

巴旦木副产物的功能成分及其在食品中的应用研究进展

谢璟怡¹ 王晚晴^{1,2} 王馨毅¹ 苑春乐¹ 李雨娜¹ 华威^{1,2}

(1. 北京联合大学生物化学工程学院, 北京 100023; 2. 生物质废弃物资源化利用北京市重点实验室, 北京 100023)

摘要: 巴旦木产业在全球范围内快速发展, 其加工过程中产生的大量副产物(包括青皮、壳、皮)蕴含丰富的功能成分, 如多酚、黄酮、膳食纤维及挥发性香气物质。文章系统总结了巴旦木副产物的成分特性、提取技术及其在食品与生物材料领域的潜在应用价值, 重点分析其抗氧化、生物活性及结构特征。结合最新研究进展, 文章进一步介绍了当前应用中存在的稳定性差、生物利用度不足以及加工兼容性限制等问题, 并提出纳米递送、结构改性及复合利用等提升策略。

关键词: 巴旦木; 副产物; 生物活性; 高值利用; 食品应用

Functional components and food application progress of almond by-products

Xie Jingyi¹ Wang Wanqing^{1,2} Wang Xinyi¹ Yuan Chunle¹ Li Yuna¹ Hua Wei^{1,2}

(1. College of Biochemical Engineering, Beijing Union University, Beijing 100023, China;
2. Beijing Key Laboratory of Biomass Waste Resource Utilization, Beijing 100023, China)

Abstract: As the global almond industry expands rapidly, large quantities of by-products are generated during processing (such as green hulls, shells, and skins), which are rich in functional constituents including polyphenols, flavonoids, dietary fibers, and volatile aroma compounds. This review summarizes the compositional characteristics and extraction technologies of these by-products, while elucidating their potential applications in food and biomaterials, with a specific focus on their antioxidant properties, bioactivities, and structural features. Furthermore, in light of recent research advances, the review further discusses poor stability, low bioavailability, challenges in processing compatibility and other problems, proposing enhancement strategies such as nano-delivery, structural modification, and combined utilization.

Keywords: almond; by-product; bioactivity; high-value utilization; food application

巴旦木属于核果类, 其结构主要由外皮(青皮)、硬壳(壳)以及种子(果仁)3个基本部分构成。在巴旦木果仁的生产过程中, 副产物包括青皮、壳和种皮3个部分, 而果仁为巴旦木的可食用部分, 也是其商业价值的核心^[1]。巴旦木隶属于蔷薇科扁桃属, 是全球范围内极为重要的坚果品种之一^[2], 广泛分布于全球50多个国家, 其中美国、澳大利亚和西班牙是主要生产国^[3], 全球带壳巴旦木年产量为360万t^[4]。在巴旦木果仁的生产过程中, 青皮大约

占果实总重量的60%~40%、外壳占33%~20%, 果仁仅占31%~15%, 种皮占4%~8%^[5]。因此, 实现巴旦木副产物资源利用的最大化, 对于促进资源的可持续利用具有重要意义。文章拟系统总结巴旦木副产物的成分特性、提取技术及其在食品与生物材料领域的潜在应用价值, 重点分析其抗氧化、生物活性及结构特征, 进一步介绍当前应用中存在的稳定性差、生物利用度不足以及加工兼容性限制等问题, 并提出纳米递送、结构改性及复合利用等提

基金项目: 其它国家级项目(科技类)——一般项目(编号: BIO-22-01-YC)

通信作者: 王晚晴(1986—), 女, 北京联合大学副教授, 博士。E-mail: shtwanqing@buu.edu.cn

收稿日期: 2025-09-16 **改回日期:** 2026-03-11

引用格式: 谢璟怡, 王晚晴, 王馨毅, 等. 巴旦木副产物的功能成分及其在食品中的应用研究进展[J]. 食品与机械, 2026, 42(8): 227-233.

Citation: Xie Jingyi, Wang Wanqing, Wang Xinyi, et al. Functional components and food application progress of almond by-products[J]. Food & Machinery, 2026, 42(8): 227-233.

升策略,旨在为巴旦木加工副产物的资源化与产业化开发提供依据。

1 巴旦木副产物的组成与活性成分

巴旦木加工过程中产生的大量副产物主要包括青皮、壳和种皮(见图1)。这些副产物常被视为低价值废弃物,但近年来研究揭示其富含多种生物活性化合物和可再生生物质,显示出在食品、材料与能源等领域的广阔应用前景。

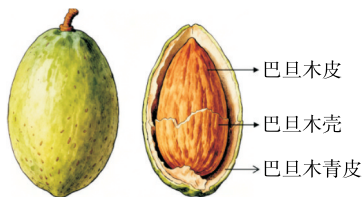


图1 巴旦木果实及其主要副产物结构示意图
Figure 1 Almond fruit and its main by-products

1.1 巴旦木青皮

巴旦木青皮是果实最外层的纤维质组织,其化学成分以糖类、木聚糖和酚类物质为主^[6]。青皮中富含酚类化合物,特别是高浓度的黄酮类物质和三萜化合物,这些物质使其成为一种有效的天然抗氧化剂来源^[7]。这些活性物质在植物体内可增强果核抵御高温、紫外辐射及病虫害的能力,从而在生物学上发挥保护作用^[2]。在应用层面,Yao等^[8-9]分析了巴旦木青皮的关键毒理学。巴旦木青皮与杏仁壳在体内外均未表现出遗传毒性,且急性口服毒性研究(OECD 423)证实了其无毒或未分类的性质,该结论与全球化学品统一分类和标签制度(GHS)标准一致。青皮不仅具有良好的贮藏稳定性,还因现代溶剂提取与超声辅助提取技术的引入,使其活性物质得以高效分离。因此,未来研究应在将提取工艺标准化的同时,进一步评估不同黄酮与三萜成分间的协同抗氧化效应,以推动其在功能性食品中的应用。

1.2 巴旦木壳

巴旦木壳是果核的木质纤维素外层,主要成分为纤维素(38.47%)、木质素(29.54%)和半纤维素(28.82%)^[10]。这种高木质素与半纤维素含量为其在材料改性和生物质能源利用方面奠定了基础。已有研究^[11]表明,巴旦木壳可通过提取纤维素纳米晶体或改性木质素,用于可降解包装材料与生物医用材料等方面。值得注意的是,不同品种巴旦木的壳硬度与缝合口结构存在显著差异,这直接影响果仁获取效率与加工经济性^[12-13]。现有研究多集中于成分分析与材料学开发方面,但有关不同处理方式对纤维素与木质素结构稳定性的影响报道较少。因此,亟需系统研究加工工艺与壳材料功能特性间的关系,以

推动其在绿色包装与能源化利用中的产业化应用。

1.3 巴旦木种皮

巴旦木种皮是热烫去皮过程中的副产物,其酚类物质含量占整个坚果总酚的50%~75%,包括酚酸、黄酮苷、木脂素等多类化合物^[14-15]。Tungmunnithum等^[16]研究发现,冷榨油渣中仍能保留大量种皮酚类物质,提示副产物的再利用价值。但目前研究多集中于抗氧化活性评估,缺乏系统的体内代谢与功能验证。此外,种皮中多酚在加工与贮藏过程中的稳定性仍是制约其应用的关键问题。因此,未来研究应重点关注多酚类物质的稳定化策略(如微胶囊化或复合包埋),并结合临床试验验证其健康促进作用,从而推动种皮向功能性食品和保健品的高值转化。

总体来看,巴旦木副产物(青皮、壳和种皮)组成与活性成分展现出高度的多样性:青皮与皮富含活性成分,适用于功能性食品的研发与食品添加的应用,未来需优化提取工艺,深入研究成分间的协同效应与加工工艺对其结构稳定性的影响。巴旦木壳主要由纤维素、木质素和半纤维素组成,已在可降解包装和食品包装材料中显示出应用前景。通过建立跨学科的技术融合与产业对接机制,推动巴旦木副产物从农业副产物向高值化资源的可持续转化,不仅有助于提升巴旦木产业链的整体附加值,也契合绿色循环经济的发展趋势。

2 活性成分的提取与生物利用度

巴旦木果仁加工副产物富含黄酮类、酚酸类、三萜类及植物固醇类等高价值生物活性成分,具有显著的抗氧化^[17]、抗炎、抗菌^[18]活性以及调节代谢、免疫等潜在生理功能。然而,这些高价值化合物大多为脂溶性,在水介质中溶解度极差,从而导致其口服渗透性和生物利用度严重受限。在现代药物与功能产品开发中,攻克活性成分的低生物利用度问题,是配方设计成功与否的关键^[19]。

2.1 巴旦木副产物活性物质的提取

2.1.1 酚类化合物 在溶剂选择方面,醇类溶剂因极性较强而常被用于黄酮和酚酸的提取。Murathan等^[20]采用酸化甲醇结合超声处理,仅用15 min便能从青皮中高效提取柚皮素、槲皮素等黄酮类物质;Qureshi等^[21]利用70%乙醇室温浸渍法,分离得到儿茶素和山奈酚。Sang等^[22]在50℃下使用95%乙醇从杏仁皮中成功提取出原儿茶酸和香草酸。Tlili等^[23]利用乙酸乙酯从青皮中分离出儿茶素和金丝桃苷。Ben Khadher等^[24]进一步采用极性递增的序贯提取(从环己烷到水),结果显示芦丁主要集中于乙酸乙酯相,而表儿茶素则分布在甲醇相,直观揭示了溶剂极性对成分分布的决定作用。

在物理强化方面,可以引入超声、高温和高压等新技术,以弥补传统浸渍法耗时长、效率低的不足。Murathan

等^[20]研究表明,超声可在短时间内显著提升黄酮提取率。Bolling等^[25]采用加压液体萃取(PLE)技术(100℃, 10.34 MPa),利用甲醇-醋酸水溶液,从杏仁皮中高效提取了儿茶素、槲皮素及其糖苷。An等^[26]则结合高压微流控与超声技术,采用乙醇-水-乙酸混合溶剂显著强化了传质过程,提高了香草酸等酚酸得率。

综上,通过优化溶剂极性,结合超声、加压液体萃取和高压微流控等物理强化技术,可以在较短时间内实现酚类化合物的高效和高选择性提取,为巴旦木副产物作为食品天然抗氧化剂和功能性成分的开发提供了可行工艺路径。未来研究应聚焦于绿色溶剂(如乙醇、水基体系)的应用、工艺规模化验证,以及与食品基质相结合的稳定性的评价,以推动这些提取技术更好地服务于食品工业。

2.1.2 三萜类化合物和植物甾醇的提取 除酚类化合物外,巴旦木副产物(尤其是青皮)中还富含三萜类和植物甾醇等脂溶性成分。三萜酸类化合物分子具有一定极性,适合采用中等极性的醇类溶剂提取。Fabroni等^[27]以80%乙醇溶液对巴旦木青皮进行长时间浸渍,并利用高效液相色谱-光电二极管阵列检测器(HPLC-PDA)进行分析,成功鉴定出齐墩果酸、熊果酸和白桦脂酸等多种三萜酸。这些化合物具有抗氧化和抗炎潜力,提示青皮是获取天然三萜酸的重要来源。相比之下,植物甾醇的极性更低,传统醇类溶剂的提取率有限。Takeoka等^[28]选择非极性的乙醚作为初始溶剂,以更好匹配其脂溶性特点。由于植物甾醇挥发性差,不适合直接气相色谱分析,故采用硅烷基化处理,将甾醇衍生为三甲基硅烷基(TMS)醚衍生物,从而能借助气相色谱-质谱(GC-MS)进行高灵敏度定性和定量,最终鉴定出豆甾醇和 β -谷甾醇。

现有研究通过溶剂极性匹配与衍生化分析策略,实现了对三萜类和植物甾醇的有效分离与鉴定,为巴旦木副产物作为功能性食品原料提供了化学基础。但目前多数研究主要集中于成分鉴定,缺乏工艺优化与规模化验证;且有关这些成分在食品加工过程中的稳定性及与其他配料的相互作用研究较少。未来应注重绿色溶剂体系食品加工条件下的适用性研究,以推动三萜类和植物甾醇在功能食品中的应用转化。

2.2 巴旦木副产物活性物质口服利用度的提高

源自植物的生物活性成分(如黄酮类、三萜类和植物甾醇)普遍存在水溶性差、肠道代谢迅速及显著首过效应等问题,而酚酸类物质则面临胃酸降解、肠道停留时间短和跨膜渗透性不足的挑战。这些特性共同导致其口服生物利用度偏低。为克服上述障碍,近年来物理封装技术,尤其是纳米递送系统成为研究热点。这类系统借助生物大分子^[29]、无机材料、脂质体^[30]、聚合物作为载体^[31],能够在胃肠道环境中保护活性成分的稳定性,从而显著提高

其吸收率与功能表现。

Cui等^[32]通过甘草酸二钾修饰大豆分离蛋白(SPI),显著提升了柚皮素在体外的水溶性与生物可及性,并增强了抗氧化和抗糖尿病活性;Dai等^[33]构建的TMC包覆玉米醇溶蛋白纳米粒,不仅提高了槲皮素在酸性环境下的稳定性,还实现了缓释和旁细胞吸收,动物试验进一步证明其在肥胖小鼠中具有较好的减肥效果。Wei等^[34]的研究则强调多层结构的保护作用:通过构建CKGM-CS核壳纳米粒,有效延缓了柚皮苷在胃酸条件下的释放,并显著提高其口服利用度。综上,不同材料和结构设计在改善黄酮类成分溶解性、稳定性及生物学效能方面各具特色。Wang等^[35]揭示了柚皮苷通过“肠道微生物-肝脏-胆固醇轴”发挥抗动脉粥样硬化作用,提示其在慢性代谢性疾病防治中的潜力。但由于柚皮苷在肠道中稳定性有限,利用纳米封装延缓其释放,可进一步放大其生物学效应。Pan等^[36]利用深共晶溶剂溶解木质素并构建了异鼠李素-木质素纳米颗粒,显著延长了异鼠李素在小鼠体内的药效持续时间,表明木质素等天然高分子材料在提升活性物质利用度方面具有独特优势。与此相似,Wu等^[37]通过反向胶束法将马鞭草苷递送至脂质纳米胶囊中,实现了初始快速释放与长效缓释的双相释放模式,在神经毒性细胞模型中显著增强了神经保护效果。表明合理设计的纳米结构不仅能改善药物释放行为,还能在细胞功能层面放大其生物学作用。Barahuie等^[38]采用磁性氧化铁纳米颗粒与壳聚糖构建pH敏感的纳米载体,成功实现了香草酸在肿瘤部位的靶向缓释,为肿瘤治疗中天然小分子的应用提供了新的思路。Wang等^[39]利用Bigel半固态材料作为没食子酸的递送系统,有效提升了其在贮藏与加工过程中的稳定性,更契合食品加工与保藏的应用需求。

整体来看,上述研究充分展示了不同纳米递送策略在提升天然活性物质稳定性、缓释性能与靶向性方面的独特优势。从机制研究(柚皮苷-动脉粥样硬化)到递送载体创新(木质素纳米颗粒、反向胶束脂质体、磁性纳米载体、Bigel材料),研究者们从疾病防治与食品应用两个层面展开探索,逐步形成了互补的证据链。然而,目前大多数成果仍停留在动物试验或细胞模型阶段,缺乏系统的临床验证与食品体系应用测试。此外,不同载体的安全性、成本可控性及规模化制备仍有待评估。未来研究亟需在材料选择的可持续性、递送体系的稳定性以及人体试验的转化性等方面进一步突破。

3 在食品中的应用

巴旦木副产物如青皮、种皮及外壳,并非废弃物,而是富含酚类化合物、纤维素等多种生物活性成分的宝贵资源。其功能性应用主要集中在3个层面:① 挖掘其固

有的功能性成分,阐明其在抗氧化、调节血糖及抗菌等方面的生物活性机理;② 将其作为天然食品添加剂,直接应用于食品体系以改善产品的感官特性、营养价值和贮藏稳定性;③ 利用其开发新型食品包装材料,构建能够延长食品保质期的可持续活性包装系统。

3.1 功能性成分

Kahlaoui 等^[40]研究发现,巴旦木青皮中的每个品种普遍含有丰富的原儿茶酸、儿茶素和绿原酸等酚类物质;Ma 等^[41]验证了巴旦木种皮中具有较高含量的原花青素与绿原酸;这些成分赋予其显著的降糖^[42]、抗菌^[43]和抗氧化^[44]等健康益处,使其成为一种具有广泛功能性应用潜力的食品原料。在血糖调节方面,Yao 等^[45]通过大鼠试验发现,巴旦木青皮提取物及其粉末能够显著抑制 α -淀粉酶活性,从而降低餐后血糖水平,并延缓血糖峰值的出现。这一发现提示青皮可能通过延缓淀粉消化和胃排空来实现持续的血糖控制,具备开发降糖功能食品的潜力。但该研究基于动物模型,尚缺乏临床数据支撑。在抗菌作用方面,D'Arcangelo 等^[46]研究表明,巴旦木青皮提取物能够有效抑制金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的生长,并对人真皮成纤维细胞无细胞毒性。说明青皮提取物不仅安全,还可能成为一种天然、可持续的抗菌剂,用于食品防腐及抗生物膜相关感染。然而,该研究仍局限于体外试验,其在实际食品体系中的稳定性与有效性有待进一步验证。在抗氧化方面,Oliver 等^[14]研究发现,成年人摄入杏仁皮多酚后,血浆中的谷胱甘肽(GSH)水平显著提高,氧化型谷胱甘肽(GSSG)水平降低。谷胱甘肽是一种重要的细胞内抗氧化剂,能够有效清除活性氧(ROS)和活性氮(RNS),在氧化应激状态下,GSH 被消耗,转化为 GSSG^[47]。Picerno 等^[48]在体外试验中发现,杏仁皮的提取物能够显著抑制代谢综合征相关疾病的金属蛋白酶 MMP-2 及 MMP-9 的活性,并抑制晚期糖基化终产物(AGEs)的形成,揭示了其在预防相关慢性疾病方面的潜在健康价值。综合来看,青皮与种皮均富含具有多重生物活性的多酚类物质,能够在不同试验模型中展现降糖、抗菌和抗氧化等功能,为其在功能性食品开发中的应用奠定了理论基础。

3.2 食品添加剂

食品添加剂是改善食品品质和加工性能的重要辅料,既可提升色泽、风味与质构,也能延长保质期^[49]。近年来,巴旦木副产物(青皮、壳和种皮)因富含天然活性成分,逐渐被探索作为功能性食品添加剂使用。在感官品质改善方面,Oliveira 等^[50]将巴旦木青皮粉末添加到华夫饼配方中,不仅增强了烘焙食品的香气和色泽,还能掩盖部分脂肪风味,使产品更受消费者喜爱。Garcia 等^[51]将巴旦木壳应用于烈酒酿造,其作为调味剂可改善利口酒的化学组成和感官特性,在风味、色泽和消费者接受度方面

均表现出显著优势。说明青皮与果壳作为天然辅料,能够拓展其在烘焙与饮品中的应用潜力。在食品结构与货架期方面,Vuono 等^[52]将杏仁皮添加到无麸质和无乳糖的烘焙产品中,可以提高面团的保湿性,有效改善产品的质地口感,并有效抑制脂质的过氧化,延长烘焙产品的保质期。在抗菌与防腐方面,巴旦木皮中含有丰富的对羟基苯甲酸,其良好的抗菌与抗真菌活性使其成为天然防腐剂的潜在来源^[25,53]。巴旦木皮可以作为食品添加剂添加到黑莓果酱中,在巴氏杀菌的处理下,巴旦木皮仍能保持较好的生物活性;添加巴旦木皮后,黑莓果酱的食品感官特性得到了改善,显著提高了果酱的营养价值,并降低了餐后血糖水平。Loizzo 等^[54]进一步将巴旦木皮提取物应用于黑莓果酱中,发现其在巴氏杀菌后仍能保持较好的生物活性,并改善果酱的感官品质与营养价值,同时有助于降低餐后血糖水平。Dhankhar 等^[55]在巴旦木酱中添加 $\leq 5\%$ 的杏仁皮,结果显示,过氧化值提升、硫代巴比妥酸与游离脂肪酸水平降低,说明杏仁皮能够显著延缓脂质氧化,发挥天然抗氧化剂的作用^[56]。总体而言,巴旦木副产物在食品添加剂开发方面具有多重优势:一方面能改善感官品质和食品质构,另一方面可通过天然抗氧化和抗菌成分延长货架期。但也存在一些不足,相关研究多集中于实验室或小规模验证,缺乏产业化应用数据,且消费者对含有“副产物来源配料”的接受度仍需进一步调查。未来应加强在实际食品体系中的应用验证,并通过标准化工艺与感官评价体系,推动巴旦木副产物向安全、有效的天然食品添加剂转化。

3.3 食品包装材料

随着绿色环保与可持续包装理念的兴起,利用巴旦木副产物开发生物基食品包装材料成为研究热点。食品包装的设计需以功能保护为基础、安全合规为底线、用户体验为导向,三者协同统一,实现保护商品、保障安全、便利消费的核心价值^[57]。巴旦木壳和青皮富含纤维素及多酚类物质,既能作为基材改善包装膜的力学性能和热稳定性,又能通过活性成分赋予包装抗氧化、抗菌等功能,从而延长食品保质期并减少化学防腐剂的使用^[58]。在基膜功能提升方面,Martin-Perez 等^[59]将巴旦木皮提取物引入活性聚乳酸(PLA)薄膜中,能够有效抑制氧化反应,延缓橙汁和葵花籽油的品质劣变,显著延长食品货架期。说明副产物提取物可作为食品包装膜中的天然抗氧化剂。在复合材料研究方面,Selvamurugan 等^[60]将巴旦木壳粉掺入增韧环氧树脂/卡丹诺诺基复合物,可显著提高材料的机械强度和耐磨性,同时赋予复合材料抗菌特性。该材料被认为可作为金属罐头的内涂层,既能保持环氧树脂原有的防腐性,又进一步降低微生物风险,提升食品贮藏的安全性^[61]。在活性包装开发方面,Valdés 等^[62]研究表明,巴旦木壳提取物作为功能性添加剂可应用于多

种聚合物基材中,不仅可改善包装的力学性能和热稳定性,还能赋予其抗氧化和抗菌活性,且该类提取物也可直接作为涂层使用,制备具有“活性保护”功能的包装材料,从而减少对额外化学防腐剂的依赖。

4 总结与展望

巴旦木加工副产物(青皮、壳、种皮)作为重要的生物资源,富含多酚、黄酮、三萜及膳食纤维等多种功能成分,具有显著的抗氧化、抗菌及代谢调节潜力。当前研究已系统阐明了其组成特性,并通过绿色提取技术与纳米递送等策略,有效提升了活性成分的得率、稳定性与生物利用度。在应用层面,这些副产物已展现出在功能性食品开发、天然防腐添加剂以及活性包装材料等领域的广阔前景,为产业高值化利用提供了明确路径。尽管已有诸多进展,但巴旦木副产物的综合利用仍面临挑战,同时也蕴含着巨大的发展机遇。未来的研究应聚焦以下几个关键方向:① 深入开展活性物质的构效关系研究与生物活性系统评价,为高效提取和精准应用提供坚实的理论依据。② 开发绿色、低成本且高效的提取工艺至关重要,引入超声波辅助提取、酶法水解、超临界流体萃取等先进技术,有望显著提升活性成分的产率与纯度。③ 结合现代分离纯化技术,创新多功能复合活性物质的制备方法,以满足不同产业需求的精细化与规模化生产。

综上,推动巴旦木副产物的综合利用,不仅能满足消费者对天然、健康产品的需求,提升巴旦木全产业链的附加值,更对促进循环经济和农业可持续发展具有深远意义。未来的突破将有赖于化学、食品科学、农业工程与环境科学等多学科的深度交叉与协同创新,以期全面释放巴旦木副产物的应用潜力,创造显著的经济、社会与环境效益。

参考文献

- [1] Fornés Comas J, Socías I Company R, Alonso Segura J M. Shell hardness in almond: cracking load and kernel percentage[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 245: 7-11.
- [2] Esfahlan A J, Jamei R, Esfahlan R J. The importance of almond (*Prunus amygdalus* L.) and its by-products[J]. *Food Chemistry*, 2010, 120(2): 349-360.
- [3] Calle A, Aparicio-Durán L, Battlle I, et al. Review of agronomic and kernel quality traits of 273 almond cultivars[J]. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 2025, 72(4): 3 783-3 828.
- [4] Calderón-Pavón A, García-Tejero I F, Noguera-Artiaga L, et al. Linking almond yield and quality to the production system and irrigation strategy considering the plantation age in a mediterranean semiarid environment[J]. *Agronomy*, 2025, 15 (6): 1 448.
- [5] Silva V, Oliveira I, Pereira J A, et al. Almond by-products: a

- comprehensive review of composition, bioactivities, and influencing factors[J]. *Foods*, 2025, 14(6): 1 042.
- [6] Cao L, El Mashad H M, Pan Z L, et al. Production of filamentous fungal biomass (*Aspergillus awamori*) in pellet form from almond hull extract[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2025, 18(10): 8 735-8 750.
- [7] Pascuzzi S, Santoro F. Analysis of the almond harvesting and hulling mechanization process: a case study[J]. *Agriculture*, 2017, 7(12): 100.
- [8] Yao Y Y, Liu J E, Miao Q M, et al. Evaluation of the genotoxicity of almond hull: implications for its use as a novel food ingredient[J]. *Foods*, 2024, 13(9): 1 404.
- [9] Liu J E, Yao Y Y, Cheng Y L, et al. Acute oral toxicity evaluation of almond hull powders in BALB/c mice[J]. *Foods*, 2023, 12(22): 4 111.
- [10] Li X M, Liu Y N, Hao J X, et al. Study of almond shell characteristics[J]. *Materials*, 2018, 11(9): 1 782.
- [11] Valdés A, Mondragon G, Garrigós M C, et al. Microwave-assisted extraction of cellulose nanocrystals from almond (*Prunus amygdalus*) shell waste[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2023, 9: 1071754.
- [12] Ledbetter C A. Shell cracking strength in almond (*Prunus dulcis* [Mill.] D. A. Webb.) and its implication in uses as a value-added product[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99 (13): 5 567-5 573.
- [13] Seeler D P, Kerr W L, Kerrihard A L, et al. Statistical modelling of sensory, physical, and chemical changes in almonds during prolonged storage at different conditions: Effect of shelling on shelf life[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2024, 209: 112713.
- [14] Oliver Chen C Y, Milbury P E, Blumberg J B. Polyphenols in almond skins after blanching modulate plasma biomarkers of oxidative stress in healthy humans[J]. *Antioxidants*, 2019, 8 (4): 95.
- [15] Valdés A, Vidal L, Beltrán A, et al. Microwave-assisted extraction of phenolic compounds from almond skin byproducts (*Prunus amygdalus*): a multivariate analysis approach[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2015, 63(22): 5 395-5 402.
- [16] Tungmunthum D, Abid M, Elamrani A, et al. Almond skin extracts and chlorogenic acid delay chronological aging and enhanced oxidative stress response in yeast[J]. *Life*, 2020, 10 (6): 80.
- [17] 戴昊昕, 杨大伟. 显齿蛇葡萄叶提取物黄酮化合物鉴定及抗氧化活性研究[J]. *食品与机械*, 2026, 42(1): 139-144.
- [18] Dai H X, Yang D W. Flavonoid identification and antioxidant activity of *Ampelopsis grossedentata* leaf extract[J]. *Food & Machinery*, 2026, 42(1): 139-144.
- [18] Prgomet I, Gonçalves B, Domínguez-Perles R, et al. Irrigation deficit turns almond by-products into a valuable source of

- antimicrobial (poly)phenols[J]. *Industrial Crops and Products*, 2019, 132: 186-196.
- [19] Charalabidis A, Sfouni M, Bergström C, et al. The biopharmaceutics classification system (BCS) and the biopharmaceutics drug disposition classification system (BDDCS): beyond guidelines[J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2019, 566: 264-281.
- [20] Murathan Z T, Kaya A, Erbil N, et al. Comparison of bioactive components, antimicrobial and antimutagenic features of organically and conventionally grown almond hulls[J]. *Erwerbs-Obstbau*, 2020, 62(4): 463-472.
- [21] Qureshi M N, Numonov S, Aisa H A. Chemical and pharmacological evaluation of hulls of *Prunus dulcis* nuts[J]. *International Journal of Analytical Chemistry*, 2019, 2 019(1): 5861692.
- [22] Sang S M, Lapsley K, Jeong W S, et al. Antioxidative phenolic compounds isolated from almond skins (*Prunus amygdalus* Batsch) [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002, 50(8): 2 459-2 463.
- [23] Tlili N, Kirkan B, Sarikurcu C. LC-ESI-MS/MS characterization, antioxidant power and inhibitory effects on α -amylase and tyrosinase of bioactive compounds from hulls of *Amygdalus communis*: the influence of the extracting solvents[J]. *Industrial Crops and Products*, 2019, 128: 147-152.
- [24] Ben Khadher T, Sassi-Aydi S, Aydi S, et al. Phytochemical profiling and biological potential of *Prunus dulcis* shell extracts[J]. *Plants*, 2023, 12(14): 2 733.
- [25] Bolling B W, Dolnikowski G, Blumberg J B, et al. Quantification of almond skin polyphenols by liquid chromatography-mass spectrometry[J]. *Journal of Food Science*, 2009, 74(4): C326-C332.
- [26] An J, Liu J E, Liang Y Y, et al. Characterization, bioavailability and protective effects of phenolic-rich extracts from almond hulls against pro-oxidant induced toxicity in Caco-2 cells[J]. *Food Chemistry*, 2020, 322: 126742.
- [27] Fabroni S, Trovato A, Ballistreri G, et al. Almond [*Prunus dulcis* (mill.) DA Webb] processing residual hull as a new source of bioactive compounds: phytochemical composition, radical scavenging and antimicrobial activities of extracts from Italian cultivars ('tuono', 'pizzuta', 'romana') [J]. *Molecules*, 2023, 28(2): 605.
- [28] Takeoka G R, Dao L T. Antioxidant constituents of almond [*Prunus dulcis* (Mill.) D. A. Webb] hulls[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2003, 51(2): 496-501.
- [29] 徐小锦, 熊向源, 高洪霞, 等. 蛋白质复合纳米递送体系的构建策略与应用研究进展[J]. *食品与机械*, 2026, 42(1): 202-212.
- Xu X J, Xiong X Y, Gao H X, et al. Research progress on construction strategies and applications of protein-based composite nanodelivery systems[J]. *Food & Machinery*, 2026, 42(1): 202-212.
- [30] 尤婷婷, 马永强, 赵若冰, 等. 叶黄素纳米脂质体的制备及体外消化特性研究[J]. *食品与机械*, 2025, 41(12): 28-36.
- You T T, Ma Y Q, Zhao R B, et al. Preparation and *in vitro* digestion characteristics of lutein nanoliposomes[J]. *Food & Machinery*, 2025, 41(12): 28-36.
- [31] Qin K M, Sun X Y, Liu J M, et al. A rosmarinic acid-fish skin protein-chitosan hybrid nano-delivery system with excellent sustained-release and antioxidant performances[J]. *Food Chemistry*, 2025, 491: 145316.
- [32] Cui Q C, Song X X, Li M S, et al. Obtention, interaction, and characterization of the soy protein isolate-glycyrrhizin nano complex for encapsulating naringenin[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 145: 109110.
- [33] Dai Z J, Yin W T, Li J H, et al. Zein and trimethyl chitosan-based core-shell nanoparticles for quercetin oral delivery to enhance absorption by paracellular pathway in obesity mice[J]. *Biomaterials Research*, 2025, 29: 193.
- [34] Wei Y J, Xiao C G, Lu W J, et al. Fabrication, characterization and *in vitro* controlled-releasing of naringin nano-particles encapsulated by chitosan-carboxymethyl konjac glucomannan [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2024, 200: 116191.
- [35] Wang F, Zhao C Y, Tian G F, et al. Naringin alleviates atherosclerosis in ApoE^{-/-} mice by regulating cholesterol metabolism involved in gut microbiota remodeling[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(45): 12 651-12 660.
- [36] Pan Y K, Li R, Jing N N, et al. Isorhamnetin-lignin nanoparticles: green preparation, characterization, remarkable bioavailability and long-lasting bioactivity *in vivo*[J]. *Food Bioscience*, 2025, 69: 106931.
- [37] Wu L P, Huang W S, Peng K J, et al. Enhancing the stability, BBB permeability and neuroprotective activity of verbascoside *in vitro* using lipid nanocapsules in combination with menthol [J]. *Food Chemistry*, 2023, 414: 135682.
- [38] Barahuie F, Dorniani D, Saifullah B, et al. Impacts of designed vanillic acid-polymer-magnetic iron oxide nanocomposite on breast cancer cells[J]. *Heliyon*, 2024, 10(12): e32863.
- [39] Wang X Y, Tang H, Chen M J, et al. Bigels as capsaicin and Gallic acid co-delivery systems: controlled release and enhanced bioavailability[J]. *Journal of Food Science*, 2025, 90 (3): e70147.
- [40] Kahlaoui M, Dalla Vecchia S B, Giovine F, et al. Characterization of polyphenolic compounds extracted from different varieties of almond hulls (*Prunus dulcis* L.) [J]. *Antioxidants*, 2019, 8(12): 647-663.
- [41] Ma X, Zhou X Y, Qiang Q Q, et al. Ultrasound-assisted extraction and preliminary purification of proanthocyanidins and chlorogenic acid from almond (*Prunus dulcis*) skin[J]. *Journal of Separation Science*, 2014, 37(14): 1 834-1 841.

- [42] Clifford M N, Kerimi A, Williamson G. Bioavailability and metabolism of chlorogenic acids (acyl-quinic acids) in humans [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2020, 19(4): 1 299-1 352.
- [43] Wu M S, Brown A C. Applications of catechins in the treatment of bacterial infections[J]. *Pathogens*, 2021, 10 (5): 546.
- [44] Deuchande T, Fundo J F, Pintado M E, et al. Protocatechuic acid as an inhibitor of lipid oxidation in meat[J]. *Meat Science*, 2024, 213: 109519.
- [45] Yao Y Y, Liu J E, Miao Q M, et al. Inhibition and effect of almond hull extract on activities of α -amylase and α -glucosidase, and postprandial glucose in normal SD rats[J]. *Journal of Functional Foods*, 2024, 123: 106624.
- [46] D'Arcangelo S, Santonocito D, Messina L, et al. Almond hull extract valorization: from waste to food recovery to counteract *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* in formation and mature biofilm[J]. *Foods*, 2024, 13(23): 3 834.
- [47] Wang F J, Yuan H T, Shen J, et al. Nanozymes with broad-spectrum scavenging of reactive oxygen species (ROS) alleviate inflammation in acute liver injury[J]. *ACS Materials Letters*, 2024, 6(4): 1 304-1 316.
- [48] Picerno P, Crasci L, Iannece P, et al. A green bioactive by-product almond skin functional extract for developing nutraceutical formulations with potential antimetabolic activity [J]. *Molecules*, 2023, 28(23): 7 913.
- [49] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. GB 2760—2024 食品安全国家标准 食品添加剂使用标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2025: 2.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB 2760—2024 National Food Safety Standards Standards for the use of food additives[S]. Beijing: Standards Press of China, 2025: 2.
- [50] Oliveira I, Marinho B, Szymanowska U, et al. Chemical and sensory properties of waffles supplemented with almond skins [J]. *Molecules*, 2023, 28(15): 5 674.
- [51] Garcia C, Dias M I, Henriques M H F, et al. *Pterospartum tridentatum* liqueur using spirits aged with almond shells: chemical characterization and phenolic profile[J]. *Molecules*, 2023, 28(11): 4 455.
- [52] Vuono L F, Sicari V, Mincione A, et al. Reuse of almond skin to formulate a new gluten- and lactose-free bakery product[J]. *Foods*, 2024, 13(23): 3 796.
- [53] 韩林学, 张续, 邱天, 等. 对羟基苯甲酸酯类防腐剂的环境和人体暴露研究进展[J]. *环境化学*, 2023, 42(8): 2 563-2 575.
Han L X, Zhang X, Qiu T, et al. Research progress in the study of environmental and human exposure to paraben preservatives [J]. *Environmental Chemistry*, 2023, 42(8): 2 563-2 575.
- [54] Loizzo M R, Tundis R, Leporini M, et al. Almond (*Prunus dulcis* cv. casteltermini) skin confectionery by-products: new opportunity for the development of a functional blackberry (*Rubus ulmifolius* schott) jam[J]. *Antioxidants*, 2021, 10(8): 1 218.
- [55] Dhankhar J, Yadav M, Kundu P, et al. Storage stability of almond paste fortified with almond skin as antioxidants[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2022, 46(3): e16410.
- [56] Schevey C T, Brewer M S. Effect of natural antioxidants and lipid model system on lipid oxidation[J]. *Journal of Food Quality*, 2015, 38(1): 40-52.
- [57] 杜鹏. 食品包装设计理论与美术创意应用研究[J]. *食品与机械*, 2026, 42(1): 253-254.
Du P. Research on food packaging design theory and application of artistic creativity[J]. *Food & Machinery*, 2026, 42(1): 253-254.
- [58] Chen Z, Azizt, Sunh Y, et al. Advances and applications of cellulose bio-composites in biodegradable materials[J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2023, 31(6): 2 273-2 284.
- [59] Martin-Perez L, Contreras C, Chiralt A, et al. Active polylactic acid (PLA) films incorporating almond peel extracts for food preservation[J]. *Molecules*, 2025, 30(9): 1 988.
- [60] Selvamurugan T S, Balasubramanian P. Development of almond shell powder and palm kernel fibre-reinforced cardanol oil toughened epoxy resin hybrid composites: mechanical, wear, and antimicrobial properties[J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2024, 14(20): 26 509-26 519.
- [61] Vázquez-Loureiro P, Lestido-Cardama A, Sendón R, et al. Investigation of migrants from can coatings: occurrence in canned foodstuffs and exposure assessment[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2023, 40: 101183.
- [62] Valdés A, Garrigós M C, Jiménez A. Extraction and characterization of antioxidant compounds in almond (*Prunus amygdalus*) shell residues for food packaging applications[J]. *Membranes*, 2022, 12(8): 806.