

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20241104002

http://www.yykxjz.cn/

徐科凤, 高焱, 王馨, 王琪, 黄博, 纪蕾, 王颖, 刘梅. 壳聚糖活性机制及其纳米复合材料应用研究进展. 渔业科学进展, 2025, 46(6): 59–71

XU K F, GAO Y, WANG X, WANG Q, HUANG B, JI L, WANG Y, LIU M. Research progress on the active mechanisms of chitosan and applications of chitosan-based composite materials. Progress in Fishery Sciences, 2025, 46(6): 59–71

壳聚糖活性机制及其纳米复合材料应用研究进展*

徐科凤 高 焱 王 馨 王 琪
黄 博 纪 蕾 王 颖 刘 梅^①

(山东省海洋科学研究院 山东 青岛 266104)

摘要 工业用壳聚糖主要来源于虾蟹壳, 壳聚糖的拓展应用有利于推动虾蟹壳废弃物循环利用和绿色生物技术发展。壳聚糖基纳米复合材料是指以壳聚糖为基体, 通过引入纳米级无机或有机物而制备形成的一类复合材料。壳聚糖基纳米复合材料因其生物相容性、可降解性和多功能性, 在多个领域展现出广泛的应用前景。本文探讨了壳聚糖四项活性机制, 系统综述了壳聚糖基纳米复合材料在医药、废水处理、农业、食品和渔业等领域的研究进展和应用价值, 旨在为壳聚糖的拓展应用提供全面参考和启发。

关键词 壳聚糖基; 活性机制; 纳米复合材料; 综合应用

中图分类号 P745 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2025)06-0059-13

甲壳素广泛存在于昆虫角质层、虾蟹壳以及某些真菌细胞壁中, 在自然界中的含量仅次于纤维素, 是第二大天然多糖。工业用甲壳素主要来自于虾蟹壳(Divya *et al*, 2018)。甲壳素的化学名称为(1,4)-聚-2-乙酰氨基-2-脱氧-D-葡萄糖, 它是通过 β -1,4 糖苷键连接形成的线性多糖(马宁等, 2004)。壳聚糖通过甲壳素的脱乙酰化反应获得, 其结构由 β -1,4 键连接的 N-乙酰氨基葡萄糖和 2-氨基-2-脱氧-D-葡萄糖组成(Park *et al*, 2011)。壳聚糖含有 3 个主要官能团: C2 位置的氨基、C3 位置的伯羟基和 C6 位置的仲羟基, 氨基是壳聚糖的独特功能团, 相较于甲壳素中的乙酰基, 氨基为壳聚糖带来了良好的化学反应性和生物活性(Pathak *et al*, 2021)。壳聚糖及其衍生物具有多种生物活性, 包括促凝血、组织修复与再生、抑菌、抗肿

瘤、抗氧化和促进吸收等功能(Kantak *et al*, 2022)。壳聚糖因天然易得、可生物降解、活性丰富等特性, 被视为具有广阔前景的绿色生物材料基质。根据 Scopus 数据库的统计, 壳聚糖相关的文献引用次数多达 17 000 次, 这一高引用率反映了业界对壳聚糖化学及其广泛应用的特别关注(Abd El-Hack *et al*, 2020)。

壳聚糖虽具有优良特性, 但也存在可溶性差、机械性能弱等不足。纳米技术的发展为壳聚糖的拓展应用提供了基础。通过溶液铸造、原位合成、静电纺丝、冷冻干燥、逐层组装、乳液法和溶胶-凝胶法等技术(Azman *et al*, 2021), 纳米级的无机和有机物可与壳聚糖或其衍生物相结合, 创造出壳聚糖纳米复合材料。与壳聚糖相比, 壳聚糖纳米复合物可拥有更为优异的机械强度、热稳定性、阻隔性能、抗菌性能或其他功

* 青岛市科技惠民示范专项(25-1-5-xdny-7-nsh)、山东省海洋科技成果转移转化中心“揭榜挂帅”项目(2024JBGS03)、山东省现代农业产业技术体系(SDAIT-22-10; SDAIT-13-07)和山东省重点研发计划(软科学)(2023RKY06004)共同资助。
徐科凤, Email: xukefeng@shandong.cn

^① 通信作者: 刘 梅, Email: mliu_msrisd@126.com

收稿日期: 2024-11-04, 收修改稿日期: 2025-01-03

能,拓宽了其在医药、农业、食品、环境保护、渔业上的应用(Guo *et al*, 2024)。鉴于壳聚糖纳米复合材料研究的持续深入,本文梳理了部分最新应用进展,以期壳聚糖的后续开发提供参考。

1 壳聚糖生物活性

壳聚糖具有高生物相容性、生物降解性、抗菌活性、抗氧化活性、粘膜黏附性和优异的成膜能力等特性,除此之外,壳聚糖还具有与阴离子聚合物自发作用形成聚电解质复合物的能力(Muthu *et al*, 2021)。目前,壳聚糖活性研究较多的领域集中在抑菌、抗氧化、止血及促组织修复愈合等方面。

1.1 抑菌活性及机制

壳聚糖抑菌机制尚不统一,目前,认为其主要作用途径可能包括:破坏细胞膜,干扰菌体细胞膜的完整性和功能,使其无法进行营养运输;破坏细胞壁,导致细胞壁通透性增加,使细胞内容物泄漏,导致细菌死亡;形成高分子膜隔离菌体与外界环境;与菌体内遗传物质发生作用;对菌体胞内带负电荷的物质进行吸附使其胞内环境被破坏等(顾其胜等, 2020)。

壳聚糖被讨论最多的抑菌机制是破坏菌体细胞膜或细胞壁,壳聚糖本身带有正电荷,易与带负电荷的细胞膜发生静电作用,从而引起细胞通透性的改变和细胞膜的裂解(Tamara *et al*, 2018)。壳聚糖的另一种抑菌机制是高分子壳聚糖可在细胞表面形成致密聚合物膜,从而对营养物质和氧气起到阻隔作用,限制了需氧菌生长和繁殖的必要资源(Kołodziejaska *et al*, 2021)。除此之外,壳聚糖水解产物还可与微生物 DNA 相互作用,从而通过抑制 mRNA 而影响蛋白质合成(Yuan *et al*, 2016)。Hosseinnejad 等(2016)研究证明,壳聚糖具有螯合特性,它可以螯合对微生物细胞生长重要的金属离子。当 pH 值高于其 pKa 值时,壳聚糖对多种金属离子(Ni^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Co^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Cu^{2+})具有较高的螯合能力,这可以解释壳聚糖对微生物生长的抑制作用(Kakaei *et al*, 2016)。

1.2 抗氧化活性及机制

甲壳素、壳聚糖及其衍生物的抗氧化活性已在多项研究中得到证实,其抗氧化机制主要依赖于其自由基清除能力和金属离子螯合特性(Anraku *et al*, 2018)。壳聚糖及其衍生物中的氨基和羟基是自由基清除和金属螯合作用的关键官能基团,壳聚糖中的氨基可与金属离子结合,抑制这些金属离子参与催化氧化反应,

从而减少自由基的产生。壳聚糖的自由基清除能力与 O-H 或 N-H 键的解离能以及所生成自由基的稳定性密切相关(Aranaz *et al*, 2021)。壳聚糖通过干扰氧化链反应,可有效保护机体免受氧化应激引发的损害。此外, Wang 等(2020)研究表明,壳聚糖的抗氧化特性与其脱乙酰化程度和分子量密切相关,通常分子量较低或脱乙酰化程度较高的壳聚糖表现出更强的抗氧化活性。

1.3 止血活性及机制

壳聚糖的确切止血机制尚未完全清晰,但普遍认为依赖于血浆吸附、红细胞凝聚以及血小板活化和聚集(Lü *et al*, 2023)。血浆吸附是壳聚糖作为止血材料应用中的关键因素之一。壳聚糖可以吸收相当于其自身重量 50%~300% 的液体,从而使受伤部位的红细胞和血小板浓缩,吸附速率取决于壳聚糖的分子量、脱乙酰度以及壳聚糖材料的类型(Lestari *et al*, 2020)。红细胞凝聚是壳聚糖止血的另一关键因素,壳聚糖可以通过在血液中形成 3D 网络来捕获并聚集红细胞,从而促进纤维蛋白凝块的形成(Wang *et al*, 2008),继而形成血栓。壳聚糖的止血特性还与血小板的黏附、聚集和活化密切相关。壳聚糖及其衍生物能够通过活化血小板激活凝血级联反应,促进纤维蛋白合成,形成栓塞封闭伤口(Liu *et al*, 2020),与此同时,壳聚糖还可引发细胞内信号反应,增强血小板膜糖蛋白 II b/III a (GP II b/III a) 的表达,并释放血栓烷 A2 和 ADP。这些信号能促进血小板铺展并增强黏附稳定性(Tang *et al*, 2023)。Cheng 等(2021)研究发现,羧甲基壳聚糖可以促进血小板活化产物 PF4 的表达。

1.4 组织工程修复愈合特性及机制

已有研究证实,壳聚糖及其衍生物可刺激皮肤成纤维细胞与角质细胞的生长,支持软骨和成骨细胞黏附与增殖。Anitha 等(2014)综述了壳聚糖膜在伤口愈合、组织工程和生长因子传递方面的应用。壳聚糖通过刺激炎症细胞、巨噬细胞和成纤维细胞来加速伤口愈合过程(Bhat *et al*, 2011)。壳聚糖还可能具有调节肉芽组织形成和血管生成的能力,确保胶原纤维的正确沉积,并进一步增强受损真皮组织的正确修复(Gupta *et al*, 2014)。壳聚糖本身已被报道可以加速骨再生过程,它有助于成骨细胞的附着、生长和分化,也有助于矿化骨基质的形成。此外,它可以与各种其他材料相辅相成,并在组合中产生更好的机械和生物学性能(Arora *et al*, 2023)。

2 壳聚糖的性能局限性以及壳聚糖基纳米复合材料优势

虽然壳聚糖具备许多优良特性,但也存在纯水或大多数有机溶剂中不溶、机械性能较弱、水和气体阻隔性能不足等缺点,此外,它还缺乏足够的骨诱导性(赵海田等, 2019)。壳聚糖的支架、薄膜和微球表现出较弱的机械稳定性,用于组织再生的壳聚糖支架由于机械强度低,容易破裂,从而可能导致患者面临许多并发症,壳聚糖的这种弱点也会妨碍其支架形成细胞传递所需的连贯基质(Assaad *et al*, 2015)。缺乏足够延展性的壳聚糖薄膜在操作过程中容易破裂,限制了其在伤口敷料材料和食品包装材料中的应用(Haghighi *et al*, 2019)。壳聚糖难溶于水,仅溶于 pH<6 的某些稀酸,而中性 pH 环境更有利于开放伤口的愈合,这在一定程度上限制了壳聚糖在创伤敷料上的应用。

纳米技术的发展为改善壳聚糖性能、拓展其应用提供了有效途径。在特定条件下将纳米填料引入壳聚糖基质中,可改善壳聚糖基材料的功能或引入新功能。壳聚糖基纳米复合材料通常具有来自壳聚糖和纳米填料组分的复合或增强功能特性,主要包括机械性能、热性能、水阻隔性、气体阻隔性、刺激响应性、形状记忆性、生物性能、电化学性能、防腐性能、防污性能、吸附和解吸等(Guo *et al*, 2024)。壳聚糖常与多糖或蛋白质结合以增强其机械强度,而与 Fe、Cu、Ag、Si、Zn、ZnO 和 TiO₂ 等纳米金属结合则可显著提高其抗菌性能,与纳米精油结合则能进一步改善其生物学特性(Wang *et al*, 2016)。

壳聚糖基纳米复合材料包含多种形式,如微球、支架、泡沫、气凝胶、离子凝胶、冷冻凝胶、颗粒、水凝胶、水凝胶膜、膜、纳米多孔膜和纳米纤维等。壳聚糖纳米复合材料的制备过程中,壳聚糖与纳米添加剂以及溶剂的充分混合是重要环节,常用成型方法包括乳液液滴合并法、反向胶束法、离子凝胶化、沉淀法以及筛分和喷雾干燥法等(Silva *et al*, 2021)。每种方法都有其独特的优势,可根据不同的性能需求来定制壳聚糖纳米复合材料。而纳米添加剂的选择则取决于纳米复合材料在形态、结构、热学性能和机械性能等方面的预期要求和应用场景。

3 壳聚糖基纳米复合材料应用研究进展

壳聚糖基纳米复合物的功能特性使得其在组织工程和药物递送系统、食品包装、农业上的应用、环境保护、渔业等领域发挥了更大的应用潜力(Yu *et al*, 2021; Ahmad *et al*, 2021)。表 1 简要汇总了壳聚糖纳

米复合材料在不同领域的应用。

3.1 医药领域

3.1.1 伤口敷料 壳聚糖纳米复合材料可通过增强皮肤真皮层的上皮化过程和胶原沉积而促进伤口愈合(Azman *et al*, 2021)。Shen 等(2020)研究发现,基于硫酸化壳聚糖和 I 型胶原的复合水凝胶可通过增强巨噬细胞成纤维细胞的功能来加速慢性糖尿病伤口的愈合,从而增强伤口组织中胶原蛋白和细胞外基质的形成。负载粒细胞-巨噬细胞集落刺激因子的壳聚糖纳米颗粒与聚己内酯复合生成的纳米纤维同样具有加速伤口闭合的效果(Tanhha *et al*, 2017)。聚乙烯醇壳聚糖纳米纤维通过与包裹抗菌肽的羧甲基壳聚糖纳米颗粒相关联,表现出抗菌特性并刺激小鼠组织的愈合(Zou *et al*, 2020)。Tamer 等(2023)发现,通过 NH₂ 基团与 2,4,6-三甲氧基苯甲醛偶联的壳聚糖是伤口敷料产品和皮肤癌治疗的候选材料。Jiang 等(2016)研究了壳聚糖-聚乳酸纳米纤维膜负载四环素盐酸盐静电纺丝的抗菌活性和释放行为,研究表明,纳米纤维膜加强了四环素盐酸盐的持续释放特性,并对革兰氏阳性和革兰氏阴性细菌具有有效抗菌活性。

3.1.2 组织工程 壳聚糖纳米复合材料由于其良好的生物相容性和机械性能,是骨骼和软骨再生的重要候选材料。Ma 等(2021)研究发现,由明胶、壳聚糖、聚乙烯醇和纳米羟基磷灰石制成的复合支架对成骨分化显示出积极的影响,能够模拟天然骨的结构和功能,该复合支架有效地促进了细胞增殖和粘附,使其成为骨组织工程中有前途的仿生支架。Doench 等(2019)对纤维素纳米纤维填充的壳聚糖水凝胶在椎间盘纤维环组织修复和再生效果进行了研究,研究表明,该纳米复合材料适合用作纤维环组织缺损的植入物,以修复椎间盘生物力学,并在椎间盘核突出的情况下提供固定板,同时支持椎间盘再生。壳聚糖纳米复合支架在软骨下组织再生方面的应用潜力为软骨下骨受损提供了一种新应用思路。Samie 等(2023)在研究中制备了由纳米羟基磷灰石、壳聚糖以及羟丙基甲基纤维素或家蚕丝蛋白组成的复合支架,它们显示出控制曲安奈德或转化生长因子等释放治疗剂的能力,并能够支持小鼠前成骨细胞 MC3T3-E1 的附着和增殖,表明其具有生物相容性。此外,曲安奈德支架处理组的实时定量反转录聚合酶链式反应分析显示出其在调节炎症和骨特异性生物标志物方面的潜力。

3.1.3 药物递送 壳聚糖纳米复合材料在药物递送系统也展现出巨大的潜力,复合材料可通过不同的途径递送负载药物,其纳米级结构能够提高药物的

表 1 壳聚糖纳米复合材料在不同领域的应用研究进展摘要
Tab.1 Summary of research progress on chitosan nanocomposites in various fields

医药领域 Medical field			
主要作用成分 Main active components	用途 Usage	作用效果 Effect	文献 Reference
硫酸化壳聚糖、I 型胶原	伤口敷料	可通过增强巨噬细胞成纤维细胞加速慢性糖尿病伤口的愈合	Shen 等(2020)
壳聚糖、聚己内酯、粒细胞-巨噬细胞集落刺激因子	伤口敷料	通过持续释放功能性粒细胞-巨噬细胞集落刺激因子, 加速大鼠背部全层皮肤伤口愈合, 并减少瘢痕形成	Tanhha 等(2017)
壳聚糖、聚乙醇醇、抗菌肽、羧甲基壳聚糖	伤口敷料	对小鼠伤口具有抗菌和伤口愈合双重功能	Zou 等(2020)
壳聚糖、聚乳酸、四环素盐酸盐	伤口敷料	可加强四环素盐酸盐的持续释放特性, 并对革兰氏阳性和革兰氏阴性细菌具有有效抗菌活性	Jiang 等(2016)
壳聚糖、明胶、聚乙烯醇、纳米羟基磷灰石	组织工程	能够模拟天然骨的结构和功能, 有效促进细胞增殖和粘附	Ma 等(2021)
壳聚糖、纤维素纳米纤维	组织工程	修复椎间盘生物力学、支持椎间盘再生	Doench 等(2019)
壳聚糖、纳米羟基磷灰石、羟丙基甲基纤维素/家蚕丝蛋白	组织工程	支持小鼠前成骨细胞 MC3T3-E1 的附着和增殖	Samie 等(2023)
壳聚糖、聚乙烯醇、左氧氟沙星	药物递送	显著减少药物的突释现象, 并在磷酸盐缓冲液中实现长达 72 h 的持续释放	Jalvandi 等(2017)
N-三甲基壳聚糖、吉西他滨、聚乳酸-羟基乙酸共聚物、d- α -生育酚聚乙二醇 1000 琥珀酸酯	药物递送	显著提高了药物生物利用度	Chen 等(2021)
壳聚糖、橙皮苷	药物递送	在炎症微环境中表现出更高的细胞摄取效率; 在炎症性肺疾病的小鼠模型中, 显著抑制了肺损伤	Jin 等(2021)
壳聚糖、碱性成纤维细胞生长因子	药物递送	显著提高了碱性成纤维细胞生长因子的皮肤渗透效率	Xie 等(2022)
壳聚糖、苯扎氯铵	药物递送	显著提高了粘膜黏附性	Tuğcu-Demiröz 等(2021)
N-三甲基壳聚糖、牡荆苷	药物递送	显著提高了牡荆苷的生物利用度和抗氧化活性	Li 等(2022)
乙二醇壳聚糖、氧化透明质酸、左氧氟沙星	药物递送	在多种细菌菌株中表现出强大的抑菌能力, 并表现出良好的体外抗炎活性	Bao 等(2021)
废水和污染物处理领域 Wastewater and pollutant treatment field			
主要作用成分 Main active components	用途 Usage	作用效果 Effect	文献 Reference
壳聚糖、磁性氧化铁	吸附抗生素	从工业和医院废水中可有效去除甲硝唑等污染物	Asgari 等(2020)
壳聚糖、膨润土	吸附染料	从水溶液中可有效去除活性紫 5R	Da Silva 等(2021)
壳聚糖、钹-铈、氧化铁	吸附染料	提升了染料的吸附率和降解率	Huang 等(2021)

续表 1

农业领域 Agriculture field			
主要作用成分 Main active components	用途 Usage	作用效果 Effect	文献 Reference
壳聚糖、铜	植物病原菌的抗菌作用	对链格孢菌、灰葡萄孢菌和水稻立枯丝核菌具有良好体外抑制率	Saharan 等(2013)
壳聚糖、氧化铜	植物病原菌的抗菌作用	较低浓度即可将病害严重程度降低 91.5%	Mosa 等(2023)
壳聚糖、辣木	植物免疫调节	能触发水稻植物中多种防御相关基因的表达, 并促进根圈和叶圈微生物多样性的提升	Hafeez 等(2024)
壳聚糖、氧化锌	植物免疫调节	能够通过改善植物的光合色素和气体交换参数, 有效控制番茄的细菌斑点病	Esserti 等(2024)
壳聚糖、二氧化硅	植物免疫调节	显著降低了大豆猝死综合征的发生率, 并增加了植株微量营养素的含量	Keefe 等(2024)
壳聚糖、硅	促进植物生长	玉米幼苗活力指数比单纯用二氧化硅最多可提高 3.7 倍	Kumaraswamy 等(2021)
壳聚糖、海藻酸盐、吡虫啉	农药	与游离农药相比, 包封农药的释放时间延长了最多 8 倍	Guan 等(2008)
壳聚糖、木质素磺酸钠、阿维菌素	农药	壳聚糖和木质素磺酸钠壳层为 20 的皮克林乳液在紫外线照射下将阿维菌素的半衰期延长了 5 倍	Yu 等(2023)
食品领域 Food industry			
主要作用成分 Main active components	用途 Usage	作用效果 Effect	文献 Reference
壳聚糖、香附子精油	抗氧化剂/抗菌剂	在较低浓度下即可抑制金黄色葡萄球菌 ATCC6538 和大肠杆菌 ATCC8739 的生长	Kavaz 等(2019)
壳聚糖、迷迭香提取物、 γ -聚谷氨酸	防腐剂/抗菌剂	显著提高了迷迭香提取物对枯草芽孢杆菌的抗菌活性	Lee 等(2019)
壳聚糖、甘油、蜂胶	食品包装	在 24 小时内对单核细胞增生李斯特菌具有较强的抑制作用, 对大肠杆菌也表现出显著的抑制效果	Correa-Pacheco 等(2019)
壳聚糖、纤维素、木质纤维素、银	食品包装	明显提升对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抗菌活性	Mohammadalinejad 等(2019)
壳聚糖、精油	保鲜剂	显著减少了新鲜虾表面的微生物负荷	姚洁玉等(2019)
渔业领域 Fisheries industry			
主要作用成分 Main active components	用途 Usage	作用效果 Effect	文献 Reference
壳聚糖、硒	饲料/营养物质递送	食用含有硒-壳聚糖纳米复合物鱼饲料的尼罗罗非鱼鱼苗在体重增长和饲料转化率方面显著提高	Srinivasan 等(2024)
壳聚糖、印度楝叶	疫病防治/药物递送	对感染了嗜水气单胞菌的尼罗罗非鱼, 可修复其抗氧化和免疫指标	Ibrahim 等(2023)
壳聚糖、甘露聚糖寡糖、膨润土	饲料/去除有害物质	作为生物基吸附剂可较好地 从鱼饲料中持续根除黄曲霉毒素	Ghobish 等(2025)

生物利用度和靶向性,并展示出优越的抗菌活性及其他功能特性。Jalvandi 等(2017)使用 PVA 纳米纤维整合左氧氟沙星制备了壳聚糖纳米纤维,结果表明,该纳米纤维在递送药物方面具有更高的持续释放能力。Chen 等(2021)通过在小鼠模型中测试 N-三甲基壳聚糖涂层纳米复合材料的药物生物利用度和化疗效果,评估了该新型纳米复合材料对吉西他滨口服递送和抗肿瘤活性的改进效果,研究发现,N-三甲基壳聚糖涂层纳米复合材料显著提高了吉西他滨的口服生物利用度,与未涂层的吉西他滨相比,该纳米复合材料显示出更好的化疗效果。在动物模型中,使用该纳米复合材料治疗的肿瘤生长受到了显著抑制。Jin 等(2021)研究探索了通过鼻腔递送橙皮苷-壳聚糖纳米颗粒在急性肺损伤小鼠模型中抑制细胞因子风暴综合征的效果,研究表明,该递送系统显著减少了肺部炎症和细胞因子的释放,改善了小鼠的肺功能,展示了橙皮苷-壳聚糖纳米颗粒作为治疗急性肺损伤和抑制细胞因子风暴的潜力。Xie 等(2022)研究探讨了利用壳聚糖纳米载体结合超声透入技术经皮递送碱性成纤维细胞生长因子的效果。研究结果显示,这种递送系统显著提高了碱性成纤维细胞生长因子的皮肤渗透效率,并且在皮肤表面没有残留,促进了皮肤的再生和愈合。Tuğcu-Demiröz 等(2021)的研究通过开发和表征一种载有苯扎氯铵的壳聚糖纳米纤维混合系统,以实现阴道内的控释。研究结果显示,该混合系统具有良好的黏附性和渗透性,能够延长药物在阴道内的滞留时间并提高药物的透皮吸收效率,从而有效地控制苯扎氯铵的释放,这一系统展示了在阴道药物递送中的应用潜力,有望提高局部治疗的效果。Li 等(2022)开发了一种 N-三甲基壳聚糖包覆的靶向纳米颗粒系统,用于提高牡荆苷的口服生物利用度和抗氧化活性。通过实验发现,该纳米系统显著提升了牡荆苷的溶解度和吸收效率,从而增强了其在体内的生物利用度。此外,该纳米系统还显著提高了牡荆苷的抗氧化活性,表现出比未修饰的牡荆苷更强的自由基清除能力。Bao 等(2021)开发了一种用于局部眼部给药的甘醇壳聚糖-氧化透明质酸水凝胶薄膜,以递送地塞米松和左氧氟沙星,并对其进行了体外和体内评估,结果显示,该水凝胶薄膜具有良好的生物相容性和药物释放特性,能够显著减少炎症反应并有效抑制感染,从而有望改善眼部疾病的治疗效果。

3.2 废水和污染物处理领域

在干旱地区,通过水处理将工业废水、生活污水

等非常规水源变为符合标准的农业灌溉水是一个重要命题,除此之外,伴随全球水资源短缺,畜禽和水产养殖废水处理及循环利用也成为备受关注的研究热点。壳聚糖及其衍生物因具有多功能化学基团、高亲水性、高化学反应性和高分子柔性结构(Vunain *et al*, 2016),具有较强的重金属吸附能力。Zhu 等(2021)在研究中发现,当壳聚糖直接作为吸附剂应用时,吸附能力较低,通过将壳聚糖材料塑造成纳米纤维,可有效提高单一壳聚糖材料的吸附性能。壳聚糖作为基质的纳米复合物,有望进一步提高机械性、稳定性和可重复使用等其他性能。当壳聚糖与磁性氧化铁纳米粒子结合时,能够从工业和医院废水中有效去除甲硝唑等污染物(Asgari *et al*, 2020)。壳聚糖通过与纳米陶瓷或纳米粘土结合,可去除各种类型的有机染料(Da Silva *et al*, 2021)。壳聚糖基光催化剂纳米复合材料在光催化降解有机污染物方面展现了良好的应用前景(Huang *et al*, 2021)。此外,壳聚糖纳米复合物还可以通过芬顿(Fenton)工艺来有效去除废水中的染料(Alimard, 2019)。

3.3 农业领域

3.3.1 对植物病原菌的抗菌作用 壳聚糖作为一种阳离子多糖,具有广谱抗菌活性。与某些特异性纳米材料复合后,壳聚糖的抗菌和杀虫能力显著增强,成为农用抗菌剂的潜力材料(Malerba *et al*, 2018)。传统的种子、土壤或叶面喷洒的农用化学品难以直接到达植物细胞,而壳聚糖基纳米复合材料由于其纳米级尺寸,能够渗透植物组织并作用于内部器官(Bandara *et al*, 2020)。Saharan 等(2013)通过离子凝胶法制备了不同类型的壳聚糖纳米颗粒,并比较了它们对链格孢菌(*Alternaria alternata*)、菜豆壳孢菌(*Macrophomina phaseolina*)和水稻立枯丝核菌(*Rhizoctonia solani*)的抗真菌特性。结果显示,铜-壳聚糖纳米颗粒在 0.1%浓度下效果最为显著,对链格孢菌、菜豆壳孢菌和水稻立枯丝核菌的体外抑制率分别为 89.5%、63.0%和 60.1%,具有潜力作为作物保护剂。此外,Mosa 等(2023)评估了壳聚糖-氧化铜纳米复合材料对抗尖孢镰刀菌(*Fusarium oxysporum*)引起的番茄植株镰刀菌枯萎病的治疗效果,显示 1 g/L 的纳米颗粒处理可将病害严重程度降低 91.5%,显著优于传统农药“Kocide 2000”的 2.5 g/L 剂量。

3.3.2 植物免疫调节 除了抗菌作用外,壳聚糖纳米复合材料还能通过增强植物防御基因的转录、提升根际微生物多样性、促进光合作用和调节营养成分,

赋能植物免疫调节。壳聚糖纳米复合材料可以显著增加水稻植株中防御相关基因的转录水平,同时通过促进叶绿素和类胡萝卜素的生成,提高了水稻的光合作用效率和营养状况(Ahmed *et al.*, 2023)。Hafeez 等(2024)进一步证实,喷施 200 mg/L 的壳聚糖-辣木复合颗粒能触发水稻植物中多种防御相关基因的表达,并促进根圈和叶圈微生物多样性的提升。另有研究表明,壳聚糖与氧化锌纳米颗粒组成的复合材料能够通过改善植物的光合色素和气体交换参数,有效控制番茄的细菌斑点病(Esserti *et al.*, 2024)。壳聚糖-二氧化硅纳米颗粒处理则显著降低了大豆猝死综合征的发生率,并增加了植株微量营养素的含量(Keefe *et al.*, 2024)。

3.3.3 促进植物生长 壳聚糖和壳寡糖能够显著提高多种作物的发芽率。这是由于壳聚糖具有抗逆性,能够增强幼苗对外界不利条件的抵抗力。此外,壳聚糖和壳寡糖还可以增加苗重,促进根系生长,有效提升光合作用,从而提高作物产量并改善品质。因此,它们可作为植物生长调节剂应用(朱俊, 2019)。许多研究已将壳聚糖纳米复合材料作为植物生长促进剂进行评估(Orzali *et al.*, 2017)。壳聚糖通过与种子的作用,可积极影响发芽指数,用不同浓度的壳聚糖-硅纳米肥料(0.04~0.12%, W/V)处理玉米种子,其幼苗活力指数(SVI)比 SiO₂ 提高了最多 3.7 倍(Kumaraswamy *et al.*, 2021)。此外,壳聚糖纳米配方还被用作生长促进剂,通过改善营养吸收、叶绿素含量和光合速率来促进植物生长(Ingle *et al.*, 2022)。

3.3.4 农药与农肥 壳聚糖本身具有抗菌、杀虫、改善土壤菌群等特性,与此同时,壳聚糖结构由于具有活性较高的氨基与羟基,且为阳离子聚合体,能够通过简单的共价或者离子交联而形成纳米微球,这一系列天然优势造就了壳聚糖可作为研制高效缓释农药的优良载体,同时也可作为农业肥料的绿色增效组份。Guan 等(2008)将壳聚糖与海藻酸盐微胶囊作为吡虫啉的载体系统并对其杀虫效果进行评估,所获得的颗粒具有良好的稳定性,吡虫啉的包封效率约为 82%。在释放实验中,结果显示,与游离农药相比,包封农药的释放时间延长了最多 8 倍。Yu 等(2023)制备了由壳聚糖和木质素磺酸钠负载阿维菌素的皮克林乳液,通过控制沉积的壳聚糖和木质素磺酸钠层数,可以精细调节微胶囊的壳厚,从而使壳聚糖和木质素磺酸钠皮克林乳液具备可调节的释放行为,壳聚糖和木质素磺酸钠壳层为 20 的皮克林乳液在紫外线照射下将阿维菌素的半衰期延长了 5 倍。此外,该皮克林乳液表

现出对 pH 值和漆酶的双重响应,有利于阿维菌素的靶向释放。Corradini 等(2010)探索了利用壳聚糖纳米颗粒缓释氮、磷和钾肥料的可能性;Hussain 等(2012)报道了壳聚糖微球控释尿素的应用研究。虽然纳米颗粒作为控释装置的成本可能高于简单的肥料施用,但壳聚糖纳米复合材料不仅可以缓释氮、磷和钾肥,供作物最佳吸收,还可以防止养分不必要地流失到土壤、水和空气中,可减少肥料使用量和降低环境影响(Kashyap *et al.*, 2015)。

3.4 食品领域

在过去的十年中,消费者对食品健康和环境保护的关注日益增加,生物基包装材料替代合成塑料聚合物的研究成为热点(Rodríguez-Rojas *et al.*, 2019)。可生物降解的替代材料包括多糖类(如纤维素、淀粉、壳聚糖、琼脂)和蛋白质类(如酪蛋白),它们被视为塑料聚合物的潜在替代品(Fabra *et al.*, 2014)。壳聚糖可延长新鲜农产品、鱼类和肉制品的保质期。通过在壳聚糖中加入纳米材料,可以进一步增强薄膜和涂层的抗菌、机械和阻隔性能,从而提升食品质量并延长其保质期。壳聚糖纳米粒子与植物精油结合,已广泛应用于对抗食源性病原体。载有香附子精油的壳聚糖纳米颗粒在比单独成分更低的浓度下能够抑制大肠杆菌(*Escherichia coli*)和金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*) (Kavaz *et al.*, 2019)。迷迭香提取物在不同壳聚糖浓度(0.1~1.8 mg/mL)下与壳聚糖和 γ -聚谷氨酸一起进行纳米封装,随着壳聚糖浓度的增加,抗菌效果也得到了改善(Lee *et al.*, 2019)。将壳聚糖纳米粒子加入用于草莓保鲜的可食性薄膜中,并结合 1%壳聚糖、甘油和乙醇提取的蜂胶,表现出对食源性病原体的抑制作用,且抑制效果与浓度呈正相关(Correa-Pacheco *et al.*, 2019)。利用千屈菜药用植物提取物合成的含有银纳米粒子的壳聚糖纳米纤维,已被证明在控制释放及抑制细菌生长方面有效(Mohammadalinejad *et al.*, 2019)。壳聚糖纳米颗粒与精油等组合使用,也被用于甲壳类水产品的保鲜中,显著减少了新鲜虾表面的微生物负荷,并有效延长了虾肉的保存时间(姚洁玉等, 2019)。

3.5 渔业领域

壳聚糖纳米颗粒是水产养殖中最广泛使用的药物、营养制剂和基因递送载体之一(Ji *et al.*, 2015)。壳聚糖纳米复合物可作为生物活性成分的载体、包裹剂和固定剂,应用于鱼类胃肠道中的药物、维生素、营养物质、基因和疫苗的口服递送。饲料中添加壳聚糖

和几丁质可以显示出免疫调节作用(白阳等, 2016), 并通过增强先天免疫反应, 提高水产养殖对象对感染和胁迫的抵抗力(Ji *et al.*, 2015; Vahedi *et al.*, 2011)。克氏原螯虾(*Procambarus clarkii*)通过摄入含有壳聚糖纳米颗粒的饲料可抵抗 WSSV 感染, 存活率显著提高(Sun *et al.*, 2016)。食用含有硒-壳聚糖纳米复合物鱼饲料的尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)鱼苗在体重增长和饲料转化率方面表现出显著的特定生长率提高(Srinivasan *et al.*, 2024)。感染了嗜水气单胞菌(*Aeromonas hydrophila*)的尼罗罗非鱼, 在浓度为 1 mg/L 负载印度楝叶提取物的纳米壳聚糖复合物的水体中养殖 7 d 后, 其抗氧化和免疫指标均得到恢复(Ibrahim *et al.*, 2023)。壳聚糖与甘露聚糖寡糖、膨润土的纳米复合材料作为生物基吸附剂具有较好的从鱼饲料中持续根除黄曲霉毒素的潜力(Ghobish *et al.*, 2024)。壳聚糖-银纳米复合物可抑制鲑鱼弧菌(*Aliivibrio salmonicida*)的生长, 其影响主要包括: 影响鲑鱼弧菌细胞膜的通透性, 可能通过产生氧化应激导致细菌细胞死亡, 与此同时, 壳聚糖-银纳米复合物还可导致鲑鱼弧菌 DNA 的广泛降解, 并抑制细菌蛋白质的表达和生产(Dananjaya *et al.*, 2016)。

4 总结与展望

壳聚糖的传统应用领域包括食品、保健品、营养品、医药及化妆品等领域, 主要市场是日本、美国、韩国、中国、加拿大、挪威、澳大利亚、法国、英国、波兰和德国。自 20 世纪 90 年代初以来, 壳聚糖基生物材料蓬勃发展, 国际市场上大批产品上市, 主要以非织造布、纳米材料、复合材料、凝胶和海绵等加速伤口愈合和皮肤再生的材料为主, 初始集中在北美和亚洲, 近年欧洲发展较快, 已上市产品包括 HemCon[®]、ChitoGauze[®]、ChitoFlex[®]、ChitoSam[™]、Syvek-Patch[®]、Chitopack C[®]、Chitopack S[®]、Chitodine[®]、ChitosanSkin[®]、TraumaStat[®]、TraumaDEX[®]、Celox[™]等。近十年来, 伴随纳米技术的快速发展, 壳聚糖纳米复合材料的应用研究显著增加, 更为高端的组织工程及医药载体产品步入研发阶段。比利时的 KitoZyme 公司正在开发应用于葡萄酒酿造以及环境保护的壳聚糖-二氧化硅双壳微胶囊, 美国 DESI 公司开发了基于壳聚糖-乳酸的 ChitoVan[™]生物絮凝剂。德国的 Kerimedical 公司开发了 Reaxon[®]壳聚糖基神经导管, 有助于避免自体移植的不良缺点, 它的特殊结构也促进了营养物质和氧气的运输(Morin-Crini *et al.*, 2019)。载有精油和活性成分的壳聚糖纳米复合物已被开发为药妆产品的

活性成分, 除此之外, 基于壳聚糖-甘露醇-单磷酸酯佐剂的鼻内疫苗、壳聚糖纳米颗粒凝胶的口腔冲洗液、壳聚糖-氯胺酮的鼻内喷雾剂等正处于临床或上市阶段(Aibani *et al.*, 2021)。

得益于我国虾蟹养殖产业的飞速发展, 我国成为甲壳素原料生产和出口大国。近 20 年来, 我国壳聚糖基生物材料也实现了跨越式发展, 截至 2022 年, 据药监局的公开数据统计, 全国有效注册的壳聚糖类医疗器械产品共 199 个, 多集中在伤口护理、抗菌消炎、止血等传统领域。同美国、德国、日本等相比, 我国在壳聚糖基纳米复合材料产品开发和产业布局仍有较大提升空间。

本文综述了壳聚糖基纳米复合材料在药物输送、组织工程、农药和农肥、食品、渔业和环境保护等领域的应用进展, 展示了壳聚糖纳米复合材料广泛的应用潜力, 突显了其作为下一代绿色生物材料的巨大价值。壳聚糖纳米复合材料的发展为虾蟹壳废弃物循环利用、提升我国甲壳素行业竞争力提供了有益途径(朱琳等, 2019)。尽管壳聚糖可以通过纳米技术来改善其机械性能, 但其稳定性、规模化制备、成本、安全性等都有待提升。壳聚糖纳米复合材料在某些负载或应力较大的环境中仍然存在强度和韧性不足的问题, 且在一些环境条件下可能会发生降解, 尤其是在高温、强酸或强碱的条件下, 这会影响其长期稳定性和性能。此外, 壳聚糖纳米复合材料生产工艺的规模化和成本控制仍需要进一步优化, 在生物医学应用中的长期安全性和潜在的环境影响也有待更深入的研究等。因此, 未来仍需在基础理论研究、材料设计与优化、绿色工艺开发以及安全性评估等方面进行持续深入的探索与突破, 如通过开发新的纳米填料(如碳纳米管、石墨烯等)或改进复合材料的制备工艺, 提高其力学性能, 满足更广泛的工程应用需求, 或开发低能耗、无溶剂、无污染的合成方法, 实现环境友好型生产等。

参考文献

- ABD EL-HACK M E, EL-SAADONY M T, SHAFI M E, *et al.* Antimicrobial and antioxidant properties of chitosan and its derivatives and their applications: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 164: 2726–2744
- AHMAD S, ABBASI A, MANZOOR K, *et al.* In bionanocomposites in tissue engineering and regenerative medicine. Cambridge: Woodhead Publishing, 2021
- AHMED T, NOMAN M, GARDEA-TORRESDEY J L, *et al.*

- Dynamic interplay between nano-enabled agrochemicals and the plant-associated microbiome. *Trends in Plant Science*, 2023, 28(11): 1310–1325
- AIBANI N, RAI R, PATEL P, *et al.* Chitosan nanoparticles at the biological interface: Implications for drug delivery. *Pharmaceutics*, 2021, 13(10): 1686
- ALIMARD P. Fabrication and kinetic study of Nd-Ce doped Fe₃O₄-chitosan nanocomposite as catalyst in Fenton dye degradation. *Polyhedron*, 2019, 171: 98–107
- ANITHA A, SOWMYA S, SUDHEESH KUMAR P T, *et al.* Chitosan-a versatile semi-synthetic polymer in biomedical applications. *Progress in Polymer Science*, 2014, 39: 1644–1667
- ANRAKU M, GEBICKI J M, IOHARA D, *et al.* Antioxidant activities of chitosans and its derivatives in *in vitro* and *in vivo* studies. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 199: 141–149
- ARANAZ I, ALCÁNTARA A R, CIVERA M C, *et al.* Chitosan: An overview of its properties and applications. *Polymers*, 2021, 13(19): 3256
- ARORA S, DAS G, ALAQRNI M, *et al.* Role of chitosan hydrogels in clinical dentistry. *Gels*, 2023, 9: 698
- ASGARI E, SHEIKHMOHAMMADI A, YEGANEH J. Application of the Fe₃O₄-chitosan nano-adsorbent for the adsorption of metronidazole from wastewater: Optimization, kinetic, thermodynamic and equilibrium studies. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 164: 694–706
- ASSAAD E, MAIRE M, LEROUGE S. Injectable thermosensitive chitosan hydrogels with controlled gelation kinetics and enhanced mechanical resistance. *Carbohydrate Polymers*, 2015, 130: 87–96
- AZMANA M, MAHMOOD S, HILLES A R, *et al.* A review on chitosan and chitosan-based bionanocomposites: Promising material for combatting global issues and its applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 185: 832–848
- BAI Y, XU W, WANG D F, *et al.* The effect of dietary chitosan with different molecular weights on the growth and immunity of *Apostichopus japonicus* Selenka. *Progress in Fishery Science*, 2016, 37(1): 93–99 [白阳, 徐玮, 汪东风, 等. 不同分子量壳聚糖对刺参(*Apostichopus japonicus* Selenka)生长和免疫功能的影响. *渔业科学进展*, 2016, 37(1): 93–99]
- BANDARA S, DU H, CARSON L, *et al.* Agricultural and biomedical applications of chitosan-based nanomaterials. *Nanomaterials*, 2020, 10(10): 1903
- BAO Z, YU A, SHI H, *et al.* Glycol chitosan/oxidized hyaluronic acid hydrogel film for topical ocular delivery of dexamethasone and levofloxacin. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 167: 659–666
- BHAT S, TRIPATHI A, KUMAR A. Supramacroporous chitosan–agarose–gelatin cryogels: *in vitro* characterization and *in vivo* assessment for cartilage tissue engineering. *Journal of the Royal Society Interface*, 2011, 8: 540–554
- CHEN G, SVIRSKIS D, LU W, *et al.* N-trimethyl chitosan coated nano-complexes enhance the oral bioavailability and chemotherapeutic effects of gemcitabine. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 273: 118592
- CHENG H, SHI W, FENG L, *et al.* Facile and green approach towards biomass-derived hydrogel powders with hierarchical micronanostructures for ultrafast hemostasis. *Journal of Materials Chemistry B*, 2021, 9: 6678–6690
- CORRADINI E, DE MOURA M R, MATTOSO L H. A preliminary study of the incorporation of NPK fertilizer into chitosan nanoparticles. *Express Polymer Letters*, 2010, 4(8): 509–515
- CORREA-PACHECO Z, BAUTISTA-BAÑOS S, RAMOS-GARCÍA M D L, *et al.* Physicochemical characterization and antimicrobial activity of edible propolis-chitosan nanoparticle films. *Progress in Organic Coatings*, 2019, 137: 105326
- DA SILVA J C, FRANÇA D B, RODRIGUES F, *et al.* What happens when chitosan meets bentonite under microwave-assisted conditions? Clay-based hybrid nanocomposites for dye adsorption. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2021, 609: 125584
- DANANJAYA S H, GODAHEWA G I, JAYASOORIYA R G, *et al.* Antimicrobial effects of chitosan silver nanocomposites (CAgNCs) on fish pathogenic *Aliivibrio* (*Vibrio*) *salmonicida*. *Aquaculture*, 2016, 450: 422–430
- DIVYA K, JISHA M S. Chitosan nanoparticles preparation and applications. *Environmental Chemistry Letters*, 2018, 16: 101–112
- DOENCH I, AHN TRAN T, DAVID L, *et al.* Cellulose nanofiber-reinforced chitosan hydrogel composites for intervertebral disc tissue repair. *Biomimetics*, 2019, 4: 19
- ESSERTI S, BILLAH R E K, VENISSE J S, *et al.* Chitosan embedded with ZnO nanoparticles and hydroxyapatite: Synthesis, antiphytopathogenic activity and effect on tomato grown under high density. *Scientia Horticulturae*, 2024, 326: 112778
- FABRA N, REGUANT M. Pass-through of emissions costs in electricity markets. *American Economic Review*, 2014, 104(9): 2872–2899
- GHOBIH A M, EL-NOKRASHY A M, ELSHAFFEY A E, *et al.* Investigating the potential of chitosan-nanocomposites as a bio-based adsorbent for sustainable aflatoxin eradication from fish feed. *Egyptian Journal of Veterinary Sciences*, 2024, 56(8): 1719–1730
- GU Q S, CHEN X G, ZHAO C R. Chitosan-based marine biomedical materials. Shanghai: Shanghai Scientific and

- Technical Publishers, 2020 [顾其胜, 陈西广, 赵成如. 壳聚糖基海洋生物医用材料. 上海: 上海科学技术出版社, 2020]
- GUAN H, CHI D, YU J, *et al.* A novel photodegradable insecticide: Preparation, characterization and properties evaluation of nano-Imidacloprid. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2008, 92(2): 83–91
- GUO Y, QIAO D, ZHAO S, *et al.* Advanced functional chitosan-based nanocomposite materials for performance-demanding applications. *Progress in Polymer Science*, 2024, 26: 101872
- GUPTA A, BHAT S, JAGDALE P R, *et al.* Evaluation of three-dimensional chitosan-agarose-gelatin cryogel scaffold for the repair of subchondral cartilage defects: An *in vivo* study in a rabbit model. *Tissue Engineering Part A*, 2014, 20: 3101–3111
- HAFEEZ R, GUO J, AHMED T, *et al.* Bio-formulated chitosan nanoparticles enhance disease resistance against rice blast by physiomorphic, transcriptional, and microbiome modulation of rice (*Oryza sativa* L.). *Carbohydrate Polymers*, 2024, 334: 122023
- HAGHIGHI H, DELEO R, BEDIN E *et al.* Pulvirenti, Comparative analysis of blend and bilayer films based on chitosan and gelatin enriched with LAE (lauroyl arginate ethyl) with antimicrobial activity for food packaging applications. *Food Packaging and Shelf Life*, 2019, 19: 31–39
- HOSSEINNEJAD M, JAFARI S M. Evaluation of different factors affecting antimicrobial properties of chitosan. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016, 85: 467–475
- HUANG C, PENG B. Photocatalytic degradation of patulin in apple juice based on nitrogen-doped chitosan-TiO₂ nanocomposite prepared by a new approach. *LWT - Food Science and Technology*, 2021, 140: 110726
- HUSSAIN M R, DEVI R R, MAJI T K. Controlled release of urea from chitosan microspheres prepared by emulsification and cross-linking method. *Iranian Polymer Journal*, 2012, 21: 473–479
- IBRAHIM R E, ELSHOPAKEY G E, ABDELWARITH A A, *et al.* Chitosan neem nanocapsule enhances immunity and disease resistance in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Heliyon*, 2023, 9(9): e19354
- INGLE P U, SHENDE S S, SHINGOTE P R, *et al.* Chitosan nanoparticles (ChNPs): A versatile growth promoter in modern agricultural production. *Heliyon*, 2022, 8(11): e11893
- JALVANDI J, WHITE M, GAO Y, *et al.* Polyvinyl alcohol composite nanofibres containing conjugated levofloxacin-chitosan for controlled drug release. *Materials Science and Engineering C*, 2017, 73: 440–446
- JI J, TORREALBA D, RUYRA À, *et al.* Nanodelivery systems as new tools for immunostimulant or vaccine administration: Targeting the fish immune system. *Biology*, 2015, 4(4): 664–696
- JIANG S, LV J, DING M, *et al.* Release behavior of tetracycline hydrochloride loaded chitosan/poly (lactic acid) antimicrobial nanofibrous membranes. *Materials Science and Engineering C*, 2016, 59: 86–91
- JIN H, ZHAO Z, LAN Q, *et al.* Nasal delivery of hesperidin/chitosan nanoparticles suppresses cytokine storm syndrome in a mouse model of acute lung injury. *Frontiers in Pharmacology*, 2021, 11: 592238
- KAKAEI S, SHAHBAZI Y. Effect of chitosan-gelatin film incorporated with ethanolic red grape seed extract and *Ziziphora clinopodioides* essential oil on survival of *Listeria monocytogenes* and chemical, microbial and sensory properties of minced trout fillet. *LWT - Food Science and Technology*, 2016, 72: 432–438
- KANTAK M N, BHARATE S S. Analysis of clinical trials on biomaterial and therapeutic applications of chitosan: A review. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 278: 118999
- KASHYAP P L, XIANG X, HEIDEN P. Chitosan nanoparticle based delivery systems for sustainable agriculture. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2015, 77: 36–51
- KAVAZ D, IDRIS M, ONYEBUCHI C. Physiochemical characterization, antioxidative, anticancer cells proliferation and food pathogens antibacterial activity of chitosan nanoparticles loaded with *Cyperus articulatus* rhizome essential oils. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 123: 837–845
- KEEFE T L, DENG C, WANG Y, *et al.* Chitosan-coated mesoporous silica nanoparticles for suppression of fusarium virguliforme in soybeans (*Glycine max*). *ACS Agricultural Science and Technology*, 2024, 4(5): 580–592
- KOŁODZIEJSKA M, JANKOWSKA K, KŁAK M, *et al.* Chitosan as an underrated polymer in modern tissue engineering. *Nanomaterials*, 2021, 11: 3019
- KUMARASWAMY R V, SAHARAN V, KUMARI S, *et al.* Chitosan-silicon nanofertilizer to enhance plant growth and yield in maize (*Zea mays* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*, 2021, 159: 53–66
- LEE K H, LEE JS, KIM E S, *et al.* Preparation, characterization, and food application of rosemary extract-loaded antimicrobial nanoparticle dispersions. *LWT - Food Science and Technology*, 2019, 101: 138–144
- LESTARI W, YUSRY WNAW, HARIS M S, *et al.* A glimpse on the function of chitosan as a dental hemostatic agent. *Japanese Dental Science Review*, 2020, 56(1): 147–154
- LI S, LV H, CHEN Y, *et al.* N-trimethyl chitosan coated targeting nanoparticles improve the oral bioavailability and

- antioxidant activity of vitexin. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 286: 119273
- LIU J, LIU Y. Advances in the research of wound dressings based on chitosan nanofibers. *Chinese Journal of Burns*, 2020, 36: 627–630
- LÜ S, ZHANG S, ZUO J, *et al.* Progress in preparation and properties of chitosan-based hydrogels. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 242: 124915
- MA N, WANG Q, SUN S, *et al.* Progress in chemical modification of chitin and chitosan. *Progress in Chemistry*, 2004, 16(4): 643 [马宁, 汪琴, 孙胜玲, 等. 甲壳素和壳聚糖化学改性研究进展. *化学进展*, 2004, 16(4): 643]
- MA P, WU W, WEI Y, *et al.* Biomimetic gelatin/chitosan/polyvinyl alcohol/nano-hydroxyapatite scaffolds for bone tissue engineering. *Materials Design*, 2021, 207: 109865
- MALERBA M, CERANA R. Recent advances of chitosan applications in plants. *Polymers*, 2018, 10(2): 118
- MOHAMMADALINEJHAD S, ALMASI H, ESMAILI M. Simultaneous green synthesis and in-situ impregnation of silver nanoparticles into organic nanofibers by *Lythrum salicaria* extract: Morphological, thermal, antimicrobial and release properties. *Materials Science and Engineering C*, 2019, 105: 110115
- MORIN-CRINI N, LICHTFOUSE E, TORRI G, *et al.* Applications of chitosan in food, pharmaceuticals, medicine, cosmetics, agriculture, textiles, pulp and paper, biotechnology, and environmental chemistry. *Environmental Chemistry Letters*, 2019, 17: 1667–1692
- MOSA M A, EL-ABEID S E. Chitosan-loaded copper oxide nanoparticles: A promising antifungal nanocomposite against fusarium wilt disease of tomato plants. *Sustainability*, 2023, 15: 14295
- MUTHU M, GOPAL J, CHUN S, *et al.* Crustacean waste-derived chitosan: antioxidant properties and future perspective. *Antioxidants*, 2021, 10: 228
- ORZALI L, CORSI B, FORNI C, *et al.* Chitosan in agriculture: A new challenge for managing plant disease. *Biological Activities and Application of Marine Polysaccharides*, 2017, 10: 17–36
- PARK J K, CHUNG M J, CHOI H N, *et al.* Effects of the molecular weight and the degree of deacetylation of chitosan oligosaccharides on antitumor activity. *International Journal of Molecular Sciences*, 2011, 12(1): 266–277
- PATHAK K, MISRA S K, SEHGAL A, *et al.* Biomedical applications of quaternized chitosan. *Polymers*, 2021, 13(15): 2514
- RODRÍGUEZ-ROJAS A, OSPINA A A, RODRÍGUEZ-VÉLEZ P, *et al.* What is the new about food packaging material? A bibliometric review during 1996–2016. *Trends in Food Science and Technology*, 2019, 85: 252–261
- SAHARAN V, MEHROTRA A, KHATIK R, *et al.* Synthesis of chitosan based nanoparticles and their *in vitro* evaluation against phytopathogenic Fungi. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2013, 62: 677–683
- SAMIE M, KHAN A F, RAHMAN S U, *et al.* Drug/bioactive eluting chitosan composite foams for osteochondral tissue engineering. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 229: 561–574
- SHEN T, DAI K, YU Y, *et al.* Sulfated chitosan rescues dysfunctional macrophages and accelerates wound healing in diabetic mice. *Acta Biomaterialia*, 2020, 117: 192–203
- SILVA A O, CUNHA R S, HOTZA D, *et al.* Chitosan as a matrix of nanocomposites: A review on nanostructures, processes, properties, and applications. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 272: 118472
- SRINIVASAN L, GAYATHRI A, KALIAPERUMAL K, *et al.* Selenium-chitosan engineered nanocomposite as efficient formulated fish diet evaluated for sustainable aquaculture practice of *Oreochromis niloticus* (Nile tilapia) fishes. *Polymers for Advanced Technologies*, 2024, 35(6): e6436
- SUN B, QUAN H, ZHU F. Dietary chitosan nanoparticles protect crayfish *Procambarus clarkii* against white spot syndrome virus (WSSV) infection. *Fish and Shellfish Immunology*, 2016, 54: 241–246
- TAMARA F R, LIN C, MI F L, *et al.* Antibacterial effects of chitosan/cationic peptide nanoparticles. *Nanomaterials*, 2018, 8: 88
- TAMER T M, ZHOU H, HASSAN M A, *et al.* Synthesis and physicochemical properties of an aromatic chitosan derivative: in vitro antibacterial, antioxidant, and anticancer evaluations, and in silico studies. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 240: 124339
- TANG W, WANG J, HOU H, *et al.* Application of chitosan and its derivatives in medical materials. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 124398
- TUĞCU-DEMİRÖZ F, SAAR S, KARA A A, *et al.* Development and characterization of chitosan nanoparticles loaded nanofiber hybrid system for vaginal controlled release of benzydamine. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2021, 161: 105801
- VAHEDI G, GHODRATIZADEH S. Effect of chitin supplemented diet on innate immune response of rainbow trout. *World Journal of Fish and Marine Sciences*, 2011, 3: 509–513
- VUNAIN E, MISHRA A K, MAMBA B B. Dendrimers, mesoporous silicas and chitosan-based nanosorbents for the removal of heavy-metal ions: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016, 86: 570–586
- WANG J, WANG L, YU H, *et al.* Recent progress on synthesis, property and application of modified chitosan: An overview. *International Journal of Biological*

- Macromolecules, 2016, 88: 333–344
- WANG Q Z, CHEN X G, LI Z X, *et al.* Preparation and blood coagulation evaluation of chitosan microspheres. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 2008, 19: 1371–1377
- WANG W, XUE C, MAO X. Chitosan: Structural modification, biological activity and application. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 164: 4532–4546
- XIE X, KURASHINA Y, MATSUI M, *et al.* Transdermal delivery of bFGF with sonophoresis facilitated by chitosan nanocarriers. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 2022, 75: 103675
- YAO J Y, LI Y, JIANG Y Y, *et al.* Optimization of chitosan-citrus essential oil microcapsules for application in the preservation of *Litopenaeus vannamei*. *Progress in Fishery Science*, 2019, 40(6): 203–209 [姚洁玉, 李苑, 江杨阳, 等. 壳聚糖-柑橘精油微胶囊制备工艺优化及其在凡纳滨对虾保鲜中的应用. *渔业科学进展*, 2019, 40(6): 203–209]
- YU J, WANG D, GEETHA N, *et al.* Current trends and challenges in the synthesis and applications of chitosan-based nanocomposites for plants: A review. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 261: 117904
- YU X, LI X, MA S, *et al.* Biomass-Based, interface tunable, and dual-responsive pickering emulsions for smart release of pesticides. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(27): 2214911
- YUAN G, LV H, TANG W, *et al.* Effect of chitosan coating combined with pomegranate peel extract on the quality of Pacific white shrimp during iced storage. *Food Control*, 2016, 59: 818–823
- ZHAO H T, LI X D, CAO F Q, *et al.* Advances in preparation and application of chitosan-based nanoparticles for drug delivery system. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2019, 38(11): 5057–5065 [赵海田, 李旭东, 曹凤芹, 等. 基于壳聚糖纳米粒子载药体系的制备与应用研究进展. *化工进展*, 2019, 38(11): 5057–5065]
- ZHU F, ZHENG Y M, ZHANG B G, *et al.* A critical review on the electrospun nanofibrous membranes for the adsorption of heavy metals in water treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 401: 123608
- ZHU J. Preparation of three types of chitooligosaccharide derivatives and preliminary studies of their lethal activities against *Meloidogyne incognita*. Master's Thesis of University of Chinese Academy of Sciences, 2019 [朱俊. 三类壳寡糖衍生物的制备及对南方根结线虫杀灭活性初步研究. 中国科学院大学硕士研究生学位论文, 2019]
- ZHU L, FU X D, LI L, *et al.* Cleaner production of chitooligosaccharides with different degrees of deacetylation from shrimp shells and their effects on TMV resistance. *Progress in Fishery Sciences*, 2019, 40(2): 148–154 [朱琳, 付晓丹, 李丽, 等. 利用虾壳清洁化生产不同脱乙酰度壳寡糖及其抗 TMV 效果研究. *渔业科学进展*, 2019, 40(2): 148–154]
- ZOU P, LEE W H, GAO Z, *et al.* Wound dressing from polyvinyl alcohol/chitosan electrospun fiber membrane loaded with OH-CATH30 nanoparticles. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 232: 115786

(编辑 陈 辉)

Research Progress on the Active Mechanisms of Chitosan and Applications of Chitosan-Based Composite Materials

XU Kefeng, GAO Yan, WANG Xin, WANG Qi,
HUANG Bo, JI Lei, WANG Ying, LIU Mei^①

(Marine Science Research Institute of Shandong Province, Qingdao 266104, China)

Abstract Chitosan is derived primarily from shrimp and crab shells. Expanding use of chitosan can promote the recycling of shrimp and crab shell waste while advancing green biotechnology. Chitosan and its derivatives exhibit a wide range of biological activities, including tissue repair, regeneration, and promoting coagulation and have antibacterial, anticancer, antioxidant, and absorption properties. Despite its excellent characteristics, chitosan has limitations, such as poor solubility and weak mechanical

① Corresponding author: LIU Mei, Email: mliu_msrisd@126.com

properties. The development of nanotechnology has provided a foundation for broadening the applications of chitosan. Chitosan-based nanocomposites are formed by introducing nanoscale inorganic or organic substances into chitosan, which serves as the matrix. Recently, chitosan-based nanocomposites have become the focus of research in various fields owing to their biocompatibility, degradability, and multifunctionality. In the medical field, chitosan nanocomposites can promote wound healing by enhancing epithelialization and collagen deposition in the dermis and are promising candidates for bone and cartilage regeneration. Furthermore, chitosan nanocomposites can deliver encapsulated drugs via various pathways; their nanoscale structure significantly improves the drugs' bioavailability and targeting. Chitosan and its derivatives possess strong heavy metal adsorption capabilities in wastewater and pollutant treatment, owing to their multifunctional chemical groups, high hydrophilicity, high chemical reactivity, and flexible polymer structures. Chitosan nanocomposites can enhance these properties by improving their mechanical strength, stability, reusability, and adsorption capacity. In agriculture, chitosan nanocomposites are used as functional components in plant growth inducers, pesticide carriers, fertilizers, growth regulators, and stress inhibitors owing to their enhanced antimicrobial properties, targeting ability, and controlled release features. In the food industry, the antimicrobial, mechanical, and barrier properties of films and coatings can be improved by incorporating nanomaterials into chitosan, which enhances food quality and extends shelf life. In the fishery industry, chitosan nanocomposites serve as carriers, encapsulants, and immobilizers for bioactive ingredients, enabling the oral delivery of drugs, vitamins, nutrients, genes, and vaccines to the fish gastrointestinal tract. This paper systematically reviews the research progress and application potential of chitosan-based nanocomposites across the fields of medicine, agriculture, wastewater treatment, food, and fisheries to provide a comprehensive reference and foundation for expanding the applications of chitosan.

Key words Chitosan-based; Active mechanism; Nanocomposites; Comprehensive application