

牡蛎壳的营养功能特性及其开发利用研究进展

黄家旋, 赵巧丽, 李瑞, 汪卓, 钟赛意*
(广东海洋大学食品科技学院, 广东湛江 524088)

摘要: 随着水产养殖业的快速发展, 废弃牡蛎壳的年产量持续攀升, 但其常被直接填埋或随意丢弃, 造成严重的环境污染和资源浪费。牡蛎壳富含碳酸钙 (90%~95%)、有机质及锌、硒等微量元素, 具有抑菌、抗氧化、免疫调节等多种生理活性, 由于加工技术受限, 其高值化利用仍然面临许多挑战。该文对牡蛎壳的化学组成、加工方式、营养成分和生物活性进行了系统综述, 总结了其在食品、化妆品与生物医药领域的应用, 并对当前工业化应用中牡蛎壳存在的技术瓶颈进行了分析。未来牡蛎壳加工应聚焦人工智能驱动的绿色工艺优化与微生物-酶协同重金属脱除技术, 通过精准调控纳米化与活性保留工艺, 推动牡蛎壳向靶向药物载体、仿生骨修复材料及高吸收率的钙强化剂等高值化产品转型, 构建由水产废弃物到多功能材料产业链, 实现生态与经济效益协同提升。

关键词: 牡蛎壳; 营养成分; 资源化利用; 食品防腐; 绿色加工技术

文章编号: 1673-9078(2026)7-302-310

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.7.0519

Nutritional Functional Properties and Exploitation of Oyster Shells: A Research Review

HUANG Jiakuan, ZHAO Qiaoli, LI Rui, WANG Zhuo, ZHONG Saiyi*

(School of Food Science and Technology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 254088, China)

Abstract: With the rapid expansion of global aquaculture, the annual production of discarded oyster shells has surged, but their improper disposal through landfilling or indiscriminate dumping can lead to severe environmental pollution and resource waste. Oyster shells, comprising 90%~95% calcium carbonate (CaCO₃), organic matrices, and trace elements (e.g., zinc and selenium), exhibit multifaceted bioactivities including antimicrobial, antioxidant, and immunomodulatory properties. However, their high-value utilization remains constrained by technical limitations in processing methodologies. This review systematically analyzes the chemical composition, processing techniques, nutritional components, and bioactivity profiles of oyster shells and summarizes their emerging applications in food preservation, nutraceutical formulations, cosmetic ingredients, and biomedical materials. Critical bottlenecks in industrial applications, such as inefficient bioactivity retention, heavy metal residues, and high energy consumption during nanonization, are discussed. To address these challenges, future developments should prioritize artificial intelligence-driven green processing optimization and microbial-enzyme synergistic heavy-metal detoxification. Gaining precise control over the processes of nanonization and bioactivity retention will enable the transformation of oyster shells into high-value products,

引文格式:

黄家旋, 赵巧丽, 李瑞, 等. 牡蛎壳的营养功能特性及其开发利用研究进展[J]. 现代食品科技, 2026, 42(7): 302-310.

HUANG Jiakuan, ZHAO Qiaoli, LI Rui, et al. Nutritional functional properties and exploitation of oyster shells: a research review [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(7): 302-310.

收稿日期: 2025-04-13 ; 修回日期: 2025-05-21 ; 接受日期: 2025-05-29

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2020VFDO901101); 国家自然科学基金资助项目 (32402136); 广东海洋大学科研启动基金项目 (060302042402)

作者简介: 黄家旋 (2002-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 牡蛎壳的加工利用, E-mail: huangjiakuan11@stu.gdou.edu.cn

通讯作者: 钟赛意 (1979-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 水产品加工与高值化利用、食品功能成分开发, E-mail: zsylyxc@126.com

such as pH-responsive drug carriers, biomimetic bone repair scaffolds, and high-bioavailability calcium fortifiers. By establishing a comprehensive industrial chain from aquaculture waste to multifunctional materials, synergistic improvements in ecological and economic benefits can be achieved.

Key words: oyster shells; nutritional components; resource utilization; food preservation; green processing technologies

牡蛎 (Oyster) 是一种广泛分布于温带和热带海域的海洋双壳贝类, 其肉质鲜美, 富含蛋白质、多不饱和脂肪酸、活性多糖及牛磺酸, 素有“海洋牛奶”的美誉^[1]。牡蛎的蛋白质含量为 39.1%~53.1%, 是极好的蛋白质来源, 其必需氨基酸的完全程度和质量比都高于牛奶和人乳, 而且牡蛎的蛋白质中富含精氨酸, 有助于促进人体生长激素分泌, 在食品工业和保健品开发中具有重要应用价值^[2]。此外, 牡蛎还富含锌、血红素铁及糖原等营养物质, 其中锌能够增强人体免疫力、促进男性生殖健康, 铁能够改善贫血, 牛磺酸具有调节胆固醇、降低心血管疾病的风险, 牡蛎糖原能够调节肠道微生物群落的组成和多样性, 改善肠道健康, 增强肠道屏障功能^[3]。

据统计, 全球每年牡蛎产量约 600 万吨, 主要以鲜食和深加工为主, 在此过程中产生的壳类废弃物大部分被填埋或直接丢弃, 造成严重的环境污染和资源浪费。牡蛎壳主要由碳酸钙 (90%~95%) 和有机基质 (甲壳素、多糖等) 构成, 其具有独特的层状结构, 同时富含锌、硒等微量元素, 兼具抑菌、抗氧化等生物活性。牡蛎壳的利用方式多集中在建筑、农业等领域, 缺乏在医药、食品等高附加值领域的深入开发, 导致产物附加值低、市场竞争力不足。因此, 如何实现牡蛎壳的资源化利用, 提高其附加值, 是当前牡蛎加工产业关注的热点问题之一。本文系统总结了牡蛎壳的主要组成、加工方式、营养成分及其生物活性和开发利用研究现状, 以期为延伸牡蛎壳深加工产业链, 增加其附加值提供参考依据。

1 牡蛎壳的主要组成及加工方式

1.1 牡蛎壳的主要组成

牡蛎壳, 《神农本草经》记载: 味咸, 平。主伤寒寒热, 温疟洒洒, 惊、悲怒气, 除拘缓, 鼠痿, 女子带下赤白。久服强骨节、杀邪鬼、延年^[4]。牡蛎壳是由牡蛎的外套膜分泌形成的一种结构化的生物复合材料, 其基本结构可分为三层: 外层是厚度极薄的硬化蛋白角质层, 具有疏水性和抗腐蚀功能, 能够抵御外界机械损伤及海洋微生物的侵蚀; 中间为钙质纤维交织, 呈叶片状结构且存在天然气孔的棱柱层, 该层孔

隙率高, 兼具轻质与抗压特性, 是牡蛎壳力学强度的主要来源; 内层为珍珠层, 由文石型碳酸钙与有机基质交替堆叠形成, 类似“砖-泥”模型^[5], 这种纳米级有序排列结构赋予珍珠层较高的韧性及抗裂纹扩展能力, 使得牡蛎壳的珍珠层断裂韧性能够达纯碳酸钙的 3 000 倍。牡蛎壳钙含量丰富, 其中的碳酸钙含量高达 95%。此外, 牡蛎壳还含有 0.1%~5% 的有机基质, 如多糖、水溶性和不溶性蛋白和脂类等大分子以及色素、游离氨基酸和短肽等小分子, 进而赋予其抑菌、抗炎及促修复等多种生物活性。

1.2 牡蛎壳的加工方式

基于牡蛎壳的基质组成, 其加工方法可以根据目标产物的功能需求分为六大类: (1) 机械粉碎: 牡蛎壳通过清洗、干燥去除杂质后, 经颚式破碎机或锤式粉碎机粉碎至 1~10 mm 颗粒, 可直接用于农业土壤改良、畜禽饲料、食品防腐等领域, 但生物利用率低^[1,6]; (2) 高温煅烧: 使用 800 °C 以上高温将牡蛎壳中的碳酸钙转化为高活性氧化钙, 使其兼具多孔吸附性与抗菌性, 可以用于食品防腐以及用作骨修复材料, 但容易造成有机成分的损失且能耗较高^[7-9]; (3) 化学处理: 加入 1 N HCl 溶液, 固液比 1:7, 80 °C 处理 1 h 的步骤脱矿质去除钙质成分, 随后加入 3% NaOH 溶液, 固液比 1:8, 80 °C 处理 2 h 脱蛋白获得甲壳素, 再加入 50% NaOH, 120 °C 处理 1 h 使得牡蛎壳脱乙酰化, 进而转化为壳聚糖, 脱乙酰度达 89.14%, 产率为 61.11%。最后通过离子凝胶法制备纳米壳聚糖颗粒, 粒径范围为 679~910 nm。该方法通过优化酸碱浓度和反应时间实现高纯度壳聚糖及纳米颗粒转化, 能够用作生物医用材料、也可以应用于食品保鲜领域, 但强酸强碱易造成环境污染^[10,11]; (4) 纳米化技术, 将牡蛎壳稀盐酸清洗、900 °C 煅烧 2 h 去除有机物, 以纯净水为球磨助剂, 转速 600 r·min⁻¹, 将预处理的牡蛎壳初磨 2.5 h, 复磨 3 h 制备尺寸小于 100 nm 的纳米颗粒, 其比表面积达到 36.2 m²·g⁻¹, 载药量提高 2~3 倍, 细胞渗透性也有所增强, 但量产稳定性较差, 成品率不足 70%^[7,12]; (5) 水热法, 牡蛎壳清洗粉碎后, 与磷酸盐混合, 在 160~220 °C, 6 h 的条件下进行水热反应,

2 牡蛎壳的营养成分及其生物活性

牡蛎壳作为一种重要的生物质资源,富含多种营养成分,包括蛋白质、多糖、矿物质及微量元素。这些营养成分具有抗炎、抗菌、促进伤口愈合、抗骨质疏松和美白等多种生物活性,为开发保健品、化妆品和营养强化食品提供了丰富的物质基础。在中国传统医学中,牡蛎壳被视为一种重要的药材。其药用价值源于其丰富的矿物质成分,尤其是钙、镁和微量元素,是维持生命活动不可或缺的无机营养素,常被用来治疗多种疾病,包括癫痫和痤疮等。牡蛎壳粉富含多种矿物质和氨基酸,可用于开发保健品,具有抗氧化、延缓衰老、抗癌等功效^[6,16]。相关研究表明,牡蛎壳提取物在脂多糖刺激的 RAW264.7 巨噬细胞中表现出显著的抗炎作用^[17]。它通过减少细胞内 ROS 水平、增加抗氧化酶活性、抑制 NO 生成以及降低促炎细胞因子 TNF- α 、IL-1 β 、IL-6 和炎症介质 iNOS、COX-2 的表达,发挥抗炎作用。牡蛎壳及其煅烧产物对多种农作物病原真菌具有显著的抗真菌活性,尤其是煅烧后的牡蛎壳粉末^[18]。牡蛎壳的微观结构也和抑菌活性之间存在密切的相互作用,多孔结构和纳米颗粒尺寸增加了比表面积和活性位点,促进了化学成分的溶出,从而增强了抑菌活性。例如,崔艳俊等^[7]通过优化球磨和煅烧工艺,制备出平均粒径为 91 nm 的纳米贝壳粉,发现 1 100 °C 煅烧处理的纳米贝壳粉具有显著的抗菌性能,且在添加浓度为 2% 时抑菌效果最佳。Tran 等^[19]通过实验评估牡蛎壳乙醇提取物(Ethanol Extract of Oyster Shell, EOS)对脂肪生成的抑制作用,发现 EOS 通过抑制丝氨酸棕榈酰转移酶的活性,减少鞘氨醇和鞘磷脂的合成,进而抑制脂肪生成基因的表达,最终降低细胞内甘油三酯水平。

2.1 蛋白质

牡蛎壳中的蛋白质是牡蛎壳具有生物活性成分的重要依据,其蛋白质的结构与功能特性备受关注。Feng 等^[20,21]从太平洋牡蛎壳中提取的水溶性基质蛋白具有显著的抗骨质疏松特性,能够通过促进成骨细胞分化,抑制破骨细胞活性来改善骨质疏松。尹德胜等^[22]从牡蛎壳中提取的糖蛋白在清除羟自由基(-OH)方面表现出极高的效率,其效果显著优于维生素 C,表明牡蛎壳中的糖蛋白具有强大的抗氧化潜力。不止如此,牡蛎壳中的多肽也具有显著的生物活性。彭新颜等^[23]通过球磨破碎、酸碱提取、多种酶联合酶解及逐级超滤方法制备牡蛎壳抗氧化肽,发现分子量小于 5 kDa 的组分均具有优异的抗氧化性能,其

中胰蛋白酶酶解产物抗氧化性能最优,对羟自由基和 DPPH 自由基具有较好的清除效果。邵江娟等^[24]通过水提取结合离子交换层析和反向 C₈ 柱层析技术,从废弃牡蛎壳中高效分离出总肽含量达 38.02% 的抗氧化寡肽,该抗氧化寡肽对 DPPH 自由基、超氧阴离子及羟自由基的清除率均高达 85%,呈现出较强的抗氧化能力。

2.2 多糖

甲壳素作为牡蛎壳中一种重要的生物质资源,具有广泛的应用价值。采用脱矿质和脱蛋白工艺处理牡蛎壳获得几丁质,纯度达 69.65%,显著优于同工艺处理的其他海洋贝壳废弃物^[10]。研究表明,甲壳素对羟自由基的清除率达 82%,能够阻断脂质过氧化链式反应,有效缓解氧化应激损伤^[25]。同时,甲壳素还具有显著的抗菌作用,甲壳素通过破坏如金黄色葡萄球菌、大肠杆菌等微生物细胞壁及干扰营养输送系统实现广谱抗菌^[26,27]。甲壳素类物质还可通过激活巨噬细胞吞噬功能并调控 IL-6、TNF- α 等炎症因子分泌,形成多通路免疫调节网络^[28]。除了甲壳素外,甲壳素衍生物壳聚糖也具有显著的抑菌效果。Nasaj 等^[29]系统探究了壳聚糖及其衍生物的抗菌机制及影响因素,发现低分子量壳聚糖(1~3 kDa)在酸性条件下对革兰阴性菌的清除效率超过 85%,且壳聚糖的季铵化衍生物,如 N-三甲基壳聚糖等可显著增强水溶性和抗菌谱,该研究为壳聚糖在抗耐药菌材料与食品防腐剂开发中的优化应用提供了理论支撑。Handayani 等^[11]通过三步法,即盐酸脱矿质、氢氧化钠脱蛋白及 50% 浓碱脱乙酰化,从牡蛎壳中提取甲壳素并合成脱乙酰度达 89.14% 的壳聚糖,随后利用离子凝胶法结合三聚磷酸钠交联将其转化为 679~910 nm 的纳米颗粒,后续开发功能性材料奠定了重要基础。牡蛎壳中甲壳素的高效资源化利用,不仅揭示了海洋废弃物的潜在价值,更为开发绿色可持续的生物材料提供了科学指引。

2.3 矿物质和微量元素

图 2 为牡蛎壳的营养成分及其生物活性,其中矿物质和微量元素是人体必需的无机营养素,它们在维持人体正常生理功能中发挥着重要作用。钙是维持骨骼和牙齿健康的核心元素,其摄入不足可能引发骨质疏松症、佝偻病等骨骼系统疾病。牡蛎壳中的钙以生物碳酸钙形式存在,易于人体吸收,是理想的天然钙源,可通过煅烧加工成粉末,用作钙补充剂^[30]。此外,从壳中提取的羟基磷灰石在控制和预防骨质流失方面的效果已得到广泛证实。例如其与乳酸、苹果酸、柠檬

酸等食用有机酸反应成有机酸钙盐、与氨基酸反应生成谷氨酸螯合钙和 L- 天冬氨酸螯合钙^[31-33]。有机酸钙盐和氨基酸螯合钙在提高钙的生物利用率、减少胃部不适以及促进骨骼健康等方面具有显著优势,是理想的钙补充剂和食品强化剂。除此之外,牡蛎壳中还含有一些矿物质和微量元素也有许多功能,例如镁可以调节神经和肌肉功能,铁可以预防和治疗贫血,锌可以促进生长和发育。

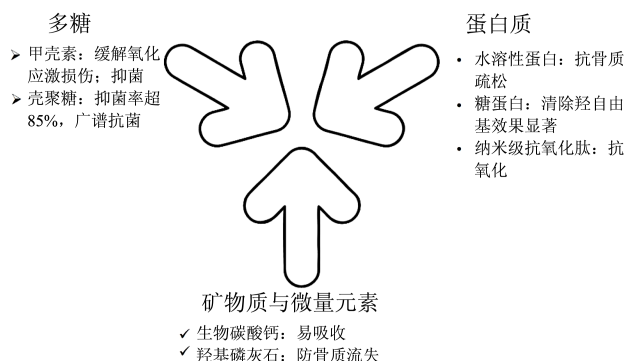


图 2 牡蛎壳的营养成分及其生物活性

Fig.2 The nutritional components of oyster shells and their bioactivity

3 牡蛎壳的开发利用现状

3.1 牡蛎壳在食品领域的应用

牡蛎壳在食品领域可以用于食品防腐、食品添加剂、钙营养强化等,利用其含有的碳酸钙和甲壳素成分的抑菌作用以及吸附催熟气体显著延长果蔬保鲜期;作为高生物利用度钙源,可替代合成添加剂改善肉制品弹性、持水性并降低钠含量,推动低钠健康食品开发;经高温处理的离子钙与天然成分复配后制成膳食补充剂或功能饮料,能够提高机体 30% 的钙吸收率,并具有调节肠道健康的功效,实现了废弃资源的高值化再利用。

3.1.1 食品防腐剂

食品防腐剂是一类用于防止或延缓食品腐败变质的添加剂,其本质是通过抑制微生物的生长或杀死微生物来延长食品的保质期。在食品领域,钙质的高生物利用度及有机-无机复合特性使得牡蛎壳中钙能够作为功能钙源和天然防腐剂^[34];牡蛎壳粉中富含的碳酸钙(CaCO_3)和甲壳素在食品保鲜领域展现出协同抑菌作用。碳酸钙通过其物理吸附特性有效结合食品贮藏过程中释放的乙烯等催熟气体,延缓果蔬成熟与腐败进程,同时高温煅烧处理能使牡蛎壳粉中的 CaCO_3 转化为 CaO ,对大肠杆菌和金黄色葡萄球

菌表现出良好的抗菌活性^[35]。甲壳素及其脱乙酰产物壳聚糖,则通过分子链上的氨基与微生物细胞壁负电荷结合,干扰代谢活动并诱导溶菌效应,显著提升防腐性能^[36,37]。黄丽等^[38]发现煅烧牡蛎壳粉能够显著延长香蕉、火龙果的货架期,保持其新鲜度。Meeparn 等^[39]研究发现牡蛎壳的碱性作用和 Ca^{2+} 通过静电作用与淀粉羟基结合,干扰淀粉链排列,抑制回生,显著提升木薯珍珠的钙营养、缩短加工时间、改善冷藏质构稳定性,并赋予木薯珍珠更佳的外观。Lu 等^[13]通过将废弃牡蛎壳转化为纳米花状羟基磷灰石(Hap),并负载尖晶石型 CuFe_2O_4 ,成功开发出对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的杀菌率分别达 99.6% 和 99.7% 的 CuFe_2O_4 -Hap 纳米复合材料。然而牡蛎壳粉的抗菌作用并非对所有微生物都有效,在实际应用中,需要与其他防腐方法结合使用,如与抗氧化剂、维生素等防腐成分组合,以最大限度地发挥其优势,从而全面的保障食品质量^[38,40]。未来应进一步探索其在复杂微环境中更广泛的抗菌潜力,以及与其他保鲜技术的协同作用,以开发出更高效、更安全的食品防腐剂。

3.1.2 功能食品添加剂

功能食品添加剂作为食品加工过程中的关键组分,可通过营养强化、品质改良及保质期延长等途径提升食品综合价值。以牡蛎壳粉为例,其核心成分碳酸钙具有多种功能特性,不仅可以通过离子交换作用改善肉制品持水性和质地均匀性,而且其中的生物可利用钙可促进骨钙沉积。如 Cho 等^[41]证实牡蛎壳粉中的碳酸钙能替代合成磷酸盐用于猪肉熟制品加工,在降低钠含量的同时将产品弹性和出品率分别提高 12% 和 18%。Choi 等^[42]将牡蛎壳钙粉与 1.5% NaCl 和 0.5% 乳清蛋白结合,生产出具有理想质量特性的重组猪肉火腿,牡蛎壳钙粉的引入显著增加了猪肉火腿的 pH 值和灰分含量,改善了咀嚼性和弹性,但对水分保持能力和烹饪损失没有显著影响。该成果为开发低磷、低钠的功能性肉制品提供了天然添加剂替代方案,可应用于健康火腿、香肠等产品的工业化生产。

3.1.3 膳食补充剂

膳食补充剂是一种旨在补充日常饮食的营养素或生物活性物质,通常以浓缩形式存在,如片剂、胶囊、粉末或液体等。在膳食补充剂领域,牡蛎壳的应用前景备受关注,王衍钊等^[43]通过 1 700 °C 高温煅烧,使牡蛎壳生成离子钙,并结合魔芋粉、富铬酵母、L- 谷氨酰胺等成分开发膳食补充剂,研究发现其可中和体内酸毒、调节酸碱平衡、改善肠道健康,使得便秘缓解率高达 92%,并且钙吸收率提升至 30%。赵劲民

等^[44]研发的牡蛎壳复合果汁饮料,通过牡蛎壳粉提供高吸收率的有机钙与天然果汁的风味完美结合,既保留了牡蛎钙的高生物利用度,又通过果汁中的维生素C和天然果酸进一步促进钙的吸收。卞正欣等^[45]将牡蛎壳粉与椰子粉、小球藻粉、裙带菜等原料混合调配,成功开发出具有海洋特色的复合代餐饮料,丰富了食品创新应用的领域。另外,煅烧牡蛎壳粉是一种有效的钙强化剂,能够显著改善珍珠粉圆的营养价值和质地特性,具有良好的应用前景^[39]。

3.2 牡蛎壳在化妆品领域的应用

牡蛎壳中含有丰富的天然活性成分,包括多糖类、天然抗氧化剂等,这些成分共同作用,使得牡蛎壳粉在化妆品中具有滋润保湿、改善皮肤屏障功能以及减少皱纹等方面功效。它能够提高产品的稠度和质地,帮助产品更好地覆盖和滋润皮肤表面,同时还可以减少毛孔堵塞和清洁皮肤,预防粉刺和痘痘的产生,还具有抗氧化、抗衰老的作用,能够减轻皱纹和干纹等老化迹象。牡蛎壳天然成分以其多效性和安全性,为化妆品的开发提供了理想的原料选择。

3.2.1 长效保湿与屏障修复功效

牡蛎壳的保湿作用主要源于牡蛎壳中的矿物质和多糖成分,使得牡蛎壳既能直接补充皮肤水分和营养,又能通过调节皮肤状态维持长效保湿。邓一清等^[46]研究发现贝类多糖具有一定的吸湿性和保湿性,尤其是近江牡蛎壳多糖的保湿性能较好,这可能与分子中含有大量羟基等亲水基团有关,该亲水基团能够与水分子形成氢键,从而锁住水分。这一研究为海洋贝类多糖在化妆品等领域的应用提供了理论基础。而在禚国维^[47]的研究中,牡蛎壳中的有效成分能够调节皮肤油脂平衡,提亮肤色,保持皮肤的弹性和水润度,其天然成分能够温和去角质,促进皮肤修复,改善皮肤状态,具有显著的美白和修复作用。

3.2.2 抗氧化与抗衰老活性

牡蛎壳的抗氧化作用源于其天然活性成分的协同效应,包括多糖、多肽、甲壳素及锌、硒等微量元素。马文婷^[48]通过研究发现牡蛎壳水提物通过提升抗氧化酶活性、清除自由基及抑制炎症因子,展现出显著的体内抗氧化与抗炎潜力。其含有的多糖、多肽等活性成分可直接清除自由基,并通过激活内源性抗氧化酶系统,显著提升SOD、CAT活性,从而增强机体防御功能。同时发现牡蛎壳水提物不仅能够抑制脂质过氧化,还可以降低氧化损伤标志物MDA含量,有效缓解由乙醇等诱发的氧化应激。Yamamoto等^[49]发现珍

珠层提取物通过上调抗氧化酶的表达,减少氧化应激,延缓了皮肤的衰老。除此之外,牡蛎壳提取物能够抑制由D-半乳糖诱导的皮肤衰老,如减少皱纹的深度和数量,增加皮肤水分含量,改善皮肤的屏障功能,通过促进皮肤血液循环,增加胶原蛋白和弹性纤维的生成,进一步提升了皮肤的屏障功能和保湿效果。

3.2.3 安全性评价

从安全性角度来看,牡蛎壳及其天然提取物已被收入《已使用化妆品原料目录(2021年版)》,明确其为允许使用的天然护肤成分,在化妆品中的使用浓度通常控制在1%以下,在正常使用条件下不会对人体造成危害,且具有良好的安全性和稳定性。秦贞苗^[50]通过正交实验优化牡蛎壳超微粉制备工艺,制得了粒径2.448 μm 的牡蛎壳超微粉,收得率为94.9%,用其开发的面膜液不仅对酪氨酸酶抑制率达32.1%,而且经测试人体对其无过敏反应,表明其美白活性与安全性并存。

3.3 牡蛎壳在生物医药领域的应用

牡蛎壳作为天然生物材料,其医药价值主要体现在骨健康修复、抗炎抗氧化及神经保护等方面,同时可以通过纳米化技术开发为靶向药物载体和骨修复材料,兼具高生物相容性与环保优势,为骨质疏松、慢性炎症等疾病提供绿色治疗方案。

3.3.1 治疗骨质疏松

牡蛎壳可以用于治疗骨质疏松,只是限于技术限制而无法解析其机制。石秋月等^[51]通过建立糖皮质激素性骨质疏松小鼠模型,结合微型计算机断层扫描分析、骨转换标志物检测及肠道菌群高通量测序技术,研究发现牡蛎壳粉可显著提升骨密度、增加骨小梁厚度,抑制骨吸收标志物TRACP活性,增加约氏乳杆菌丰度来调节肠道菌群,进而改善骨代谢,促进骨形成基因ALP和OPG表达,抑制骨吸收基因Sclerostin表达。Hu等^[52]研究发现牡蛎外套膜衍生的外泌体可以释放 Ca^{2+} 激活成骨细胞PI3K/Akt/ β -catenin通路来促进成骨活性,并通过抑制破骨细胞中的NF- κ B通路来减弱破骨细胞活性,从而调节骨稳态来缓解骨质疏松症。由此可见牡蛎外泌体携带活性分子不仅可以指导壳的矿化与结构组装,而且在治疗人类骨质疏松中的也存在着一定价值。同时,Feng等^[20,21]发现牡蛎壳中的水溶性基质蛋白具有显著的抗骨质疏松特性,说明调控牡蛎壳的形成的功能因子与牡蛎壳中存在的基质蛋白均有抗骨质疏松的作用,展现出牡蛎壳在治疗骨质疏松症方面具有强大的潜力。牡蛎壳及其提取物在

骨质疏松症治疗中的作用机制如图 3 所示。

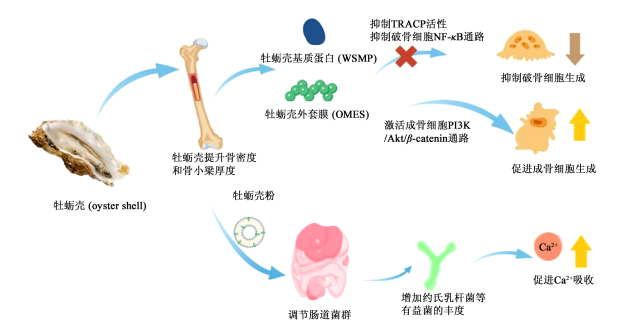


图 3 牡蛎壳及其提取物在骨质疏松症治疗中的作用机制

Fig.3 Mechanism of action of oysters and their extracts in the treatment of osteoporosis

3.3.2 作骨质修复材料

牡蛎壳含 90%~95% 碳酸钙，其层状多孔结构和有机-无机复合基质与人体骨骼的羟基磷灰石高度相似，具备优异生物相容性，经纳米化后能促进成骨细胞分化、抑制破骨活性，同时多孔框架为新生骨组织提供生长空间，是高效、低成本的天然骨修复材料。刘子阳等^[12]以牡蛎壳为原料通过水热法调控钙磷元素比例，制备 CaCO₃/HA 复合材料，研究发现羟基磷灰石（HA）纳米颗粒在片层状 CaCO₃ 表面生长，当 HA 实际含量达 43.24% 时，比表面积提升至 36.2 m²·g⁻¹，热稳定性增强，且体外降解速率随 HA 比例升高显著降低，14 d 降解率从 15.2% 降至 10.8%。该材料兼具牡蛎壳的天然钙源低成本、富微量元素的优点和降解速率可调控特性。张其清等^[53]通过水热反应法和海绵浸渍法，将牡蛎壳转化为羟基磷灰石多孔骨修复材料，

并成功开发出全球首个利用牡蛎壳制备体内植入骨修复材料的专利技术。

3.3.3 其他作用

牡蛎壳肉中提取的酶解物展现出显著的抗抑郁活性，刘战华等^[54]通过蛋白酶、纤维素酶、葡糖酸内酯等复合酶解技术，利用壳肉比 1:4~5 的比例处理牡蛎壳肉，酶解后截留 1 000~2 000 Da 肽段，制备活性肽-矿物质复合产物，实验显示该酶解物高剂量组 12 g·kg⁻¹ 效果优于氟西汀，显著降低小鼠悬尾不动时间，并提升抑郁症模型大鼠血清 5-HT、DA 水平及降低了 40% 的 IL-6、TNF-α 炎症因子，这为开发新型抑郁症治疗药物提供了科学依据。与此不同的是，牡蛎壳经过高温煅烧后还具有优异的抑制溃疡作用。张凤婷等^[54]通过多温度段（100~900 ℃）煅制牡蛎壳，结合红外光谱、X 射线衍射、硬度及钙溶出度等理化分析，并建立大鼠乙醇-盐酸胃溃疡模型验证药效，发现 600 ℃煅制 4 h 的牡蛎炮制品显著提升 42% 的胃组织 NO 水平，增加 35% 的 PGE2 水平，溃疡抑制率达到了 68%，优于硫糖铝对照组，证明了煅烧牡蛎壳具有溃疡抑制作用。

综上所述，牡蛎壳的开发利用现状如表 2 所示，其在医药领域的应用研究具有重要的科学价值和应用前景，这些研究不仅推动牡蛎壳在骨质疏松治疗、骨修复材料、神经精神疾病及消化系统疾病防治中的精准应用，更通过资源高值化利用，为海洋废弃物的可持续开发与绿色医药发展提供创新路径，为解决健康问题 and 推动可持续发展提供了重要参考。

表 2 牡蛎壳的开发利用现状表

Table 2 Current status of development and utilization of oyster shells

应用领域	细分方向	关键技术 / 产品	主要效果 / 优势
食品领域	食品防腐剂	煅烧牡蛎壳粉（CaO）、甲壳素 / 壳聚糖纳米颗粒	吸附乙烯延缓果蔬成熟；抑制大肠杆菌、金黄色葡萄球菌（杀菌率 >99%）；延长香蕉、火龙果货架期
	功能食品添加剂	牡蛎壳碳酸钙替代合成磷酸盐；钙粉与 NaCl/ 乳清蛋白复配	降低肉制品钠含量；提升弹性、提升出品率；改善重组火腿咀嚼性和弹性
	膳食补充剂	高温煅烧离子钙复合魔芋粉 / 果汁 / 椰子粉；有机酸钙盐（柠檬酸钙、L- 天冬氨酸螯合钙）	钙吸收率提升 30%；缓解便秘；改善珍珠粉圆钙营养与冷藏质构稳定性
化妆品领域	长效保湿与屏障修复	牡蛎壳多糖；牡蛎壳的有效成分	吸湿性强，维持皮肤水分；调节油脂平衡，促进皮肤修复，改善弹性和水润度
	抗氧化与抗衰老	多糖、多肽、甲壳素及锌 / 硒等微量元素；珍珠层提取物	清除自由基（DPPH/ 羟自由基清除率 >85%）；提升 SOD/CAT 活性；减少皱纹，增加皮肤水分含量
	安全性评价	超微牡蛎壳粉（粒径 2.448 μm）；《已使用化妆品原料目录（2021 年版）》认证	无过敏反应；酪氨酸酶抑制率 32.1%；正常使用浓度（<1%）无危害
生物医药领域	治疗骨质疏松	牡蛎壳粉调节肠道菌群（增加约氏乳杆菌）；外套膜外泌体（激活成骨 / 抑制破骨通路）	提升骨密度，增加骨小梁厚度；抑制骨吸收标志物 TRACP；缓解骨质疏松症（外泌体调节骨稳态）
	骨修复材料	水热法制备 CaCO ₃ /HA 复合材料；海绵浸渍法制备羟基磷灰石多孔材料	比表面积提升至 36.2 m ² ·g ⁻¹ ；14 d 降解率降低至 10.8%；生物相容性高，能够促进成骨细胞分化
	其他作用（抗抑郁 / 抑制溃疡）	1 000~2 000 Da 酶解活性肽；多温度段煅烧牡蛎壳粉	抗抑郁效果优于氟西汀；溃疡抑制率 68%，优于硫糖铝

4 存在问题及展望

牡蛎壳中含有蛋白质、多糖、矿物质和微量元素,具有抗菌、抗炎、抗氧化、免疫调节、促进伤口愈合、增强免疫力、抗骨质疏松、美白等生物活性,基于这些特征,可用于开发功能性保健品、美白抗衰产品及新型医药材料,实现跨领域高值化利用。虽然牡蛎壳含有多种生物活性,但其高附加值利用仍面临多重挑战。例如:牡蛎壳中碳酸钙与有机基质紧密复合,传统酸/碱处理工艺容易破坏牡蛎壳中的活性成分,且存在重金属(Pb、Cd)残留问题。目前研究主要采用煅烧牡蛎壳粉,该工艺虽然可以解决重金属残留,但是其煅烧温度过高,能耗较大。而牡蛎壳纳米化工艺流程复杂且成本高,制备纳米级牡蛎壳粉需采用多步球磨-煅烧工艺,能耗大,纳米贝壳粉的制备球磨参数已经被优化,但量产稳定性不足,成品率低于70%。另外,单一牡蛎壳粉的抑菌效果十分有限,如煅烧牡蛎壳粉对部分微生物(如黑曲霉)的抑菌率仅为50%,往往需要与茶多酚这类天然抗氧化剂协同使用,以达到较好的抑菌效果。但是这样会导致成本增加。

近年来,绿色加工技术通过多学科交叉取得显著突破,为牡蛎壳资源化利用提供了高效、低耗的创新路径。例如,(1)酶-微生物协同法:通过复合酶定向降解有机基质,结合乳酸菌生物吸附重金属,实现活性肽与甲壳素的同步提取,不仅可以避免传统酸碱处理的污染问题,而且可以提升提取率至80%以上;(2)等离子辅助技术:利用低温等离子体预处理牡蛎壳,通过表面刻蚀与官能团活化增强纳米化效率,较传统球磨工艺能耗降低50%,且纳米颗粒粒径稳定,比表面积提升至 $80\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$,显著增强载药与抗菌性能;相较于高温煅烧和化学处理,牡蛎壳的绿色加工技术通过生物-物理协同策略,兼顾活性保留与低碳目标,推动牡蛎壳从“粗放利用”向“精准高值化”转型。未来牡蛎壳加工应聚焦人工智能驱动的绿色工艺优化与微生物-酶协同重金属脱除技术,通过精准调控纳米化与活性保留工艺,推动牡蛎壳向靶向药物载体、仿生骨修复材料及高吸收率的钙强化剂等高值化产品转型,构建由水产废弃物到多功能材料产业链,实现生态与经济效益协同提升。

参考文献

- [1] 曹敏杰,丁希月,许玲玲,等.牡蛎壳资源利用研究进展[J].集美大学学报(自然科学版),2021,26(5):390-397.
- [2] 曾静,方伟,周天琼.牡蛎肽生物活性最新研究进展[J].现代食品科技,2023,41(7):403-407.

- [3] 章超桦.牡蛎营养特性及功能活性研究进展[J].大连海洋大学学报,2022,37(5):719-731.
- [4] 侯小涛,刘婧曦,吴东阳,等.我国海洋生物废弃物药用研究现状与策略[J].广西科学,2021,28(6):577-587.
- [5] CHECA A G. Physical and biological determinants of the fabrication of molluscan shell microstructures [J]. Frontiers in Marine Science, 2018, 5: 353.
- [6] 王洪波.废弃贝壳资源化利用现状及研究进展[J].海洋科学,2020,44(3):123-132.
- [7] 崔艳俊,盛宏朝,王祥莹,等.纳米贝壳粉的制备及抑菌活性研究[J].鲁东大学学报(自然科学版),2023,39(4):328-334.
- [8] WU S C, HSU H C, WU Y N, et al. Hydroxyapatite synthesized from oyster shell powders by ball milling and heat treatment [J]. Materials Characterization, 2011, 62(12): 1180-1187.
- [9] TSOU C H, WU C S, HUNG W S, et al. Rendering polypropylene biocomposites antibacterial through modification with oyster shell powder [J]. Polymer, 2019, 160: 265-271.
- [10] ALABARAOYE E, ACHILONU M, HESTER R. Biopolymer (Chitin) from various marine seashell wastes: isolation and characterization [J]. Journal of Polymers and the Environment, 2017, 26(6): 2207-2218.
- [11] HANDAYANI L, SYAHPUTRA F, ASTUTI Y. Utilization and characterization of oyster shell as chitosan and nanochitosan [J]. Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi, 2018, 21(4): 224-231.
- [12] 刘子阳,耿振,李朝阳.牡蛎壳为原料制备医用 CaCO_3/HA 复合生物材料[J].无机材料学报,2020,35(5):601-607.
- [13] LU J, ZHOU B, ZHANG X, et al. Oyster shell-derived CuFe_2O_4 -Hap nanocomposite for healthy houses: Bacterial and formaldehyde elimination [J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 477:147054.
- [14] WU S C, HSU H C, WU W H, et al. Enhancing bioactivity and mechanical properties of nano-hydroxyapatite derived from oyster shells through hydrothermal synthesis [J]. Nanomaterials, 2024, 14(15): 1281.
- [15] LI P, LI J, CHEN W, et al. Removal and recovery of phosphate by modified oyster shell and its fertilizer application [J]. Science of the Total Environment, 2024, 908: 168432.
- [16] ULAGESAN S, KRISHNAN S, NAM T J, et al. A review of bioactive compounds in oyster shell and tissues [J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2022, 10: 913839.
- [17] LEE S Y, KIM H J, HAN J S. Anti-inflammatory effect of oyster shell extract in lps-stimulated raw 264.7 cells [J]. Preventive Nutrition and Food Science, 2013, 18(1): 23-29.
- [18] XING R, QIN Y, GUAN X, et al. Comparison of antifungal activities of scallop shell, oyster shell and their pyrolyzed products [J]. Egyptian Journal of Aquatic Research, 2013, 39(2): 83-90.
- [19] TRAN N K S, KWON J E, KANG S C, et al. Crassostrea gigas oyster shell extract inhibits lipogenesis via suppression of serine palmitoyltransferase [J]. Natural Product Communications, 2015, 10(2): 349-352.
- [20] FENG X, JIANG S, ZHANG F, et al. Shell water-soluble matrix protein from oyster shells promoted proliferation, differentiation and mineralization of osteoblasts *in vitro* and *vivo* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 201: 288-297.
- [21] FENG X, JIANG S, ZHANG F, et al. Extraction and characterization

- of matrix protein from pacific oyster (*Crassostrea gigas*) shell and its anti-osteoporosis properties *in vitro* and *in vivo* [J]. Food & Function, 2021, 12(19): 9066-9076.
- [22] 尹德胜,林得鹏.从牡蛎壳中提取生物糖蛋白的分析研究[J].广州化工,2009,37(9):143.
- [23] 彭新颜,于海洋,付学军,等.一种基于牡蛎壳的抗氧化活性肽及其制备方法:中国,CN116904542A[P].2023-10-20.
- [24] 邵江娟,姚忠,吴昊,等.牡蛎抗氧化寡肽的提取分离研究[J].中药材,2013,36(9):1395-1397.
- [25] HAO W, LI K, MA Y, et al. Preparation and antioxidant activity of chitosan dimers with different sequences [J]. Marine Drugs, 2021, 19(7): 366.
- [26] HU Z, GÄNZLE M G. Challenges and opportunities related to the use of chitosan as a food preservative [J]. Journal of Applied Microbiology, 2018, 126(5): 1318-1331.
- [27] PERINELLI D R, FAGIOLI L, CAMPANA R, et al. Chitosan-based nanosystems and their exploited antimicrobial activity [J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 195: 599-612.
- [28] REAY S L, MARINA FERREIRA A, HILKENS C M U, et al. The paradoxical immunomodulatory effects of chitosan in biomedicine [J]. Polymers, 2024, 17(1): 19.
- [29] NASAJA M, CHEHELGERDI M, ASGHARI B, et al. Factors influencing the antimicrobial mechanism of chitosan action and its derivatives: A review [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 277: 134321.
- [30] BAE S M, JEONG J Y. The potential substitution of oyster shell powder for phosphate in pork patties cured with chinese cabbage and radish powder [J]. Food Science of Animal Resources, 2024, 44(4): 849-860.
- [31] 陈剑锋,张茂华,陈浩,等.一种联产柠檬酸络合钙、苹果酸络合钙和果酸螯合钙产品的方法:中国,CN112479866A[P].2021-03-12.
- [32] 兰福娣,柯咏一,余佳慧,等.废弃牡蛎壳制备柠檬酸钙的工艺研究[J].广东化工,2022,49(5):26-28.
- [33] WANG Z, WANG K, FENG Y, et al. Preparation, characterization of L-aspartic acid chelated calcium from oyster shell source and its calcium supplementation effect in rats [J]. Journal of Functional Foods, 2020, 75: 104249.
- [34] YANG Y T, LI X P, GAO L C, et al. Optimization, application effects and improved microecology of a composite microbial agent containing oyster shells [J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 123-135.
- [35] YEN L T, WENG C H, THAN N A T, et al. Mode of inactivation of *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* by heated oyster-shell powder [J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 432(15): 134386.
- [36] 李迈,唐菊艳,蔡帅,等.长牡蛎贝壳不同部位的几丁质提取及鉴定[J].海洋通报,2023,42(5):527-532.
- [37] LI J, ZHUANG S. Antibacterial activity of chitosan and its derivatives and their interaction mechanism with bacteria: Current state and perspectives [J]. European Polymer Journal, 2020, 138: 109984.
- [38] 黄丽,陀丽媚,覃颖异,等.牡蛎壳粉对香蕉与火龙果保鲜效果的研究[J].食品安全导刊,2023,8:104-111.
- [39] MEEPARN P, AENGLONG C, RATANASUMAWONG S, et al. Effect of fortified calcium compounds from oyster shell on the quality of tapioca pearls [J]. Food Chemistry, 2025, 463: 141252.
- [40] 邱勇,孟志容,林祥志,等.牡蛎壳粉资源化利用研究进展[J].轻工学报,2024,39(6):37-48.
- [41] CHO M G, BAE S M, JEONG J Y. Egg shell and oyster shell powder as alternatives for synthetic phosphate: Effects on the quality of cooked ground pork products [J]. Korean Journal for Food Science of Animal Resources, 2017, 37(4): 571-578.
- [42] CHOI J S, LEE H J, JIN S K, et al. Effect of oyster shell calcium powder on the quality of restructured pork ham [J]. Korean Journal for Food Science of Animal Resources, 2014, 34(3): 372-377.
- [43] 王衍钊,马新娟.一种改性牡蛎壳的膳食补充剂及制备方法:中国,CN116998713A[P].2023-11-07.
- [44] 赵劲民,韦锦斌,徐家科.一种牡蛎复合果汁饮料及其制备方法:中国,CN11543570A[P].2020-08-18.
- [45] 卞正欣.牡蛎壳粉椰子粉小球藻复合代餐饮料的研究[J].食品安全导刊,2023,6:139-141.
- [46] 邓一清,童银洪,陈小丽,等.4种海洋贝类多糖提取和保湿性研究[J].广东海洋大学学报,2012,32(3):86-89.
- [47] 肖君琳,陈速凡,熊速清,等.国医大师禰国维应用牡蛎及其药对治疗皮肤病经验[J].天津中医药,2022,39(7):817-820.
- [48] 马文婷.牡蛎壳水提取物的体内抗炎及抗氧化活性研究[D].锦州:渤海大学,2024.
- [49] YAMAMOTO H, SHIMOMURA N, OURA K, et al. Nacre extract from pearl oyster shell prevents d-galactose-induced brain and skin aging [J]. Marine Biotechnology, 2023, 25(4): 503-518.
- [50] 秦贞苗.牡蛎壳超微面膜粉的研制[M].海口:海南科技出版社,2020.
- [51] 石秋月,侯付景,韩姣姣,等.基于高通量测序技术的牡蛎壳粉缓解骨质疏松症的研究[J].食品工业科技,2021,42(18):372-379.
- [52] HU Y, HOU Z, LIU Z, et al. Oyster mantle-derived exosomes alleviate osteoporosis by regulating bone homeostasis [J]. Biomaterials, 2024, 311: 122648.
- [53] 张其清,薛启煌,邢永振,等.一种牡蛎壳羟基磷灰石多孔骨修复材料及其制备方法:中国,CN108159497A[P].2018-06-15.
- [54] 张凤婷,铃莉妍,包丽媛,等.基于理化性质和抗胃溃疡作用优化煅牡蛎的炮制工艺[J].中南药学,2023,21(10):2570-2576.