

壳聚糖的结构、功能及其在农业上的应用研究进展

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2023.04.003

刘洁^{1,2} 王娟^{1,2}
李胜^{1,2} 谢丽霞^{1,2}
李丁^{1,2} 张邦跃^{1,2}

1. 湖南工业大学
生命科学与化学学院
湖南 株洲 412007
2. 湖南工业大学
百合种质资源创新与深加工
湖南省工程研究中心
湖南 株洲 412007

摘要: 壳聚糖具有生物相容性、生物降解性、抗菌活性和无毒性等特点,广泛应用于医学、制药、纺织等多个领域,但在农业领域壳聚糖的应用报道较少。阐述了壳聚糖的结构特征以及功能,总结了壳聚糖作为抗菌剂对植物病原菌的抑制作用和对生防菌的协同促进作用,介绍了壳聚糖在农业领域作为载体材料负载农药、肥料、土壤改良剂等应用,最后概述了壳聚糖对植物免疫防御作用的影响。壳聚糖在农业上的应用为农业生产者在改善土壤质量和提高农业生产率等问题上提供了一种新型的绿色环保方法,为可持续发展农业提供了新思路。

关键词: 壳聚糖; 结构特征; 抗菌活性; 载体材料; 农业生产

中图分类号: O636.1; TB324

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2023)04-0021-08

引文格式: 刘洁, 王娟, 李胜, 等. 壳聚糖的结构、功能及其在农业上的应用研究进展 [J]. 包装学报, 2023, 15(4): 21-28.

1 研究背景

到目前为止,世界人口约为80亿,到2050年,世界人口将达到97亿。持续增加的人口对粮食的需求量也在不断增加,全球农业在未来几十年将面临许多挑战。首先,病原菌是引起许多农作物病虫害的主要原因之一,会对世界各地的农作物产量和质量造成影响^[1]。许多病原菌在侵染农作物过程中还会产生有害的毒素和代谢产物,从而对农产品的安全构成严重威胁^[2]。其次,不合理的施肥方式以及不科学的耕作制度,导致土壤肥力结构失衡、土壤板结、土壤微生态环境破坏,从而引起农作物的产量降低。

目前,改善农业生产状况、提高农作物产量的措施主要包括施用肥料提高土壤肥力、添加土壤改良剂改善土壤板结、喷洒农药减少病虫害。然而,这些措施所产生的效果并不是很理想。一方面,肥料、

土壤改良剂、农药是在土壤上直接施用或在农作物上喷洒,这极易造成原料浪费和环境污染^[3]。据统计,施用的肥料中约有40%~70%的氮、80%~90%的磷和50%~70%的钾流失到环境中,不能被植物吸收。另一方面,由于化学农药易于使用,成本相对较低,作用范围广,多年来对病原体的控制主要是通过施用化学农药来进行的^[4]。但传统农药剂型存在使用有害溶剂、分散性差、粉尘飘移等缺点,造成多达99%的农药流失到环境中,未能被植物吸收。农药的低效使用造成病原和害虫产生抗性,农业用地、地下水和地表水体污染增加,水体富营养化,土壤退化,食物链中的生物积累,生物多样性丧失等一系列生态环境问题^[5]。因此,在保证植物健康生长和农业可持续发展的前提下,开发环境友好的土壤改良剂或农药及其技术具有重要意义。

壳聚糖(chitosan)溶于酸后,分子中的氨基可

收稿日期: 2023-02-22

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2022JJ50070)

作者简介: 刘洁(1985-),女,湖南株洲人,湖南工业大学讲师,博士,主要研究方向为植物营养与土壤肥力,

E-mail: 342781339@qq.com

与质子相结合而使自身带正电荷,因此它是自然界中唯一存在的带正电的碱性氨基多糖^[6]。壳聚糖具有来源丰富、无毒、低免疫原性以及良好的生物可降解性、生物相容性和抗菌活性等优点,可作为抗菌剂和药物载体材料广泛应用于医药、食品、化工、水处理、金属提取及回收等诸多领域。我国研究壳聚糖在农业领域的应用起步较晚,从20世纪80年代开始出现壳聚糖在农业领域中的应用报道,主要包括食品保鲜、杀虫、杀菌、调节生长、土壤改良、肥料等方面应用^[7]。本文对壳聚糖的结构特征及功能进行阐述,并在此基础上总结壳聚糖的抗菌活性对植物病原菌的作用,以及壳聚糖作为载体材料对负载易受环境影响或污染环境的农药、土壤改良剂和肥料的作用。

2 壳聚糖的结构及功能

2.1 壳聚糖的结构

壳聚糖是由 β -(1-4)连接的N-乙酰基-2-氨基-2-脱氧-D-葡萄糖和2-氨基-2-脱氧-D-葡萄糖亚基组成的线性聚合物^[8],是甲壳素(chitin)脱乙酰化的产物。壳聚糖来源及结构如图1所示。甲壳素又称几丁质,广泛存在于海洋节肢动物如虾、蟹等甲壳类动物的外壳、昆虫的角质层和真菌的细胞壁中,是地球上目前存储量仅次于纤维素的第二大可再生生物质材料,年产量超过100亿t,具有价格低廉、产量丰富的特点^[9]。

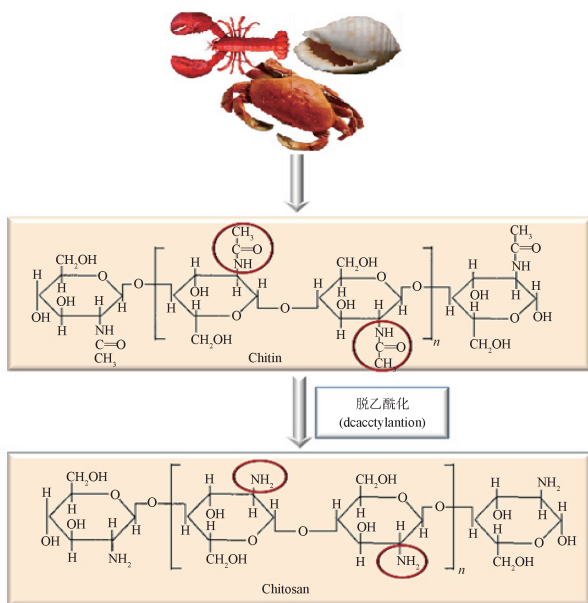


图1 壳聚糖的来源及结构

Fig. 1 The source and structure of chitosan

2.2 壳聚糖的功能

2.2.1 电荷作用

壳聚糖分子中含有多个 $-NH_2$,能与水中的质子结合形成 $-NH_3^+$ 而带正电荷,壳聚糖的正电荷与带负电的微生物膜的DNA结合,阻止RNA的转录和蛋白质的合成,从而达到杀菌的目的。当病原菌侵入植物体时,壳聚糖与病原菌的核酸结合,并对病原菌产生一系列的损害和选择性的抑制,从而达到限制病原菌繁殖的目的。黎军英等^[10]在PDA培养基中加入不同浓度的壳聚糖培养桃褐腐病菌(*Monilinia fructicola*),结果表明当壳聚糖质量浓度为2 mg/mL时,桃褐腐病菌的细胞器减少,空腔增多;当质量浓度为4 mg/mL时,桃褐腐病菌的细胞遭到严重破坏,主要表现为细胞壁破裂导致胞外物质侵入或胞内原生质外泄^[11]。赵进成等^[12]研究了壳聚糖对烟草黑胥病菌(*Phytophthora parasitica*)的影响,发现壳聚糖处理后烟草黑胥病菌菌丝出现畸变,正常的新陈代谢明显受到影响,细胞壁结构遭到破坏。

2.2.2 屏障作用

向植物组织喷洒壳聚糖溶液,可以起到防护作用。一是壳聚糖可以在植物表面形成一个物理屏障,将病原菌侵入点隔离,以免病原菌向其他健康组织扩散,同时在被隔离区的周围,时常会发生过敏反应,并伴有 H_2O_2 的积累,诱导植物细胞壁增厚,这对植物其他健康组织是一个警示信号^[13]。二是壳聚糖能与不同的物质结合,从而快速启动植物组织的伤害复原反应^[14]。

2.2.3 螯合作用

在革兰氏阳性菌的细胞壁中,肽聚糖含量丰富,约占细胞干重的50%~80%,除此之外还有大量的特殊成分,如磷壁质酸。磷壁质酸的磷酸基团能够吸引二价金属阳离子,特别是 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} ,以维持酶的功能和细胞质膜的稳定性^[15]。革兰氏阴性菌的细胞壁富含脂多糖,它可以增加细胞膜的负电荷,而且对 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 等阳离子具有很强的亲和力。

首先,壳聚糖作为一种螯合剂,当 $pH < 6.0$ 时,壳聚糖的质子化 $-NH_3^+$ 基团会与二价金属离子竞争磷壁质酸或脂多糖分子中的磷酸基团,从而抑制病原体细胞的生长发育^[16]。其次,壳聚糖分子中的氨基能够将孤对电子提供给金属离子形成螯合物^[17],使其对金属离子表现出优异的螯合性能。如壳聚糖可以螯合细菌和真菌生长所必须的微量元素、金属离子,

降低金属离子在细胞表面的浓度, 进而干扰正常菌丝的新陈代谢活动。再次, 壳聚糖还可与霉菌毒素结合, 降低宿主受到毒素的侵害^[18]。

2.2.4 载体作用

壳聚糖为阳离子聚合体, 且结构中含有活性较高的氨基与羟基, 能够通过简单的共价或离子交联而形成纳米微球。1989年, R. Bodmeier 等首次报道了在壳聚糖溶液中加入三聚磷酸钠 (tripolyphosphate, TPP) 阴离子, 利用壳聚糖中游离的带正电的氨基与 TPP 阴离子发生离子交联作用, 制得了不同纳米尺寸的壳聚糖纳米颗粒^[19]。壳聚糖纳米颗粒作为一种新型的农药载体, 具有无毒、良好生物兼容性和生物可降解性的特点, 可以提高农药的稳定性、分散性, 增加农药的吸收与持效时间, 提高农药的生物利用度, 降低农药毒副作用, 因此在农业领域上得到了广泛的关注^[20]。此外, 壳聚糖分子中 C2 位上的氨基反应活性大于羟基, 其易发生化学反应, 使壳聚糖可在较温和的条件下进行多种化学修饰, 如通过酰化、羟基化、氰化、醚化、烷基化、酯化、酰亚胺化、叠氮化、接枝与交联等反应, 形成不同结构和不同性能的壳聚糖衍生物, 应用于药物载体或缓释材料领域^[21]。

3 壳聚糖在农业上的应用

3.1 壳聚糖作为抗菌剂在农业上的作用

3.1.1 壳聚糖对植物病原菌的影响

1) 壳聚糖及其衍生物可抑制多种植物病原细菌的生长。壳聚糖对细菌的抑制效果根据细菌种类及壳聚糖相对分子质量的不同而不同, 并且在较低的 pH 值下有较好的抑菌效果^[22]。壳聚糖对革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌的抗菌效率不同, 壳聚糖对革兰氏阳性细菌的抑制作用高于对革兰氏阴性细菌的抑制作用。因为革兰氏阳性菌的细胞壁较疏松, 而革兰氏阴性菌的细胞壁有外膜结构, 能抵抗大分子的有效渗透^[2]。壳聚糖也可抑制黄单胞杆菌属 (*Xanthomonas*)、丁香假单胞菌 (*Pseudomonas syringae*)、根癌土壤杆菌 (*Agrobacterium tumefaciens*) 和欧文氏菌 (*Erwinia carotovora*) 等多种病原细菌的生长^[23]。

2) 壳聚糖对多种植物病原真菌具有一定的杀菌作用。研究发现, 相较于细菌, 壳聚糖对真菌的抑制效果更为显著^[22]。它能抑制许多病原真菌的体外生长, 如灰霉病菌 (*Botrytis cinerea*)、交链格孢

菌 (*Alternaria alternata*)、炭疽菌 (*Colletotrichum gloeosporioides*)、立枯病丝核菌 (*Rhizoctonia solani*) 和匍匐茎根霉 (*Rhizopus stolonifer*)^[4]。在菌丝生长、产孢、孢子活力和胚芽形成等病原真菌发育的不同阶段, 壳聚糖都具有抑制作用。如 Meng X. H. 等^[24]发现在质量浓度为 5.0 g/L 时, 壳聚糖能完全抑制菊交链孢菌和松果体菌的孢子萌发、芽管伸长和菌丝生长。E. I. Rabea 等^[25]报道了 24 种新的壳聚糖衍生物 (即 N-烷基、N-苄基壳聚糖) 的合成, 并通过灰霉病菌和灰霉病菌的径向菌丝生长测定衍生物的杀真菌活性。结果表明, 所有衍生物均比天然壳聚糖具有更高的杀真菌活性。王晓芙等^[26]分别探究低相对分子质量壳聚糖和高相对分子质量壳聚糖对猕猴桃灰霉病的抑制效果, 以及两者对灰霉病菌孢子萌发和对猕猴桃免疫反应的诱导作用差异。结果表明, 两者均可显著降低猕猴桃病斑直径以及灰霉病菌孢子萌发率, 而低相对分子质量壳聚糖的抑制效果更显著, 且过氧化氢酶、过氧化物酶、苯丙氨酸解氨酶和酪氨酸解氨酶活性均显著升高。

3.1.2 壳聚糖对生防菌的影响

在土壤中加入生防菌, 通过生防菌与植物病原菌进行营养和位点的竞争, 诱导植物抗性机制的表达, 从而使植物产生抗生素代谢产物, 抑制病原菌的繁殖, 降低土壤中病原菌密度, 调整根际微生态环境, 促进农作物生长^[27]。

壳聚糖可以通过渗透细胞膜进入真菌, 破坏细胞结构。因此, 壳聚糖对真菌的抑制或杀灭取决于壳聚糖对真菌膜的敏感性。但有些生防真菌 (biological control fungi, BCF), 进化出耐壳聚糖的低流动性膜, 并产生高效的壳聚糖降解酶, 可以降解壳聚糖, 将其作为营养源^[28]。E. Larriba 等^[29]研究发现, 食线虫真菌如衣原体孢子菌能耐受高剂量的壳聚糖, 这是因为衣原体孢子虫能编码产生降解壳聚糖的酶, 如甲壳素脱乙酰酶或壳聚糖酶。N. Escudero 等^[30]研究表明, 壳聚糖主要诱导在衣原体孢子菌感染线虫卵时的基因 (主要是 CDA1、CSN1 和 CSN6)。此外, 壳聚糖还能诱导衣原体蛋白酶。J. Palma-Guerrero 等^[31]研究发现, 壳聚糖单独诱导 VCP1 丝氨酸蛋白酶的表达, 也参与衣原体孢子菌感染线虫卵。E. A. Zavala-González 等^[32]研究发现, 壳聚糖还增加了生防真菌的产孢量, 如衣原体孢子菌、白僵菌和木霉菌的产孢量, 有利于提高防治效果。

壳聚糖对生防真菌的作用效果还与其自身的浓度、相对分子质量以及脱乙酰化程度有关,因此,为了提高壳聚糖对生防真菌的协调促进作用,应分析这些特性之间的相互作用。

3.2 壳聚糖作为载体材料在农业上的应用

3.2.1 农药递送载体

壳聚糖分子中的—OH、—NH₂等活性基团,能够与农药分子的活性基团发生简单且容易降解的酯化、酰胺化等反应,形成具有缓释作用的高分子农药。M. Gabriel Paulraj 等^[33]研究发现,由壳聚糖制备的纳米颗粒载体改善了印楝素的光稳定性和水分散性,并提高了对小菜蛾和棉铃虫的杀虫活性。Zheng Q. 等^[34]将植物源杀虫剂鱼藤酮包埋在可生物降解的壳聚糖纳米颗粒中,制备出具有良好性能的纳米农药制剂。该制剂表现出较强的杀虫活性,明显减弱了红火蚁的攻击性,降低了红火蚁及其生存环境中毒液生物碱的含量。

壳聚糖容易吸附到植物表面(如叶和茎),有助于延长农药与植物病害部位的接触时间,达到更好的防治效果。壳聚糖的负载功能可以提高所含活性成分的分子生物利用度^[35]。M. Rashidipour 等^[36]用壳聚糖、果胶和磷酸盐复合成纳米颗粒负载除草剂百草枯,发现百草枯对玉米或芥菜依然具有明显的除草活性,并能减少对土壤的吸附作用,降低土壤污染。此外,通过实验证明,包封后的除草剂对肺泡和口腔细胞系的毒性较小。Wang J. 等^[37]用壳聚糖包封多杀菌素形成混悬剂,通过毒性和耗散试验评价了混悬剂与传统多杀菌素制剂对小菜蛾的杀虫效果,发现所制备的混悬剂具有良好的速效性和20 d以上的长效性,对小菜蛾幼虫的防治效果最好。这与壳聚糖具有良好的缓释性能、优异的紫外屏蔽能力,以及对多种杀虫素杀虫活性的协同作用有关。

3.2.2 土壤改良剂递送载体

土壤肥力流失、土壤板结、土壤酸化、微生物群落失衡等问题限制了作物的正常生长。因此,需要适时对土壤的理化性质和化学成分以及养分进行调整。土壤改良剂能有效改善土壤孔隙度和土壤养分状况,并对土壤微生物及生物酶活性产生积极影响,从而为植物的生长提供适宜的条件^[38]。黄腐酸(fulvic acid, FA)是一种土壤改良剂,具有提高植物耐旱性、促进养分吸收、稳定土壤pH值、减少肥料流失等多种功效^[39]。FA容易失去水分,使其在短时间内失去

作用。为了保持FA长期的土壤调理效果,利用壳聚糖载体提供缓释效果,制备的壳聚糖-黄腐酸微球具有无毒、缓释、良好的生物降解能力,可作为一种新型的土壤调理剂^[40]。

3.2.3 肥料递送载体

土壤连作使其肥力的流失不可避免。然而,植物生长状况在很大程度上取决于土壤的肥力情况。因此,提高农作物产量需要更好地利用肥料养分。壳聚糖良好的成膜性和生物可降解性使其在肥料的包膜材料上有广泛的应用前景。Ma J. H. 等^[41]以壳聚糖微球为载体,通过乳化和交联技术将尿素包封起来,结果显示89%的尿素与壳聚糖微球成功结合,延长了植物生长所需的常量营养素和微量营养素的释放。T. dos Santos Pereira 等^[42]采用逆转化法吸附硝酸钾(KNO₃)肥料制备了壳聚糖-甘蔗渣复合微球。用傅里叶变换红外、X射线衍射、扫描电镜和热重分析对缓释前后微球的结构、形貌和热性能以及钾离子在水和土壤中的释放规律进行了评价,发现KNO₃包裹在微球中,并且能够稳定释放。综上所述,壳聚糖是一种具有优异的生物相容性、生物可降解性、无毒无害的材料,其作为递送载体不会对环境造成污染,在农业科学领域具有很大的实用价值。将壳聚糖作为农药、土壤改良剂、微量营养素和肥料的递送载体,可以实现靶向递送,减少药物及营养素等流失,降低环境污染。

3.3 壳聚糖增强植物先天免疫防御能力

壳聚糖是一种有效的“抗性激发剂”,通过参与生物化学和分子反应,可以触发植物的先天免疫和防御机制。如参与免疫反应相关的代谢产物和蛋白的合成与积累,激发胼胝质的合成,促进木质化形成以及蛋白酶抑制剂的产生^[43]。N. Benhamou 等^[44]报道指出,在番茄植株中壳聚糖引起诱导反应的主要特征是在病原菌试图穿透的部位形成结构屏障。M. Iriti 等^[45]研究发现,壳聚糖对烟草坏死病毒(TNV)具有抗病毒活性,并通过诱导烟草植物的防御系统,显著减少了TNV病毒诱导的坏死病变。M. H. Soliman 等^[46]利用壳聚糖和钾盐诱导黄秋葵植物抵抗白粉病,发现植物体中蛋白质含量的增加以及防御酶(如多酚氧化酶、过氧化物酶、几丁质酶和 β -1,3-葡聚糖酶)活性的增加。S. Anusuya 等^[47]对姜黄的叶面喷施质量分数为0.1%的壳聚糖溶液,可以引发姜黄植物的防御反应,对植株生长和根茎中姜黄素的积累都有积极的影响。R. Mathew 等^[48]对罗汉果的研究表明,

壳聚糖在刺激生物量增长、促进总酚类和萜类化合物积累、提高迷迭香酸和丁香酚浓度以及增强抗氧化活性等方面发挥了作用。

4 总结与展望

壳聚糖是一种天然高分子材料,具有产量广、成本低、无毒无害、可降解、抗菌活性等优势。壳聚糖能渗透细菌壁,破坏细胞结构,从而达到抑制或消灭病原菌的目的。壳聚糖可以帮助调节有益微生物的基因功能,提高它们的植物生长促进能力和生物防治能力;还可以诱导植物产生一系列具有抗微生物活性的致病相关蛋白,以保护植物免受病原菌的侵染,提高植物防御能力。此外,壳聚糖具有可降解性和良好的成膜性能,可以作为载体材料运载性质不稳定、易受环境因素影响的农药、土壤改良剂和肥料等,以减少资源浪费和环境污染。

绿色农业观念深入人心。我国农业生产需要进一步调整发展战略和思路,坚持走绿色、可持续发展之路^[49]。壳聚糖凭借其得天独厚的性能在农业方面的应用越来越多,但仍有不少问题还未解决。

1) 壳聚糖难溶于水。壳聚糖作为碱性多糖几乎不溶于水,需要溶于弱酸才能喷洒在患病植株上,但是酸性溶剂对植株根茎叶的生长有一定的抑制作用。若直接施用壳聚糖,则其容易随风吹散或随雨水流失,功效大打折扣。因此,解决壳聚糖的水溶性问题并对植物生长不造成影响,同时不会影响其功效发挥是亟待解决的难题。

2) 靶向性不强。壳聚糖具有广谱抗菌作用,但是对具体的致病菌引起的植物病害不能专一防治。因此,深入对壳聚糖在病原菌和植物中作用机制进行了解,并结合转录组和蛋白质组对关键防御基因和蛋白质进行分析,提高对壳聚糖介导的复杂信号通路的认识,使壳聚糖在植物病害防治中得到更好的应用。

3) 实际应用不足。虽然研究人员对基于壳聚糖纳米颗粒的递送系统的研究热潮正在增加,但目前的知识水平和数据还不足以支撑对壳聚糖运载农药在农业中使用所产生的结果进行公正的评估。在实际生产投入上,还需要更好地了解这些产品的应用效果,分析现行法规的适用性,以便在必要时加以改进。

参考文献:

- [1] HASSANISAADI M, SHAHIDI BONJAR G H, HOSSEINIPOUR A, et al. Biological Control of *Pythium Aphanidermatum*, the Causal Agent of Tomato Root Rot by Two *Streptomyces* Root Symbionts[J]. *Agronomy*, 2021, 11(5): 846.
- [2] XING K, ZHU X, PENG X, et al. Chitosan Antimicrobial and Eliciting Properties for Pest Control in Agriculture: A Review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2015, 35(2): 569–588.
- [3] OMBÓDI A, SAIGUSA M. Broadcast Application Versus Band Application of Polyolefin-Coated Fertilizer on Green Peppers Grown on Andisol[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2000, 23(10): 1485–1493.
- [4] RANI L, THAPA K, KANOJIA N, et al. An Extensive Review on the Consequences of Chemical Pesticides on Human Health and Environment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 283: 124657.
- [5] TUDI M, RUAN H D, WANG L, et al. Agriculture Development, Pesticide Application and Its Impact on the Environment[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(3): 1112.
- [6] 冯梦凰. 聚乙二醇单甲醚改性壳聚糖及羧甲基壳聚糖的研究[D]. 天津: 天津大学, 2004.
FENG Menghuang. Modification of Chitosan & Carboxymethyl Chitosan Grafted with Monomethoxy Poly(Ethylene Glycol)[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.
- [7] 谭毛, 段亚玲, 周梦春, 等. 壳聚糖的分析方法及其在农业领域中的应用进展[J]. *农药*, 2021, 60(1): 6–10, 17.
TAN Mao, DUAN Yaling, ZHOU Mengchun, et al. Analysis Method of Chitosan and Its Application in Agricultural Field[J]. *Agrochemicals*, 2021, 60(1): 6–10, 17.
- [8] KAUR S, DHILLON G S. The Versatile Biopolymer Chitosan: Potential Sources, Evaluation of Extraction Methods and Applications[J]. *Critical Reviews in Microbiology*, 2014, 40(2): 155–175.
- [9] 李知函. 壳聚糖基生物物质抑菌材料的制备及其应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
LI Zhihan. Study on the Preparation and Application of Antibacterial Biomass Material Based on Chitosan[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [10] 黎军英, 李红叶. 壳聚糖对桃褐腐病菌的抑菌作用[J].

- 电子显微学报, 2002, 21(2): 138-140.
- LI Junying, LI Hongye. Antifungal Activity of Chitosan on *Monilinia Fructicola*[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2002, 21(2): 138-140.
- [11] 罗志会, 刘慕兰, 张海军, 等. 壳聚糖在植物病害防治方面的研究 [J]. 农业装备技术, 2015, 41(6): 10-14.
- LUO Zhihui, LIU Mulan, ZHANG Haijun, et al. A Study of Chitosan in Plant Disease Prevention and Control[J]. Agricultural Equipment & Technology, 2015, 41(6): 10-14.
- [12] 赵进成, 蒋冬花, 杨宝峰, 等. 壳聚糖对烟草黑胫病菌抑制作用 [J]. 上海交通大学学报 (农业科学版), 2008, 26(3): 204-207.
- ZHAO Jincheng, JIANG Donghua, YANG Baofeng, et al. Antifungal Activity of Chitosan Against *Phytophthora Parasitica* var *Nicotianae*[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University (Agricultural Science), 2008, 26(3): 204-207.
- [13] 张 璐, 曾凯芳. 采后壳聚糖处理对果实-病原菌互作中形态结构的影响 [J]. 食品科学, 2013, 34(11): 305-310.
- ZHANG Lu, ZENG Kaifang. Influence of Postharvest Chitosan Treatment on the Morphosis in Fruit-Pathogen Interaction[J]. Food Science, 2013, 34(11): 305-310.
- [14] HIRANO S, NAKAHIRA T, NAKAGAWA M, et al. The Preparation and Applications of Functional Fibres from Crab Shell Chitin[J]. Journal of Biotechnology, 1999, 70(1/2/3): 373-377.
- [15] ELSSENHANS B, BLUME R, LEMBCKE B, et al. A New Class of Inhibitors for in Vitro Small Intestinal Transport of Sugars and Amino Acids in the Rat[J]. Biochimica et Biophysica Acta, 1983, 727(1): 135-143.
- [16] VAARA M. Agents that Increase the Permeability of the Outer Membrane[J]. Microbiological Reviews, 1992, 56(3): 395-411.
- [17] ZIENKIEWICZ-STRZAŁKA M, DERYŁO-MARCZEWSKA A, SKORIK Y A, et al. Silver Nanoparticles on Chitosan/Silica Nanofibers: Characterization and Antibacterial Activity[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2019, 21(1): 166.
- [18] BORNET A, TEISSEDRE P L. Chitosan, Chitin-Glucan and Chitin Effects on Minerals (Iron, Lead, Cadmium) and Organic (Ochratoxin A) Contaminants in Wines[J]. European Food Research and Technology, 2008, 226(4): 681-689.
- [19] BODMEIER R, CHEN H G, PAERATAKUL O. A Novel Approach to the Oral Delivery of Micro-or Nanoparticles[J]. Pharmaceutical Research, 1989, 6(5): 413-417.
- [20] 梁文龙. 壳聚糖纳米农药的构建及其生物应用研究 [D]. 广州: 华南农业大学, 2018.
- LIANG Wenlong. Preparation and Biological Application Study of Chitosan Nanopesticides[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2018.
- [21] 杨新超, 赵祥颖, 刘建军. 壳聚糖的性质、生产及应用 [J]. 食品与药品, 2005, 7(8): 59-62.
- YANG Xinchao, ZHAO Xiangying, LIU Jianjun. The Properties, Production and Application of Chitosan[J]. Food and Drug, 2005, 7(8): 59-62.
- [22] HEMANTARANJAN A. A Future Perspective in Crop Protection: Chitosan and Its Oligosaccharides[J]. Advances in Plants & Agriculture Research, 2014, 1(1): 23-30.
- [23] 胡举伟, 刘 辉, 马秀明, 等. 壳聚糖的抗菌、诱抗和促生作用及在农业中应用综述 [J]. 江苏农业科学, 2018, 46(15): 1-5.
- HU Juwei, LIU Hui, MA Xiuming, et al. Antimicrobial, Inducing and Growth-Promoting Effects of Chitosan and Its Application in Agriculture: A Review[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(15): 1-5.
- [24] MENG X H, YANG L Y, KENNEDY J F, et al. Effects of Chitosan and Oligochitosan on Growth of Two Fungal Pathogens and Physiological Properties in Pear Fruit[J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 81(1): 70-75.
- [25] RABEA E I, BADAWY M E I, ROGGE T M, et al. Insecticidal and Fungicidal Activity of New Synthesized Chitosan Derivatives[J]. Pest Management Science, 2005, 61(10): 951-960.
- [26] 王晓芙, 曹来福, 张丹凤, 等. 低分子量壳聚糖对猕猴桃灰霉病的抑制作用 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2019, 42(11): 1563-1568.
- WANG Xiaofu, CAO Laifu, ZHANG Danfeng, et al. Inhibitory Effect of Low Molecular Weight Chitosan on Kiwifruit Gray Mold Caused by *Botrytis Cinerea*[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2019, 42(11): 1563-1568.
- [27] 王 苗, 孙 燕, 刘清梅, 等. 西洋参连作障碍产生原因及生物防治概述 [J]. 中药材, 2016, 39(11): 2665-2667.
- WANG Miao, SUN Yan, LIU Qingmei, et al. Summary of Causes and Biological Control of Continuous Cropping Obstacle of American Ginseng[J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2016, 39(11): 2665-2667.

- [28] PALMA-GUERRERO J, JANSSON H B, SALINAS J, et al. Effect of Chitosan on Hyphal Growth and Spore Germination of Plant Pathogenic and Biocontrol Fungi[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2008, 104(2): 541–553.
- [29] LARRIBA E, JAIME M D L A, CARBONELL-CABALLERO J, et al. Sequencing and Functional Analysis of the Genome of a Nematode Egg-Parasitic Fungus, *Pochonia Chlamydosporia*[J]. *Fungal Genetics and Biology*, 2014, 65: 69–80.
- [30] ESCUDERO N, FERREIRA S R, LOPEZ-MOYA F, et al. Chitosan Enhances Parasitism of *Meloidogyne Javanica* Eggs by the Nematophagous Fungus *Pochonia Chlamydosporia*[J]. *Fungal Biology*, 2016, 120(4): 572–585.
- [31] PALMA-GUERRERO J, GÓMEZ-VIDAL S, TIKHONOV V E, et al. Comparative Analysis of Extracellular Proteins from *Pochonia Chlamydosporia* Grown with Chitosan or Chitin as Main Carbon and Nitrogen Sources[J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2010, 46(7): 568–574.
- [32] ZAVALA-GONZÁLEZ E A, LOPEZ-MOYA F, ARANDA-MARTINEZ A, et al. Tolerance to Chitosan by *Trichoderma* Species is Associated with Low Membrane Fluidity[J]. *Journal of Basic Microbiology*, 2016, 56(7): 792–800.
- [33] GABRIEL PAULRAJ M, IGNACIMUTHU S, GANDHI M R, et al. Comparative Studies of Tripolyphosphate and Glutaraldehyde Cross-Linked Chitosan-Botanical Pesticide Nanoparticles and Their Agricultural Applications[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2017, 104: 1813–1819.
- [34] ZHENG Q, QIN D Q, WANG R F, et al. Novel Application of Biodegradable Chitosan in Agriculture: Using Green Nanopesticides to Control *Solenopsis Invicta*[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 220: 193–203.
- [35] KASHYAP P L, XIANG X, HEIDEN P. Chitosan Nanoparticle Based Delivery Systems for Sustainable Agriculture[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2015, 77: 36–51.
- [36] RASHIDIPOUR M, MALEKI A, KORDI S, et al. Pectin/Chitosan/Tripolyphosphate Nanoparticles: Efficient Carriers for Reducing Soil Sorption, Cytotoxicity, and Mutagenicity of Paraquat and Enhancing Its Herbicide Activity[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(20): 5736–5745.
- [37] WANG J, WANG M, LI G B, et al. Evaluation of a Spinosad Controlled-Release Formulation Based on Chitosan Carrier: Insecticidal Activity Against *Plutella xylostella* (L.) Larvae and Dissipation Behavior in Soil[J]. *ACS Omega*, 2021, 6(45): 30762–30768.
- [38] 程培军, 张翔, 李亮, 等. 3种土壤改良剂对烟田土壤性质和烟叶生长及质量的影响[J]. *江西农业学报*, 2021, 33(12): 71–76.
- CHENG Peijun, ZHANG Xiang, LI Liang, et al. Effects of Three Soil Amendments on Soil Properties, Tobacco Leaves Growth and Quality in Tobacco Fields[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2021, 33(12): 71–76.
- [39] SUH H Y, YOO K S, SUH S G. Effect of Foliar Application of Fulvic Acid on Plant Growth and Fruit Quality of Tomato (*Lycopersicon Esculentum* L.)[J]. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 2014, 55(6): 455–461.
- [40] WANG X B, WANG J C, SONG S Q, et al. Preparation and Properties of Soil Conditioner Microspheres Based on Self-Assembled Potassium Alginate and Chitosan[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 147: 877–889.
- [41] MA J H, FAQIR Y, CHAI Y L, et al. Chitosan Microspheres-Based Controlled Release Nitrogen Fertilizers Enhance the Growth, Antioxidant, and Metabolite Contents of Chinese Cabbage[J]. *Scientia Horticulturae*, 2023, 308: 111542.
- [42] dos SANTOS PEREIRA T, FRANÇA D, SOUZA C F, et al. Chitosan-Sugarcane Bagasse Microspheres as Fertilizer Delivery: On/Off Water Availability System[J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2020, 28(11): 2977–2987.
- [43] RISEH R S, HASSANISAADI M, VATANKHAH M, et al. Chitosan as a Potential Natural Compound to Manage Plant Diseases[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 220: 998–1009.
- [44] BENHAMOU N, BÉLANGER R R, REY P, et al. Oligandrin, the Elicitin-Like Protein Produced by the Mycoparasite *Pythium Oligandrum*, Induces Systemic Resistance to *Fusarium Crown and Root Rot* in Tomato Plants[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2001, 39(7/8): 681–696.
- [45] IRITI M, SIRONI M, GOMARASCA S, et al. Cell Death-Mediated Antiviral Effect of Chitosan in Tobacco[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2006, 44(11/12): 893–900.
- [46] SOLIMAN M H, EL-MOHAMEDY R S R. Induction of Defense-Related Physiological and Antioxidant Enzyme Response Against Powdery Mildew Disease in Okra

- (*Abelmoschus Esculentus* L.) Plant by Using Chitosan and Potassium Salts[J]. Mycobiology, 2017, 45(4): 409–420.
- [47] ANUSUYA S, SATHIYABAMA M. Effect of Chitosan on Growth, Yield and Curcumin Content in Turmeric Under Field Condition[J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2016, 6: 102–106.
- [48] MATHEW R, SANKAR P D. Effect of Methyl Jasmonate and Chitosan on Growth Characteristics of *Ocimum Basilicum* L., *Ocimum Sanctum* L. and *Ocimum Gratissimum* L. Cell Suspension Cultures[J]. African Journal of Biotechnology, 2012, 11(21): 4759–4766.
- [49] 陈萌山. 大力发展绿色农业 满足人民日益增长的营养健康需求 [J]. 中国战略新兴产业, 2018(29): 96.
- CHEN Mengshan. Developing Green Agriculture Vigorously to Meet People's Growing Nutritional and Health Needs[J]. China Strategic Emerging Industry, 2018(29): 96.
- (责任编辑: 李玉华)

Research Progress on Structure and Function of Chitosan and Its Application in Agriculture

LIU Jie^{1,2}, WANG Juan^{1,2}, LI Sheng^{1,2}, XIE Lixia^{1,2}, LI Ding^{1,2}, ZHANG Bangyue^{1,2}

(1. College of Life Science and Chemistry, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;
2. Hunan Provincial Engineering Research Center of Lily Germplasm Resource Innovation and Deep Processing, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Chitosan has the characteristics of biocompatibility, biodegradability, antibacterial activity, and non-toxicity. It is widely used in medicine, pharmaceutical, textile and other fields, but the application of chitosan in the agricultural field is rarely reported. The structural characteristics and functions of chitosan were expounded, and the inhibitory effect of antibacterial agents on plant pathogens and the synergistic promotion effect on biocontrol bacteria were summarized. The applications of chitosan as carrier materials in agricultural fields such as pesticides, fertilizers and soil amendments were introduced, and finally the effects of chitosan on plant immune defense were summarized. The introduction of chitosan to agriculture provides a new type of green material for agricultural producers to improve soil quality and increase agricultural productivity, and offers new ideas on sustainable agriculture.

Keywords: chitosan; structural characteristics; antibacterial activity; carrier material; agricultural production