergic responses. Therefore, ferulic acid has the potential to alleviate food allergies, and the research results provide a theoretical foundation for the development of anti-allergy drugs to treat food allergies.

Key words: ferulic acid; sensitization; network pharmacology; molecular docking

收稿日期: 2025−06−05

基金项目: 江西省教育厅青年项目（GJJ2403634）; 国家自然科学基金项目（22368024）; 江西省自然科学基金面上项目（20224BAB205046）。

作者简介: 章开（1991−）（ORCID: 0009−0002−4908−4893）, 女, 博士研究生, 研究方向: 药食组分相互作用, E-mail: kz0518@126.com。

*** 通信作者:** 刘俊（1989−）（ORCID: 0000−0002−8570−5741）, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品营养组分相互作用, E-mail: lj_anyi@126.com。

由食物引起的过敏反应呈现逐年增长趋势，严重影响了患者及其家庭的生活，已成为广泛关注的公共健康问题[1−2]。而鱼类是最容易引起过敏的食物之一，其主要过敏原是小清蛋白，分子量在 10~14 kDa，属于 EF 手性蛋白家族。据报道，超过 90% 的鱼类过敏是由小清蛋白引起的，且小清蛋白广泛存在于各种鱼类中[3]。因此，如何消减小清蛋白引起的食物过敏对保障人类健康生活具有重要的现实意义。

临床上主要采取药物治疗、免疫疗法、靶向治疗等策略治疗食物过敏，但没有较好的治愈手段，其中过敏原特异性免疫疗法被认为是在临床上能治疗 IgE 介导过敏疾病最有效的途径[4]；第二代抗组胺药物是治疗轻度过敏反应的首选药物，但存在耐药性和严重的副作用等[5]。目前，物理法、化学法及生物法等被用来降低致敏蛋白的过敏性，如：表儿茶素与 Ara h1 的表位结合导致其空间结构发生变化，降低了其致敏性[6]；白藜芦醇-卵清蛋白复合物的消化率会显著提高，使卵清蛋白潜在的致敏性显著降低[7]；*β*-乳球蛋白与多酚化合物的共价偶联也会降低其致敏能力[8−11]；多酚类化合物可从过敏原、免疫系统和肠道菌群三方面发挥对过敏反应的干预作用[12]。因此，挖掘能缓解过敏反应的多酚类化合物及其脱敏机制的研究成为目前研究的热点和难点。

网络药理学在系统研究药物、靶点、途径和疾病之间相互关系中表现出整体性和有效性[13−14]，如：Peng 等[15] 采用网络药理学结合生化药理学研究三子汤通过调节 Th1/Th2 平衡减轻过敏性哮喘症状；薛静雯[16] 通过体内外实验和网络药理学探讨枳实总黄酮提取物抗过敏的活性机制。阿魏酸是一种天然酚类化合物，具有抗肿瘤、抗炎等生物活性[17]，可通过增强转化生长因子诱导 T 细胞扩增，缓解炎症。前期发现阿魏酸-葡萄糖通过调节肠道菌群、花生四烯酸和色氨酸代谢途径来降低 *β*-乳球蛋白致敏性[18]，但基于网络药理学从细胞和动物方面探究阿魏酸缓解食物过敏的机制还鲜有报道。

本文首先运用网络药理学方法筛选阿魏酸与食物过敏的共同作用靶点，构建蛋白质互作网络并识别核心靶点；通过 GO 功能注释和 KEGG 通路富集分析预测其潜在作用途径；结合分子对接技术验证阿魏酸与关键靶点的结合特性。进一步通过体外实验评估阿魏酸对 IgE 介导的 KU812 细胞组胺和 IL-6 释放量的影响，并建立小清蛋白致敏小鼠模型，从过敏症状评分、免疫器官指数、血清特异性抗体水平等方面评价阿魏酸的抗过敏功效，为开发基于天然产物的食物过敏干预策略提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

小清蛋白　自制；阿魏酸（99.00%）　北京索莱宝科技有限公司；小鼠免疫球蛋白 G（Immunoglobulin G, IgG）、免疫球蛋白 E（Immunoglobulin E, IgE）ELISA 试剂盒、白介素-6、组胺试剂盒　江苏酶免实业有限公司；山羊抗鼠 IgE-HRP、山羊抗鼠 IgG-HRP　美国 Sigma 公司；KU812 细胞　武汉尚恩生物技术有限公司；3 种鱼类过敏血清效价分别为 0.36、2.4、0.83 kUA/L　江西省儿童医院；BALB/c 雌性小鼠　购自浙江维通利华实验动物技术有限公司 [SCXK（浙）2024-0001]。

Synergy H1 酶标仪　美国 Bio Tek 公司；5430R 冷冻离心机　德国艾本德公司；SR160W 二氧化碳培养箱　上海舍岩仪器有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　阿魏酸作用靶点预测　为预测阿魏酸作用靶点，综合利用多源数据库进行分析。首先通过 PubChem 数据库（https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov）获取阿魏酸的结构信息，而后利用 SEA 数据库（http://sea.bkslab.org/）、TCMSP 数据库（https://www.tcmsp-e.com/index.php）、Swiss Target Prediction 数据库（https://swisstargetprediction.ch）、PharmMapper 数据库（http://lilab-ecust.cn/pharmmapper/index.html）及 SuperPred 数据库（https://prediction.charite.de/subpages/target_prediction.php）进行阿魏酸靶点筛选，收集上述数据库的预测靶点，通过 UniProt 数据库将靶点转换为对应的基因名称，整合数据、去除重复值，获取阿魏酸作用靶点。

1.2.2　食物过敏相关靶点获取　通过 MeSH 网站检索疾病名称，确定食物过敏的标准化学术语。利用 Genecards 数据库、OMIM 数据库、TTD 数据库、CTD 数据库以“Food Hypersensitivity”为关键词进行靶点查询。整合数据、去除重复值，同样统一其名称为人类基因标准名，最终获取食物过敏相关靶点。

1.2.3　交集靶点筛选及蛋白质互作（PPI）网络构建　利用在线绘图工具 Venny 2.1.0（https://bioinfogp.cnb.csic.es/tools/venny）识别阿魏酸与食物过敏之间的交集靶点。为深入探究两者交集靶点之间的蛋白相互作用，借助 String 数据库（https://string-db.org）进行分析并构建 PPI 网络图，设定物种参数为人，置信度阈值大于 0.4，确保所获取的相互作用信息具有较高的可信度，将分析完成的文件导入软件 Cytoscape 3.10.0，借助 Cytoscape 软件对分析结果进行可视化。

1.2.4　GO 和 KEGG 通路富集分析　为深入研究阿魏酸与食物过敏交集靶点所涉及的关键信号通路和细胞功能，将 1.2.3 获得的交集靶点导入 DAVID 数据库（http://david.ncifcrf.gov）进行 GO 和 KEGG 通路分析。分析过程中，标识符、列表类型和物种分别设置为官方基因符号、基因列表和人。统计学上，$P<0.05$ 被认为具有显著性，表明所研究的靶点在相关通路或功能中显著富集。使用微生信在线平台（http://www.bioinformatics.com.cn）对分析结果进行图表展示。

1.2.5 分子对接 首先利用 PDB 蛋白质数据库(https://www.rcsb.org)获取多个靶点蛋白的三维结构,再通过 PubChem 数据库(https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov)获取阿魏酸三维结构。采用 PYMOL 软件对分子结构前处理(加氢、除水、去配体等),获取符合对接模式的三维结构。以阿魏酸为配体,靶点蛋白为受体,借助 AutoDockTools 1.5.6 软件中的 AutoDock Vina 进行分子对接,使用 PyMOL 软件对结果进行可视化。

1.2.6 KU812 细胞实验 参照前期报道[19]的方法,将 KU812 细胞置于 37 ℃、5%CO_2 的培养箱中培养,培养基为 RPMI-1640(含 20% 胎牛血清及 1% 青霉素/链霉素),隔天换液或传代。待细胞生长稳定后,将其浓度调整为 1×10^6 个/mL,以 500 μL/孔接种到 48 孔培养板中,边缘孔加入等量 PBS 溶液。培养 24 h 后,每孔加入 50 μL 2.0 mg/mL 经 0.22 μm 水相膜过滤的鱼类过敏患者血清(v/v=50∶1)敏化处理。敏化 24 h 后,实验组加入 50 μL 0.5 mg/mL 阿魏酸(ferulic acid, FA)进行刺激命名为 FA 组,对照组不加 FA 命名为 PV 组,孵育 4 h。Normal 组为正常细胞。最后离心(10000×g, 5 min, 4 ℃)收集上清液,按照试剂盒说明书检测上细胞清液中组胺和白介素-6 的释放量。

1.2.7 动物实验 参照贾斌梅[20]的方法,构建小清蛋白为过敏原诱导的 BALB/c 雌性小鼠食物过敏模型。动物实验方案经江西省肿瘤医院医学伦理委员会批准(伦理编号 2024ky091),并按照中国动物福利指南(GB/T35892-2018)实施。具体方法为:30 只 BALB/c 雌性小鼠(3~4 周,约 12 g)在 20~26 ℃ 的动物室内自适应喂养 1 周。然后,随机分为对照组(Control 组)、小清蛋白致敏组(PV 组)、阿魏酸剂量组(FA 组),每组小鼠正常饮水喂食。

致敏处理阶段:在实验的第 0 d 和第 14 d,对各组小鼠进行腹腔注射,Control 组注射 200 μL/只的 PBS 与铝佐剂(1∶1)混合液;PV 组和 FA 组注射 200 μL/只的混合液,成分比例为小清蛋白(0.25 μg/μL)、PBS 及铝佐剂(2∶1∶1)。

灌胃处理及过敏激发:第 15~26 d 期间,正常喂养小鼠。从第 27 d 起,每日对各组小鼠实施灌胃处理,Control 组和 PV 组灌胃 2 mL PBS 溶液(对照),FA 组灌胃 2 mL 阿魏酸(90 mg/kg, PBS 溶解)溶液;在第 28~40 d 期间,每 3 d 进行一次过敏激发,激发前 1 h,小鼠禁食(不禁水),PV 组和 FA 组灌胃 2 mL 20 mg/mL 小清蛋白,Control 组灌胃等量 PBS 作为对照,共进行 5 次过敏激发。

样本采集与保存:第 5 次激发后 1 h 内采集尾静脉血清,−80 ℃ 冻存备用;第 41 d 时处死小鼠,收集眼球血清、脾脏及胸腺,−80 ℃ 保存待后续分析。

1.2.8 过敏性指标测定 基于上述建立的小鼠过敏模型,参照前期报道的方法[21],对小鼠过敏性指标进行测定:每次激发后观察小鼠 1 h 进行过敏症状评分;在第五次灌胃激发结束后,在 1 h 内每隔 20 min 测量小鼠的体温;在无菌超净工作台内对实验小鼠实施解剖手术,分别分离并摘取脾脏及胸腺组织,随后仔细剔除器官表面附着的脂肪与结缔组织,并用生理盐水进行充分冲洗,随后准确称量脾脏及胸腺组织湿重,通过器官指数(mg/g)=器官重量(mg)/小鼠体重(g)公式计算各组小鼠的器官指数。此外,根据试剂盒说明书对小鼠血清中 IgE 和 IgG 水平进行测定。

1.3 数据处理

所有实验均进行 3 次重复,所有结果均以平均值±标准偏差进行表示。数据的统计分析及显著性差异分析均采用 SSPS 27.0 软件进行,使用软件 Origin 2021 作图。

2 结果与分析

2.1 阿魏酸与食物过敏关联靶点获取

阿魏酸的 Pubchem CID 是 445858,在 Pubchem 数据库中检索到的阿魏酸二维和三维结构,SMILES 式为 COC1=C(C=CC(=C1)/C=C/C(=O)O)O。使用 TCMSP、Swiss Target Prediction、PharmMapper、Super Pred 以及 SEA 五个数据库搜索阿魏酸靶点,设定筛选条件 Swiss Target Prediction、PharmMapper 数据库可能性>0 分。筛选后从 TCMSP、Swiss Target Prediction、PharmMapper、Super Pred 及 SEA 五个数据库分别获得 16、60、246、78 及 278 个靶点,将上述所有靶点整合、转换基因名并去除重复值后共得到 548 个靶点。从 GeneCards(Relevance Score>10)、OMIM 以及 CTD(Inference Score>10)数据库中筛选、去重后分别获得 122、4 及 2723 个靶点,而 TTD 数据库未检索到相关靶点。将上述所有靶点整合、转换基因名并去除重复值后共得到 2834 个靶点。进一步与阿魏酸靶点取交集,最终筛选出 46 个交集靶点(图 1)。这些靶点被初步确认为阿魏酸缓解食物过敏的潜在作用靶点。

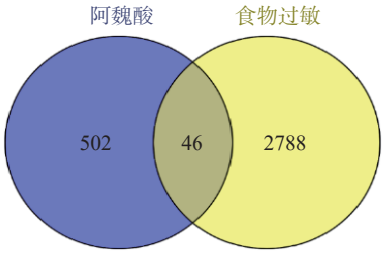


图 1 阿魏酸-食物过敏靶点韦恩图

Fig.1 Venn diagram of ferulic acid-food hypersensitivity targets

2.2 蛋白质相互作用(Protein-Protein Interaction, PPI)网络构建

使用 STRING 数据库对 46 个靶点进行了 PPI 分析,结果如图 2 所示。图中共有 46 个节点,其中 13 个节点属于游离节点,线条代表靶点蛋白之间存在的联系,共有 93 条。这表明 46 个靶点中有 33 个

之间是紧密联系的，初步判断是阿魏酸影响食物过敏的关键靶点蛋白，同时也说明阿魏酸可能通过多种蛋白和多条通路来影响食物过敏。

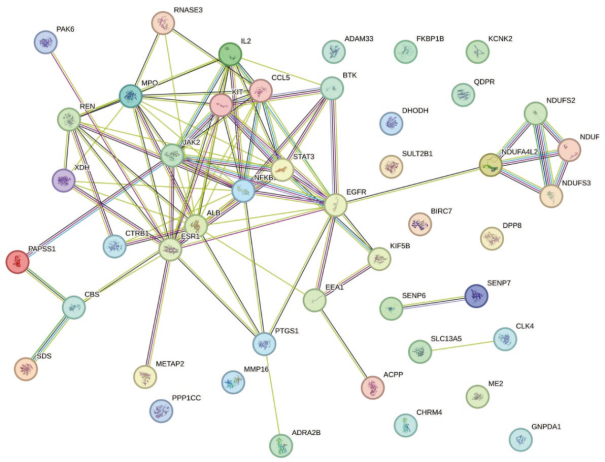


图 2　阿魏酸-食物过敏 PPI 网络图

Fig.2　PPI network diagram PPI network diagram of ferulic acid and food hypersensitivity

如图 3 所示，靶点网络图中的关键节点蛋白包括 ALB（degree=16）、ESR1（degree=15）、NFKB1（degree=13）、STAT3（degree=13）、EGFR（degree=13）、MPO（degree=11）、IL2（degree=11）、KIT（degree=10）、JAK2（degree=10）及 CCL5（degree=10）等。这些靶点大多数与蛋白质代谢、能量代谢、细胞增殖分化以及炎症和免疫反应通路有关，可能是阿魏酸缓解食物过敏的潜在关键靶点。

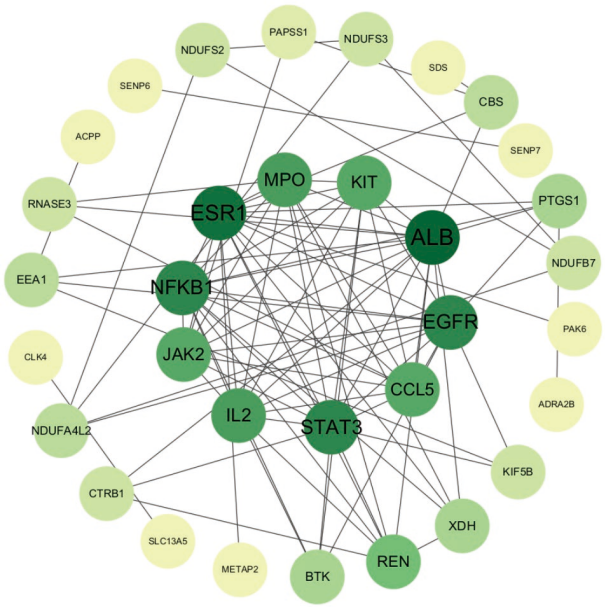


图 3　阿魏酸-食物过敏核心靶点图

Fig.3　Ferulic acid-food hypersensitivity core target diagram

2.3　基因本体（Gene Ontology，GO）功能及京都基因与基因组百科全书（Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes，KEGG）通路富集

通过 DAVID 数据库进行 GO 功能富集分析，结果显示在生物过程（Biological Process，BP）、细胞组分（Cellular Component，CC）和分子功能（Molecular Function，MF）三个分类中，P<0.05 的条目分别有 37、5 和 17 个。为了更直观地呈现结果，选取了生物过程和分子功能中富集靶点数排名前 10 及细胞组分的 5 个条目绘制了 GO 富集水平的柱状图，具体结果如图 4 所示。其中 GO-BP 中富集靶点数前 10 的条目包括蛋白水解，细胞群体增殖的调节，细胞迁移、细胞质钙离子浓度、磷脂酰肌醇 3-激酶/蛋白激酶 B 信号转导和丝裂原活化蛋白激酶（mitogen-activated protein kinase，MAPK）级联反应的正调控以及凋亡过程、炎症反应中细胞因子生成、RNA 聚合酶 II 介导的转录及基因表达的负调控；GO-CC 富集的条目包括细胞质基质、细胞质、线粒体、细胞外空间及线粒体呼吸链复合体 I；GO-MF 富集靶点数前 10 的条目分别为蛋白质、血红素、蛋白激酶、同源蛋白质、金属离子结合，蛋白质同源二聚化、电子转移和激酶、组蛋白激酶、蛋白质酪氨酸激酶活性。

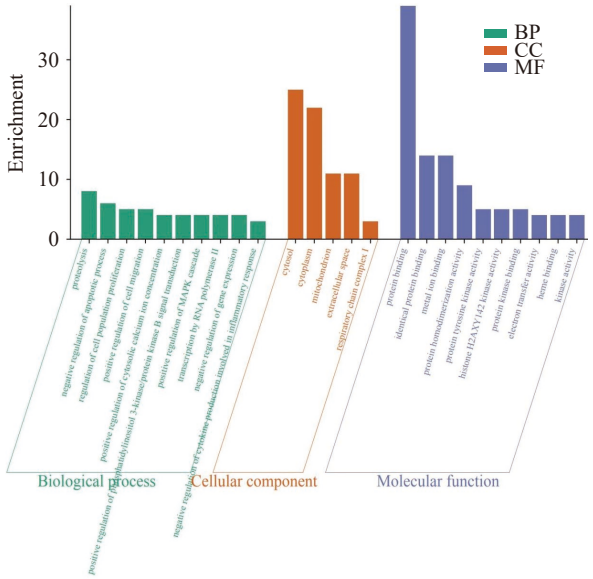


图 4　GO 功能富集分析

Fig.4　GO function enrichment analysis

KEGG 通路分析鉴定出 25 条显著相关信号通路（P<0.05），按照 P 值从小到大排序，取前 20 条通路绘制 KEGG 气泡图，结果如图 5 所示，与食物过敏机制密切相关的通路有 Th17 细胞分化、JAK-STAT 及炎症性肠病通路等，而 NFKB1、STAT3、IL2、JAK2 等关键靶点均富集于上述通路中。Th17 细胞及其产生的细胞因子在过敏疾病中发挥重要的作用[22]；JAK-STAT 信号通路参与调控细胞免疫、增殖和凋亡等生物学过程，与多种自身免疫性疾病的发病机制相关[23]；Sadar 等[24] 发现阿魏酸可提高结肠炎小鼠结肠中的抗氧化能力，降低丙二醛和一氧化氮的表达水平，对肠上皮损伤及细胞凋亡有保护作用。这些研究发现阿魏酸具有调控免疫-炎症网络中的关键靶点的能力。

2.4　分子对接

基于 KEGG 通路分析，采用 Autodock 工具对

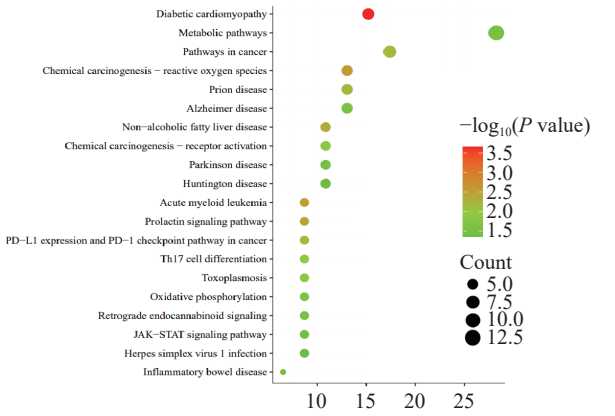


图 5　KEGG 功能富集分析

Fig.5　KEGG function enrichment analysis

PPI 网络筛选出的关键核心靶点 NFKB1、STAT3、IL2、JAK2 与阿魏酸进行分子对接。再结合 PyMOL 平台完成三维构象可视化呈现，结果如表 1 及图 6 所示，图中的黄色虚线表示氢键。阿魏酸与 NFKB1、STAT3、IL2、JAK2 的结合能分别为−4.9、−5.9、−5.2、−6.7 kJ/mol，均低于−4 kJ/mol，证实阿魏酸与靶蛋白具有稳定的结合能力；阿魏酸分别与 NFKB1 氨基酸 Gln63 和 Ser67、STAT3 氨基酸 Asn86、IL2 氨基酸 Asn33、Lys76 和 Phe78 以及 JAK2 氨基酸 Leu932 发生相互作用，主要通过氢键结合，氢键个数分别为 2、1、3、1。阿魏酸与 JAK2 的结合能最低（−6.7 kJ/mol），与 IL2 的氢键结合数量最多（3 个）。结果表明，阿魏酸可与各个靶点蛋白的关键氨基酸结合形成氢键网络，能够形成稳定的复合物。

表 1　阿魏酸与蛋白靶点分子对接结果

Table 1　Molecular docking results for ferulic acid and protein targets

蛋白靶点	结合能力(kJ/mol)	氢键数量	关键氨基酸残基
NFKB1(1mdi)	−4.9	2	Gln63、Ser67
STAT3(5u5s)	−5.9	1	Asn86
IL2(11irl)	−5.2	3	Asn33、Lys76、Phe78
JAK2(3e62)	−6.7	1	Leu932

2.5　FA 对 KU812 细胞组胺及 IL-6 含量的影响

建立鱼过敏患者血清引起的 KU812 细胞致敏模型评价阿魏酸缓解过敏反应的效果。结果如图 7 所示，与 Normal 组相比，PV 刺激后的 KU812 细胞释放组胺和 IL-6 的含量显著增加（P<0.05），表明 PV 可以诱导 KU812 细胞进行脱颗粒。而与 PV 相比，FA 组的组胺和 IL-6 释放水平显著降低（P<0.05），这与贾斌梅[20] 报道的结果类似，说明阿魏酸可以有效缓解敏化细胞的致敏性。

2.6　FA 对 PV 致敏小鼠过敏症状的影响

FA 对小鼠过敏评分、体温、脾脏和胸腺指数的影响结果见图 8。在第 5 次灌胃后，Control 组的小鼠均未出现任何过敏症状，而 PV 组小鼠的过敏评分显著上升（P<0.05），小鼠的体温显著下降（P<0.05）。

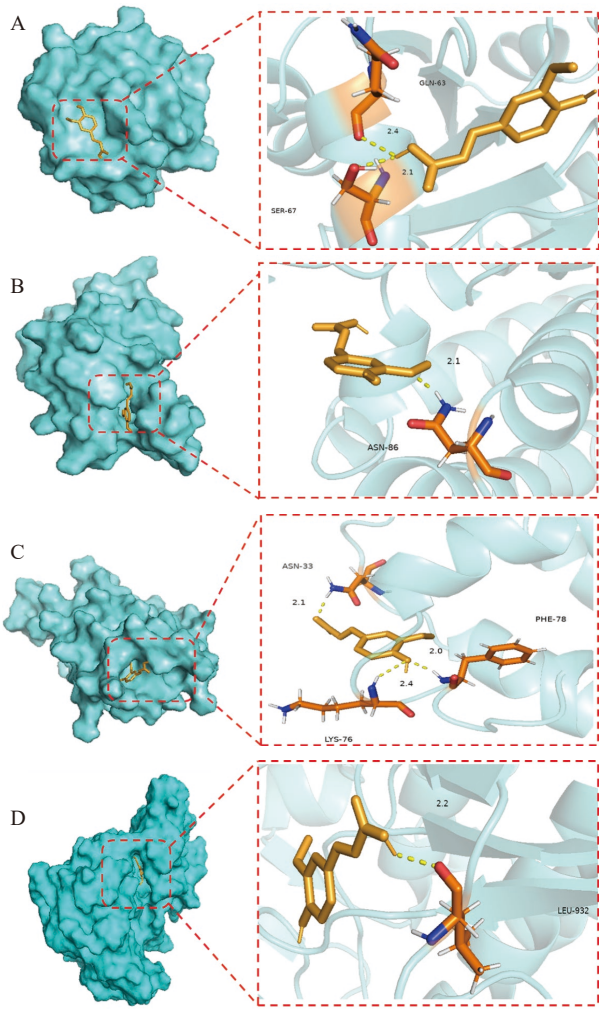


图 6　阿魏酸与 NFKB1(A)、STAT3(B)、IL2(C)和 JAK2(D)分子对接可视化结果图

Fig.6　Visualization result diagram of ferulic acid molecular docking with NFKB1 (A), STAT3 (B), IL2 (C) and JAK2 (D)

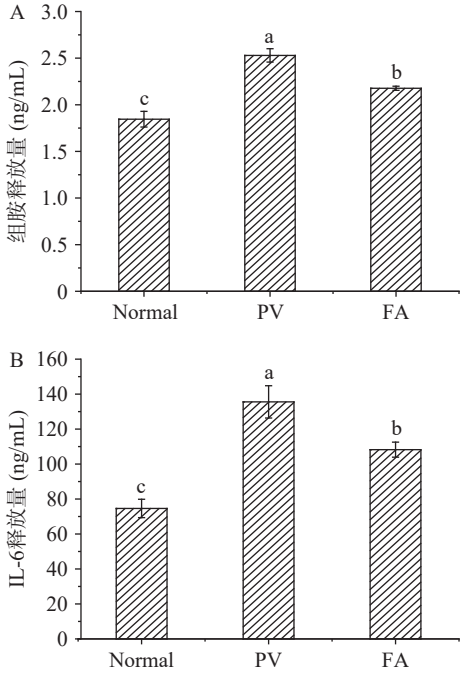


图 7　细胞组胺(A)和 IL-6(B)表达水平

Fig.7　Cellular histamine (A) and IL-6 (B) expression level

注：不同小写字母表示差异显著（P<0.05），图 8~图 9 同。

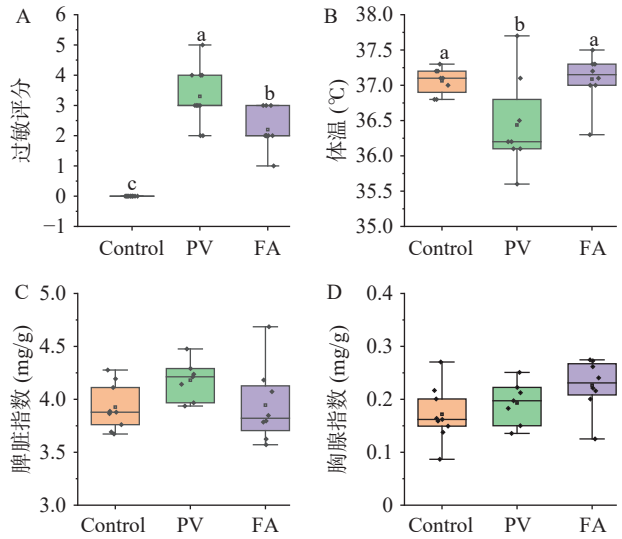


图 8　小鼠过敏症状评分(A)、体温变化(B)、脾脏(C)和胸腺(D)指数

Fig.8　Allergic symptom score (A), temperature changes (B), spleen index (C) and thymus index (D) in mice

与 PV 组相比，FA 干预的小鼠过敏评分显著降低(P<0.05)，体温有显著回升趋势(P<0.05)，这是由于小鼠过敏后，大量接触过敏原会导致小鼠体温骤降[25]；FA 干预后，缓解了体温的降低，这是由于 FA 影响了炎症介质的释放或下丘脑体温调节中枢，缓解过敏反应进而影响体温；脾脏和胸腺指数结果如图 8C~图 8D 所示，与 Control 组和 FA 组相比，PV 组的脾脏指数有所升高，这可能是由于过敏反应引起的脾脏肥大所致；PV 组和 FA 组脾脏和胸腺指数有差异，但无统计学意义(P>0.05)。说明阿魏酸可以有效减轻小鼠的过敏症状和减少体温变化，缓解其过敏反应，使过敏小鼠更趋向于对照组小鼠的状况。

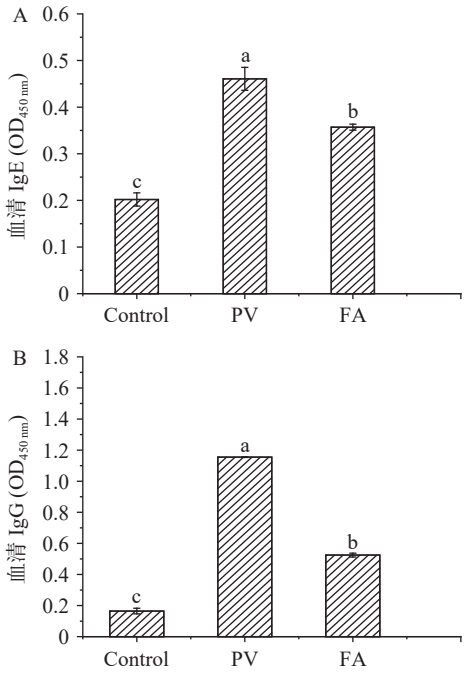


图 9　小鼠血清特异性 IgE(A)和 IgG(B)含量

Fig.9　Mouse serum-specific IgE (A) and IgG (B) content

2.7　FA 对 PV 致敏小鼠血清 IgE 和 IgG 含量的影响

如图 9 所示，PV 组小鼠的血清 IgE 和 IgG 含量显著升高(P<0.05)，表明 PV 可以使小鼠过敏，产生了 IgE 和 IgG 抗体[25]。与 PV 组相比，FA 组 IgE 和 IgG 的含量均显著下降(P<0.05)，这表明 FA 可以显著降低小清蛋白诱导的过敏小鼠血清中特异抗体的含量、缓解其过敏反应，这结果与小鼠过敏症状(图 8)结果一致。PV 组的小鼠过敏情况最严重，FA 组的小鼠次之，而 Control 组的小鼠没有产生过敏反应。

3　结论

获得 548 个阿魏酸作用靶点和 2834 个食物过敏相关的靶点，筛选到 46 个阿魏酸干预食物过敏的重要潜在靶点，阿魏酸可能通过 Th17 细胞分化、JAK-STAT 信号通路及炎症性肠病通路等途径调节炎症水平来影响食物过敏，阿魏酸与多个关键靶点有较好的结合活性，结合能均低于−4.0 kJ/mol，表明阿魏酸与关键靶点蛋白可形成稳定复合物；阿魏酸使敏化 KU812 细胞释放的组胺和 IL-6 表达水平降低，有效缓解 PV 对细胞的敏化作用；同时阿魏酸可以减轻小清蛋白致敏引起的小鼠过敏反应症状、减少器官指数的变化，降低血清特异性 IgE 和 IgG 分泌水平。结果表明，阿魏酸对蛋白质致敏引起的食物过敏反应具有很好的干预效果，但干预效果的评价不全面，后期还需要实验对其进行全面评价。

© 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] FU Guiming, ZHAO Kui, CHEN Hui, et al. Effect of 3 *Lactobacilli* on immunoregulation and intestinal microbiota in a *β*-lactoglobulin-induced allergic mouse model[J]. Journal of Dairy Science, 2019, 102(3): 1943−1958.

[2] EIWEGGER T, HUNG L, SAN DIEGO K E, et al. Recent developments and highlights in food allergy[J]. Allergy, 2019, 74(12): 2355−2367.

[3] SHARP M F, STEPHEN J N, KRAFT L, et al. Immunological cross-reactivity between four distant parvalbumins: Impact on allergen detection and diagnostics[J]. Molecular Immunology, 2015, 63(2): 437−448.

[4] ARASI S, CORSELLO G, VILLANI A, et al. The future outlook on allergen immunotherapy in children: 2018 and beyond[J]. Italian Journal of Pediatrics, 2018, 44(1): 80.

[5] TONG Ping, CHEN Shuguang, GAO Jinyan, et al. Caffeic acid-assisted cross-linking catalyzed by polyphenol oxidase decreases the allergenicity of ovalbumin in a BALB/c mouse model[J]. Food and Chemical Toxicology, 2018, 111: 275−283.

[6] SUN Shanfeng, JIANG Tianyi, GU Yanjun, et al. Contribution of five major apple polyphenols in reducing peanut protein sensitization and alleviating allergencitiy of peanut by changing allergen structure[J]. Food Research International, 2023, 164: 112297.

[7] XU Xiaoqian, CAO Qiang, YUAN Jin, et al. Shedding light on the interaction of ovalbumin and resveratrol: Structure, digestibility,

transport, and allergenicity assessment of OVA-RES complexes[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2024, 104(3): 1645−1655.

[8] WU Xuli, LU Yuqin, XU Haoxie, et al. Reducing the allergenic capacity of β-lactoglobulin by covalent conjugation with dietary polyphenols[J]. Food Chemistry, 2018, 256: 427−434.

[9] 吴序栎. 牛乳β-乳球蛋白的检测及茶多酚对其免疫反应性影响的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012. [WU Xuyue. Detection of bovine β-lactoglobulin and effects of tea polyphenols upon immunoreactivity of β-lactoglobulin[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.]

[10] WANG Yang, ZHANG Kai, CHEN Wenmei, et al. Gut microbiome-serum metabolism revealed the allergenicity of ferulic acid combined with glucose-modified β-lactoglobulin[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2024, 72(20): 11746−11758.

[11] WANG Yang, ZHANG Kai, CHEN Wenmei, et al. Allergenicity assessment of β-lactoglobulin ferulic acid-glucose conjugates[J]. Food Chemistry, 2024, 460: 140605.

[12] ZENG Binghui, JIANG Tianyi, XIONG Wenwen, et al. Protective properties of polyphenols in food allergy: A review[J]. Allergy, 2023, 78(6): 1654−1656.

[13] 世界中医药学会联合会. 网络药理学评价方法指南[J]. 世界中医药, 2021, 16(4): 527−532. [World Federation of Chinese Medicine Societies. Network pharmacology evaluation methodology guidance[J]. World Chinese Medicine, 2021, 16(4): 527−532.]

[14] 王子怡, 王鑫, 张岱岩, 等. 中医药网络药理学:《指南》引领下的新时代发展[J]. 中国中药杂志, 2022, 47(1): 7−17. [WANG Ziyi, WANG Xin, ZHANG Daiyan, et al. Traditional Chinese medicine network pharmacology: Development in new era under guidance of network pharmacology evaluation method guidance[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2022, 47(1): 7−17.]

[15] PENG Wenpan, XU Yong, ZHOU Yunhai, et al. Sanzi Yangqin decoction alleviates allergic asthma by modulating Th1/Th2 balance: Coupling network pharmacology with biochemical pharmacology[J]. Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine, 2022, 2022(1): 9037154.

[16] 薛静雯. 枳实总黄酮提取物对过敏性哮喘的影响[D]. 长春: 吉林大学, 2022. [XUE Jingwen. Effect of flavonoids extracted from *Aurantii Fructus* immaturus on allergic asthma[D]. Changchun: Jilin University, 2022.]

[17] 刘宝瑞, 钱晓萍, 孟宪志, 等. 阿魏酸钠对人大肠癌Moser细胞和乳腺癌MCT7细胞增殖和凋亡的影响[J]. 中国中西医结合杂志, 2002, 22(S1): 188−190. [LIU Baorui, QIAN Xiaoping, MENG Xianzhi, et al. Effects of 4 Chinese medical preparations on colon cancer Moser cell and mammary carcinoma MCF7 cell proliferation and apoptosis[J]. Chinese Journal of Integrated Traditional and Western Medicine, 2002, 22(S1): 188−190.]

[18] 王阳. 阿魏酸联合葡萄糖降低β-乳球蛋白致敏性的机制初探[D]. 南昌: 江西师范大学, 2023. [WANG Yang. Mechanism of the reduction in the allergenicity of β-lactoglobulin induced by ferulic acid combined with glucose[D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2023.]

[19] 邹琳, 陈琼珍, 熊子豪, 等. 碱性氨基酸对β-乳球蛋白结构和致敏性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(11): 7−12. [ZOU Lin, CHEN Qiongzhen, XIONG Zihao, et al. Effect of basic amino acids on structure and allergenicity of β-lactoglobulin[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(11): 7−12.]

[20] 贾斌梅. 迷迭香酸缓解食物过敏的效应评价及机制研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2023. [JIA Binmei. Evaluation of the effect and mechanism of RA in alleviating food allergy[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2023.]

[21] CHEN Wenmei, WANG Yang, SHAO Yanhong, et al. Glycation combined with phosphorylation: Investigating the structure changes and allergenic potential of parvalbumin in silver carp (*Hypophthalmichthy molitrix*)[J]. Food Bioscience, 2024, 58: 103733.

[22] GUPTA R K, GUPTA K, DWIVEDI P D. Pathophysiology of IL-33 and IL-17 in allergic disorders[J]. Cytokine & Growth Factor Reviews, 2017, 38: 22−36.

[23] SARAPULTSEV A, GUSEV E, KOMELKOVA M, et al. JAK-STAT signaling in inflammation and stress-related diseases: Implications for therapeutic interventions[J]. Molecular Biomedicine, 2023, 4(1): 40.

[24] SADAR S S, VYAWAHARE N S, BODHANKAR S L. Ferulic acid ameliorates TNBS-induced ulcerative colitis through modulation of cytokines, oxidative stress, iNOs, COX-2, and apoptosis in laboratory rats[J]. EXCLI Journal, 2016, 15: 482−499.

[25] 陈文美. 糖基化联合磷酸化修饰降低鲢鱼小清蛋白致敏性的机制初探[D]. 南昌: 江西师范大学, 2022. [CHEN Wenmei. Mechanism of the reduction in allergy of silver carp parvalbumin induced by glycation combined with phosphorylation[D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2022.]