桃仁的主要成分、生物活性及减毒脱苦研究进展

高万亨，王宇晓，孙欣，张仁堂*

（山东农业大学食品科学与工程学院，山东泰安 271018）

摘要：桃仁富含多种营养和活性成分，是一种药食两用的优质资源。桃仁活性成分种类繁多，作用机制复杂，含有不饱和脂肪酸、蛋白质、黄酮类、苯丙素类及氰苷类化合物等多种生物活性成分，这些成分赋予了桃仁的抗凝血、抗动脉粥样硬化、抗氧化及抗肿瘤等活性。然而，桃仁中还含有苦杏仁苷，这一成分虽然具有一定的生物活性，却也存在一定的毒性和苦味问题，限制了桃仁在食品工业中的广泛应用。该文系统综述了桃仁的主要成分和生物活性，并梳理了苦杏仁苷的毒性及其脱除方法，介绍了传统炮制方法和现代加工技术（如超声波、发酵、微波等）在减毒脱苦方面的研究进展，旨在为桃仁的精深加工和高效利用提供参考和思路，特别是推动其在功能性食品中的创新应用。

关键词：桃仁；主要成分；生物活性；毒性；苦杏仁苷

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.9.0323

Recent Advances in the Main Components, Biological Activities, and Detoxification of Peach Kernel

GAO Wanheng, WANG Yuxiao, SUN Xin, ZHANG Rentang*

(College of Food Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

Abstract: Peach kernel, a dual - purpose food and medicinal material, is rich in nutrients and bioactive components. It contains unsaturated fatty acids, proteins, flavonoids, phenylpropanoids, and cyanogenic glycosides, which endow it with anticoagulant, anti - atherosclerotic, antioxidant, and anti - tumour activities. However, the presence of amygdalin in peach kernel restricts its extensive application in the food industry due to toxicity and bitterness. This review systematically examines the main components and bioactivities of peach kernel, discusses amygdalin's toxicity and removal methods, and highlights advances in traditional processing and modern detoxification technologies like ultrasound, fermentation, and microwave. The goal is to provide a basis for the deep processing and application of peach kernel, promoting its innovative use in functional foods.

Key words: peach kernel; main components; bioactivity; toxicity; amygdalin

桃仁为蔷薇科植物桃 *Prunus persica* (L.) Batsch.或山桃 *Prunus davidiana* (Carr.) Franch.的干燥成熟种子，由桃或山桃成熟的果实采收后去除果肉、核壳，将种子取出并晒干得到，具有活血祛瘀、润肠通便、止咳平喘的功效[1]。桃树为蔷薇科李属落叶小乔木植物，种植历史可追溯至公元前 1100 年[2]，有广泛的地域分布，在山东、河北、江苏、浙江等地区均有栽培[3]，是助推乡村产业兴旺的重要经济作物[4]。近年来，随着经济社会发展和人们生活水平的日益提高，药食同源理念在健康中国建设和大健康产业发展中的重要作用已经得到广泛认同[5]。药食同源的桃仁，早在 2002 年即被列入《既是食品又是药品的物品名单》，为其在食品领域的深入研究与进一步应用奠定了基础。在中医药领域，桃仁是《古代经典名方目录（第一批）》中桃核承气汤、身痛逐瘀汤、桃红四物汤的重要组成，关于桃仁的炮制方法、功效和临床应用等在历代中医药典籍中均有较多记载[6]。在食品领域，桃仁作为一种食材，含有丰富的不饱和脂肪酸、蛋白质等多种营养成分，以及苦杏仁苷、槲皮素等多种生物活性成分，这些成分共同赋予了其独特的营养价值和健康益处。将桃仁应用于包括功能食品在内的各类食品中，不仅可以实现

收稿日期：2025-03-08；修回日期：2025-08-09；接受日期：2025-08-13

基金项目：山东省重点研发计划（2024TZXD007）；山东省泰山产业领军人才项目（TSCY20241184）；企业委托项目（SSH20250074）；德州市健康食品产业创新创业共同体（DZGTT202101）

作者简介：高万亨（2002-），男，硕士研究生，研究方向：食品加工与安全，E-mail：Gao__WH@163.com

通讯作者：张仁堂（1978-），男，博士，教授，研究方向：果蔬加工，E-mail：rentangzhang@163.com

对于桃仁的高效、高值利用，还能强化食品的营养价值，为消费者提供更健康的饮食选择。

联合国粮农组织（FAO）测算，2023 年全球桃（含油桃）种植面积约 1 561 641 hm^2，产量约 2 707.79 万 t。其中，中国作为全球最大的桃生产国，2023 年桃产量约为 17 516.5 kt，居全球首位[7]。在食品加工领域，桃仁是桃加工过程中产生的重要副产物，其重量约占桃的 5%~10%[8]。但由于桃仁含有苦杏仁苷，存在一定的毒性和苦味，限制了其在食品工业中的应用，常常被当作废弃物丢弃，无法得到充分利用，造成资源浪费[8]。不同国家和地区对于食品中的氰化物含量亦有一定限量要求，例如，欧洲食品安全局（EFSA）规定酒精饮料中氰化物限量为 35 mg/kg，罐装核果类水果中氰化物限量为 5 mg/kg，而在牛轧糖、杏仁糖或其替代品及类似产品中氰化物限量为 50 mg/kg[9]。目前，《中国药典》2020 年版尚未设定苦杏仁苷的安全限量，但有研究通过每日未见毒性反应剂量（NOAEL）推算出苦杏仁苷的每日安全限量为 104.30 mg，超出限量可能导致呼吸麻痹等[10]。此外，国内外已报道多起因过量摄入富含苦杏仁苷的植物种子，或将其作为替代疗法大剂量使用而引发的氰化物中毒病例，提示桃仁中的苦杏仁苷具有潜在急性毒性风险[11]。因此，开展桃仁减毒脱苦等加工技术研究，不仅有助于实现副产物转化为高附加值产品，减少资源浪费，还能为食品和医药领域提供更安全、更具功能性的原料，兼具重要的经济和环境意义。

本文从桃仁的主要成分、生物活性及减毒脱苦等研究进展的角度对桃仁近年来的研究进行了系统综述，并在此基础上讨论了目前桃仁研究中面临的新问题和可能的发展方向，为实现桃仁在食品加工领域中的高值化开发利用，进一步延长桃加工产业链，助力乡村振兴和可持续发展提供新思路。

1 桃仁的主要成分

桃仁作为一种具有丰富营养价值和药理活性的天然植物资源，其主要成分的研究一直是现代科学关注的热点。桃仁的化学成分较为复杂，有研究表明桃仁中主要含有脂质、蛋白质、碳水化合物、灰分、粗纤维、水分和柠檬酸[12]。尽管目前国内外关于桃仁化学成分和药理作用的研究较多，例如借助气相色谱（GC）及气相色谱质谱联用（GC-MS）等检测手段，已明确桃仁中包含脂肪酸、蛋白质、甾醇及其糖苷类、黄酮类、酚酸类等多种化合物，但现有研究还不够深入和系统[13]。桃仁的各种成分是桃仁独特风味和营养价值的基础，使其在食品领域具有广泛的应用潜力。因此，对桃仁主要成分的研究可以为桃仁的综合利用提供科学指导。

1.1 脂类

桃仁是一种良好的低成本油脂原料，其脂类成分具有一定生物活性和营养特性，在化妆品、保健食品开发等领域有着广泛的应用前景[12,14-16]。桃仁油主要由不饱和脂肪酸组成，其中油酸（C18:1 n9c）和亚油酸（C18:2 n6c）是其主要成分，因此对于桃仁油的提取、组成及功效一直是研究的热点。对于桃仁油的提取，常见的方法有水蒸气蒸馏、索氏提取和溶剂浸出法，近年来也有采用超临界二氧化碳萃取、超声辅助提取等方法制备桃仁油的报道[17]。采用索氏提取法以石油醚、乙醚、氯仿、正己烷为溶剂对桃仁油进行提取的研究发现，以正己烷为溶剂提取得到的桃仁油酸价、过氧化物值、碘价和皂化值最佳[18]。而超临界流体萃取制得的桃仁油中普遍含有较高含量的黄酮和总酚类化合物，与乙醇浸出法和索氏提取法相比，油酸和亚油酸的产量和质量也更高，采用超临界 CO_2 流体萃取桃仁油的产率可以达到 29.53%[12,19]。超声辅助提取与索氏提取和溶剂浸出法相比，可以显著缩短提取时间，实现 35 min 从 1 g 干桃仁中提取出 0.197 g 桃仁油[17]。有研究显示，桃仁油中饱和脂肪酸与不饱和脂肪酸之比为 0.14，不饱和脂肪酸（油酸和亚油酸）在桃仁油中最具代表性，其含量取决于桃的基因型，且饱和脂肪酸的含量低于 15%[20,21]，如表 1 所示，不同产地桃仁油脂肪酸成分的相对百分含量也有所不同[22]。亦有研究表明，桃仁中不饱和脂肪酸的质量分数为 89.00%，且不饱和脂肪酸中油酸和亚油酸占比分别为 54.94%和 32.42%[14]。对桃仁油中 28 种脂肪酸的测定结果表明，在饱和脂肪酸中棕榈酸和硬脂酸含量最多，分别占比 5.95%和 2.92%[23]。此外，桃仁中挥发油成分含量较高，主要包含以苯甲醛为代表的芳香族小分子化合物，同时还含有维生素 E、β-生育酚等成分；脂肪族小分子化合物主要包括油酸、油酸甲酯、亚油酸、亚油酸甲酯、棕榈酸、棕榈酸乙酯、十四烷、环十五烷、辛烷、环十二烯、1-二十烯、8-十七烯、二甲基十氢萘、2,3-己二酮、4-二甲基氨基-2-丁酮、9,17-十八碳二烯醛、2-甲基己醛、反,反-2,4-癸二烯醛等[24]。因此，桃仁的油脂品质较高，具有在食品中应用的潜在价值，可以从桃仁中提取富含不饱和脂肪酸的桃仁油，进一步用于食品、制药和化妆品工业。

表 1 不同产地桃仁油脂肪酸成分的相对百分含量

Table 1 The relative percentage content of fatty acids in *P. persica* kernel oil from different areas

编号	化合物名称	相对含量/%					
		云南	山西	陕西	山东	内蒙古	河北
1	油酸	60.31	59.22	73.36	59.21	59.71	61.08
2	亚油酸	28.48	23.82	25.10	25.57	30.22	28.78
3	棕榈酸	7.90	6.67	9.69	7.49	7.94	8.13
4	硬脂酸	2.08	1.84	4.22	1.89	2.09	2.22
5	棕榈油酸	0.63	0.67	0.52	0.63	0.73	0.68
6	十七烷酸	0.04	0.04	0.09	0.04	0.05	0.04
7	花生四烯酸	0.03	0.03	0.02	0.03	0.04	0.04
8	二十烷酸	0.04	0.06	0.21	0.05	0.06	0.04
9	苯甲醛衍生物、烷类	0.29	0.31	0.71	0.35	0.48	0.49

1.2 蛋白质

植物蛋白市场在 2035 年之前可能占总蛋白质市场的 15%[25]，而桃仁是一种良好的植物蛋白源，其蛋白含量高达 27%（*m/m*），具有成为动物蛋白替代品的潜力[19]。有研究采用热搅拌萃取、微波萃取、加压液体萃取和以 NaOH 为溶剂的超声辅助提取等方法对桃仁中的蛋白进行提取，结果表明，加压液体萃取方法蛋白质的得率最高为 95.10%，其次是热搅拌萃取，蛋白质得率为 55.09%，而且采用加压液体萃取方法获得的蛋白质在乳化性、起泡性、浊度、色泽等功能特性和品质方面更优[19]。在桃仁蛋白提取物中白蛋白质量占比最高约为 60%，其次为约 17%的非蛋白类含氮化合物，球蛋白和谷蛋白占比分别为 9.5%和 8.2%[14]。有研究采用基于组合肽配体库的纳米液相色谱-串联质谱（nLC-MS/MS）技术在桃子种子中鉴定出了 97 个独特的基因产物，并在桃子种子蛋白序列中鉴定出了 14 个生物活性肽的序列[26]。有研究采用高效液相色谱串联质谱（HPLC-MS/MS）鉴定了 3 种不同的肽（LYSPH、LYTPH 和 HLLP）抵抗模拟胃肠消化和血管紧张素转换酶（Angiotensin Converting Enzyme，ACE）抑制活性，验证了其具有体外降压能力[27]，并在后续研究中从桃仁水解产物中分离出有较高的 ACE 抑制的肽段，采用反相高效液相色谱（RP-HPLC）分离得到抑菌活性较高的 2 个组分，利用液相色谱-四极杆飞行时间串联质谱（LC-Q-TOF-MS/MS）从中鉴定出 33 个多肽，认为桃仁是一种未被充分利用的副产品，可以此为原料生产具有良好降压活性的生物活性肽，用于开发营养保健品和功能食品[28]。亦有研究采用毛细管液相色谱离子阱串联质谱的方法对于桃仁中 4 种不同的 ACE 抑制肽（IYSPH、IYTPH、IFSPR 和 VAIP）含量进行测定，亦证明了桃仁蛋白是 ACE 抑制肽的良好来源[29]。如表 2 所示，有研究采用全自动氨基酸分析仪测定了 15 个品种的桃中桃仁含有必需氨基酸种类及含量[30]。因此，桃仁在减少抗营养物质后，是一种新的优质蛋白质的潜在来源，可在食品或其他工业领域得到应用[14]。

表 2 不同品种桃仁中人体必需氨基酸组成及含量

Table 2 Composition and Contents of Essential Amino Acids in Kernels of Different *P. persica* Cultivars

编号	样品名称	必需氨基酸含量/(mg/g)						
		苏氨酸	缬氨酸	蛋氨酸	异亮氨酸	亮氨酸	苯丙氨酸	赖氨酸
1	山桃	3.6	11.5	0.51	8.5	17.2	12.9	5.5
2	金秋	2.3	11.9	0.34	9.2	18.0	13.2	6.0
3	明星	3.8	10.2	0.46	7.4	14.9	11.1	5.3
4	大久保	5.9	11.3	0.37	8.1	16.0	12.0	5.8
5	晚黄金	2.4	11.0	0.39	8.3	16.5	12.1	5.4
6	罐 5	1.8	10.9	0.36	8.0	15.9	11.8	5.4
7	红不软	4.2	10.6	0.41	7.9	16.2	12.5	5.7
8	锦霞	3.4	10.8	0.41	8.5	16.1	12.4	5.8
9	艳霞	2.9	11.1	0.36	7.9	15.6	11.3	5.7

10	早红霞	3.6	10.6	0.38	8.2	15.1	11.6	5.5
11	红珊瑚	4.4	11.3	0.49	8.2	17.1	11.7	5.8
12	香珊瑚	3.7	10.3	0.44	7.6	16.4	12.1	5.6
13	金星	2.3	10.4	0.35	7.7	15.7	11.8	5.5
14	N72	4.5	11.2	0.43	7.8	15.2	12.6	5.4
15	丹墨	3.2	10.6	0.45	8.7	16.6	12.3	5.9
平均值		3.47	10.91	0.41	8.13	16.17	12.09	5.62

1.3 其他成分

除了脂肪酸和蛋白两种常见的营养成分外，桃仁还富含许多其他生物活性成分，如黄酮类、苯丙素类、氰苷类化合物等[31]。黄酮类化合物最初是指以 2-苯基色原酮为基本骨架衍生的一类化合物的总称，现泛指两个苯环通过三个碳原子相互连接而成的一系列化合物的总称，即具有 C_6-C_3-C_6 结构的一类化合物的总称[32]，而桃仁中含有黄酮类化合物包括槲皮素、柚皮苷、山柰酚-3-O-芸香糖苷、洋李苷、槲皮素葡萄糖苷、儿茶素、柚皮素、山柰酚、二氢山柰酚等[24]。苯丙素类物质是具有 C_6-C_3 芳香核骨架的一类天然化合物的统称，由莽草酸通路合成，具有多种生理活性，桃仁中的苯丙素类化合物包括开环异落叶松脂素 4-O-*β*-D-吡喃葡萄糖苷、二氢去氢二愈创木基醇 4-O-*β*-D-吡喃葡萄糖苷、绿原酸等[8,24]。植物甾醇是天然的植物性生物活性化合物，以含有醇基环戊烷全氢菲为主架结构[33]，有研究表明，利用超临界二氧化碳提取的桃仁油中含有豆甾醇、*β*-谷甾醇等多种植物甾醇，这些植物甾醇具有一定降低胆固醇等作用[34]。在桃仁中含有的氰苷类化合物中，苦杏仁苷含量最多、最具代表性，这一物质也是大量服用桃仁后可能引发中毒的关键成分[9,35]。因此，桃的种子和果仁被认为是钠、钾、锌、铜、铁、脂肪酸（亚麻酸、油酸、棕榈酸和亚油酸）、纤维和碳水化合物（蔗糖、葡萄糖和果糖）含量非常丰富的来源[34]。此外，桃仁中还含有少量的微量元素、鞣质和一些萜类化合物，如柠檬烯、角鲨烯、罗勒烯等[24]。

2 桃仁的生物活性

桃仁不仅富含多种营养成分，还具有显著的生物活性，使其在医药和食品领域具有广泛的潜在应用价值。如前文所述，桃仁中的活性成分主要包括不饱和脂肪酸、蛋白质、黄酮类化合物、苯丙素类化合物、氰苷类化合物等。如图 1 所示，现代研究表明，桃仁在抗氧化、抗炎、抗肿瘤、调节血脂等方面表现出显著的生物活性[34]。

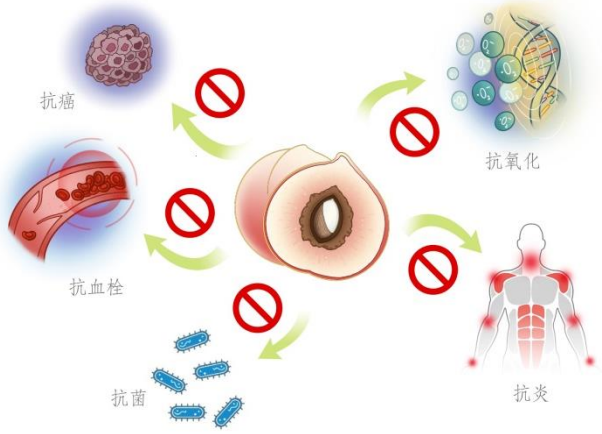

图 1 桃仁的生物活性

Fig.1 Biological activities of Peach Kernel

2.1 抗凝血

血栓性疾病严重危害人类的健康，也是全世界死亡的主要原因[36]。而桃仁为我国传统常用活血类中药材，临床上被广泛用于治疗血栓性疾病，并表现出很好的治疗效果，但桃仁中具有抗凝血作用的药效成分及其作用靶点仍不十分明确[37]。桃仁中的苦杏仁苷可以延长活化部分凝血酶时间和凝血酶时间，降低纤维蛋白原含量，起到抗凝血作用[38]。有研究采用亲和超滤联合超高效液相色谱-四极杆飞行时间质谱的方法筛选出了桃仁中两种潜在的凝

血酶配体，两个配体与参与凝血酶活化的关键氨基酸残基相互作用，表现出较强的亲和力，并通过了斑马鱼实验进行验证[37]。有研究通过亲和超滤质谱联用技术从血府逐瘀汤中筛选出桃仁所含活性成分苦杏仁苷，并验证其可显著延长家兔血浆活化部分凝血活酶时间，提示桃仁可通过内源性凝血途径发挥抗凝血作用[39]。有研究通过大鼠动静脉旁路血栓模型证实，桃仁水提物经 MCI 柱层析后获得的 10%（*V*/*V*）乙醇洗脱部位可显著减少血栓质量，其作用主要归因于 DL-扁桃酸[40]。此外，亦有研究表明，桃仁中的脂质成分具有一定的抗凝血作用[41]。总的来说，桃仁抗凝血作用较为确切，但其具体成分和机制仍有待进一步研究。

2.2 抗动脉粥样硬化

动脉粥样硬化是由于斑块形成而导致的动脉病理过程，是导致心脏病、中风和外周动脉疾病等多种疾病的原因[42]，而脂质代谢异常是导致动脉粥样硬化的最重要危险因素[43]。黄欣莉等[38]的研究将胰脂肪酶抑制率作为降血脂的重要指标，表明苦杏仁苷具有一定的胰脂肪酶抑制能力，并且能与甘氨酸胆酸盐和牛磺酸胆酸盐结合，具有一定的体外降血脂潜力。苦杏仁苷还可通过调控 MAPKs、AP-1 和 NF-κB p65 信号通路，减轻载脂蛋白 E 基因敲除小鼠的动脉粥样硬化。此外，在经氧化型低密度脂蛋白处理的骨髓来源巨噬细胞中，苦杏仁苷还表现出明显的抗炎效果[44]。且亦有研究表明，桃仁油能降低载脂蛋白 E 基因敲除小鼠的总胆固醇、低密度脂蛋白胆固醇、三酰甘油水平，并提升其高密度脂蛋白胆固醇水平，显著下调转铁蛋白表达，抑制动脉粥样硬化斑块的形成，降低主动脉粥样硬化损伤面积[42]。苦杏仁苷和桃仁油通过抑制脂质代谢相关酶和调节血脂水平，展现出显著的降血脂及抗动脉粥样硬化潜力，为动脉粥样硬化及其相关疾病的预防和治疗提供了新的研究方向。

2.3 抗氧化

人体内可以产生多种活性氧（Reactive Oxygen Species，ROS），在炎症反应、神经退行性疾病、恶性肿瘤等人类疾病的发展中发挥作用，同时也执行某些生理功能[45]。桃仁油中含有较多的酚类化合物，具有良好的抗氧化活性和储藏稳定性[16,18]，桃仁中的苦杏仁苷成分可以显著降低 ROS 的产生，并增强抗氧化酶的活性，减轻心肌细胞凋亡和心脏功能障碍，对急性心肌梗死具有保护作用[46]，苦杏仁苷还可通过激活 NRF2/ARE 信号通路，显著提高抗氧化酶（如 SOD、CAT 和 GPX4）的活性，降低氧化应激标志物（如 MDA 和 ROS）的水平，从而在高糖诱导的人视网膜内皮细胞损伤中发挥抗氧化保护作用[47]。有研究采用多种不同的酶对桃仁进行处理获得多种生物活性肽，并分析了其抗氧化能力，并以亲水相互作用色谱和反相高效液相色谱电喷雾四极杆飞行时间质谱对桃仁中具有抗氧化作用的生物活性肽进行了鉴定[48]。亦有研究对桃仁提取物的抗氧化活性和毒性进行了评价，发现桃仁提取物在抗氧化方面活性良好，且毒性较低[49]。

2.4 抗肿瘤

癌症是全球人类死亡的主要原因之一，恶性肿瘤的治疗耗费了大量的医疗资源[50]。越来越多的研究表明，天然生物分子，特别是植物化学物质，可以阻断各种癌症的发生、发展和进展[51]。桃仁的部分成分已被证明具有一定的抗肿瘤作用，如表 3 所示，诸多研究表明桃仁中的苦杏仁苷成分对于前列腺癌、肺癌、膀胱癌、结肠癌和直肠癌有一定治疗作用[11,52,53]，可以在增殖和代谢活性较高的肿瘤细胞中表现出较高的细胞毒性作用[54]。研究表明，苦杏仁苷能够抑制人结肠癌细胞（HT-29）生长，在抑制结肠癌发展方面具有一定潜力[55]。亦有研究显示，桃仁提取物对 A549、HepG2、MCF-7 和 HT-29 细胞系的生长表现出显著的抑制作用，其抑制率分别为 99%、97%、95%和 97%[34]。

表 3 苦杏仁苷抗癌活性的相关研究示例

Table 3 Representative Studies on the Anticancer Activity of Amygdalin

类型	研究结果	参考文献
胃癌	抑制 TGF-*β*/Smad 信号通路	[56]
乳腺癌	通过抗氧化、抗炎、下调 Bcl-2 并激活 Caspase-3/P53 轴，诱导细胞周期阻滞与凋亡，从而抑制 DMBA 诱导的小鼠乳腺癌发生与进展	[57]
前列腺癌	下调 DU-145 细胞 *α*6 整合素表达，抑制其与血管内皮及胶原的黏附和迁移，从而发挥抗前列腺癌转移作用，但对 PC3 细胞无显著影响	[58]

肺癌	抑制 H1299 细胞体外增殖，肿瘤细胞侵袭、迁移能力显著下降，MMP-2/9、integrinβ1/4、ILK、FAK、β-catenin 蛋白和 mRNA 表达,MMP-2/9 活性以及 FAK、Akt 和 RICTOR 磷酸化水平显著下调	[59]
肝癌	诱导人肝癌 HuH-7 细胞和裸鼠 HuH-7 细胞移植瘤细胞发生凋亡，减缓肿瘤生长	[60]

2.5 其他活性

除上述活性外，桃仁提取物还可抑制炎症反应，进而抑制脂多糖诱导的活化 HSC-T6 细胞转化，进而具有防止肝脏纤维化的活性[61]。Jun 等[62]研究了桃仁促进成骨细胞分化和骨愈合的作用，并在蛋白质和 mRNA 水平上证实了桃仁对于 BMP-2 和 Wnt 信号通路的调节是促进骨折愈合的关键机制。有研究表明，桃仁中的苦杏仁苷可能通过激活 ERK1/2 信号通路来发挥促进神经突起生长的作用，具有神经保护方面的活性[63]，可以改善认知缺陷和神经退行性疾病，其机制可能与减轻氧化应激损伤和抑制 MAPKs 炎症信号通路有关[64]。此外，Fratianni 等[20]研究发现桃仁油对金黄色葡萄球菌、铜绿假单胞菌、鲍曼不动杆菌等的 MIC 范围为 26~30.5 μg/mL，且在 9~18 μg/mL 亚抑菌浓度下可抑制生物被膜形成。因此，桃仁在促进骨折愈合、治疗肝损伤、神经保护、抗菌等方面亦具有一定作用。

3 桃仁的减毒脱苦

桃仁入药首载于东汉《神农本草经》，原名桃核仁，味苦、甘[1,65]。“是药三分毒”，桃仁作为一种中药材亦有一定的毒性，《炮制全书》中指出“双仁有毒不用”，这是关于桃仁毒性的最早记载[66]。如何削减其毒性和苦涩味并最大限度地保留其生物活性便成为食品加工过程中亟待解决的问题。炮制是桃仁减毒的传统手段。古代医家普遍主张“凡入药者必先炮”，以便通过炮制实现中药材的“增效减毒”，从而充分发挥药材的药效、确保临床用药的安全性[65]。汉代张仲景在其所著《金匮玉函经》中首次提出桃仁“去皮尖”的制法，而李时珍在《本草纲目》中所述：“桃仁行血宜连皮尖生用，润燥和血，宜汤浸去皮尖炒黄用”[65]。目前全国及地方炮制规范收载的桃仁炮制品主要有净制、燀制、炒制等[6,65]。

现代研究表明，苦杏仁苷是桃仁中主要的毒性成分和重要苦味来源，化学式为 $C_{20}H_{27}NO_{11}$，由两分子葡萄糖、一分子苯甲醛和一分子氢氰酸组成，是一种氰苷类化合物，其本身无毒，但在体内经过 β-葡萄糖苷酶的作用可以产生有毒的氢氰酸，其反应过程如图 2 所示[67-70]。而炮制能够通过降低苦杏仁苷酶的活性，减少苦杏仁苷降解生成氢氰酸[71]。苦杏仁苷存在 D 型和 L 型两种构型，在自然界中仅存在味道苦涩的 D 型苦杏仁苷，在煎煮等处理过程中 D 型苦杏仁苷可以转化为没有苦味的 L 型苦杏仁苷，但 D 型和 L 型苦杏仁苷均可引起人体中毒，因此需要对桃仁进行减毒脱苦，以减少苦味和中毒风险[72]。桃仁中毒的临床症状与摄入的苦杏仁苷在体内释放出的氢氰酸含量密切相关，其中毒表现为腹泻、呕吐、腹痛、头晕、呼吸困难，严重者甚至会导致死亡，成人摄入 0.5~3.5 mg/kg 的苦杏仁苷即可导致死亡，且儿童对其敏感程度更高[11]。鉴于桃仁有一定的毒性和苦味，将其作为食品原料大量使用时，须严格控制使用量，并进一步研究其减毒脱苦的加工方法，以确保食用安全。

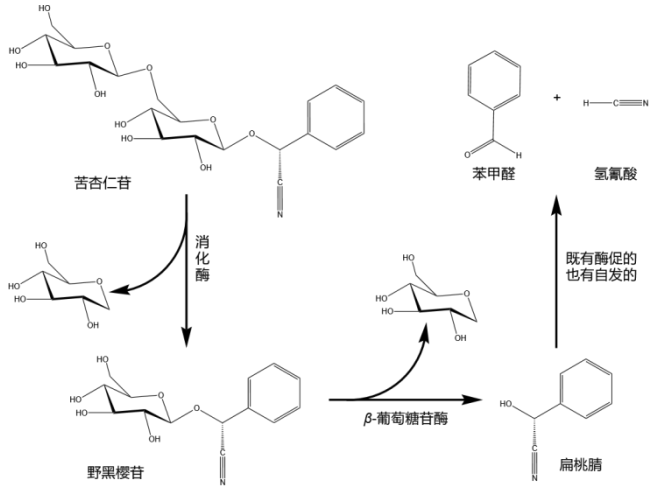

图 2 苦杏仁苷分解产生氰化氢的途径

Fig.2 The pathway of amygdalin decomposition to produce hydrogen cyanide

苦杏仁苷的毒性在很大程度上还取决于消化道中细菌的种类[9]，人体中的肠道微生物具有分解苦杏仁苷产生氰化氢的能力，增加了桃仁的潜在毒性风险[73]，但部分肠道微生物可以通过其存在的磺基转移酶家族对氰化物有一定解毒作用[74]，这也为通过微生物发酵降低食品原料中苦杏仁苷的含量提供了潜在可能。有研究认为，苦杏仁苷有较强的热稳定性（高达 250 ℃）[75]，但加热导致的水分蒸发会对苦杏仁苷的稳定性造成较大影响[76]，在 45 ℃的水中浸泡 9 h 可以有效降低李子仁中苦杏仁苷的含量[77]。有研究采用红外、热风、烫漂等技术处理 *Onobrychis viciifolia* L.的种子发现其中苦杏仁苷质量分别降低了 29%、19%、32%[78]，亦有研究通过微波加热处理发现杏仁中的苦杏仁苷及氢氰酸含量显著降低[76]。此外，还有研究发现，木薯粉中的氰化物含量在酒精发酵过程中逐渐降低，蒸煮是控制氰化物含量的有效方法[79]。但传统的苦杏仁苷脱除过程中往往存在高耗能、高耗水等问题，为此有研究采用脉冲电场对樱桃核进行处理，发现脉冲电场处理可显著加快苦杏仁苷和氰化氢含量的降低[80]，亦有研究采用超声处理实现了苦杏仁苷的高效去除[72]。上述研究表明，热处理与非热处理均能有效降解苦杏仁苷，但机制存在一定差异。热处理往往通过激活内源 *β*-葡萄糖苷酶水解苦杏仁苷生成可挥发的氢氰酸，并辅以高温直接裂解与加速溶出，实现其高效脱除；而非热处理则利用脉冲电场、超声波空化或微生物中酶的协同或独立作用，促使苦杏仁苷酶解或直接降解而脱除。苦杏仁苷作为桃仁的核心生物活性成分，赋予其抗凝血、抗动脉粥样硬化、抗氧化及抗肿瘤等多种药理作用。然而，其亦是潜在的毒性来源，在体内 *β*-葡萄糖苷酶等作用下可水解生成剧毒的氢氰酸。这一“效-毒同源”的特性构成了桃仁应用的关键矛盾。因此，工业化减毒脱苦的核心目标并非简单降低苦杏仁苷含量，而是通过精准调控加工条件阻断其向有毒代谢产物的转化路径，以最大限度保留苦杏仁苷并有效抑制 HCN 的生成，显著降低其潜在毒性风险。因此，在食品加工领域，除了采用传统中药材炮制方法对于桃仁进行处理以外，采用超声、发酵、微波等技术对桃仁及其加工制品进行减毒脱苦也具有较高的研究和应用价值，后续仍需要对苦杏仁苷的毒理学和减毒脱苦工艺开展更多原创性研究，以解决工业化生产中“效-毒”平衡的难题。

4 总结与展望

本文系统综述了桃仁的现代研究进展及其在食品领域的应用。桃仁作为一种传统的药食同源食物，含有不饱和脂肪酸、蛋白质、黄酮类化合物、苯丙素类化合物、氰苷类化合物等丰富的营养成分和活性成分，这些成分赋予了桃仁抗凝血、抗动脉粥样硬化、抗氧化、抗肿瘤等多种生物活性。尽管桃仁在营养和药理活性方面具有显著潜力，但其在食品领域的应用仍面临一些挑战。桃仁的毒性和苦味是限制其广泛应用的关键因素，特别是桃仁中的苦杏仁苷，需要通过适当的加工方法减毒脱苦，以确保其在食品中的安全应用。目前，超声、发酵、微波等技术已被证明可以有效降低苦杏仁苷含量，从而减少其毒性和苦味，但仍需更多研究明确不同减毒脱苦方法的机制、优缺点及其联用的可能性。未来的研究应进一步探索桃仁中各种活性成分的具体作用机制，为开发功能性食品提供更坚实的科学依据，研究和优化桃仁的加工技术，以最大限度地保留其营养成分和活性成分，同时有效降低毒性、改善风味，不断开发基于其药食同源特性的功能性饮料、营养补充剂、特医食品等新型产品，对桃仁及其加工制品进行更全面的安全性评估，为人们的健康饮食提供更多的选择，助力可持续发展。

参考文献

[1] 国家药典委员会编.中华人民共和国药典一部 2020 年版[M].北京:中国医药科技出版社,2020:290-291.

[2] DAVIDOVIĆ S M, VELJOVIĆ M S, PANTELIĆ M M, et al. Physicochemical, antioxidant and sensory properties of peach wine made from Redhaven cultivar [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(6): 1357-1363.

[3] 王力荣.我国桃产业现状与发展建议[J].中国果树,2021,10:1-5.

[4] 徐磊,陈超.中国桃产业经济分析与发展趋势[J].果树学报,2023,40(1):133-143.

[5] 孙欣缘,郑雅萍,孙康萌,等.我国食药物质名单梳理、修订与展望[J].中国中药杂志,2025,50(2):346-355.

[6] 邓静,叶梦倩,彭杰,等.桃仁炮制历史沿革及现代研究进展[J].中成药,2023,45(11):3713-3717.

[7] FAOSTAT[EB/OL]. [2025-02-25]. https://www.fao.org/faostat/en/#home.

[8] NOWICKA P, WOJDYŁO A. Content of bioactive compounds in the peach kernels and their antioxidant, anti-hyperglycemic, anti-aging properties [J]. European Food Research and Technology, 2019, 245(5): 1123-1136.

[9] BARAKAT H, ALJUTAILY T, ALMUJAYDIL M S, et al. Amygdalin: a review on its characteristics, antioxidant potential, gastrointestinal microbiota intervention, anticancer therapeutic and mechanisms, toxicity, and encapsulation [J]. Biomolecules, 2022,

12(10): 1514.

[10] 刘云杰,张梦,李雯婷,等.中药材及其制剂中毒性成分质量控制检测技术与限量安全风险评估研究进展[J].中国中药杂志,2025,50(17):4717-4728.

[11] JASZCZAK-WILKE E, POLKOWSKA Ż, KOPROWSKI M, et al. Amygdalin: Toxicity, Anticancer Activity and Analytical Procedures for Its Determination in Plant Seeds [J]. Molecules, 2021, 26(8): 2253.

[12] SHARIF H R, SHARIF M K, ARSHAD R, et al. A comprehensive review on exploring the nutraceutical potential and industrial applications of peach [J]. Food Reviews International, 2024, 40(10): 3530-3554.

[13] 吴环宇,金泽林,王宁,等.桃果深加工及其副产物综合利用研究进展[J].保鲜与加工,2021,21(1):146-150.

[14] MUSTAFA M A M, SOROUR M A H, MEHANNI A H E, et al. Amino acid profile, physico-chemical properties and fatty acids composition of some fruit seed kernels after detoxification [J]. Chemical and Biological Technologies in Agriculture, 2023, 10(1): 37.

[15] LANDOLSI C, SALEM-BERRABAH O B, FEKI M, et al. Unsaponifiable compounds and phenols content, antioxidant and antitrypsin activities of *prunus persica* kernel oil [J]. Journal of Oleo Science, 2024, 73(6): 865-874.

[16] RODRÍGUEZ-BLÁZQUEZ S, GÓMEZ-MEJÍA E, ROSALES-CONRADO N, et al. Valorization of prunus seed oils: fatty acids composition and oxidative stability [J]. Molecules, 2023, 28(20): 7045.

[17] SOLOMAKOU N. Valorization of peach (*Prunus persica* L.) peels and seeds using ultrasound and enzymatic methods [J]. Chemical Engineering and Processing, 2024, 206: 110072.

[18] WU H. Essential oil extracted from peach (*Prunus persica*) kernel and its physicochemical and antioxidant properties [J]. Food Science and Technology, 2011, 44(10): 2032-2039.

[19] RUDKE C R M. Comparing green extraction methods for the recovery of protein-rich fraction from peach seeds (*Prunus persica*) [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 153: 109991.

[20] FRATIANNI F, D'ACIERNO A, OMBRA M N, et al. Fatty acid composition, antioxidant, and *in vitro* anti-inflammatory activity of five cold-pressed *prunus* seed oils, and their anti-biofilm effect against pathogenic bacteria [J]. Frontiers in Nutrition, 2021, 8: 775751.

[21] KOPRIVICA M. Fatty acids composition and physical properties of stones and kernels from different peach cultivars as biomarker of origin and ripening time [J]. European Food Research and Technology, 2022, 248: 2471-2482.

[22] 陶春晓,叶泰玮,张芳,等.桃仁油提取工艺及其理化性质、组成研究[J].中成药,2022,44(12):3914-3919.

[23] SAVCHENKO L, IVANAUSKAS L, JARUKAS L. Determination and comparison of fatty acids composition of apricot and peach oils [J]. FARMACIA, 2021, 69: 17.

[24] 张妍妍,韦建华,卢澄生,等.桃仁化学成分、药理作用及质量标志物的预测分析[J].中华中医药学刊,2022,40(1):234-241.

[25] RIVERA DEL RIO A, MÖLLER A C, BOOM R M, et al. *In vitro* gastro-small intestinal digestion of conventional and mildly processed pea protein ingredients [J]. Food Chemistry, 2022, 387: 132894.

[26] GONZÁLEZ-GARCÍA E, MARINA M L, GARCÍA M C, et al. Identification of plum and peach seed proteins by nLC-MS/MS via combinatorial peptide ligand libraries [J]. Journal of Proteomics, 2016, 148: 105-112.

[27] VÁSQUEZ-VILLANUEVA R, MARINA M L, GARCÍA M C. Revalorization of a peach (*Prunus persica* (L.) Batsch) byproduct: extraction and characterization of ACE-inhibitory peptides from peach stones [J]. Journal of Functional Foods, 2015, 18: 137-146.

[28] VÁSQUEZ-VILLANUEVA R, ORELLANA J M, MARINA M L, et al. Isolation and characterization of angiotensin converting enzyme inhibitory peptides from peach seed hydrolysates: *in vivo* assessment of antihypertensive activity [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(37): 10313-10320.

[29] GONZÁLEZ-GARCÍA E, GARCÍA M C, MARINA M L. Capillary liquid chromatography-ion trap-mass spectrometry methodology for the simultaneous quantification of four angiotensin-converting enzyme-inhibitory peptides in *Prunus* seed hydrolysates [J]. Journal of Chromatography A, 2018, 1540: 47-54.

[30] 黄丽萍,尹蓉,张倩茹,等.桃仁中脂肪酸、氨基酸含量分析[J].农学学报,2017,7(11):35-41.

[31] LIU Y, WU H, ZHANG Z, et al. Traditional use, phytochemistry, pharmacology, toxicology and clinical applications of *persicae semen*: A review [J]. Chinese Journal of Integrative Medicine, 2024, 30(12): 1137-1147.

[32] CHEN L, CAO H, HUANG Q, et al. Absorption, metabolism and bioavailability of flavonoids: A review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(28): 7730-7742.

[33] ZHANG R, HAN Y, MCCLEMENTS D J, et al. Production, characterization, delivery, and cholesterol-lowering mechanism of phytosterols: A review [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2022, 70(8): 2483-2494.

[34] KUMARI N, RADHA, KUMAR M, et al. Peach *(Prunus persica* (L.) Batsch) seeds and kernels as potential plant-based functional food ingredients: A review of bioactive compounds and health-promoting activities [J]. Food Bioscience, 2023, 54: 102914.

[35] MENSAH M A. Cyanogenic glycosides as food toxins [M]. Analysis of Naturally Occurring Food Toxins of Plant Origin. CRC Press, 2022.

[36] STARK K, MASSBERG S. Interplay between inflammation and thrombosis in cardiovascular pathology [J]. Nature Reviews Cardiology, 2021, 18(9): 666-682.

[37] HUANG S, ZHANG J, HE X, et al. Rapid screening of active components with thrombin inhibitory activity from peach kernel based on affinity ultrafiltration coupled with UPLC-Q-TOF-MS [J]. Chemistry & Biodiversity, 2025, 22(2): e202401239

[38] 黄欣莉,吴伟杰,陈杭君,等.桃仁中苦杏仁苷高效提取及其体外生物活性研究[J].中国食品学报,2023,23(4):146-156.

[39] HUANG C, DAI J, HE X, et al. Screening of anticoagulant active components in Xuefu Zhuyu decoction via affinity-ultrafiltration coupled with mass spectrometry [J]. Anal Methods, 2024, 16(44): 7576-7588.

[40] 贺宇,徐德平.桃仁中抗血栓活性成分的筛选与鉴定[J].食品与生物技术学报,2025,44(1):54-60.

[41] YANG N Y, LIU L, TAO W W, et al. Antithrombotic lipids from *Semen Persicae* [J]. Natural Product Research, 2011, 25(17): 1650-1656.

[42] HAO E, PANG G, DU Z, et al. Peach kernel oil downregulates expression of tissue factor and reduces atherosclerosis in apoe knockout mice [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2019, 20(2): 405.

[43] BERBERICH A J, HEGELE R A. A modern approach to dyslipidemia [J]. Endocrine Reviews, 2022, 43(4): 611-653.

[44] WANG Y, JIA Q, ZHANG Y, et al. Amygdalin attenuates atherosclerosis and plays an anti-inflammatory role in apoe knock-out mice and bone marrow-derived macrophages [J]. Frontiers in Pharmacology, 2020, 11: 590929.

[45] HALLIWELL B. Understanding mechanisms of antioxidant action in health and disease [J]. Nature Reviews Molecular Cell Biology, 2024, 25(1): 13-33.

[46] BOSHEN Y, YUANKANG Z, XINJIE Z, et al. Cardioprotective effects of amygdalin, a promising antioxidant, on acute myocardial infarction and underlying mechanisms [J]. Journal of Functional Foods, 2023, 107: 105684.

[47] LI S, LU S, WANG L, et al. Effects of amygdalin on ferroptosis and oxidative stress in diabetic retinopathy progression via the NRF2/ARE signaling pathway [J]. Experimental Eye Research, 2023, 234: 109569.

[48] VÁSQUEZ-VILLANUEVA R, MARINA M L, GARCÍA M C. Identification by hydrophilic interaction and reversed-phase liquid chromatography–tandem mass spectrometry of peptides with antioxidant capacity in food residues [J]. Journal of Chromatography A, 2016, 1428: 185-192.

[49] YANG J, LIU Y, SONG Y, et al. Antioxidant activity and preclinical safety of *Semen persicae* extract [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2024, 25(16): 8580

[50] WANG Y, YAN Q, FAN C, et al. Overview and countermeasures of cancer burden in China [J]. Science China Life Sciences, 2023, 66(11): 2515-2526.

[51] BOUABDALLAH S, AL-MAKTOUM A, AMIN A. Steroidal saponins: naturally occurring compounds as inhibitors of the hallmarks of cancer [J]. Cancers, 2023, 15(15): 3900.

[52] FERNANDES Q, BILLA N. Amygdalin in antineoplastic medicine and the relevance of nanotechnology [J]. Biomed Pharmacother, 2025, 182: 117772.

[53] HE X Y. Amygdalin - A pharmacological and toxicological review [J]. Journal of Ethnopharmacology, 2020, 254: 112717.

[54] TODOROVA A, PESHEVA M, ILIEV I, et al. Antimutagenic, antirecombinogenic, and antitumor effect of amygdalin in a yeast cell–based test and mammalian cell lines [J]. Journal of Medicinal Food, 2017, 20(4): 360-366.

[55] CASSIEM W, DE KOCK M. The anti-proliferative effect of apricot and peach kernel extracts on human colon cancer cells *in vitro* [J]. BMC Complementary and Alternative Medicine, 2019, 19(1): 32.

[56] XU J, QIN N, JIANG W, et al. Amygdalin suppresses the proliferation, migration and EMT of gastric cancer cells by inhibiting TGF-*β*/Smad signal pathway [J]. Tropical Journal of Pharmaceutical Research, 2022, 21(4): 721-726.

[57] MAGEID A D A, ABDEL-WADOUD I M, SALIM E I, et al. The protective and chemotherapeutical role of amygdalin in induced

mammary cancer in experimental mice and upregulation of related genes [J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 9131.

[58] MANI J, NEUSCHäFER J, RESCH C, et al. Amygdalin Modulates Prostate Cancer Cell Adhesion and Migration *In Vitro* [J]. Nutrition and Cancer, 2020, 72(3): 528-537.

[59] 孙卓琳,刘京伟,匡长春.苦杏仁苷抑制人肺癌 NCI-H1299 细胞体外侵袭的机制[J].中国药科大学学报,2016,47(4):479-482.

[60] 王青瑛,王郁金,邢文文,等.苦杏仁苷介导人肝癌细胞 HuH-7 凋亡的实验研究[J].现代生物医学进展,2021,21(17):3227-3231+3216.

[61] CHEN H J, HUANG J Y, KO C Y. Peach kernel extracts inhibit lipopolysaccharide-induced activation of hsc-t6 hepatic stellate cells [J]. International Journal of Clinical Practice, 2022, 2022(1): 4869973.

[62] JUN J Y, KIM J H, KIM M, et al. *Persicae Semen* promotes bone union in rat fractures by stimulating Osteoblastogenesis through BMP-2 and Wnt Signaling [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(8): 7388.

[63] YANG C, ZHAO J, CHENG Y, et al. Bioactivity-guided fractionation identifies amygdalin as a potent neurotrophic agent from herbal medicine *Semen Persicae* extract [J]. BioMed Research International, 2014, 2014: 1-10.

[64] ZHAO X. Antioxidative activity of methyl amygdalinate from the seeds of *Prunus persica* and neuroprotective effects on Aβ1–42-induced neurodegeneration models [J]. RSC Advances, 2016, 6: 93794-93800.

[65] 周国铭,王玺,何成峙,等.桃仁现代研究进展和炮制方法历史沿革[J].中草药,2024,55(13):4565-4574.

[66] 杨丽,陈建强.中药桃仁的研究综述[J].中国药物经济学,2020,15(5):118-121.

[67] SIREESHA D, REDDY B S, REGINALD B A, et al. Effect of amygdalin on oral cancer cell line: An *in vitro* study [J]. Journal of Oral and Maxillofacial Pathology : JOMFP, 2019, 23(1): 104-107.

[68] RICCIARDI F, DEL CUETO J, BARDARO N, et al. Synteny-based development of CAPS markers linked to the sweet kernel LOCUS, controlling amygdalin accumulation in almond (*Prunus dulcis* (Mill.) D.A.Webb) [J]. Genes, 2018, 9(8): 385.

[69] MOSAYYEBI B, IMANI M, MOHAMMADI L, et al. An update on the toxicity of cyanogenic glycosides bioactive compounds: Possible clinical application in targeted cancer therapy [J]. Materials Chemistry and Physics, 2020, 246: 122841.

[70] ZHANG H S, GUO P H, ZHANG Q A, et al. Effects of saturated hot air pretreatment compared to traditional blanching on the physicochemical properties of Apricot (*Prunus armeniaca* L.) kernels and its skin during removing skin [J]. LWT- Food Science and Technology, 2021, 150: 111947.

[71] 郑蓉慧,孙冬梅,段志文,等.基于化学模式识别的桃仁及其炮制品差异性研究[J].天然产物研究与开发,2024,36(10):1751-1760+1799.

[72] ZHANG N. Changes of amygdalin and volatile components of apricot kernels during the ultrasonically-accelerated debitterizing [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 58: 104614.

[73] JASWAL V, PALANIVELU J, C R. Effects of the gut microbiota on amygdalin and its use as an anti-cancer therapy: substantial review on the key components involved in altering dose efficacy and toxicity [J]. Biochemistry and Biophysics Reports, 2018, 14: 125-132.

[74] WEN Q, YU S, WANG S, et al. Impact of intestinal microbiota on metabolic toxicity and potential detoxification of amygdalin [J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 1030516.

[75] MARIAN E, TITA B, TITA I C, et al. Thermal behaviour and kinetic study of amygdalin [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2018, 134(1): 765-772.

[76] SHEIKH M A, UBAID M, AHMED N, et al. Effects of controlled microwave heat treatment on the compositional attributes, antioxidant potential, and anti-nutritional components of apricot kernel flour [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2025, 3: 1859-1873.

[77] SHEIKH M A, SAINI C S, SHARMA H K. Analyzing the effects of hydrothermal treatment on antinutritional factor content of plum kernel grits by using response surface methodology [J]. Applied Food Research, 2021, 1(1): 100010.

[78] ANDAÇ A E, YILMAZ TUNCEL N, TÜLBEK M Ç, et al. Characterization and effects of heat treatments on antinutritional components and enzyme activities in sainfoin (*Onobrychis viciifolia* L.) seeds: A high-protein alternative plant-based food source [J]. Food Research International, 2025, 199: 115372.

[79] QIN Y, DUAN B, SHIN J A, et al. Effect of fermentation on cyanide and ethyl carbamate contents in cassava flour and evaluation of their mass balance during lab-scale continuous distillation [J]. Foods, 2021, 10(5): 1089.

[80] GIANCATERINO M. Effect of pulsed electric field pre-treatment on the debittering process of cherry kernels [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2023, 83(12): 103234.