王珂雯,俞钧严,徐贞贞. 植物源低蛋白含量食品中活性肽挖掘研究进展 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(4): 492−501. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040006

WANG Kewen, YU Junyan, XU Zhenzhen. Research Progress on the Mining of Bioactive Peptides from Plant-derived Low-protein Foods[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(4): 492−501. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040006

· 专题综述 ·

植物源低蛋白含量食品中活性肽挖掘研究进展

王珂雯[1,2],俞钧严[1,2],徐贞贞[1,2,*]

(1.中国农业大学食品科学与营养工程学院,北京 100083;
2.中国农业科学院农业质量标准与检测技术研究所,北京 100081)

摘　要: 植物源活性肽具有作用特异性好、生产成本低、组织渗透性强等优势,逐渐受到关注。前期研究多聚焦于植物源高蛋白含量食品中肽的研究,而近些年,植物源低蛋白含量食品肽的研究逐渐增多。系统挖掘这类食品中的活性肽,不仅能够拓展活性肽的获取途径,还能通过开发新型食品基质促进食品资源的多元化发展。本文首先探讨了基于肽组学的植物源低蛋白含量食品肽的分析流程,着重阐述了肽的提取与富集、检测与分析、活性预测等三个核心环节的关键要点。其次,聚焦植物源低蛋白含量食品,对其中的降血压肽、降血脂肽、降血糖肽、抗氧化肽、抗炎肽等主要活性肽进行综述。未来研究植物源低蛋白含量食品中活性肽的研究应从单一活性预测和体外验证转向涵盖协同效应、体内机制及加工稳定性的系统性研究。本研究为植物源低蛋白含量食品活性肽的挖掘提供方案,为植物源低蛋白含量食品资源的开发提供思路。

关键词: 植物源食品,低蛋白含量食品,肽组学,降血压肽,降血脂肽
中图分类号: TS201.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)04−0492−10
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040006　　本文网刊:

Research Progress on the Mining of Bioactive Peptides from Plant-derived Low-protein Foods

WANG Kewen[1,2], YU Junyan[1,2], XU Zhenzhen[1,2,*]

(1.College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;
2.Institute of Quality Standards and Testing Technology for Agro-Products, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Plant-derived bioactive attains increasing attention due to their advantages such as high target specificity, low production cost, and strong tissue permeability. While earlier research primarily focused on peptides from plant-derived high-protein foods, recent years have witnessed a growing interest in peptides from plant-derived low-protein foods. The systematic exploration of bioactive peptides in such foods not only expands the sources of bioactive peptides, but also promotes the diversification of food resources through the development of novel food matrices. This article first discusses the peptidomics-based analytical workflow for identifying peptides in plant-derived low-protein foods, with a focus on three key steps: extraction and enrichment, detection and analysis, and bioactivity prediction. It then reviews the main bioactive peptides found in these foods, including anti-hypertensive, lipid-lowering, hypoglycemic, antioxidant, and anti-inflammatory peptides. Future research on bioactive peptides from plant-derived low-protein foods should shift from single-activity prediction and *in vitro* validation toward systematic studies encompassing synergistic effects, *in vivo* mechanisms, and processing stability. This study provides a methodological framework for mining bioactive peptides from plant-derived

收稿日期: 2025−04−03
基金项目: “十四五”国家重点研发计划(2024YFD2101304);中国科协青年人才托举工程博士生专项计划。
作者简介: 王珂雯(1998−),女,博士研究生,研究方向:果蔬非热加工与品质控制,E-mail:wangkewen@cau.edu.cn。
*** 通信作者:** 徐贞贞(1985−),女,博士,研究员,研究方向:农产品质量与加工,E-mail:xuzhenzhen@caas.cn。

low-protein foods and offers insights for the development of related food resources.

Key words: plant-derived foods; low-protein foods; peptidomics; anti-hypertensive peptides; hypolipidemic peptides

近年来，植物源食品在促进人体健康、提升资源利用效率以及推动食品产业可持续性方面的贡献获得了越来越多学术界和产业界的认同。随着大众对健康的日益关注和市场消费新业态、新模式的出现，植物源食品市场增长迅速。2024 年联合国粮农组织数据表明，全球植物源食品供给量已达到 12.40 亿吨，为动物源食品产量的 10 倍，但是产值不足其二分之一。我国植物源食品产量 3.99 亿吨，为美国产量的 5 倍，但单位产量产值不足其 90%[1]。虽然当前我国植物源食品已占全球总供给量的三分之一，但植物源食品高端市场占有率及产值远远落后。因此，对植物源食品中的新型组分开展深入研究，对于充分挖掘植物源食品的功能性，提升其附加值，具有重要意义。

不同食品中的蛋白质含量差异较大，动物源食品的蛋白质含量较高，如牛肉为 19.9%，鸡蛋为 13.3%；植物源食品中，豆类的蛋白质含量较高，如大豆为 35%，谷类的蛋白质含量其次，如小麦为 11.9%。然而，多数新鲜果蔬、新鲜食用菌、果蔬汁、植物蛋白饮品，酒类等植物源食品蛋白质含量在 0~5% 的范围内[2]。本文重点关注蛋白质含量低于 5% 的植物源食品中的肽，并将这类食品概括为植物源低蛋白含量食品。食物源肽根据来源分为天然肽和水解肽。天然肽是生物体中天然存在的肽[3]；水解肽是蛋白质在酸、碱或者酶的作用下断裂释放出的肽，又分为化学水解肽和酶水解肽[4]。

近年来，基于肽的疗法在改善和提升人体健康方面的应用正逐渐成为研究热点。在美国食品药品监督管理局批准的所有药物中，约有 6% 是肽类药物[5−6]。肽类市场快速增长得益于其区别于其他活性物质的特性。与其他小分子相比，肽对目标分子的作用更具特异性，从而具有更优的效果和更少的副作用；与大分子相比，肽具有生产简单、成本低，组织渗透性强的优势[7]。食物源活性肽具有多种潜在的健康益处，包括降血压、降血糖、抗炎等[8]。目前，在植物源食品中，关于活性肽的研究主要集中在豆类和谷物等高蛋白食品中[9]。近些年，植物源低蛋白含量食品肽的研究持续深化。作为人类日常膳食结构的重要组成部分，种类丰富的植物源低蛋白含量食品存在未被充分开发的活性成分。系统挖掘这类食品中的活性肽，既能拓宽活性肽的来源，又可借助新型食品基质的开发推动食品资源多元化，从而为大食物观背景下食品体系的创新与升级提供科学支撑。

本文首先探讨了基于肽组学的植物源低蛋白含量食品活性肽的分析流程，着重阐述了肽的提取与富集、检测与分析、活性预测等三个核心环节的关键要点。其次，聚焦植物源低蛋白含量食品，对其中的降血压肽、降血脂肽、降血糖肽、抗氧化肽、抗炎肽等主要活性肽进行综述。本研究为植物源低蛋白含量食品活性肽的挖掘提供方案，为植物源低蛋白含量食品资源的开发提供思路。

1　基于肽组学的植物源低蛋白含量食品肽的分析流程

基于肽组学的植物源低蛋白含量食品肽的分析流程与其他复杂基质中肽的分析流程相似，主要包含肽的提取与富集、检测与分析、活性预测等三个核心环节。然而，鉴于此类食品中蛋白质和肽的丰度较低，且相关蛋白质数据库覆盖度不足，其分析流程需进行针对性改进，以实现低丰度肽的有效识别。结合现有文献，改进策略聚焦于最大程度保留植物源低蛋白含量食品肽，有效提取和富集植物源低蛋白含量食品肽，依据目标肽特征选择适合的离子源，应用不依赖蛋白质数据库的从头测序工具注释肽，结合多反应监测技术实现精准定量肽等。

1.1　提取与富集

植物源肽制备过程中的一个常见问题是肽的降解，特别是低丰度肽。为了最大程度保留植物源低蛋白含量食品中的肽，可通过加热或添加蛋白酶抑制剂来灭活酶，但应避免长时间的热处理，长时间的热处理可能会对肽的结构和活性产生不利影响。此外，低温处理或储存样品是一种有效的策略，有助于避免肽在提取前发生降解或修饰[10]。

为了有效地提取肽，可根据植物源低蛋白含量食品样品的物理状态进行分类处理。对于固态植物源低蛋白含量食品，如苋菜[11]、豇豆[12] 等，提取过程可包括将原料研磨或粉碎，以增加表面积并促进细胞破裂，然后使用有机溶剂与醇/水缓冲液结合提取肽。有机溶剂有助于裂解细胞膜，促进肽的释放，还可抑制蛋白酶活性，减少肽的降解。此外，有机溶剂还可用于去除脂溶性化合物（如叶绿素、类胡萝卜素等），可净化提取物[10]。对于液态植物源低蛋白含量食品，比如果汁[13]，豆乳[14] 等，食品加工过程本身在一定程度上完成了肽的提取操作，可以通过离心或过滤去除大颗粒杂质，或者通过调节酸碱度和离子强度来优化肽的溶解性和稳定性，以适应后续富集或分析的需求。

植物源低蛋白含量食品肽经提取后，其中可能掺杂了盐、脂质、蛋白质和碳水化合物等，导致提取物中肽的丰度仍然较低。基质的复杂性可能会降低质谱识别感兴趣的肽的能力，需要对肽进行富集，如通过膜过滤法、固相微萃取法等实现。Desportes 等[15] 利用逐级膜过滤技术富集葡萄酒中的肽类，使用微滤技术截留了 3000 Da 以上的大分子物质，并对透过液进行纳滤，舍弃了含有氨基酸，有机酸，醇和

盐的小分子透过液，得到了 200~3000 Da 之间的目标肽类提取物。在富含花青素和肽类的接骨木果汁中，Wu 等[16] 使用 MCX 填料的固相萃取柱，去除了接骨木汁中的花青素，实现了肽类的富集。此外，组合肽配体库技术也是一种低丰度蛋白质和肽的富集手段，主要应用于低丰度蛋白质的检测分析，并已被用于分析植物源低蛋白含量食品（如橙子果肉/果皮及橙汁）的蛋白质组图谱[17]。目前，组合肽配体库技术在植物源低蛋白含量食品低丰度肽研究领域尚未见报道，后续研究可借鉴此富集方法，实现低丰度肽的高效富集。

1.2 检测与分析

随着质谱分析技术的进步，尤其是随着高分辨质谱的出现，低丰度肽的定性定量等分析能力提高[18]。在质谱分析中，主要的电离方式包括电喷雾（electron spray ionization, ESI）和基质辅助激光解吸（matrix-assisted laser desorption/ionization, MALDI）。其中，ESI 源常应用于分子量低、热不稳定的肽的离子化[19]，而 MALDI 源可应用于较大分子量肽的离子化[20]。在植物源低蛋白含量食品肽的分析中，基于 ESI 离子源，在苋菜中鉴定了 11 个由 4~9 个氨基酸组成的肽，它们的分子量在 300~1200 Da[21]；基于 MALDI 离子源，在银杏中鉴定了 11 个由 40~45 个氨基酸组成的肽，它们分子量均大于 4000 Da[22]。因此，明确植物源低蛋白含量食品中目标肽的分子量分布特征，选择适配的离子源，可显著提升肽的检测效果。

在数据采集方面，串联质谱（MS/MS）是目前最常用的手段，包括数据依赖型采集（data dependent acquisition, DDA）和数据非依赖型采集（data independent acquisition, DIA）模式。DDA 模式通过选择一级质谱响应最强的前体离子进行碎片化，可获得高质量的 MS/MS 谱图，有助于目标肽段的准确鉴定。相比之下，DIA 模式则对所有前体离子都进行 MS/MS 分析，可显著提高数据的重复性和定量的准确性。在植物源低蛋白含量食品肽的分析中，采用 DDA 模式，对接骨木果汁中的千余种肽实现了进行数据采集[16]；基于 DIA 模式，对不同加工方式橙汁中的肽进行了检测，确定了可稳定检出的 7 个三肽[23]。在近年来，一种新兴的检测方法逐渐崭露头角，即在离子源和质谱分析仪之间引入离子迁移模块。这种设计通过增加离子迁移步骤，有效提高了离子的利用效率，从而显著提升了检测的灵敏度和特异性，并且能够拓宽动态范围[10]，为研究植物源低蛋白含量食品中低丰度肽的检测提供了技术支持。

植物源低蛋白含量食品中肽的定性分析可依赖于该样品所属物种的蛋白质数据库，从肽碎片离子的特征来推断序列，然后将该肽序列与蛋白质数据库中的序列进行匹配。常用的蛋白质组学工具 MaxQuant[24]、Mascot[25] 也可被用于肽的定性分析。结合 Mascot 和 MaxQuant 软件，在玉米的不同部位一共确定了 6100 个肽[26]。当面对天然肽或非特异性酶切肽时，未定义的酶切规则会导致理论肽库的搜索超出计算资源极限，同时引发较大的假阳性率。此外，在植物源低蛋白食品肽的定性分析中，还可使用 PEAKS（Bioinformatics Solutions Inc., Canada）工具。该工具不依赖于样品的蛋白质组成信息，可实现肽的从头测序分析，因此对于蛋白组成信息不明确的植物源低蛋白食品肽的定性分析更为有效。该软件已成功应用于黄酒[27]、松茸[28] 等植物源低蛋白含量食品肽的分析研究中。肽组学定量策略有无标记、稳定同位素或化学标记法。其中，无标记定量方法的优势是成本低，样品制备简单，结合多重反应监测（multiple reaction monitoring, MRM），对于植物源低蛋白含量食品中的低丰度肽的检测有较好效果[29]。基于无标记定量结合 MRM 模式，在长达六年的监测中，确定了随着橙汁冷冻储藏时间的延长而含量下降的低丰度肽[13]。

1.3 活性预测

为了加速活性肽的发现与应用，随着深度学习算法的迅猛发展，一系列肽活性预测工具应运而生。这部分主要列举了活性肽库和不同活性肽的预测网站（表 1）。BIOPEP-UWM 作为一个可搜索的活性肽数据库，为研究人员提供了丰富的数据资源[30]。EROP-Moscow database 则涵盖了由 2~50 个氨基酸组成的肽序列，详细记录了肽的结构、来源、活性以及翻译后修饰等信息[31]。DFBP 是一个综合性的食源性活性肽数据库，不仅提供食源性活性肽的检索和分析平台，还提供其理化特性信息，以促进推动新的肽类药物和健康食品的发现[32]。AHTpin 专注于预测和设计有效的降血压肽，能够提供任意二肽或三肽的基于实验验证的血管紧张素转换酶（angiotensin converting enzyme, ACE）抑制活性 IC_{50} 值，并对 3 个氨基酸及以上的肽进行 ACE 抑制活性预测和打分[33]。AnOxPP 利用 BiLSTM 神经网络和优化的氨基酸描述符 SDPZ27，成为预测肽抗氧化活性的有效工具[34]。PepNet 具备对肽进行批量化的抗炎活性、

表 1 活性肽库及预测网站

Table 1 Bioactive peptide database and prediction website

分类	网站名称	网站地址
活性肽库	BIOPEP-UWM	https://biochemia.uwm.edu.pl/
	EROP-Moscow database	http://erop.inbi.ras.ru
	DFBP	http://www.cqudfbp.net/
降血压肽预测	AHTPDB	http://crdd.osdd.net/raghava/ahtpdb/
抗氧化肽预测	AnOxPP	http://www.cqudfbp.net/AnOxPP/index.jsp
抗炎肽预测	PepNet	http://liulab.top/PepNet/server
	PreAIP	http://kurata14.bio. kyutech.ac.jp/PreAIP/
	AIPpred	www.thegleelab.org/AIPpred
抗菌肽	PepNet	http://liulab.top/PepNet/server
	CAMP	https://camp.bicnirrh.res.in/prediction.php

抗菌活性预测的功能[35]。PreAIP 能够对肽的抗炎活性进行预测，并将预测结果标记为高置信、中等置信、低置信。AIPpred 适用于对 5 到 25 个氨基酸的肽进行抗炎活性预测[36]。CAMP 则可预测肽的抗菌活性，或者肽中具有抗菌活性的片段[37]。这些数据库和预测工具的出现，极大地提高了活性肽研究的效率，为植物源低蛋白含量食品中的活性肽的开发和应用提供了有力的支持。

2　植物源低蛋白含量食品中的活性肽

2.1　降血压肽

高血压以血压异常升高为特征，是心血管疾病的主要危险因素。血压受到多种生化系统的调节，但通过抑制 ACE 来调节肾素-血管紧张素系统被认为是血压改善的主要机制[38]。前期主要使用合成药物如赖诺普利、卡托普利等作为 ACE 抑制药物，但在长期使用药物后会出现慢性咳嗽、胃肠道不适、肾功能恶化等副作用[39]。与合成的 ACE 抑制剂相比，植物源食品中的 ACE 抑制肽是很有前途的替代品[40]。

当前研究已从食用菌类（如双孢蘑菇、香菇、杏鲍菇、牛肝菌）、薯类（如马铃薯）、蔬菜类（如竹笋）以及加工食品类（如豆乳、橙汁、白酒）等植物源低蛋白含量食品中鉴定出多种降血压活性肽（表 2）。这些活性肽的发现主要依赖于体外 ACE 抑制活性测定。体外 ACE 抑制活性测定可基于多种底物来进行，其中主要的底物为马脲酰组氨酰亮氨酸，通过测定 ACE 酶解后所产生的马尿酸来实现体外 ACE 抑制活性的测定。豆乳通过 10 kDa 分子量截留得到的肽组分经马脲酰组氨酰亮氨酸底物验证具有 ACE 抑制活性，活性为 73.35%，进一步，经肽组学分析确定了 51 个肽，根据 BIOPEP-UWM 数据库记录，发现其中 31 个肽为 ACE 抑制肽[14]。基于肽组学在双孢蘑菇中鉴定了 8 种 ACE 抑制肽，其中，六肽 AHEPVK 的 ACE 抑制活性最高，IC_{50} 值为 43 mg/mL，且对胃肠消化有较好的稳定性[41]。在橙汁中，基于肽组学发现了 193 种肽类，其中 5 个肽，GAVEPAK，KVLPALN，VTVPK，AASPFK 和 AAPVQ，具有较高的 ACE 抑制活性，IC_{50} 值在 0.31~1.93 mg/mL 之间，在长期的冷冻储藏中仍可检出[13]。此外，体外 ACE 抑制活性测定的底物还可以是呋喃丙烯酰三肽。利用这一底物，在新鲜的香菇、杏鲍菇、牛肝菌中，发现杏鲍菇肽水解物显示出最强的 ACE 抑制活性，IC_{50} 值为 64.11 mg/mL。进一步基于肽组学进行肽鉴定后，发现八肽 ASPYAFGL 具有最高的 ACE 抑制活性，且对胃肠消化具有较好的稳定性[42]。

上述体外研究可用于初步筛选降血压肽，进一步的活性需经体内实验验证，常用的动物模型为自发性高血压大鼠模型。竹笋水解后表现出较强的 ACE 抑制活性，对该水解物进行分级萃取，发现水相表现出更强的 ACE 抑制活性，进一步基于动物实验，发现竹笋二肽 DY 可显著降低大鼠血压，发挥降血压活性[43]。基于动物实验，发现马铃薯二肽 IF 干预具有肾脏保护作用，可能的机制是二肽 IF 通过核因子 E2 相关因子 2 依赖的抗氧化途径，沿蛋白质去糖基化酶和蛋白激酶 B 轴对高血压相关活性氧介导的肾损伤发挥了保护作用，从而实现降血压活性[44]。

2.2　降血脂肽

高脂血症以血液中脂质和/或脂蛋白水平异常为特征，是代谢综合征和心血管疾病的危险因素。药物虽然可以有效调节血脂，降低胆固醇，但存在副作用[45]。植物源食品中存在降血脂肽，相关机制包括降血脂肽与胆汁酸/胆固醇在肠道内互作；降血脂肽影响激素和胆固醇受体；降血脂肽调节肝脏脂质代谢；和降血脂肽刺激肝脏中低密度脂蛋白受体编码基因的表达[46]。肽的结构决定活性，研究表明具有降血脂活性的肽通常具有较低的蛋氨酸/甘氨酸比值和赖氨酸/精氨酸比值[47]。

植物源低蛋白含量食品中的降血脂肽主要来源于蔬菜类，如苋菜、四季豆、豇豆，其鉴定主要依赖于体外脂质合成抑制活性测定（表 2）。相比于苋菜本身，苋菜在水解后具有更强的胰脂肪酶及胆固醇酯酶抑制活性，IC_{50} 值分别为 0.38 和 0.47 mg/mL，说明在水解后产生了可抑制脂质合成的活性物质。进一步在其中鉴定到了 17 种肽类，经过活性鉴定，发现 FPFPPTLGY 和 FGAPR 具有胰脂肪酶抑制活性，FPFVPAPT 具有胆固醇酯酶抑制活性，可分别通过抑制胰脂肪酶和胆固醇酯酶实现降血脂作用[11]。四季豆肽提取物经胃蛋白酶和胰蛋白酶、热溶蛋白酶和糜蛋白酶等组合酶消化后，具有较高的胆固醇胶束溶解抑制率，为 27.38%，从而发挥降血脂的活性[48]。豇豆经水解后，通过 3 kDa 分子量截留得到了肽组分，在其中鉴定到一种五肽 GCTLN，发现其可通过减少胆固醇在肠内胶束中的溶解，抑制胆固醇合成过程中关键 3-羟基-3-甲基戊二酰辅酶 A 还原酶活性来实现降血脂的活性[12]。蔬菜类食品已被报道具有降血脂作用，但目前对于其中活性组分的研究尚不充分[49-50]，尤其是其中的降血脂肽对于蔬菜类食品本身的降血脂功效是否具有显著贡献，值得深入研究。

2.3　降血糖肽

糖尿病以血糖水平异常为特征，可导致多种并发症，包括慢性伤口、视网膜病变、肾病等[51]。降血糖肽，如胰岛素、二甲双胍等，可口服或皮下注射。口服给药易受到肝脏首过效应的影响，而频繁地皮下注射会引起患者疼痛和恐惧，导致患者依从性差[52−53]。从植物源食品中挖掘天然降血糖肽，开发口服降糖肽，成为一种潜在的解决方案。

当前研究已从加工制品类（白啤、黄酒）和蔬菜

表 2 植物源低蛋白含量食品活性肽的研究汇总

Table 2 Summary of research on bioactive peptides from plant-derived low-protein foods

活性类型	来源	活性成分	作用方式	参考文献
降血压	豆乳	10 kDa分子量截留肽组分(包含51个肽)	体外ACE抑制活性为73.35%	[14]
	双孢蘑菇	AHEPVK	体外ACE抑制IC_{50}值为43 mg/mL	[41]
	橙汁	GAVEPAK, KVLPALN, VTVPK, AASPFK, AAPVQ	体外ACE抑制IC_{50}值分别为0.31、0.70、1.22、1.28和1.93 mg/mL	[13]
	杏鲍菇	肽水解物(包含ASPYAFGL)	体外ACE抑制IC_{50}值为64.11 mg/mL	[42]
	竹笋	DY	改善自发性高血压大鼠氧化状态, 从而降低自发性高血压大鼠血压	[43]
	马铃薯	IF	对高血压相关的活性氧介导的肾损伤产生保护作用, 从而降低自发性高血压大鼠血压	[44]
降血脂	苋菜	肽水解物(包含FPFPPTLGY、FGAPR、FPFVPAPT)	体外胰脂肪酶及胆固醇酯酶抑制活性, IC_{50}值分别为0.38和0.47 mg/mL	[11]
	四季豆	肽水解物	体外胆固醇胶束溶解抑制率为27.38%	[48]
	豇豆	3 kDa分子量截留肽组分(包含GCTLN)	体外抑制胆固醇合成关键还原酶	[12]
降血糖	白啤	VPFPHTP、LAKLQR	体外二肽基肽酶-IV抑制活性	[54]
	黄酒	VYVPPE、LQPGQGQPGYD	体外促进大鼠L6成肌细胞进行葡萄糖吸收, 从而降血糖	[27]
	四季豆	3 kDa分子量截留肽组分	维持大鼠血糖稳定	[55]
	苦瓜	水提取物(包含GHPYYSIKKS)	灌胃2 h后可使小鼠血糖降低61.7%	[56]
抗氧化	玉米	RYLL	体外$ABTS^+$自由基和DPPH自由基清除IC_{50}值分别为0.12和0.18 mg/mL	[61]
	豇豆	肽水解肽(1.8~6.5 kDa)	具有体外氧自由基清除效率	[62]
	枣	VGQHTR、GWLK	DPPH自由基清除IC_{50}值分别为0.6和0.5 mg/mL, 与Fe^{2+}的螯合能力达50%时的浓度分别为1.1和0.86 mg/mL	[63]
	豆乳	10 kDa分子量截留肽组分(包含35个肽)	体外DPPH自由基清除能力为50.74%	[14]
	葡萄果实、葡萄汁、葡萄酒	谷胱甘肽	还原型谷胱甘肽可清除自由基	[64]
	白酒	RNH、CWC	显著提升体外HepG2细胞的抗氧化能力	[19]
	黄酒	黄酒肽提取物	体外保护大鼠心脏组织细胞免受氧化损伤	[66]
抗炎	苋菜	肽水解物(包含11个肽)	体外对脂多糖诱导的巨噬细胞中表现出抗炎活性	[21]
	松茸	3 kDa分子量截留肽组分(包含SDIKHFPF、SDLKHFPF和WFNNAGP)	体外对脂多糖诱导的巨噬细胞中表现出抗炎活性	[28]
	黄酒	肽组分	体外抑制脂多糖诱导的巨噬细胞NO的分泌, IC_{50}值为0.68 mg/mL	[73]
	玉米	FLPPVTSMG、IIGGAL、PPYLSP	体外抑制肿瘤坏死因子-α诱导的促炎血管细胞粘附分子-1和细胞间粘附分子-1的生成	[74]
促进酒精代谢	蘑菇	IPLH	体外激活乙醇脱氢酶和醛脱氢酶	[75]
改善肾损伤	玉米	QLLPF	改善乙醇诱导的肾损伤大鼠	[76]
抗菌	双孢蘑菇	肽水解物	抑制铜绿假单胞菌和蜡样芽孢杆菌的生长	[77]
	香菇	分子量为17 kDa的肽	对须癣毛癣菌、红色毛癣菌、和热带念珠菌, 有较强的抗菌作用	[78]
	银杏	gB5肽	对黑曲霉、月弯曲霉、尖孢镰刀菌和立枯丝核菌的IC_{50}值分别为6.8、10.0、69.2和20.0 μg/mL	[22]

类(如四季豆、苦瓜)等植物源低蛋白含量食品中鉴定出多种具有降血糖作用的肽,这些肽的活性主要通过体外实验确定(表 2)。基于肽组学技术和生物活性评分,在白啤中确定了 68 个潜在活性肽,其中两个肽 VPFPHTP 和 LAKLQR 具有较高的二肽基肽酶-IV 抑制活性,具有降血糖的活性[54]。不同地区黄酒中肽含量在 4.53~9.06 g/L,基于大鼠 L6 成肌细胞模型,发现绍兴黄酒肽提取物具有促进该细胞吸收葡萄糖的作用。其中,活性最强的两个肽是 VYVPPE 和 LQPGQGQPGYD。进一步的研究发现这两个肽通过提高 AMPK、p38 等蛋白的磷酸化水平,激活 AMPK 和 MAPK 信号通路,促进 GLUT4 易位,进而促进 L6 细胞葡萄糖吸收,实现降血糖作用[27]。

体外结合体内实验验证了四季豆中存在具有降血糖活性的肽组分。四季豆中分子量小于 3 kDa 的肽组分对 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶具有体外抑制活性。进一步通过动物实验评估四季豆肽组分的体内降血糖活性,结果表明,四季豆肽组分可维持血糖稳定,避免出现餐后血糖峰值,具有较好的降血糖作用[55]。基于糖尿病小鼠研究了苦瓜中的降血糖肽,发现苦瓜水提物可显著降低糖尿病小鼠血糖浓度,且不影响正常小鼠血糖浓度。进一步对苦瓜水提物进行分离,发现其中一个组分表现出了最强的降血糖效果,在灌胃 2 h 后可使小鼠血糖降低 61.7%,并改善了小鼠的糖耐量,经测序发现该组分含有十肽 GHPYYSIKKS。后续机制探究表明,苦瓜肽是通过修复糖尿病小鼠胰岛 β 细胞,促进胰岛素分泌,增加肝糖原含量,从而实现了降血糖作用[56]。

2.4 抗氧化肽

氧化应激可导致细胞损伤，与心血管疾病、癌症等有关[57]。抗氧化肽作为天然抗氧化剂，可提高机体抗氧化能力，保护机体免受活性氧的损害，降低疾病风险；并且可用于防止食品中其他组分的氧化，在食品工业中具有重要意义[58]。抗氧化肽的作用机制包括：通过提供质子和/或电子直接清除自由基，抑制脂质过氧化反应，螯合金属离子，激活机体的抗氧化防御系统[58]。肽的抗氧化作用与特定氨基酸组成有关[59]，含有半胱氨酸的肽可通过巯基与自由基作用实现抗氧化活性[60]。

当前研究已从谷物类（如玉米）、蔬菜类（如豇豆）、水果类（如枣、葡萄）及加工食品类（如豆乳、葡萄汁、葡萄酒、白酒、黄酒）等植物源低蛋白含量食品中鉴定出多种具有抗氧化作用的肽（表 2）。体外抗氧化活性的测定主要依据肽的自由基清除能力测定。玉米肽抗氧化活性与其分子量和结构相关，结果表明，分子量小于 1 kDa 的玉米肽水解组分表现出优异的抗氧化性能，经鉴定，其中含有一个新型四肽 RYLL。RYLL 对 $ABTS^{+}$自由基和 DPPH 自由基的清除能力突出，IC_{50} 值分别为 0.12 和 0.18 mg/mL。进一步的结构分析揭示了该四肽具有多个抗氧化活性位点，其中酪氨酸为主要活性位点，此外，其结构简单有助于活性位点的暴露，这是该四肽具有较高抗氧化活性的原因[61]。豇豆经水解处理后，其抗氧化活性显著增强，主要归因于水解过程中生成的分子量介于 1.8~6.5 kDa 的活性肽，这些肽对氧自由基有较好的清除效率[62]。与其他蛋白酶相比，枣经过胰蛋白酶水解后得到的组分具有最高的抗氧化活性，通过进一步的分离和鉴定，发现了其中存在的六肽 VGQHTR 和四肽 GWLK，它们清除 DPPH 自由基的 IC_{50} 值分别为 0.6 和 0.5 mg/mL，与 Fe^{2+}的螯合能力达 50% 时的浓度分别为 1.1 和 0.86 mg/mL[63]。以上研究结果表明，植物源低蛋白含量食品中水解产生的肽组分具有抗氧化活性，这些肽具有作为功能性食品添加剂的潜力，可用于抗氧化保鲜体系、健康食品开发甚至医药等领域中。此外，豆乳未经酶解，直接通过 10 kDa 分子量截留得到的组分也显示出最高的肽含量，以及最强的抗氧化活性，DPPH 清除能力为 50.74%，进一步，经肽组学分析在其中确定了 35 个具有抗氧化活性的肽[14]。在葡萄果实、葡萄汁、葡萄酒中均存在三肽谷胱甘肽，该肽具有抗氧化活性。在葡萄果实中，谷胱甘肽主要以还原型存在，葡萄之中的还原型谷胱甘肽与葡萄品种、葡萄汁中酪氨酸酶活性、氧气、压榨等因素相关，而葡萄酒中的谷胱甘肽一部分来自葡萄，另一部分来自乙醇发酵阶段酵母菌的代谢[64]。

除了基于自由基清除能力测定肽的抗氧化能力外，在细胞水平的研究发现了白酒和黄酒中的肽能够显著提升细胞的抗氧化能力。在白酒中，研究人员发现了天然存在的活性肽，如三肽 RNH 和 CWC，其浓度分别为 18.78 和 11.06 μg/L。HepG2 细胞氧化损伤模型揭示了白酒抗氧化肽显著提升了细胞抗氧化能力。具体而言，三肽 RNH 主要通过增强细胞内抗氧化酶的活力，提高细胞内谷胱甘肽的浓度，同时抑制丙二醛含量的增加，由此实现细胞抗氧化能力的提升，且其抗氧化能力随着浓度的增加而呈现出依赖性增长趋势[19]。三肽 CWC 含有半胱氨酸，凭借自身含有的巯基，展现出抗氧化能力，不仅能显著减少细胞内活性氧的积累，还可降低丙二醛水平。此外，经 CWC 预处理后，能避免谷胱甘肽过氧化物酶、超氧化物歧化酶以及过氧化氢酶活性的下降[65]。在黄酒中，通过单因素和响应面结合优化了黄酒肽的提取方法，使得黄酒肽含量达 72.23%，细胞水平的活性研究表明，黄酒肽可保护大鼠心脏组织细胞免受过氧化氢诱导的氧化损伤，主要是激活并上调了 Sirt1/Nrf2 通路，通过抗氧化作用实现了心脏组织细胞的保护作用[66]。上述研究结果表明，酒中天然存在的活性肽对于深入探究活性肽与酒的品质之间的关联具有重要意义。

2.5 抗炎肽

炎症是机体对刺激的一种防御反应，以发红、肿胀、发热、疼痛和功能障碍为特征，可导致组织损伤、纤维化等多种疾病的发生[67−68]。目前的炎症管理策略主要集中在抑制细胞免疫反应、减少促炎细胞因子分泌以及干预炎症通路[69]。然而，传统的抗炎药物往往会产生副作用，如心血管并发症和胃肠道出血[70]。食品来源的抗炎肽因其公认的安全性和高生物利用度而成为候选者。研究表明，疏水性和碱性氨基酸会增强肽的抗炎活性[71]。此外，带正电荷的氨基酸可使抗炎肽像趋化因子一样发挥作用，引导免疫细胞的迁移和聚集[72]。

当前研究已从蔬菜类（如苋菜）、食用菌类（如松茸）、谷物类（如玉米）和加工食品类（如黄酒）等植物源低蛋白含量食品中鉴定了多种抗炎肽，其鉴定主要通过脂多糖诱导巨噬细胞模型进行评价（表 2）。苋菜经过体外模拟消化后，得到了苋菜肽组分，在脂多糖诱导的巨噬细胞中表现出了显著的抗炎活性，利用肽组学技术在其中鉴定出了其中存在的 11 个肽[21]。但是未开展进一步研究来说明其中活性最高的抗炎肽。在脂多糖诱导的巨噬细胞中，发现分子量小于 3 kDa 的松茸肽可抑制 MAPK 和 NF-κB 的激活，从而减少 IL6、IL-1β、TNF-α、iNOS 和 COX-2 等促炎因子的产生，增强了线粒体功能和提高细胞能量生产能力，进一步通过肽组学技术鉴定出了 3 个具有最高抗炎活性得分的肽，分别是 SDIKHFPF、SDLK-HFPF 和 WFNNAGP[28]。黄酒肽组分可显著抑制脂多糖诱导的巨噬细胞 NO 的分泌，IC_{50} 值为 0.68 mg/mL，对细胞炎症具有改善作用[73]。研究并未对该组分进行肽的序列鉴定，而是利用氨基酸分析仪对该组

分的氨基酸组成进行评价，结果表明，主要的氨基酸是谷氨酸、苯丙氨酸、亮氨酸和甘氨酸，其中疏水性氨基酸占比达 32.63%[73]，与前期研究发现的疏水性氨基酸会增强肽的抗炎活性的结果一致[71]。

此外，还有研究基于 TNF-α 诱导的内皮细胞评价肽的抗炎活性。对玉米肽水解物进行胃肠蛋白酶模拟消化后，鉴定出了 11 种稳定存在的肽，进一步基于 TNF-α 诱导的内皮细胞评价这些肽的抗炎活性，发现 FLPPVTSMG、IIGGAL 和 PPYLSP 三个肽可显著抑制肿瘤坏死因子-α 诱导的促炎血管细胞粘附分子-1 和细胞间粘附分子-1 的生成，抑制比例分别为 38.9%~54% 和 28.6~36.5%[74]。

2.6 其他活性肽

除上述活性外，植物源低蛋白含量食品肽还展现出其他多种重要的活性，比如促进酒精的代谢和分解，从而减轻酒精对身体的负担和损害；此外还具有对肝脏的保护作用。同时，一些植物源低蛋白含量食品肽还具有抗菌特性，能够抑制细菌和真菌的生长。

蘑菇足蛋白在 400 MPa 超高压处理 10 min 后，经过分子量截留获得的 3 kDa 以下的混合肽组分，可激活乙醇脱氢酶和醛脱氢酶，从而促进酒精的代谢和分解。进一步基于肽组学研究在其中发现了 9 种肽，其中四肽 IPLH 对乙醇脱氢酶和醛脱氢酶的激活能力最强，但显著低于混合肽组分的激活能力[75]。对玉米进行水解和 5 kDa 分子量截留获得了玉米混合肽组分，在其中进一步鉴定了一种五肽 QLLPF，基于乙醇诱导的肾损伤大鼠模型，探究了玉米混合肽组分和五肽 QLLPF 干预后对大鼠的影响，结果表明玉米混合肽组分和五肽 QLLPF 均有助于抑制细胞色素 c 的释放，调节 B 细胞淋巴瘤/白血病-2 族蛋白、细胞表面受体 Fas 及其配体 FasL 和重要的核因子 NF-κB，并抑制 caspase-3 的激活。相比与单独五肽，玉米混合肽组分效果更好[76]。值得注意的是，蘑菇肽和玉米肽的研究结果均表明，相比于单独的肽，植物源低蛋白含量食品混合肽组分的活性效果更好，这表明植物源低蛋白含量食品肽组分中多种肽可能存在协同效应。

还有一些植物源低蛋白含量食品中的肽具有较好的抗菌效果。双孢蘑菇中胰蛋白酶水解后的混合肽组分可显著抑制铜绿假单胞菌和蜡样芽孢杆菌的生长，抑制效果达 26.64%[77]。在香菇中，发现了一种分子量约为 17 kDa 的肽，对革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌无抗菌活性，对真菌，尤其是须癣毛癣菌、红色毛癣菌、和热带念珠菌，有较强的抗菌作用，抗真菌效果呈浓度依赖性[78]。在银杏中，已鉴定出 11 种肽，其中一种名为 gB5 的肽对多种植物病原真菌的菌丝生长具有显著抑制作用。gB5 对黑曲霉、弯曲霉、尖孢镰刀菌和立枯丝核菌的 IC_{50} 值分别为 6.8、10.0、69.2 和 20.0 μg/mL[22]。

3 总结与展望

作为人类日常膳食结构的重要组成部分，种类丰富的植物源低蛋白含量食品存在未被充分开发的活性成分。系统挖掘这类食品中的活性肽，不仅能够拓展活性肽的获取途径，更能通过开发新型食品基质促进食品资源的多元化发展，为践行大食物观背景下食品体系的创新升级提供科学支撑。本文详细梳理了基于肽组学的植物源低蛋白含量食品肽的分析流程，着重阐述了肽的提取与富集、检测与分析、活性预测等三个核心环节的关键要点。肽组学作为一种强大的分析工具，为食品活性肽的分析提供了高效的方案。

然而，植物源低蛋白含量食品活性肽的产业价值较为有限，相关研究仍面临挑战。目前，活性肽的预测网站主要聚焦在降血压肽、抗氧化肽、抗炎肽的活性上，对于其他活性肽的预测较少，这阻碍了其他活性肽的探索。其次，植物源低蛋白含量食品中肽的活性验证主要基于体外实验数据，体内研究相对较少，作用机制尚不明确。体外实验虽然能够初步评估活性肽的潜力，但体内研究对于验证其实际功效和最佳剂量至关重要。尤其是前期文献表明食品混合肽组分与单一肽的活性效果不同，体内实验中还需关注食品混合肽组分中存在的协同效应，从而更充分地发挥植物源低蛋白含量食品活性肽的优势。在确证植物源低蛋白食品中活性肽的功能特性后，亟需解析食品加工技术对肽的稳定性及生物利用度的影响，阐明食品关键工序与肽稳定性之间的作用规律，并建立其与工业生产参数的关联。通过精准调控加工工艺参数并开发肽的定向富集技术，可实现活性肽的高效保留与靶向强化，最终构建从基础研究到产业化应用的全链条增效路径。

植物源低蛋白含量食品活性肽具有多种活性，包括降血压、降血脂、降血糖、抗氧化、抗炎活性等，这些特性使其在食品、医药、化妆品等领域具有广阔的应用前景。在食品领域，该类活性肽可应用于功能性食品、膳食补充剂以及特定疾病相关的医用食品中，具有作为天然功能配料的重要潜力。例如，MAKE 出品了系列以食源性肽为核心的膳食补剂，其中一款膳食补剂的核心成分为植物源低蛋白含量食品银杏中的肽。这一产品为后续植物源低蛋白含量食品活性肽的开发和生产提供思路。

© 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] Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAOSTAT [DB/OL]. [2026-01-04]. https://www.fao.org/statistics/zh/.

[2] 食品伙伴网数据库. 营养数据[DB/OL]. [2026-01-04]. https://

db.foodmate.net/yingyang/typeid_1472_346.html.［Nutritional Data. Foodmate Database, Foodmate Network, www.foodmate.net/yingyang/typeid_1472_346.html.］
［3］贺屹潮. 大鲵肉酶解肽制备及抗氧化与免疫调节活性研究［D］. 汉中：陕西理工大学, 2020.［HE Y C. Study on the preparation of enzymatic peptides from salamander meat and their antioxidant and immunomodulatory activities［D］. Hanzhong: Shaanxi University of Technology, 2020.］
［4］郝可心. 小麦中肽组分及其在加工过程中变化规律研究［D］. 天津：天津科技大学, 2018.［HAO K X. Research on peptide components in wheat and their variation patterns during processing［D］. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2018.］
［5］LEE A C, HARRIS J L, KHANNA K K, et al. A comprehensive review on current advances in peptide drug development and design［J］. International Journal of Molecular Sciences, 2019, 20(10): 2383.
［6］FETSE J, KANDEL S, MAMANI U F, et al. Recent advances in the development of therapeutic peptides［J］. Trends in Pharmacological Sciences, 2023, 44(7): 425−441.
［7］SHARMA K, SHARMA K K, SHARMA A, et al. Peptide-based drug discovery: Current status and recent advances［J］. Drug Discovery Today, 2023, 28(2): 103464.
［8］CHAI K F, VOO A Y H, CHEN W N. Bioactive peptides from food fermentation: A comprehensive review of their sources, bioactivities, applications, and future development［J］. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2020, 19(6): 3825−3885.
［9］MARTINEZ-VILLALUENGA C, PEñAS E, FRIAS J. Bioactive peptides in fermented foods: Production and evidence for health effects［M］. Boston: Academic Press, 2017: 23−47.
［10］HELLINGER R, SIGURDSSON A, WU W, et al. Peptidomics［J］. Nature Reviews Methods Primers, 2023, 3: 25.
［11］FISAYO AJAYI F, MUDGIL P, GAN C Y, et al. Identification and characterization of cholesterol esterase and lipase inhibitory peptides from amaranth protein hydrolysates［J］. Food Chemistry: X, 2021, 12: 100165.
［12］MARQUES M R, FONTANARI G G, PIMENTA D C, et al. Proteolytic hydrolysis of cowpea proteins is able to release peptides with hypocholesterolemic activity［J］. Food Research International, 2015, 77: 43−48.
［13］WANG K, ZHU X, LIAO X, et al. Changes of low-abundance peptides in frozen orange juice before and after frozen storage and pasteurization processing, and their contribution to ACE inhibition activity［J］. Food Research International, 2025, 202: 115739.
［14］SINGH B P, VIJ S. Growth and bioactive peptides production potential of *Lactobacillus plantarum* strain C2 in soy milk: A LC-MS/MS based revelation for peptides biofunctionality［J］. LWT-Food Science and Technology, 2017, 86: 293−301.
［15］DESPORTES C, CHARPENTIER M, DUTEURTRE B, et al. Liquid chromatographic fractionation of small peptides from wine［J］. Journal of Chromatography A, 2000, 893(2): 281−291.
［16］WU H, JOHNSON M C, LU C H, et al. Peptidomics study of anthocyanin-rich juice of elderberry［J］. Talanta, 2015, 131: 640−644.
［17］LERMA-GARCÍA M J, D'AMATO A, SIMÓ-ALFONSO E F, et al. Orange proteomic fingerprinting: From fruit to commercial juices［J］. Food Chemistry, 2016, 196: 739−749.
［18］DALLAS D C, GUERRERO A, PARKER E A, et al. Current peptidomics: Applications, purification, identification, quantification, and functional analysis［J］. Proteomics, 2015, 15(5-6): 1026−1038.
［19］霍嘉颖, 孙宝国, 郑福平, 等. 白酒中一种三肽 Arg-Asn-His 的鉴定及其细胞内抗氧化活性［J］. 食品科学, 2018, 39(23): 126−133.［HUO J Y, SUN B G, ZHENG F P, et al. Identification of a tripeptide Arg-Asn-His in Baijiu and its intracellular antioxidant activity［J］. Food Science, 2018, 39(23): 126−133.］
［20］CIARDIELLO M A, MELELEO D, SAVIANO G, et al. Kissper, a kiwi fruit peptide with channel-like activity: Structural and functional features［J］. Journal of Peptide Science, 2008, 14(6): 742−754.
［21］SANDOVAL-SICAIROS E S, MILÁN-NORIS A K, LUNA-VITAL D A, et al. Anti-inflammatory and antioxidant effects of peptides released from germinated amaranth during in vitro simulated gastrointestinal digestion［J］. Food Chemistry, 2021, 343: 128394.
［22］WONG K H, TAN W L, SERRA A, et al. Ginkgotides: Proline-rich hevein-like peptides from gymnosperm Ginkgo biloba［J］. Frontiers in Plant Science, 2016, 7: 1639.
［23］XU L, XU Z, KELLY S, et al. Integrating untargeted metabolomics and targeted analysis for not from concentrate and from concentrate orange juices discrimination and authentication［J］. Food Chemistry, 2020, 329: 127130.
［24］TYANOVA S, TEMU T, COX J. The MaxQuant computational platform for mass spectrometry-based shotgun proteomics［J］. Nature Protocols, 2016, 11(12): 2301−2319.
［25］PERKINS D N, PAPPIN D J, CREASY D M, et al. Probability-based protein identification by searching sequence databases using mass spectrometry data［J］. Electrophoresis, 1999, 20(18): 3551−3567.
［26］ALI U, TIAN L, TANG R, et al. A comprehensive atlas of endogenous peptides in maize［J］. iMeta, 2024, 3(6): 247.
［27］周梦洁. 黄酒肽的分离纯化、结构鉴定及其降血糖活性研究［D］. 杭州：浙江大学, 2021.［ZHOU M J. Research on the isolation, purification, structural identification and hypoglycemic activity of yellow wine peptides［D］. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.］
［28］LI M, DONG L, DU H, et al. Potential mechanisms underlying the protective effects of *Tricholoma matsutake* singer peptides against LPS-induced inflammation in RAW264.7 macrophages［J］. Food Chemistry, 2021, 353: 129452.
［29］LANGE V, PICOTTI P, DOMON B, et al. Selected reaction monitoring for quantitative proteomics: A tutorial［J］. Molecular Systems Biology, 2008, 4: 222.
［30］IWANIAK A, MINKIEWICZ P, DAREWICZ M. BIOPEP-UWM database—present and future［J］. Current Opinion in Food Science, 2024, 55: 101108.
［31］ZAMYATNIN A A, BORCHIKOV A S, VLADIMIROV M G, et al. The EROP-Moscow oligopeptide database［J］. Nucleic Acids Research, 2006, 34: 261−266.
［32］QIN D, BO W, ZHENG X, et al. DFBP: A comprehensive database of food-derived bioactive peptides for peptidomics research［J］. Bioinformatics, 2022, 38(12): 3275−3280.
［33］KUMAR R, CHAUDHARY K, SINGH CHAUHAN J, et al. An in silico platform for predicting, screening and designing of antihypertensive peptides［J］. Scientific Reports, 2015, 5(1): 12512.
［34］OLSEN T H, YESILTAS B, MARIN F I, et al. AnOxPePred: Using deep learning for the prediction of antioxidative properties of peptides［J］. Scientific Reports, 2020, 10(1): 21471.
［35］HAN J, KONG T, LIU J. PepNet: An interpretable neural

network for anti-inflammatory and antimicrobial peptides prediction using a pre-trained protein language model[J]. Communications Biology, 2024, 7(1): 1198.
[36] KHATUN M S, HASAN M M, KURATA H. PreAIP: computational prediction of anti-inflammatory peptides by integrating multiple complementary features[J]. Frontiers in Genetics, 2019, 10: 129.
[37] GAWDE U, CHAKRABORTY S, WAGHU F H, et al. CAMPR4: A database of natural and synthetic antimicrobial peptides[J]. Nucleic Acids Research, 2023, 51(1): 377−383.
[38] NOSALSKI R, LEMOLI M. The epigenetic legacy of renin–angiotensin system inhibition in preventing hypertension[J]. Cardiovascular Research, 2024, 120(7): 675−677.
[39] SUN W, ZHANG H, GUO J, et al. Comparison of the efficacy and safety of different ACE inhibitors in patients with chronic heart failure: A PRISMA-compliant network meta-analysis[J]. Medicine (Baltimore), 2016, 95(6): 2554.
[40] SHOBAKO N. Hypotensive peptides derived from plant proteins[J]. Peptides, 2021, 142: 170573.
[41] LAU C C, ABDULLAH N, SHUIB A S, et al. Novel angiotensin I-converting enzyme inhibitory peptides derived from edible mushroom *Agaricus bisporus* (J. E. Lange) imbach identified by LC–MS/MS[J]. Food Chemistry, 2014, 148: 396−401.
[42] ZHANG P, ROYTRAKUL S, SUTHEERAWATTANANONDA M. Production and purification of glucosamine and angiotensin-I converting enzyme (ACE) inhibitory peptides from mushroom hydrolysates[J]. Journal of Functional Foods, 2017, 36: 72−83.
[43] 刘连亮. 竹笋降压降脂有效成分及其活性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012. [LIU L L. Research on the effective components and biactivities of bamboo shoots for lowering blood pressure and lipid[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.]
[44] TSAI B C K, HSIEH D J Y, LIN W T, et al. Functional potato bioactive peptide intensifies Nrf2-dependent antioxidant defense against renal damage in hypertensive rats[J]. Food Research International, 2020, 129: 108862.
[45] PULIPATI V P, ALENGHAT F J. The impact of lipid-lowering medications on coronary artery plaque characteristics[J]. American Journal of Preventive Cardiology, 2021, 8: 100294.
[46] NAGAOKA S, TAKEUCHI A, BANNO A. Plant-derived peptides improving lipid and glucose metabolism[J]. Peptides, 2021, 142: 170577.
[47] 刘晓静. 亚麻籽肽降胆固醇作用的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020. [LIU X J. Research on the cholesterol-lowering effect of flaxseed peptides[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2020.]
[48] BOLAYO Y, TORIO M. Anti-hypertensive and anti-hypercholesterolemic effects of protein hydrolysates from (*Phaseolus vulgaris* L.) in functional beverage[J]. Agricultural and Food Sciences, 2024, 19: 107−116.
[49] KALITA P, AHMED A B, SEN S, et al. A comprehensive review on polysaccharides with hypolipidemic activity: Occurrence, chemistry and molecular mechanism[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 206: 681−698.
[50] RACHMAWATI E, SUHARTI S, SARGOWO D, et al. Metabolite profiling, hypolipidemic, and anti-atherosclerosis activity of mixed vegetable fermentation extract[J]. Saudi Pharmaceutical Journal, 2023, 31(5): 639−654.
[51] YAPISLAR H, GURLER E B. Management of microcomplications of diabetes mellitus: Challenges, current trends, and future perspectives in treatment[J]. Biomedicines, 2024, 12(9): 1958.
[52] LIU T, SUN Y, ZHANG W, et al. Hollow-adjustable polymer microneedles for prolonged hypoglycemic effect on diabetic rats[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 481: 148670.
[53] LIU T, JIANG G, SONG G, et al. Fabrication of rapidly separable microneedles for transdermal delivery of metformin on diabetic rats[J]. Journal of Pharmaceutical Sciences, 2021, 110(8): 3004−3010.
[54] 田文慧, 孙丽平, 张翠, 等. 白啤中二肽基肽酶-IV 抑制肽的虚拟筛选及活性分析[J]. 食品科学, 2022, 43(10): 81−87. [TIAN W H, SUN L P, ZHANG C, et al. Virtual screening and activity analysis of dipeptidyl peptidase-IV inhibitory peptide in white beer[J]. Food Science, 2022, 43(10): 81−87.]
[55] VALENCIA-MEJíA E, BATISTA K A, FERNáNDEZ J J A, et al. Antihyperglycemic and hypoglycemic activity of naturally occurring peptides and protein hydrolysates from easy-to-cook and hard-to-cook beans (*Phaseolus vulgaris* L.)[J]. Food Research International, 2019, 121: 238−246.
[56] 袁晓晴. 癞葡萄降血糖肽的制备及其降糖机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2007. [YUAN X Q. Preparation of hypoglycemic peptide from leper grape and research on its hypoglycemic mechanism[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2007.]
[57] ZHANG J, ZHOU L, CUI L, et al. Antioxidant and α-glucosidase inhibitiory activity of *Cercis chinensis* flowers[J]. Food Science and Human Wellness, 2020, 9(4): 313−319.
[58] WEN C, ZHANG J, ZHANG H, et al. Plant protein-derived antioxidant peptides: Isolation, identification, mechanism of action and application in food systems: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 105: 308−322.
[59] DURAND E, BEAUBIER S, ILIC I, et al. Production and antioxidant capacity of bioactive peptides from plant biomass to counteract lipid oxidation[J]. Current Research in Food Science, 2021, 4: 365−397.
[60] KARAMI Z, AKBARI-ADERGANI B. Bioactive food derived peptides: A review on correlation between structure of bioactive peptides and their functional properties[J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 56(2): 535−547.
[61] YU X, CHEN Y, QI Z, et al. Preparation and identification of a novel peptide with high antioxidant activity from corn gluten meal[J]. Food Chemistry, 2023, 424: 136389.
[62] GóMEZ A, GAY C, TIRONI V, et al. Structural and antioxidant properties of cowpea protein hydrolysates[J]. Food Bioscience, 2021, 41: 101074.
[63] MEMARPOOR-YAZDI M, MAHAKI H, ZARE-ZARDINI H. Antioxidant activity of protein hydrolysates and purified peptides from *Zizyphus jujuba* fruits[J]. Journal of Functional Foods, 2013, 5(1): 62−70.
[64] 龚荣, 苏静. 葡萄酒酿造过程中谷胱甘肽的研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(7): 283−291. [GONG R, SU J. Research progress of glutathione in the wine-making process[J]. Food Science, 2020, 41(7): 283−291.]
[65] HUO J, LUO X, HUANG M, et al. Identification and antioxidant activity of a novel peptide from Baijiu[J]. International Journal of Peptide Research and Therapeutics, 2019, 26(3): 1199−1210.
[66] HE Z, ZHOU Y, LI S, et al. Bioactive peptides and evaluation of cardiac cytoprotective effects of red millet yellow wine as functional food[J]. Foods, 2024, 13(24): 4111.
[67] DENG L, HE S, GUO N, et al. Molecular mechanisms of fer-

roptosis and relevance to inflammation[J]. Inflammation Research, 2023, 72(2): 281−299.
[68] JIANG B, LIU J, ZHU Z, et al. Establishment of a workflow for high-throughput identification of anti-inflammatory peptides from sea cucumbers[J]. Food Research International, 2024, 197: 115171.
[69] LIU C, LIU Y, CHEN H, et al. Myocardial injury: where inflammation and autophagy meet[J]. Burns & Trauma, 2023, 11: 62.
[70] LIANG Q, CHALAMAIAH M, LIAO W, et al. Zein hydrolysate and its peptides exert anti-inflammatory activity on endothelial cells by preventing TNF-α-induced NF-κB activation[J]. Journal of Functional Foods, 2020, 64: 103598.
[71] LIU W, YU S, HAN Y, et al. Systematic sequence characterization of enzymatic-derived soybean peptides for precision enhancement of anti-inflammatory properties[J]. Food Bioscience, 2024, 60: 104292.
[72] PAVLICEVIC M, MARMIROLI N, MAESTRI E. Immunomodulatory peptides—a promising source for novel functional food production and drug discovery[J]. Peptides, 2022, 148: 170696.
[73] 冯瑞雪, 史瑛, 姬中伟, 等. 黄酒多肽的多级分离纯化及其对小鼠巨噬细胞免疫调节的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(13): 289−295. [FENG R X, SHI Y, JI Z W, et al. Multistage separation and purification of polypeptides from yellow wine and their effects on the immune regulation of mouse macrophages[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(13): 289−295.]
[74] LIANG Q, CHALAMAIAH M, REN X, et al. Identification of new anti-inflammatory peptides from zein hydrolysate after simulated gastrointestinal digestion and transport in Caco-2 cells[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(5): 1114−1120.
[75] ZHAO R J, HUO C Y, QIAN Y, et al. Ultra-high-pressure processing improves proteolysis and release of bioactive peptides with activation activities on alcohol metabolic enzymes in vitro from mushroom foot protein[J]. Food Chemistry, 2017, 231: 25−32.
[76] MA Z L, HOU T, SHI W, et al. Inhibition of hepatocyte apoptosis: An important mechanism of corn peptides attenuating liver injury induced by ethanol[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2015, 16(9): 22062−22080.
[77] FARZANEH P, KHANAHAMADI M, EHSANI M R, et al. Bioactive properties of *Agaricus bisporus* and *Terfezia claveryi* proteins hydrolyzed by gastrointestinal proteases[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 91: 322−329.
[78] POOMPOUANG S, SUKSOMTIP M. Isolation and characterization of an antifungal peptide from fruiting bodies of edible mushroom *Lentinus squarrosulus* Mont[J]. Malaysian Journal of Microbiology, 2016, 12: 43−49.