荸荠功效因子挖掘与加工产品开发研究进展

杨文华[1]，罗 婉[1]，于 刚[2]，蔡馥琳[1]，周晓君[3]，陈永霞[3]，李 骏[1,4]，范 雁[1,4]，肖更生[1,4]，王 琴[1,4,*]
（1.广东省岭南特色食品科学与技术重点实验室，广东 广州 510225；2.三亚热带水产研究院，海南省深远海渔业资源高效利用与加工重点实验室，海南 三亚 572018；3.广州市洲星食品有限公司，广东 广州 510450；4.仲恺农业工程学院轻工食品学院，广东 广州 510225）

摘 要：荸荠是一种药食兼用的果蔬类植物，富含多种活性成分，包括多酚类、多糖类及其独特的荸荠英等，这些成分赋予了荸荠抗氧化、抗菌、抗炎、抗癌等生物活性，使其在功能食品、药物等领域具有很大的应用潜力。根据荸荠功能特性挖掘其营养功效因子，开发和制备荸荠功能食品，是近年来荸荠的研究热点。本文通过荸荠的食用和药用价值系统地介绍其生物活性功能和营养功效因子，并综述荸荠现有产品类型，以期为荸荠资源的精深加工和综合利用及产品开发提供参考。

关键词：荸荠；功效因子；生物活性；产品开发

Research Progress on Bioactive Compounds and Product Development from *Eleocharis dulcis*

YANG Wenhua[1], LUO Wan[1], YU Gang[2], CAI Fulin[1], ZHOU Xiaojun[3], CHEN Yongxia[3], LI Jun[1,4], FAN Yan[1,4], XIAO Gengsheng[1,4], WANG Qin[1,4,*]
(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Lingnan Specialty Food Science and Technology, Guangzhou 510225, China; 2. Key Laboratory of Efficient Utilization and Processing of Marine Fishery Resources of Hainan Province, Sanya Tropical Fisheries Research Institute, Sanya 572018, China; 3. Guangzhou Zhouxing Food Co. Ltd., Guangzhou 510450, China; 4. College of Food Science and Technology, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China)

Abstract: *Eleocharis dulcis*, a plant with both medicinal and culinary uses, is rich in a variety of bioactive components, including polyphenols, polysaccharides, and its unique component, puchiin. These constituents confer *E. dulcis* antioxidant, antibacterial, anti-inflammatory, and anticancer properties, highlighting its potential in functional foods and pharmaceuticals. Therefore, exploring the nutritional components of *E. dulcis* based on their functional characteristics and developing *E. dulcis*-based functional foods have become research hotspots recently. This article systematically introduces the biological activities and nutritional and functional factors of *E. dulcis* based on its dietary and medicinal values and reviews the existing types of *E. dulcis* products, aiming to provide references for the deep processing, comprehensive utilization and product development of *E. dulcis*.

Keywords: *Eleocharis dulcis*; functional ingredients; biological activities; product development
DOI:10.7506/spkx1002-6630-20250320-163
中图分类号：TS255.1 文献标志码：A 文章编号：1002-6630（2025）19-0336-11
引文格式：
杨文华, 罗婉, 于刚, 等. 荸荠功效因子挖掘与加工产品开发研究进展[J]. 食品科学, 2025, 46(19): 336-346. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20250320-163. http://www.spkx.net.cn
YANG Wenhua, LUO Wan, YU Gang, et al. Research progress on bioactive compounds and product development from *Eleocharis dulcis*[J]. Food Science, 2025, 46(19): 336-346. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20250320-163. http://www.spkx.net.cn

收稿日期：2025-03-20
基金项目：国家自然科学基金面上项目（32372336）；
海南省深远海渔业资源高效利用与加工重点实验室开放基金项目（KLEU-2023-1）；
广东省普通高校热带亚热带特色水产食品加工与营养健康重点实验室项目（2023KSYS006）
第一作者简介：杨文华（1988—）（ORCID: 0000-0003-1812-8400），男，副教授，博士，研究方向为食物资源开发及利用。E-mail: yangwh88@hotmail.com
*通信作者简介：王琴（1973—）（ORCID: 0000-0002-7838-998X），女，教授，博士，研究方向为农产品加工与贮藏。E-mail: qwang1230@126.com

荸荠（*Eleocharis dulcis*），俗称马蹄，又称凫茈、水栗和通天草等，是莎草科荸荠属多年生草本植物，地下球茎可作为蔬菜食用，球茎扁圆球形，表面平滑，呈深栗色或枣红色，果肉为白色[1]，有“地下地梨”的美誉。荸荠原产于中国和印度，在中国有着悠久的栽培及食用历史。中国关于荸荠的最早记载见于两千多年前的《尔雅·释草》中称为“芍，凫茈”[1-2]。而荸荠的称谓最早可见于《本草衍义》（公元1116年）：“皮浓、色黑、肉硬白者，谓之猪荸荠”[2]。

荸荠属木兰纲（Magnoliopsida）、百合亚纲（Liliidae）、鸭跖草超目（Commelinanae）、禾本目（Poales）、莎草科（Cyperaceae）、荸荠属（*Eleocharis*），荸荠主要分为两大类型：野生类型和栽培类型。野生类型的叶状茎较细、较矮，球茎较小；栽培类型的叶状茎较粗、较高，球茎较大[3]。此外，荸荠按球茎淀粉含量可分为两种类型：水马蹄类型和红马蹄类型。水马蹄的淀粉含量高，适于熟食和提取淀粉；红马蹄肉质甜嫩，渣少，适于生食和加工罐藏[2]。武汉市蔬菜科学研究所开展了对荸荠资源的搜集与保护工作，成功收集并保存了105 种荸荠种质资源。其中野生资源10 份，品系5 份，地方品种90 份，地方品种中包括各地著名品种，如桂林荸荠、孝感荸荠、团风荸荠等[4]。荸荠数量较多的两个品种为桂林马蹄和水马蹄，桂林荸荠汁甜肉脆，常用来生食或做菜肴；而水马蹄的球茎较小，皮色偏黑、汁液较少、因其淀粉含量丰富可作为优质的淀粉来源[5]。品种多样性为荸荠的市场应用提供了广泛的选择，同时也增加了荸荠在不同领域的应用潜力。

荸荠的分布较为广泛，以热带和亚热带地区分布较多。《粤港澳大湾区药用植物图鉴》记载荸荠分布于中国、印度、印度尼西亚、日本、朝鲜半岛、马来西亚、缅甸、尼泊尔、巴基斯坦、巴布亚新几内亚、菲律宾、斯里兰卡、泰国、越南、澳大利亚、印度洋群岛、马达加斯加、太平洋群岛、非洲[6]。我国大部分地区均有种植荸荠，荸荠在我国主要分布于广东、福建、湖北、湖南、江苏、中国台湾、广西、海南[6]。据统计，荸荠在中国的年均产量超过100万 t[5]，而中国的荸荠产量占全世界95%以上，其中广西荸荠产量占我国70%以上[7]。荸荠不仅口感清脆、味道甘甜，而且富含多种营养成分和生物活性物质，具有清热、化痰、开胃等多重功效。近年来，随着对荸荠营养和功能成分研究的深入，以及加工技术的不断创新，荸荠的利用价值得到了进一步的提升。因此，本文系统综述荸荠的功效因子、生物活性功能以及产品开发研究进展，以期为荸荠的进一步研究提供一定的理论基础，也为荸荠新产品的开发提供依据。

1 荸荠的食用和药用价值

荸荠是一种药食同源的食材，富含多酚、黄酮等生物功效因子，具有抗氧化、抗炎、抗癌等生物活性。随着现代研究的深入，尤其是基于活性成分分离技术、代谢组学等技术的进步，荸荠的食用和药用价值正不断地被挖掘和利用。在食用价值方面，荸荠的营养价值较高（营养成分见表1），含有蛋白质、粗纤维、脂肪、碳水化合物、维生素等人体所必需的营养物质，以及钙、磷、铁等微量元素。刘义满等[8]强调了荸荠作为水生蔬菜的营养价值，指出其在不同品种和栽培条件下普遍具有高营养价值。同时，沈育伊等[9]指出会仙喀斯特湿地的野生荸荠不仅含有VB和VC，还富含氨基酸、微量元素。此外，刘临[10]测定了荸荠中Cd、Mn、Cu、Zn、Mg、Se 6 种微量元素含量，发现其Mg含量最高，为238.34 μg/g。这些丰富的荸荠营养物质具有较高的使用价值，对于荸荠产品的开发具有重要作用。

在药用价值方面，荸荠在传统中医中被广泛用于治疗多种疾病。《中药大辞典》中记载荸荠性味甘、微寒、无毒，有温中益气，清热开胃，消食化痰之功效。现代研究指出，荸荠具有抗肿瘤、抗菌、治疗呼吸道疾病、利肠通便和利尿排淋、治疗糖尿病、清热化痰、明目清音、消食醒酒等保健作用[11]。现代药理学研究证实了荸荠所具有的抗菌、抗氧化和抗肿瘤的活性，主要得益于其含有的多酚类、黄酮类、多糖类等活性成分。张方艳等[12]研究了荸荠多糖的抗氧化活性，认为其可作为天然抗氧化剂。此外，荸荠还能阻断亚硝胺的合成，清除亚硝胺前体，从而达到防癌目的。因此，荸荠在传统中医和现代医学中都显示出了独特的药用价值。

表 1 荸荠营养成分含量数据比较

Table 1 Comparison of nutrient contents of *E. dulcis* from different literature sources

序号	指标	数值[13-16]			
1	热量/kJ	—	—	238	—
2	水分含量/g	68	—	84.6	84.17
3	碳水化合物含量/g	21.8	12.9～21.8	—	—
4	蛋白质含量/g	1.5	0.8～1.5	0.9	1.02
5	脂肪含量/g	0.1	0.3	0.1	—
6	粗纤维含量/g	0.5	0.3	—	—
7	钙含量/mg	5	4	3	—
8	磷含量/mg	68	45	59	—
9	铁含量/mg	0.5	0.8	0.4	—
10	胡萝卜素含量/mg	0.01	少量	—	—
11	VB_1含量/mg	0.04	—	0.28	—
12	VB_2含量/mg	0.02	—	—	—
13	VC含量/mg	3	少量	5.3	—
14	尼克酸含量/mg	0.4	—		—
15	灰分含量/g	0.8	—	0.8	3.27
16	总膳食纤维含量/g	—	—	1.4	0.93
17	淀粉含量/g	—	—		10.61

注：—.未检出；表中数据是指100 g食用部分中的水平。

2 荸荠的功效因子挖掘

荸荠果肉是荸荠的主要食用部分，主要为多糖，占荸荠鲜果质量20%～25%的副产物荸荠皮常作为废弃物被丢弃，但研究指出荸荠的活性物质主要集中在荸荠皮[17]。实际上，荸荠皮是一种珍贵的天然资源，富含多种有益的营养功效因子，如多酚类化合物、多糖、皂苷等，应该加以研究利用开发功能食品。

2.1 荸荠的功效成分

2.1.1 多酚类

多酚类化合物是一类广泛存在于植物中的天然有机化合物，是植物在生长过程中产生的重要的次生代谢产物[18]。多酚类化合物在延缓衰老、降低慢性疾病（心血管、糖尿病、癌症等）的风险，且在保护神经等方面具有作用，对人体来说多酚类化合物具有潜在促进健康的作用[19]。提取荸荠皮多酚时，提取时间、乙醇体积分数、料液比和提取温度是影响荸荠多酚物质提取率的主要因素，且影响程度依次降低，采用超声辅助提取技术，在最优提取条件下荸荠皮多酚的提取率可达到5.35%[20]。You Yanli等[21]的研究结果显示，从新鲜荸荠果肉中分离并用高效液相色谱鉴定出3 种主要酚类物质为没食子儿茶素没食子酸酯、表儿茶素没食子酸酯、儿茶素没食子酸酯，这3 种化合物占荸荠总酚含量的60%以上，且荸荠酚类提取物具有较好的抗氧化活性。李行任等[22]从荸荠皮中分离出1 种新化合物（荸荠酚甲）和8 种已知酚类化合物（蔗糖酯类、木脂素、酚酸类），通过抗氧化实验明确了阿魏酸、咖啡酸等酚酸是荸荠皮抗氧化活性的关键活性成分。荸荠的多酚类物质主要存在于荸荠皮中，荸荠多酚的提取方面应探讨化合物协同作用及抗氧化通路（如核因子E2相关因子2/抗氧化反应元件通路）以及进一步进行体内实验和稳定性研究以评估实际应用价值。

2.1.2 黄酮类

黄酮类化合物是一类具有多种生理活性的重要天然产物，具有由两个芳香环（A环和B环）通过3 个碳原子连接形成的C6—C3—C6骨架结构[23]。汪建红[24]采用减压内部沸腾法使用乙醇溶剂从荸荠皮干粉中提取黄酮类物质并确定了其最优提取条件。Li Guanli等[25]使用超高效液相色谱-质谱联用鉴定出87 种黄酮类化合物，发现大型荸荠果皮中木犀草素、苜蓿素及其糖基化/酰基化衍生物（如*O*-己糖苷、丙二酰己糖苷）含量较高，小型荸荠果皮中则木犀草素及其衍生物含量较高。Ma Qinge等[26]使用紫外-可见分光光度、红外光谱、高分辨电喷雾电离质谱等技术解析提取的化合物的结构，发现了5 种新型新型查耳酮-黄酮酮异源二聚体、4 种新型黄酮类化合物和16 种已知的黄酮衍生物，这些黄酮类化合物具有神经与肝保护的潜力。Xu Liang等[27]采用酶辅助超声-微波协同提取荸荠皮黄酮，显著提高了其黄酮提取率，且分离得到16 种黄酮类物质。

荸荠去皮后会发生黄化，传统上认为黄化是不好的现象，会降低感官品质和质量，缩短货架期[28]，但李长乐等[29]的研究表明随着鲜切荸荠表面黄化发生，其黄酮类物质含量增加且抗氧化能力增强。Yuan Rong等[30]指出荸荠抗菌和降糖效果随着荸荠黄化的发生显著提高，且黄化程度最高时抗菌降糖效果最好。荸荠的黄化由苯丙烷代谢途径激活，导致黄酮类化合物（如柚皮素、圣草酚、槲皮素和杨梅素）显著积累，柚皮素和圣草酚是荸荠黄化过程中的早期产物，槲皮素和杨梅素是后期出现的。鲜切荸荠表面出现黄化可能不是负面的现象，荸荠黄化过程中伴随着总黄酮含量的增加，且抗氧化活性、抗菌和降糖活性也随之增强。这些研究可能改变鲜切荸荠出现的黄化现象需要控制的传统观念，为荸荠黄酮类功效因子的挖掘与利用提供一定的理论依据。

2.1.3 多糖类

多糖具有免疫调节、抗肿瘤、抗氧化和降血糖的活性功能，多糖的分子质量、单糖组成等因素决定其生物活性功能[31]。Zeng Fanke等[32]从荸荠皮中分离出了多糖WVP-1和WVP-2，其研究结果表明WVP-1和WVP-2在分子质量、单糖组成、分支结构、生物活性功能等方面都存在差异。WVP-2的分子质量（59.97 kDa）远大于WVP-1（3.16 kDa），WVP-1在单糖组成上以葡萄糖为主，而WVP-2主要含有阿拉伯糖和半乳糖，其结构更为复杂。此外，WVP-2具有相对较多的支链，并含有酯化羧酸的功能基团。WVP-2的抗氧化和免疫调节活性均优于WVP-1。多糖具有溶于水但不溶于有机溶剂的特性，一般是通过水提后再使用有机溶剂沉淀法将多糖分离出来。但传统方法耗时长、提取率低，目前在提取多糖方面使用了许多新兴技术，如微波辅助提取、超声波提取、高压辅助提取、脉冲电场辅助提取、酶辅助提取、超临界流体提取等技术[33]。荸荠多糖的提取技术较传统，得率较低，例如，张方艳等[12]采用水提法提取荸荠多糖，荸荠多糖的提取率为17.86%，而汪建红[34]通过Box-Behnken试验设计优化了减压内部沸腾法提取荸荠皮多糖的条件，多糖的理论预测得率为19.55%。因此，荸荠多糖的提取需利用新兴提取技术以提高其提取得率。

2.1.4 苯丙素类

苯丙素是以C6—C3芳香核骨架为核心结构的一类天然化合物的统称，包括苯丙烯类、苯丙醇、苯丙酸及其缩酯、香豆素、木脂素及木质素等，具有抗肿瘤、抗菌消炎、抗氧化、抗病毒等生物活性[35]。荸荠苯丙素类化合物在护肝、抗氧化、抗菌等领域具有潜力。魏荣锐等[36]从荸荠乙酸乙酯部位分离纯化出16 种苯丙素类化合物，并验证了化合物2（susaroyside A）和8（thoreliin B）的保肝活性。Nie Hui等[37]通过液相色谱-质谱联用技术分析发现，带皮蒸煮和带皮水煮处理的荸荠中苯丙素类化合物（如咖啡酸、对香豆醛）含量显著高于去皮样品，共鉴定57 种苯丙素类代谢物，其中6 种

仅在带皮处理组中检出。Li Guanli等[25]从荸荠皮中共鉴定出25 种苯丙素类化合物。目前关于荸荠中苯丙素的研究较少，有待进一步挖掘荸荠苯丙素资源。

2.1.5 皂苷类

皂苷是苷元为三萜或螺旋甾烷类化合物的一类糖苷，具有多种生物活性，可以激活哺乳动物的免疫系统，作为疫苗佐剂有着巨大的开发潜能[38]，根据其苷元结构，分为三萜皂苷和甾体皂苷。Gu Yipeng等[39-40]从荸荠皮分离出的皂苷主要为甾体皂苷，包括豆甾醇葡萄糖苷、菜油甾醇葡萄糖苷、胡萝卜苷3 种化合物，其中胡萝卜苷对α-葡萄糖苷酶（半抑制浓度（half maximal inhibitory concentration，IC_{50}）=5.67 mg/L）和α-淀粉酶（IC_{50}=60.43 μmol/L）的抑制活性最强，其含量也最高，占总提取物的0.10%。杨小梅等[41]采用超声波辅助冷凝回流法提取荸荠皮皂苷，确定了最佳提取条件，该提取工艺具有操作简便、重复性好的特点，是一种高效提取荸荠皮皂苷的方法。

2.1.6 甾醇类

植物甾醇是一种存在于植物细胞膜的四环三萜衍生物，常见的植物甾醇种类主要为β-谷甾醇、豆甾醇、菜油甾醇和菜籽甾醇[42]。荸荠中甾醇的提取研究较少，目前已知从荸荠中发现了3 种甾醇，分别是24-乙基胆甾-Δ^7-胆固醇、24-乙基胆固醇和24-乙基胆甾-$\Delta^{5,22}$-二烯醇[43]。卢敏等[44]采用超声波法从荸荠皮中提取甾醇并优化了提取工艺参数。因此，关于荸荠中甾醇类物质的挖掘和利用有待提升。

2.1.7 其他成分

除了多酚类、黄酮类、多糖类、苯丙素类、皂苷、甾醇类物质外，荸荠还含有色素、膳食纤维、荸荠英等成分。从荸荠皮中提取的色素主要是棕色素，荸荠皮棕色素是具有抗氧化功能的食品着色剂，属于功能性色素。林莉等[45]采用微波辅助水浸提法提取荸荠皮中的色素，确定了最佳提取参数。作为“第七类营养素”的膳食纤维，其摄入量与多种慢性疾病（如癌症、心血管疾病、肥胖症和2型糖尿病等）的发病率息息相关[46]。赵力超等[47]研究探讨了α-淀粉酶与NaOH溶液联合提取荸荠皮膳食纤维的工艺，荸荠皮膳食纤维的得率达到29.45%，产品纯度为93.30%，各项指标均优于传统化学提取法。然而，目前鲜有研究明确鉴定出荸荠英的具体成分。王明伟等[48]采用微波提取荸荠英，研究确定了最佳提取条件，同时证明了荸荠英对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的具有一定的抑制作用。当前，荸荠的功效成分研究主要集中于荸荠皮中，关于荸荠果肉功效成分的研究较少，其功效成分有待挖掘，特别是荸荠果肉膳食纤维方面。作为药食同源的荸荠，其功效成分（多酚类、多糖类、皂苷类等）与其生物活性功能存在明确的构效关系，建立高效的活性成分提取体系和基于靶向代谢组学与多组学联用技术的功效成分鉴定体系是开发荸荠功能食品的关键前提。荸荠功效成分仍需进一步分离、纯化和结构表征，这将为荸荠功效因子的深入研究和应用提供依据。

荸荠皮中功效因子的提取方法、制备工艺和提取得率见表2。

表 2 荸荠皮的功效成分

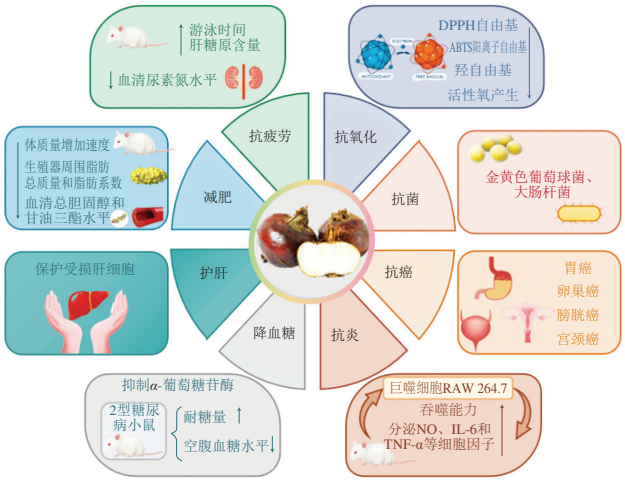
Table 2 Functional ingredients of *E. dulcis* peel

成分	提取技术或方法	最佳工艺	得率	参考文献
多酚类	超声辅助提取技术	温度80 ℃，乙醇体积分数80%，料液比1∶16，超声时间20 min	5.35%	[20]
黄酮类	减压内部沸腾法	液料比35∶1（mL/g），乙醇体积分数50%，温度70 ℃，提取时间30 min	（1.996±0.010）%	[24]
多糖类	减压内部沸腾法	乙醇体积分数80%，液料比20∶1（mL/g），pH 5，温度80 ℃，时间20 min	20.07%	[34]
色素	微波辅助水浸提法	料液比1∶9（g/mL），微波功率200 W，加热时间4 min	吸光度为0.930	[45]
膳食纤维	α-淀粉酶与NaOH溶液联合提取	α-淀粉酶用量0.2 mL/g，酶解时间1.5 h，NaOH溶液2%，NaOH溶液用量20 mL，碱解温度50 ℃，碱解时间1.5 h	29.45%	[47]
甾醇	超声波法	60%乙醇溶液作为溶剂，料液比1∶40（g/mL），提取时间14 min，超声波功率600 W	紫外吸光度为1.375	[44]
皂苷	超声波辅助冷凝回流法	使用甲醇作为溶剂，提取温度70 ℃，时间80 min，功率90 W，料液比1∶15（g/mL）	0.226%	[41]
荸荠英	微波	乙醇体积分数40%，料液比1∶37，微波功率320 W，微波时间4.5 min	—	[48]

注：—.无相关数据。

2.2 荸荠的生物活性功能

荸荠所具有的功效因子使其具备多种生物活性功能，图1展示了荸荠的生物活性功能。近年来，大量体内外实验研究表明荸荠具有丰富的生物活性功能，荸荠中的多酚、多糖、黄酮、皂苷、色素等具有较好的抗氧化、抗菌、抗癌、抗炎、降血糖等活性。除此之外，荸荠还具有潜在的护肝功能、减肥和抗疲劳作用。



DPPH. 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼（1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl）；ABTS. 2,2′-联氮双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)（2,2′-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid)）；IL-6.白细胞介素-6（interleukin-6）；TNF-α.肿瘤坏死因子-α（tumor necrosis factor-alpha）。

图 1 荸荠的生物活性功能

Fig. 1 Biological functions of *E. dulcis*

2.2.1 抗氧化功能

荨荠在抗氧化功能方面的研究主要集中于对DPPH自由基、ABTS阳离子自由基和羟自由基的清除，以及细胞抗氧化和抑制活性氧的产生并保护红细胞免受氧化损伤等方面，其主要起抗氧化功能的功效成分为多糖、多酚、色素。张方艳等[12]通过水提法提取的荨荠多糖对DPPH自由基和羟自由基清除率的IC_{50}分别为0.142 mg/mL和0.177 mg/mL。干建松[49]通过大孔树脂AB-8纯化了荨荠皮多酚，发现其具有较高的抗氧化活性。同时，荨荠皮多酚在高温下热稳定性较差，但在pH 3、光照和蔗糖存在的条件下相对稳定。曾凡珂等[50]通过细胞抗氧化及红细胞溶血实验评估了荨荠皮多糖WVP-1和WVP-2生物活性，结果表明两种多糖均能有效抑制活性氧的产生并保护红细胞免受氧化损伤。汪建红[51]对提取的荨荠皮色素进行稳定性实验，结果显示酸性条件降低了其稳定性，碱性条件有利于其稳定，同时具有很强的抗氧化能力，对羟自由基的清除率高达97.38%。这表明荨荠提取物具备作为一种稳定的天然抗氧化剂的应用潜力，但荨荠多酚在高温下的热稳定性、荨荠皮色素在酸性条件下的稳定性仍待改进，建议通过分子结构修饰（如多酚糖基化）或递送系统开发（如pH值响应型纳米脂质体）提升其环境适应性。

2.2.2 抗菌功能

荨荠提取物对金黄色葡萄球菌、大肠杆菌以及单核细胞增生李斯特氏菌具有抗菌活性。吴鹏[52]通过比较不同品种荨荠的营养指标和提取的抑菌活性物质，利用响应面法优化了超声波辅助提取工艺，显著提高了荨荠皮抑菌物质的提取率和稳定性。Zhan Ge等[53]从荨荠皮的甲醇提取物中分离出了乙酸乙酯组分、正丁醇组分和水组分，并评估了它们的抗菌特性，研究结果表明乙酸乙酯组分对3 种常见的食源性致病菌（金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、单核细胞增生李斯特氏菌）展示出了强抗菌活性，并且对金黄色葡萄球菌的杀菌效果具有浓度和时间依赖性。当前荨荠抗菌功能的研究主要是探讨其抑菌活性，对其具体作用机制尚未阐明，未来应研究其抗菌作用的分子机制。

2.2.3 抗癌功能

荨荠含有潜在的抗癌成分，上海肿瘤防治研究协作组在中药筛选过程中发现，荨荠制剂在动物模型中显示出显著的抑癌效果，《中医学报》新加坡版报道了荨荠在当地被用作食道癌辅助治疗的天然疗法[54]。王俊南等[55]研究表明荨荠皮的醇提物对人胃癌SGC7901细胞和人肝癌HepG2细胞的增殖具有显著抑制作用，尤其在400 μg/mL质量浓度条件下对SGC7901细胞的抑制率达到58.96%，而且醇提物的抗癌活性优于水提物，可能是因为其含有更多的多酚和黄酮化合物，但未展开任何抗癌机制或信号通路研究，荨荠提取物在抗胃癌、肝癌活性上需要进一步实验，如进行凋亡检测、通路蛋白表达分析等。徐小净[56]通过MTT法进行肿瘤细胞增殖实验，发现荨荠皮中的化合物B15对MGC-803、SKOV3、T24细胞显示出良好的抑制效果，并证实其作用机制主要通过诱导肿瘤细胞凋亡和影响线粒体功能实现。Baehaki等[57]研究3 种不同溶剂提取的荨荠提取物针对宫颈癌细胞的抗癌活性，发现正己烷提取物和乙酸乙酯提取物表现出较强的抗癌潜力。Zhan Ge等[58]从荨荠皮中提取出了木犀草素，其对人肺癌A549细胞的抑制作用的IC_{50}为59.60 μg/mL，同时，证实了其通过诱导G1期细胞增殖停滞和凋亡而实现。杨小梅等[59]研究发现荨荠皮中的皂苷能够抑制丙烯酰胺的形成，并阻断亚硝胺的合成。此外，Nie Hui等[60]从荨荠皮中分离得到了5 种化合物，发现其中4 种化合物能够抑制丙烯酰胺活性，这4 种化合物为七羟香豆素、益母草苷A、2-羟甲基-6-(5-羟基-2-甲氧基苯氧甲基)四氢吡喃-3,4,5-三醇、1,4-二羟基-3-甲氧基苯基-4-*O*-*β*-*D*-葡萄糖苷，它们的丙烯酰胺抑制率分别为30.24%、32.81%、30.53%、28.18%。荨荠中能够起抗癌功能的活性物质主要通过诱导细胞增殖停滞或凋亡以及影响线粒体功能实现，现阶段研究结果证明了荨荠皮提取物在抗癌研究中具有潜在应用价值。

2.2.4 抗炎作用

荨荠乙酸乙酯提取物可下调*TNF-α*、*iNOS*、*COX-2*的基因表达抑制炎症发生，而荨荠多糖可以促进细胞因子（NO、IL-6和TNF-α）的分泌从而实现免疫调节。因此，荨荠在开发新型抗炎药物和功能食品方面具有应用潜力。Yang Jinfeng等[61]研究发现300 μg/mL的荨荠乙酸乙酯提取物抗炎活性最高，能够显著降低NO的生成，并下调*TNF-α*、*iNOS*、*COX-2*基因的表达。Zeng Fanke等[32]研究表明荨荠皮中的多糖成分具有免疫调节活性，该成分通过促进巨噬细胞RAW 264.7的吞噬能力和分泌NO、IL-6和TNF-α等细胞因子，展现出潜在的抗炎作用，其研究结果还表明了荨荠皮多糖不仅能够有效抑制氧自由基的产生，保护细胞免受氧化损伤，还能通过调节免疫反应发挥抗炎效果。

2.2.5 降血糖作用

Baehaki等[57]通过采用乙醇、正己烷和乙酸乙酯3 种不同极性的溶剂对荸荠的功能成分进行了提取，研究结果表明，荸荠乙醇提取物功能成分提取率高于其他两种提取物，且乙醇提取物的抗糖尿病活性（抑制率）最大值为65.74%。Yang Xiaomei等[62]从荸荠皮中提取了胡萝卜苷，其可提高2型糖尿病小鼠的耐糖量、降低空腹血糖水平、缓解胰岛素抵抗、改善胰岛素敏感性。Yuan Rong等[30]从黄化荸荠中提取了黄酮类化合物，该化合物对α-葡萄糖苷酶和α-淀粉酶具有竞争性抑制作用，表现出了降糖能力，且鲜切荸荠组织黄化程度越高，降糖效果明显提高。Arif等[63]研究发现荸荠单独使用或与芫菁联用能降低血糖水平。Gu Yipeng等[39-40]从荸荠皮中提取分离出了3 种皂苷，分别为豆甾醇葡萄糖苷、菜油甾醇葡萄糖苷、胡萝卜苷，其对α-葡萄糖苷酶和α-淀粉酶均有抑制作用，其中胡萝卜苷的抑制效果最好。荸荠提取物通过抑制肠道α-葡萄糖苷酶/α-淀粉酶活性、改善胰岛素敏感性及调节肠道菌群稳态等发挥降血糖的作用，这为开发基于荸荠的功能性食品或天然来源降糖药物提供了理论依据。然而，其活性成分的分子互作机制、构效关系及临床转化效能仍需通过系统研究进一步阐明。

2.2.6 其他功能作用

除上述生物活性功能外，荸荠还具有潜在的护肝功能、减肥和抗疲劳作用，魏荣锐等[36]研究表明荸荠提取物对受损肝细胞具有显著的保护作用。高志明等[64-65]揭示了荸荠皮果醋具有显著的减肥和抗疲劳效果，显示出其作为潜在减肥食品和抗疲劳食品的应用前景。

3 荸荠产品开发及应用

我国食品体系中，功能性食品、保健食品与普通食品具有明确的分类特征：普通食品以满足基础营养和感官需求为主，不宣称生理调节功能；保健食品作为法定概念，需注册/备案管理，具有特定保健功能或营养补充作用，适用于特定人群；功能性食品则涵盖更广，既包含保健食品，也包含具有特定生理调节功能的普通食品，强调在基础营养之外的健康促进作用[66]。虽然荸荠已被开发成丰富多样的产品，但主要集中于普通食品，在保健食品和功能性食品的开发及应用较少。荸荠主要应用于荸荠淀粉制品、休闲食品（荸荠果脯、罐头、脆片和咀嚼片）、糕点类（马蹄糕）、饮料和发酵类（荸荠果奶、果醋和酸奶）等（图2）。因此，荸荠在产品开发和应用方面具有广阔的发展前景，特别是在功能性食品方面。



图 2 荸荠产品开发及应用

Fig. 2 Development and application of *E. dulcis* products

3.1 淀粉制品

荸荠块茎中淀粉含量较高，直链淀粉相对含量达22%～27%[67]，然而其热稳定性差和易于老化的特性限制了其应用。目前常用物理、化学、酶法和物理化学方法结合对荸荠进行改性，以扩大荸荠淀粉的实际应用范围。闻萌等[68]评估了超高压处理对荸荠淀粉的物理化学特性、结构和体外消化性的影响，研究发现400 MPa高压处理后荸荠淀粉凝胶强度、硬度和胶着性显著提升，且超高压处理能降低荸荠淀粉的快速消化淀粉含量，并增加慢消化淀粉含量。抗性淀粉是不溶于水的膳食纤维，它不能被人体正常肠道消化吸收[69]，具有调节血糖水平、调控体质量、保护肠道等有益于人体健康的功能特性[70]。关于荸荠抗性淀粉已有一定的研究，但对于荸荠抗性淀粉功能特性的研究较少。吕艺扬[71]采用响应面法优化了羧甲基醚化法制备荸荠抗性淀粉，其产率为75.85%。蔡文等[72]利用压热辅助酶解法制备了荸荠抗性淀粉，其产率为16.32%，且制备的抗性淀粉中直链淀粉质量分数为31.78%。刘云芬等[73]确定了微波-压热法制备荸荠抗性淀粉的最佳工艺，其产率为16.85%。目前，对于荸荠抗性淀粉的研究主要集中在荸荠淀粉改性技术，荸荠抗性淀粉的开发能提高荸荠淀粉产品的附加值，其在未来具有巨大的发展潜力。

3.2 休闲食品

休闲食品深受消费者喜爱，人们要求其既能满足消费者对美味、营养与健康的追求，也要求其产品具有创新性。荸荠作为休闲食品主要有果脯、罐头、脆片等，这些产品的开发有利于提高荸荠的综合利用，其生产过程应注重保留荸荠的营养价值，可将荸荠皮提取物添加进其休闲食品中，提高荸荠的附加值。

3.2.1 荸荠果脯

李殿鑫等[74]对荸荠果脯的传统加工工艺进行了优化，该工艺能有效生产出外观完整、口感细腻、风味独特且含糖量适中的荸荠果脯。张洁等[75]通过正交试验确立了荸荠蜜饯的最佳加工工艺参数，且感官品质影响的主次顺序为糖煮时间＞糖渍时间＞糖煮温度。

3.2.2 荸荠罐头

李官丽等[76]优化了即食荸荠软罐头的加工工艺，制备的产品具有色泽洁白、口感清脆、硬度适中，以及浓郁的荸荠风味。张森旺等[77]优化了荸荠排骨汤罐头的加工工艺，确定了最佳配料比例为食盐0.5%、鸡精0.35%、味精0.1%，原料配比为排骨18%、荸荠12%；杀菌条件为121 ℃、45 min。

3.2.3 荸荠脆片

张梅等[78]对荸荠脆片的加工工艺进行了优化，在最佳工艺条件下生产的荸荠脆片，口感、色泽及整体品质均达到优良水平。谢冬娣等[79]研究了一种结合微波膨化和红外干燥技术的荸荠脆片加工方法，确定了最佳配方，成功制备出膨化率高、脆度适宜、外观优良的荸荠脆片。

3.2.4 荸荠咀嚼片

夏志楷等[80]制备出了荸荠皮基料，并进一步开发了荸荠皮咀嚼片，研究确定了咀嚼片的最佳配方为荸荠皮基料55%、木糖醇10%、羟丙基甲基纤维素17.5%、微晶纤维素5%、硬脂酸镁1.8%，其余为填充剂。产品具有棕红色外观和荸荠特有的清香，同时含有多种功能性成分。该咀嚼片脂肪含量低，稳定性好，保质期较长。

3.3 糕点类

马蹄糕作为一种传统的中式糕点，不仅承载着丰富的文化和历史，其独特的风味和营养价值也受到人们的喜爱和推崇。叶若松等[81]以白莲、荸荠粉为原料，确定了白莲马蹄糕的最佳配方，所得产品质地均匀，弹性良好，甜度适宜。李淼等[82]探究了中药汁、梨汁、柠檬汁及荸荠粉添加量对马蹄糕品质的影响，确定了最佳配方，按最佳配方制作的马蹄糕展现出稳定的性状、均匀的颜色和良好的口感风味。刘世军等[83]以大枣、椰浆、荸荠粉为主要原料，确定了大枣椰浆马蹄糕的最佳配方，所得产品色泽良好、弹性佳、甜度适宜。李蕾[84]以新鲜荸荠为主料，搭配蜂蜜、柠檬酸、琼脂和卡拉胶等辅料，制作出的马蹄糕色泽乳白，质地半透明，软硬适中，无气泡，有弹性和韧性，酸甜爽口，口感细腻。

3.4 饮料类产品

荸荠水分含量高，且荸荠汁液甘甜清新，荸荠饮料成为荸荠加工领域中重要制品之一。曾劲等[85]以马蹄果肉、白砂糖、浓缩甘蔗汁为原料，确定了马蹄露的制备方法，制得马蹄露具有良好的稳定性、沉淀结块较少。康超等[86]以荸荠、百香果及脱脂乳粉作为原料，确定了荸荠果奶的最佳配方。张建萍等[87]以荸荠汁、银杏汁和花生乳作为原料，确定了荸荠银杏花生乳复合饮料的最佳配方。张奕涛等[7]开发了一种新型速溶荸荠脆脆粉产品。该荸荠脆脆粉具有细腻的口感、良好的悬浮稳定性、浓郁的风味和脆感，以及优良的糊化和流变性能，展现出显著的市场潜力。

3.5 发酵型产品

荸荠发酵型产品主要包括荸荠果酒、荸荠果醋、荸荠酸奶等，其中荸荠酸奶的相关研究最为丰富。陈程[88]确定了荸荠酒最适酿酒酵母为AWRI350酵母，最佳原料处理方式为荸荠带皮发酵，最适的澄清方式为明胶澄清，最佳陈酿方式为超声陈酿，最佳发酵工艺为发酵温度28 ℃，起始糖度22.2 °Brix，起始pH值4.56，酵母添加量0.05%，SO_2添加量0.04 mg/g，料水比1∶2.5。果醋是一种通过水果或其副产品发酵制成的健康饮品，具有保健功效，研究表明，苹果醋具有保护肾脏的作用，而石榴果醋能增强胰岛素敏感性，改善糖脂代谢[89]。丁兴华[90]利用响应面法优化荸荠皮果醋醋酸发酵的最适宜工艺条件，最终果醋酸度达到0.045 g/mL以上。秦璇璇等[91]以荸荠果浆、纯牛奶、发酵菌剂和蔗糖为原料，确定了最佳工艺条件下制得的产品具有细腻的组织和柔和的口感，以及独特的荸荠风味。刘海燕等[92]以鲜牛奶、荸荠果粒和沙棘果汁为原料制备荸荠沙棘复合酸奶，确定了最佳工艺参数。高宗露[93]以荸荠皮为原料，添加甘草、陈皮、白茅根、淡竹叶等中草药浸提液，开发一款荸荠皮复合中草药发酵饮料，口感酸甜适中，香气独特。黑荸荠是通过变温发酵技术对新鲜荸荠进行熟化加工，这一工艺不仅保留了荸荠原有的营养成分，还显著增加了多酚类物质的含量，并引入了新的功能成分——类黑精，从而增强了产品的抗氧化、抗肿瘤和抗菌等功能，魏连会等[94]研究表明随着荸荠熟化过程的进行，其营养成分含量显著增加。

3.6 荸荠创新应用

荸荠具有丰富的生物功效因子，开发荸荠产品创新应用具有广阔的市场前景。创新应用使荸荠延伸出高钙食品、调味品、天然保鲜剂等新产品方向。目前荸荠在创新型应用方面有高钙荸荠的开发、荸荠香菇酱以及荸荠皮抑菌物质开发为鸡肉保鲜剂。

3.6.1 高钙荸荠

李晗等[95]研究了真空浸渍法提高鲜荸荠中钙含量的工艺条件，确定了最佳浸渍条件下鲜荸荠的钙含量显著提高至64.41 mg/100 g，该研究为鲜荸荠钙强化提供了一种新思路。

3.6.2 荸荠酱

吕明[96]优化了荸荠在香菇酱中的应用及其预处理工艺，确定了荸荠的最佳热烫条件和荸荠香菇复合酱的最佳配方，该配方制得的酱料味道适口、滋味协调、香气浓郁。

3.6.3 荸荠保鲜剂

荸荠皮的抑菌特性为开发新型食品保鲜方法提供了潜在的应用前景。李艳青等[97]采用荸荠皮提取物结合茶多酚、壳聚糖和乳酸链球菌素作为保鲜原料，并确定了最佳复合保鲜条件，经该保鲜技术处理的冷鲜鸡肉在营养指标上与新鲜鸡肉相比无显著差异（$P>0.05$），感官评价良好。

荸荠相关产品的加工技术和条件、产品特性见表3。

表 3 荸荠相关产品的加工条件及特性

Table 3 Processing conditions and characteristics of *E. dulcis*-based products

分类	产品	加工技术和条件	产品特性	参考文献
淀粉制品	荸荠淀粉	超高压处理（200～600 MPa）持续20 min	随着压力的升高，荸荠淀粉的溶解性、膨胀力和黏度显著下降	[68]
	荸荠抗性淀粉	羧甲基醚化法，荸荠淀粉乳质量分数12%，醚化剂用量120%，醚化温度43 ℃	产率为75.85%，具有优良的持水性及颗粒完整性	[71]
		压热辅助酶解法，淀粉乳质量分数25.56%，酶添加量15.87 ASPU/g干质量，酶处理时间35.75 h	产率为16.32%，具有更高的直链淀粉质量分数（31.78%），结晶度提升	[72]
		微波-压热法，淀粉乳质量分数23%，微波时间74 s，121 ℃压热40 min，4 ℃老化12 h	产率为16.85%，溶解度、膨润度和冻融性方面均优于原淀粉，但持水性略低	[73]
休闲食品	荸荠果脯	清洗去芽，热烫2 min，−40 ℃冷冻12 h后冻干6 h，40%蔗糖煮4 min，浸糖8 h，然后在含60%蔗糖、0.5%柠檬酸、0.05% CMC-Na的溶液中煮4 min，浸糖10 h，沥干，50 ℃热风烘干10 h	外观完整、口感脆嫩、风味独特且含糖量适宜	[74]
	荸荠罐头	糖煮时间12 min，温度90 ℃，糖渍时间60 min	色泽均匀，呈乳白色，软而微脆，清甜爽口，不粘牙	[75]
		蒸制7 min，护色25 min，复合护色剂（柠檬酸0.5%、氯化钠0.9%、抗坏血酸0.20%），并在115 ℃灭菌8 min	色泽洁白、口感清脆、硬度适中，浓郁的荸荠风味	[76]
		食盐0.5%、鸡精0.35%、味精0.1%；原料配比：排骨18%、荸荠12%；杀菌条件：121 ℃ 45 min	汤体较清、肉质软硬适中、荸荠较脆有沙质感、汤色正常、香气浓郁、滋味很好	[77]
	荸荠脆片	水粉比例1∶2.5，烘焙温度53 ℃，烘焙时间17 min	口感酥脆、色泽均匀、品质优良	[78]
		奶粉20%、白砂糖5%、食盐1%、糯米粉10%，红外预干燥至含水量25%的条件下，采用480 W微波功率和110 s膨化时间	膨化率高、脆度适宜、外观优良	[79]
	荸荠皮咀嚼片	荸荠皮基料55%、木糖醇10%、羟丙基甲基纤维素17.5%、微晶纤维素5%、硬脂酸镁1.8%	棕红色外观、荸荠清香、脂肪含量低，稳定性好，保质期较长	[80]
糕点类	白莲马蹄糕	荸荠粉14.2%、莲子乳19.5%、糖4%，蒸煮时间15.5 min	质地均匀，弹性良好，甜度适宜	[81]
	药食同源马蹄糕	中药汁40 mL（由灰树花、山药、茯苓、黄芪、藕、葛根、党参、甘草组成，总加水量1 000 mL，经浸泡和煎煮）、梨汁70 mL、柠檬汁25 mL、荸荠粉35 g	稳定的性状、均匀的颜色和良好的口感风味	[82]
	大枣椰浆马蹄糕	大枣汤与荸荠粉比例3∶1，椰浆与荸荠粉比例3∶1，蒸制时间8 min	色泽良好、弹性佳、甜度适宜	[83]
	马蹄糕	100 mL荸荠汁（荸荠∶水＝1∶1）中，添加混合胶2.0 g、柠檬酸0.15 g、蜂蜜16 g	乳白色、半透明，软硬适中，无气泡，有弹性和韧性，酸甜爽口，口感细腻	[84]
饮料类产品	马蹄露	先用白砂糖和浓缩甘蔗汁熬制糖水，再将马蹄粉、*D*-异抗坏血酸钠、增稠剂、稳定性和马蹄肉加入糖水中，均质3 min	减少了马蹄露沉淀结块、稳定性良好	[85]
	荸荠果奶	荸荠汁33.3%、百香果汁3.4%、脱脂奶粉4.1%和白砂糖8.1%	感官评定得分为91 分，口感优良、色泽怡人、风味独特、质量稳定	[86]
	荸荠银杏花生乳饮料	荸荠汁18 mL、花生汁18 mL、银杏汁8 mL、白砂糖6%，并添加0.1%柠檬酸及2% CMC-Na作为稳定剂	乳白色，酸甜适中，口感良好，稳定性良好，含有4.62%的蛋白质和2.21%的脂肪，固形物质量分数为15.32%	[87]
	新型速溶荸荠脆脆粉	荸荠淀粉33.27%、30～40目荸荠全粉37.33%、白砂糖12.53%、麦芽糊精10.15%、*β*-环状糊精6.71%	细腻口感、良好悬浮稳定性、浓郁风味和脆感、优良糊化和流变性能	[7]
	荸荠果酒	通过酶解、液化和糖化、发酵、澄清、陈酿、调配等工艺制备荸荠果酒	独特的荸荠风味、口感甘甜、质地酥脆、具有抗氧化性能、低温下稳定性良好、需避光保存	[88]
发酵型产品	荸荠皮果醋	起始乙醇体积分数为7.6%，醋酸菌的接种量为10.9%，醋酸菌的适宜生长温度为32 ℃	果醋酸度达到0.045 g/mL以上	[90]
		荸荠皮果醋添加量13%、蔗糖添加量10%、蜂蜜添加量12%、荸荠皮提取液添加20%，并确定了杀菌条件为100 ℃保持5 min	甜酸适宜，口感厚实，风味浓郁	[98]
	荸荠酸奶	发酵时间6 h，糖添加量10%，荸荠添加量10%，发酵温度40 ℃	细腻的组织和柔和的口感，以及独特的荸荠风味	[91]
	荸荠沙棘复合酸奶	发酵剂接种量0.12%，加糖量9%，荸荠果粒和沙棘果汁各添加4%，发酵时间5 h	酸甜度适中，色泽悦人，香味浓郁，凝块状态佳，果粒量合适	[92]
	荸荠皮复合中草药发酵饮料	甘草、陈皮、白茅根、淡竹叶浸提液的最佳配比为1∶4∶6∶6，并与荸荠皮基料以1∶6比例混合，甜味料添加量为10%，选用植物乳植杆菌117、58、S7等比例混合发酵，乳酸菌接种量2%，发酵温度37 ℃，时间20 h	口感酸甜适中，香气独特，且具有一定的功能特性	[93]
荸荠创新应用	黑荸荠	变温发酵技术对新鲜荸荠进行熟化加工	保留荸荠原有的营养成分，显著增加多酚类物质的含量，引入新的功能成分类黑精	[94]
	高钙荸荠	真空浸渍法提高鲜荸荠中钙含量的工艺条件：温度40 ℃，真空度49 kPa，乳酸钙质量分数6.0%，时间20 min	钙含量显著提高至64.41 mg/100 g，增加了13.64 倍	[95]
	荸荠香菇复合酱	豆瓣酱12.5 g、香菇30 g、荸荠25 g	味道适口、滋味协调、香气浓郁	[96]
	荸荠保鲜剂	荸荠皮提取物0.40%、茶多酚0.25%、壳聚糖2.00%、乳酸链球菌素0.20%，配合无氧气调包装	营养指标上与新鲜鸡肉相比无显著差异，感官接受性良好	[97]

注：CMC-Na.羧甲基纤维素钠（sodium carboxymethyl cellulose）。

4 结 语

荸荠作为药食同源的食材，营养价值高，是一种具有特殊功能特性的食物资源。它含有多酚、多糖等多种生物活性物质，具有抗氧化、抗菌、抗炎、降血糖和抗癌等多种生物活性，因此荸荠在功能性食品和医药领域局域具有开发潜力。然而，荸荠在当前的研究中仍存在以下局限性：1）荸荠功效因子仍有待深入挖掘，其生物功能尚缺乏系统研究，功效因子的构效关系和作用机理尚未被充分探索，尤其是荸荠英的鉴定和功能评价。荸荠功效因子的高效提取和鉴定及作用机理等将会成为荸荠的研究重点。2）荸荠在功效因子挖掘中较多使用的是传统技术方法，因此需结合多组学分析、分子结构修饰等前沿技术构建高效的成分提取、鉴定技术以及提高功效因子的稳定性等特性。3）针对荸荠产品缺乏统一生产标准且功能性产品开发不足的问题，未来需要统一生产标准并开发营养强化型保健功能荸荠产品，以适应国内外市场需求和充分利用荸荠资源。

参考文献：

[1] 徐媛. “荸荠”名称的历时演变和地域分布[J]. 华中学术, 2018(4): 150-159.

[2] 张德纯. 广东乐昌马蹄[J]. 中国蔬菜, 2020(3): 50. DOI:10.19928/j.cnki.1000-6346.2020.03.011.

[3] 谢玲玲, 刘峰, 弭宝彬, 等. 湖南省水生蔬菜资源种类及分布现状调查与分析[J]. 农学学报, 2020, 10(7): 69-75. DOI:10.11923/j.issn.2095-4050.cjas19030031.

[4] 李峰, 柯卫东, 刘义满. 荸荠研究进展[J]. 长江蔬菜, 2006(8): 39-43. DOI:10.3865/j.issn.1001-3547.2006.08.030.

[5] 曾凡珂. 荸荠皮多糖分离纯化、结构鉴定及生物活性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021. DOI:10.27151/d.cnki.ghnlu.2021.001406.

[6] 金红, 唐旭东. 粤港澳大湾区药用植物图鉴[M]. 北京: 科学出版社, 2020.

[7] 张奕涛, 谢荣华, 谭德馨, 等. 速溶型马蹄脆脆粉配方优化及性能分析[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(11): 125-135.

[8] 刘义满, 魏玉翔, 李静, 等. 水生蔬菜答农民问(62-1): 荸荠有哪些利用价值?[J]. 长江蔬菜, 2023(11): 46-49.

[9] 沈育伊, 张德楠, 王新桂, 等. 会仙喀斯特湿地野生荸荠微量元素及营养成分分析[J]. 微量元素与健康研究, 2018, 35(1): 42-45.

[10] 刘临. 分光光度法测定荸荠中的微量元素含量[J]. 宜春学院学报, 2019, 41(9): 41-43.

[11] 李红柳, 赵冲, 王秋菊, 等. 荸荠的营养价值及清水荸荠罐头加工技术[J]. 轻工科技, 2025, 41(1): 48-50; 72.

[12] 张方艳, 张雯雯, 朱桂兰, 等. 水提法提取荸荠多糖及其体外抗氧化活性研究[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(1): 104-110. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.026852.

[13] 邢湘臣. “江南人参”: 荸荠[J]. 蔬菜, 2002(5): 40. DOI:10.3969/j.issn.1001-8336.2002.05.033.

[14] 高志明, 罗杨合, 陈振林. 荸荠皮的加工利用研究进展[J]. 食品安全导刊, 2015(27): 141. DOI:10.16043/j.cnki.cfs.2015.27.088.

[15] 王秀莉, 于雪荣, 刘柏林, 等. 芜湖市9 种水生蔬菜营养成分分析比较[J]. 海峡预防医学杂志, 2022, 28(1): 71-74.

[16] 张国真, 何建军, 姚晓玲, 等. 冷藏和热处理对荸荠多酚氧化酶活性和多酚含量的影响[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(19): 4772-4775. DOI:10.14088/j.cnki.issn0439-8114.2013.19.068.

[17] 伍淑婕, 黄双全, 聂辉, 等. 荸荠皮活性成分提取分离研究进展[J]. 食品科技, 2018, 43(10): 289-293. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2018.10.049.

[18] CHEN X N, LAN W Q, XIE J. Natural phenolic compounds: antimicrobial properties, antimicrobial mechanisms, and potential utilization in the preservation of aquatic products[J]. Food Chemistry, 2024, 440: 138198. DOI:10.1016/j.foodchem.2023.138198.

[19] WATKINS B A, MITCHELL A E, SHIN A C, et al. Dietary flavonoid actions on senescence, aging, and applications for health[J]. The Journal of Nutritional Biochemistry, 2025, 139: 109862. DOI:10.1016/j.jnutbio.2025.109862.

[20] 陈秋娟, 梁琼芳. 超声波辅助提取马蹄皮多酚物质的工艺[J]. 食品研究与开发, 2014, 35(9): 47-49. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2014.09.012.

[21] YOU Y L, DUAN X W, WEI X Y, et al. Identification of major phenolic compounds of Chinese water chestnut and their antioxidant activity[J]. Molecules, 2007, 12(4): 842-852. DOI:10.3390/12040842.

[22] 李行任, 罗杨合, 何隽, 等. 荸荠皮酚性成分及其抗氧化活性研究[J]. 天然产物研究与开发, 2013, 25(12): 1615-1620. DOI:10.16333/j.1001-6880.2013.12.010.

[23] 杜一铭, 柳书玉, 任子怡, 等. 黄酮类化合物护眼功能的研究进展[J/OL]. 食品工业科技, 1-13[2025-07-03]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025010060.

[24] 汪建红. 减压内部沸腾法提取荸荠皮黄酮的工艺优化[J]. 食品工业科技, 2019, 40(23): 172-176. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2019.23.028.

[25] LI G L, HUANG S Q, LI X C, et al. Identification of compounds from chufa (*Eleocharis dulcis*) peels by widely targeted metabolomics[J]. Food Science & Nutrition, 2023, 11(1): 545-554. DOI:10.1002/fsn3.3085.

[26] MA Q G, WEI R R, SANG Z P, et al. Structural characterization, neuroprotective and hepatoprotective activities of flavonoids from the bulbs of *Heleocharis dulcis*[J]. Bioorganic Chemistry, 2020, 96: 103630. DOI:10.1016/j.bioorg.2020.103630.

[27] XU L, HE W J, LU M, et al. Enzyme-assisted ultrasonic-microwave synergistic extraction and UPLC-QTOF-MS analysis of flavonoids from Chinese water chestnut peels[J]. Industrial Crops and Products, 2018, 117: 179-186. DOI:10.1016/j.indcrop.2018.03.012.

[28] JIANG L X, SHI Y M, LI M T, et al. Controlled atmosphere storage of krypton, xenon and oxygen inhibits yellowing and maintains quality of fresh peeled water chestnuts (*Eleocharis dulcis*)[J]. Postharvest Biology and Technology, 2024, 210: 112745. DOI:10.1016/j.postharvbio.2023.112745.

[29] 李长乐, 潘永贵. 鲜切荸荠表面黄化过程中黄酮类物质和抗氧化活性变化[J]. 食品科学, 2018, 39(19): 212-217. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201819033.

[30] YUAN R, LI C L, PAN Y G, et al. Antibacterial and hypoglycemic activity of flavonoids in etiolated tissues from fresh-cut Chinese water-chestnuts (*Eleocharis tuberosa*)[J]. Scientia Horticulturae, 2022, 297: 110925. DOI:10.1016/j.scienta.2022.110925.

[31] ZHANG H, CUI H T, XIE F, et al. Tamarind seeds polysaccharide: structure, properties, health benefits, modification and food applications[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 155: 110222. DOI:10.1016/j.foodhyd.2024.110222.

[32] ZENG F K, CHEN W B, HE P, et al. Structural characterization of polysaccharides with potential antioxidant and immunomodulatory

activities from Chinese water chestnut peels[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 246: 116551. DOI:10.1016/j.carbpol.2020.116551.

[33] WANG T T, ZHU B J, ZHAO J, et al. Research progress in methods of acquisition, structure elucidation, and quality control of Chinese herbal polysaccharides[J]. Chinese Journal of Natural Medicines, 2025, 23(2): 143-157. DOI:10.1016/S1875-5364(25)60819-3.

[34] 汪建红. Box-Behnken试验设计优化内部沸腾法提取荸荠皮多糖工艺[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(10): 115-119. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2019.10.021.

[35] 李凯薇, 庄以彬, 唐俊, 等. 植物苯丙素类天然产物生物合成研究进展[J]. 中国科学: 生命科学, 2025, 55(4): 647-660.

[36] 魏荣锐, 马勤阁, 桑志培, 等. 荸荠中苯丙素类化学成分及其保肝活性研究[J]. 中国中药杂志, 2021, 46(6): 1430-1437. DOI:10.19540/j.cnki.cjcmm.20200821.201.

[37] NIE H, CHEN H C, LI G L, et al. Comparison of flavonoids and phenylpropanoids compounds in Chinese water chestnut processed with different methods[J]. Food Chemistry, 2021, 335: 127662. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.127662.

[38] SILVA M, KATO Y, MELO M B, et al. A particulate saponin/TLR agonist vaccine adjuvant alters lymph flow and modulates adaptive immunity[J]. Science Immunology, 2021, 6(66): eabf1152. DOI:10.1126/sciimmunol.abf1152.

[39] GU Y P, YANG X M, SHANG C J, et al. Inhibition and interactions of alpha-amylase by daucosterol from the peel of Chinese water chestnut (*Eleocharis dulcis*)[J]. Food & Function, 2021, 12(18): 8411-8424. DOI:10.1039/D1FO00887K.

[40] GU Y P, YANG X M, SHANG C J, et al. Inhibitory properties of saponin from *Eleocharis dulcis* peel against α-glucosidase[J]. RSC Advances, 2021, 11(25): 15400-15409. DOI:10.1039/d1ra02198b.

[41] 杨小梅, 谷毅鹏, 陈伟玲, 等. 响应面法优化荸荠皮皂苷的提取工艺[J]. 食品工业, 2019, 40(10): 30-34.

[42] GAN C F, LIU Q, ZHANG Y, et al. A novel phytosterols delivery system based on sodium caseinate-pectin soluble complexes: improving stability and bioaccessibility[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 124: 107295. DOI:10.1016/j.foodhyd.2021.107295.

[43] ZHANG Y, XU H, HU Z B, et al. *Eleocharis dulcis* corm: phytochemicals, health benefits, processing and food products[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 102(1): 19-40. DOI:10.1002/jsfa.11508.

[44] 卢敏, 杨志刚, 罗兵, 等. 超声波法辅助提取荸荠块茎皮中甾醇的工艺研究[J]. 湖北农业科学, 2015, 54(12): 2987-2991. DOI:10.14088/j.cnki.issn0439-8114.2015.12.047.

[45] 林莉, 袁玮, 苏文婷, 等. 响应面优化微波辅助提取荸荠皮色素的工艺研究[J]. 凯里学院学报, 2021, 39(6): 27-34.

[46] YE S X, SHAH B R, LI J, et al. A critical review on interplay between dietary fibers and gut microbiota[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 124: 237-249. DOI:10.1016/j.tifs.2022.04.010.

[47] 赵力超, 毛新, 黄利华, 等. 荸荠皮膳食纤维酶化学法提取工艺研究[J]. 食品工业科技, 2009, 30(11): 244-246; 250.

[48] 王明伟, 彭周凌, 严碧云. 响应面法优化马蹄皮中荸荠英的微波提取工艺研究[J]. 科学技术创新, 2018(28): 142-144.

[49] 干建松. 荸荠皮多酚的纯化与抗氧化性、稳定性研究[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(17): 27-33.

[50] 曾凡珂, 潘蕾蔓, 张祎, 等. 荸荠皮多糖的理化性质及抗氧化活性[J]. 现代食品科技, 2022, 38(3): 82-88; 81. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.3.0581.

[51] 汪建红. 荸荠皮色素提取新方法及其稳定性、抗氧化性研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(13): 104-110. DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2021.13.016.

[52] 吴鹏. 基于电化学传感器方法对荸荠乙醇提取物抑菌作用研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2018: 24-31.

[53] ZHAN G, PAN L Q, MAO S B, et al. Study on antibacterial properties and major bioactive constituents of Chinese water chestnut (*Eleocharis dulcis*) peels extracts/fractions[J]. European Food Research and Technology, 2014, 238(5): 789-796. DOI:10.1007/s00217-013-2151-2.

[54] 张怡, 胡月珍, 李小根. 荸荠营养成分及保健价值的研究[J]. 科技创业家, 2013(6): 198.

[55] 王俊南, 胡晓潇, 单恬恬, 等. 水生蔬菜提取物抑制人肝癌HepG2细胞和人胃癌SGC7901细胞的增殖[J]. 现代食品科技, 2020, 36(9): 9-16; 87. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.9.0068.

[56] 徐小净. 荸荠皮和浒苔的化学成分及其抗肿瘤、抗菌活性研究[D]. 南京: 东南大学, 2019. DOI:10.27014/d.cnki.gdnau.2019.001226.

[57] BAEHAKI A, WIDIASTUTI I, LESTARI S, et al. Antidiabetic and anticancer activity of Chinese water chestnut (*Eleocharis dulcis*) extract with multistage extraction[J]. Journal of Advanced Pharmaceutical Technology & Research, 2021, 12(1): 40-44. DOI:10.4103/japtr.JAPTR_67_20.

[58] ZHAN G, PAN L Q, TU K, et al. Antitumor, antioxidant, and nitrite scavenging effects of Chinese water chestnut (*Eleocharis dulcis*) peel flavonoids[J]. Journal of Food Science, 2016, 81(10): H2578-H2586. DOI:10.1111/1750-3841.13434.

[59] 杨小梅, 周文红, 陈伟玲, 等. 荸荠皮皂苷对亚硝酸盐及亚硝胺合成的影响[J]. 食品工业, 2020, 41(10): 181-185.

[60] NIE H, HUANG S Q, LI X C, et al. Identification of compounds from chufa (*Eleocharis dulcis*) peels with inhibitory acrylamide formation activity[J]. Revista Brasileira de Farmacognosia, 2019, 29(4): 483-487. DOI:10.1016/j.bjp.2018.11.002.

[61] YANG J F, TANG X X, SHUAI L, et al. Chemical characterization, antioxidant properties and anti-inflammatory activity of Chinese water chestnut extracts[J]. ScienceAsia, 2020, 46(2): 151. DOI:10.2306/scienceasia1513-1874.2020.026.

[62] YANG X M, GU Y P, LIU H Z, et al. Modulation of the gut microbiota alleviates insulin resistance in type 2 diabetic mice by daucosterol from *Eleocharis dulcis* peel[J]. Journal of Functional Foods, 2024, 114: 106092. DOI:10.1016/j.jff.2024.106092.

[63] ARIF A, GILLANI S R, HUSSAIN H. *Eleocharis dulcis* individually and in combination with *Brassica rapa* as a best cure of diabetes with zero side effects[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(9): e16444. DOI:10.1111/jfpp.16444.

[64] 高志明, 罗杨合, 陈振林. 荸荠皮果醋减肥效果研究[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(27): 216-217; 237. DOI:10.13989/j.cnki.0517-6611.2015.27.079.

[65] 高志明, 罗杨合, 陈振林. 荸荠皮果醋抗疲劳功能研究[J]. 中国调味品, 2016, 41(6): 153-155. DOI:10.3969/j.issn.1000-9973.2016.06.035.

[66] 李京虎, 张逸璇, 高飞, 等. 功能性食品在我国食品分类中的定位及思考[J]. 中国农业科技导报, 2024, 26(12): 7-17. DOI:10.13304/j.nykjdb.2024.0819.

[67] GUL K, RIAR C S, BALA A, et al. Effect of ionic gums and dry heating on physicochemical, morphological, thermal and pasting properties of water chestnut starch[J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 59(1): 348-355. DOI:10.1016/j.lwt.2014.04.060.

[68] 闻萌, 曹正文, 胡荣, 等. 超高压处理对荸荠淀粉理化、结构及消化特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(20): 190-198. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.037544.

[69] 周宇, 童冠群, 杨可, 等. 抗性淀粉在老年食品中的应用研究进展[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(6): 43-50. DOI:10.16210/j.cnki.1007-7561.2023.06.006.

[70] 郭亦庄, 高昕瑜, 邢璐奕, 等. 抗性淀粉的功能特性及其应用研究进展[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(5): 149-156. DOI:10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.000557.

[71] 吕艺扬. 响应面优化羧甲基醚化法制备马蹄抗性淀粉的工艺及理化性质研究[J]. 现代食品, 2024, 30(1): 57-64. DOI:10.16736/j.cnki.cn41-1434/ts.2024.01.015.

[72] 蔡文, 帅良, 廖玲燕, 等. 压热辅助酶解法制备马蹄抗性淀粉的工艺优化及理化特性研究[J]. 食品科技, 2023, 48(7): 234-242. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2023.07.014.

[73] 刘云芬, 郭珍红, 殷菲胧, 等. 响应面优化微波-压热法制备马蹄抗性淀粉的工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(21): 74-82. DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2022.21.010.

[74] 李殿鑫, 林丽军. 荸荠果脯的加工工艺研究[J]. 贵州农业科学, 2018, 46(10): 122-126. DOI:10.3969/j.issn.1001-3601.2018.10.032.

[75] 张洁, 韩苗苗, 史少华, 等. 荸荠蜜饯加工及保藏工艺优化[J]. 武汉轻工大学学报, 2016, 35(3): 94-97; 106.

[76] 李官丽, 罗杨合, 黄凤媚, 等. 即食马蹄软罐头关键加工工艺优化[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(16): 93-99. DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2023.16.013.

[77] 张森旺, 徐建国, 顾震, 等. 荸荠排骨汤罐头的加工工艺研究[J]. 现代农业科技, 2021(23): 188-190.

[78] 张梅, 黎光会, 肖家丽, 等. 荸荠脆片的工艺优化研究[J]. 农产品加工, 2023(20): 37-40. DOI:10.16693/j.cnki.1671-9646(X).2023.10.037.

[79] 谢冬娣, 岳君. 再造型荸荠脆片的微波膨化工艺[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(3): 105-110. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2016.03.027.

[80] 夏志楷, 金嘉奇, 李丽, 等. 荸荠皮咀嚼片的配方研究[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(20): 118-122. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2018.20.022.

[81] 叶若松, 陈勇辉, 欧阳金金, 等. 白莲马蹄糕的制作工艺优化及其品质分析[J]. 食品安全导刊, 2023(21): 118-122. DOI:10.16043/j.cnki.cfs.2023.21.044.

[82] 李淼, 谢梦洲, 陈禧音, 等. 一款药食同源马蹄糕的研制[J]. 农产品加工, 2020(17): 11-13. DOI:10.16693/j.cnki.1671-9646(X).2020.09.003.

[83] 刘世军, 阿迪来·艾尔肯, 唐志书, 等. 大枣椰浆马蹄糕的研制[J]. 中国食物与营养, 2019, 25(7): 59-61. DOI:10.3969/j.issn.1006-9577.2019.07.012.

[84] 李蕾. 荸荠糕的加工工艺研究[J]. 食品安全导刊, 2018(8): 67. DOI:10.16043/j.cnki.cfs.2018.08.031.

[85] 曾劲, 周晓君, 陈永霞. 一种马蹄露及其制备方法: CN115736146A[P]. 2023-03-07.

[86] 康超, 刘凤听, 伍淑婕, 等. 响应面法优化荸荠百香果果奶工艺[J]. 食品工业, 2021, 42(4): 192-196.

[87] 张建萍, 巫永华, 刘恩岐, 等. 酶解法制备荸荠汁工艺及荸荠银杏花生乳复合饮料的研制[J]. 保鲜与加工, 2020, 20(2): 144-149.

[88] 陈程. 荸荠酒生产工艺及其品质的研究[D]. 淮安: 淮阴工学院, 2020. DOI:10.27944/d.cnki.ghygy.2020.000046.

[89] 杜丽娟, 孙钦菊, 成显波, 等. 香蕉醋的发酵工艺优化及其降血脂和降血糖功能研究[J]. 保鲜与加工, 2024, 24(6): 62-73. DOI:10.3969/j.issn.1009-6221.2024.06.009.

[90] 丁兴华. 荸荠皮果醋生产的优化工艺研究[J]. 江苏调味副食品, 2012, 29(6): 12-14. DOI:10.16782/j.cnki.32-1235/ts.2012.06.004.

[91] 秦璇璇, SAMILYK M, 罗杨合. 凝固型风味荸荠发酵酸奶的工艺优化研究[J]. 中国乳业, 2022(9): 108-113.

[92] 刘海燕, 王润梅, 高志慧. 荸荠沙棘复合酸奶加工工艺研究[J]. 山西大同大学学报(自然科学版), 2019, 35(6): 59-62.

[93] 高宗露. 荸荠果皮复合中草药发酵饮料的研制[D]. 扬州: 扬州大学, 2020. DOI:10.27441/d.cnki.gyzdu.2020.000742.

[94] 魏连会, 刘宇峰, 姬妍茹, 等. 荸荠与黑荸荠营养成分的比较分析[J]. 食品科学技术学报, 2018, 36(5): 68-73. DOI:10.3969/j.issn.2095-6002.2018.05.011.

[95] 李晗, 江琳玲, 范方宇, 等. 鲜荸荠真空浸渍强化钙工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(13): 117-123. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2019.13.020.

[96] 吕明. 荸荠香菇复合酱的研制[J]. 农产品加工, 2024(4): 16-19; 24. DOI:10.16693/j.cnki.1671-9646(X).2024.04.004.

[97] 李艳青, 李佳, 李博. 荸荠皮提取物复合保鲜技术在冷鲜鸡肉保鲜中的应用[J]. 中国调味品, 2023, 48(12): 69-74.

[98] 高志明, 罗杨合, 陈振林, 等. 荸荠皮果醋饮料的开发[J]. 中国酿造, 2010, 29(5): 164-166. DOI:10.3969/j.issn.0254-5071.2010.05.050.