

## 壳聚糖及其衍生物在农业生产中的应用

张海娟<sup>1</sup>, 彭科研<sup>2</sup>, 鞠正春<sup>2</sup>, 吕鹏<sup>2</sup>, 冯光辉<sup>1</sup>, 孙东文<sup>1</sup>, 刘光亚<sup>2</sup>, 白文波<sup>3</sup>, 韩伟<sup>2\*</sup> (1. 淄博市数字农业农村发展中心, 山东淄博 255000; 2. 山东省农业技术推广中心, 山东济南 250000; 3. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

**摘要** 壳聚糖及其衍生物作为一种天然聚氨基葡萄糖, 资源丰富, 主要来源于虾蟹等海洋生物的外壳, 而且对环境友好, 安全、无毒副作用。目前, 美国、日本、加拿大等发达国家将壳聚糖及其衍生物的应用从化工、医药领域逐步拓展到农业生产领域, 同时国内也掀起了研究热潮。简述了壳聚糖及其衍生物的主要应用机理, 重点系统地综述了壳聚糖及其衍生物在种子处理剂、植物病害诱抗剂、植物抗逆调控剂、土壤改良剂、可降解地膜及果蔬保鲜剂 6 个方面的应用研究。针对壳聚糖及其衍生物在农业生产上的使用现状、存在问题提出了展望。

**关键词** 壳聚糖; 衍生物; 生长调控; 土壤改良; 果蔬保鲜

中图分类号 F323.3 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2023)09-0007-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2023.09.002



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

### Applications of Chitosan and Its Derivatives in Agricultural Production

ZHANG Hai-juan<sup>1</sup>, PENG Ke-yan<sup>2</sup>, JU Zheng-chun<sup>2</sup> et al (1. Zibo Digital Agriculture Rural Development Center, Zibo, Shandong 255000; 2. Shandong Province Agriculture Technology Popularizing Center, Jinan, Shandong 250000)

**Abstract** Chitosan and its derivatives, as a kind of natural glucosamine, are rich in resources. They mainly come from the shells of marine organisms such as shrimp and crab, and are environmentally friendly, safe and non-toxic. At present, the United States, Japan, Canada and other developed countries have gradually expanded the application of chitosan and its derivatives from the field of chemical industry and medicine to the field of agricultural production. At the same time, there is also a research upsurge in China. This paper briefly describes the main application mechanism of chitosan and its derivatives, and focuses on the application research of chitosan and its derivatives in six aspects: seed treatment agent, plant disease inducer, plant stress regulator, soil conditioner, degradable plastic film and fruit and vegetable preservative. The application status and existing problems of chitosan and its derivatives in agricultural production were prospected.

**Key words** Chitosan; Derivative; Growth regulation; Soil improvement; Preservation of fruits and vegetables

壳聚糖[ $\beta$ -(1,4)聚-2-氨基-D-葡萄糖, CTS]又称脱乙酰甲壳素, 是由甲壳素[(1,4)-2-乙酰氨基-2-脱氧-D-葡萄糖]脱乙酰化得到的一种碱性氨基多糖, 分子量为 10 万~30 万, 是甲壳素最重要的衍生物, 外观为白色或灰白色且具有金属光泽<sup>[1]</sup>。壳聚糖再经过进一步降解, 就成为壳寡糖, 其分子量小于 3 000 Da, 聚合度为 3~10, 交联度低于 5% 的低聚  $\beta$ -(1,4)-2-脱氧-2-氨基葡萄糖<sup>[2]</sup>。壳聚糖分子结构中分布着大量羟基、氨基等活性基团, 通过化学反应, 可制备具有特定用途的壳聚糖衍生物(羧甲基壳聚糖、低聚壳聚糖、壳聚糖季铵盐、磺化壳聚糖、褐藻胶寡糖等)。

壳聚糖及其衍生物作为一种天然聚氨基葡萄糖, 资源丰富, 主要来源于虾蟹等海洋生物的外壳, 而且对环境友好, 安全、无毒副作用。目前被广泛应用于材料、医疗、食品等多个领域, 在农业领域也具有十分广泛的用途, 主要用作土壤改良剂、生物降解性地膜、饲料添加剂、植物病害抑制剂、果蔬保鲜剂、植物生长调节剂等多方面<sup>[3]</sup>。经研究发现, 甲壳素和壳聚糖能够诱导植物产生微生物相关分子模式(MAMPs)或病原相关分子模式(PAMPs), 从而引起植物对病原物免疫调控<sup>[4]</sup>。同时, 甲壳素和壳聚糖也可以促进植物生长和诱导不同植物对非生物胁迫的生理反应。Turk<sup>[5]</sup>认为, 壳聚糖作为高效绿色农药和植物生长调节剂在农业生产上的应用将

为农作物可持续生产的发展做出重要贡献。

该研究系统总结壳聚糖及其衍生物的主要应用机理、在农业生产中的应用, 分析前人的试验研究成果, 并对其研究前景进行展望, 以期全面了解壳聚糖及其衍生物在农业方面发挥的作用, 为指导生产提供理论依据。

#### 1 壳聚糖及其衍生物的主要应用机理

**1.1 壳聚糖及其衍生物具有较好的抑菌杀菌性** 壳聚糖及其衍生物能在较短时间内诱导植物产生大量抗性物质。研究发现<sup>[6]</sup>, 壳聚糖分子链上具有带正电的取代基-NH<sub>3</sub><sup>+</sup>能发挥壳聚糖的抑菌杀菌特性, -NH<sub>3</sub><sup>+</sup>与植物病原菌细胞表面的带负电荷的分子结合, 对细胞壁的形成进行干扰, 病原菌细胞内的蛋白酶和其他成分外泄, 阻碍病原菌继续生长。另外, 壳聚糖及其衍生物还可直接进入病原菌的细胞核, 与 DNA 结合通过影响病原菌的 mRNA 和蛋白质的合成来抑制其生长, 从而杀死细菌<sup>[7]</sup>。

**1.2 壳聚糖及其衍生物具有较好的自发成膜性** 用壳聚糖及其衍生物喷洒或者浸泡果蔬后表面会形成一层半透膜, 它具有一定的选择性渗透作用, 能阻止氧气(O<sub>2</sub>)进入, 限制二氧化碳(CO<sub>2</sub>)排出, 从而降低果蔬的呼吸强度和蒸腾作用, 减少果蔬失重, 延长果蔬保鲜期<sup>[8]</sup>。同时, 半透膜可以作为物理屏障阻止营养物质向细胞内运输或者改变细胞膜的选择透过性, 从而抑制病原菌的侵入。

**1.3 壳聚糖及其衍生物具有较好的抗逆性** 在寒冷条件下, 壳聚糖及其衍生物能提高可溶性蛋白和可溶性糖等抗寒性物质的含量, 降低膜脂过氧化水平和膜透性的增加程度,

**基金项目** 国家重点研发计划项目(2019YFE0197100)。

**作者简介** 张海娟(1985—), 女, 山东青州人, 高级农艺师, 硕士, 从事蔬菜技术推广工作。\* 通信作者, 高级农艺师, 博士, 从事农业技术推广工作。

**收稿日期** 2022-06-16; **修回日期** 2022-07-19

维持作物较高的光合作用强度,有效抵御低温对作物的伤害<sup>[9]</sup>。壳聚糖是植物抗病反应和诱导植物对非生物逆境反应的抗逆信号分子,能诱导植物体内抗病相关蛋白(PRs)产生,提高保护酶活性,增加渗透调节物质及次生代谢产物含量,从而提高植物的抗病性、耐盐性及抗热性等<sup>[10-18]</sup>。

**1.4 壳聚糖及其衍生物具有较好的增肥性** 壳聚糖本身含有丰富的C、N元素,在土壤中能够被微生物分解,形成植物所需要的养分<sup>[19]</sup>。并且壳聚糖可以促使有益菌群大量繁殖增生,抑制有害菌繁殖。当施用的壳聚糖进入土壤后,可充分活化根际环境,溶解植物所需养分,被植物充分吸收<sup>[20]</sup>。壳聚糖作为土壤改良剂,可有效改善土壤板结程度,增加土壤有机质含量,提高土壤肥力。另外,因壳聚糖及其衍生物具有成膜性,可以作为缓释剂,延缓肥料的释放,减少肥料使用,起到减施提质增效的作用。

**1.5 壳聚糖及其衍生物具有较好的增产性** 壳聚糖及其衍生物在促进农作物生长、提质增产增效方面潜力巨大。利用壳聚糖及其衍生物代谢途径中形成的壳寡糖调节植物生长,能有效促进植物根、茎、叶和花的发育,调节生殖器官大小,增强作物抗性,达到增产增收的目的<sup>[21]</sup>。

## 2 壳聚糖及其衍生物在农业生产中的应用

壳聚糖及其衍生物具有较好的安全性、抑菌杀菌性、生物降解性等多方面的功能特点以及来源广泛、无毒无味等,在农业方面进行了广泛的应用。小麦、玉米、蔬菜种子可以用壳聚糖及其衍生物进行浸种、拌种或作为种子包衣剂使用;逆境条件下可以用其作为诱抗剂、抗逆剂使用;土壤酸化、盐渍化严重的可以用其作为土壤改良剂使用;蔬菜、水果可以用其作为保鲜剂保鲜。壳聚糖及其衍生物在农业上的应用实例见表1。

表1 壳聚糖及其衍生物在农业生产上的应用实例

Table 1 Application examples of chitosan and its derivatives in agricultural production

序号 No.	用途 Use	作物种类(品种) Crop type(variety)	处理方式 Processing method	处理浓度 Treatment concentration	试验结果 Test result	参考文献 Reference
1	种子处理剂	玉米(苏玉5号、丹玉13号F <sub>1</sub> 杂交种)	浸种4h	0.05%~0.30%的NCMC	对玉米的碳、氮代谢具有一定的生物调节功能	[22]
		玉米(农大108号)	种衣剂	种衣剂中添加脱乙酰度75%~90%的低聚壳聚糖	抑菌、杀菌、促进种子发芽	[23]
		黄瓜(江蔬露丰)	浸种24h	0.5~4.0 mg/mL 壳聚糖溶液	提高黄瓜产量,改善黄瓜品质	[24]
		番茄(L402、贝鲁特、粉多利)	喷叶	50~600 mg/L 寡聚酸碘溶液	抑制TMV活性、促进番茄生长	[25]
2	植物病害诱抗剂	黄瓜(唐秋一号)	浸种	0.001~100.000 mg/L 壳寡糖溶液	低浓度壳寡糖能促进黄瓜种子发芽及幼苗生长	[26]
		黄瓜、棉花、凤尾兰、辣椒	喷叶	0.0625~2.0000 mg/L 壳聚糖、壳聚糖铜溶液	病菌抑制效果达60%~100%	[27]
		脐橙(纽荷尔)	浸泡1min	2%的壳聚糖	显著降低脐橙果实接种发病率的升高和病斑直径的扩展	[28]
3	植物抗逆调控剂	黄瓜(津优1号)	水培	50 mg/L 壳聚糖溶液	增加了黄瓜叶片叶绿素含量,降低了净光合速率、胞间CO <sub>2</sub> 体积分数、气孔导度的下降幅度	[16]
		黄瓜(新泰密刺)	喷叶	1/1 500、1/1 000、1/500、1/100 (W/V) 羧甲基壳聚糖溶液	明显提高黄瓜幼苗的抗冷性	[29]
		辣椒(陇椒3号、陇椒2号、中研8号)	喷叶	10~80 mg/L 壳聚糖溶液	可增强辣椒幼苗抗旱性	[30]
4	肥料和土壤改良剂	辣椒(农金105)	喷叶	≥25 g/L 的壳聚糖水溶肥	增产,对辣椒主要农艺性状有一定的促进作用	[31]
		—	—	1%的壳聚糖酸溶液	增加土壤的团粒结构和渗透系数	[32]
5	可降解壳聚糖地膜	—	—	—	地膜伸缩性好、强度高、可完全降解	[3]
6	果蔬保鲜剂	葡萄(巨峰)	浸泡1min	0.5%~1.5%的壳聚糖涂膜剂	抑菌,减缓果肉组织的腐败,减少重量及营养的损失	[33]
		草莓	浸泡30s	5~20 g/L 的壳聚糖溶液	延长草莓保鲜期	[34]
		连翘	浸泡3min	一定浓度连翘叶提取物-壳聚糖复合	降低圣女果的呼吸强度,减少水分散失,延缓V <sub>c</sub> 含量及可滴定酸含量的下降	[35]

**2.1 种子处理剂** 壳聚糖及其衍生物具有促生长、增产、提质的功效,因此农业生产中经常用不同处理方式、不同浓度的壳聚糖溶液进行浸种、拌种或者种子包衣处理后,有效提高种子发芽率,增强作物幼苗的抵抗力,促进作物生长,提高作物产量<sup>[36]</sup>。师素云等<sup>[22]</sup>以不同浓度的羧甲基壳聚糖处理玉米种子,种子发芽率、发芽率、幼苗株高及幼苗叶片的叶绿素含量均有不同程度提高。其处理的玉米种子及幼苗,萌发

种子胚乳中 $\alpha$ -淀粉酶、幼苗茎叶中硝酸还原酶活性分别提高45%和60%。张勇等<sup>[23]</sup>以低聚壳寡糖作为杀菌剂,制得的种衣剂,浸泡玉米农大108号种子后进行了观察试验。试验表明,该种衣剂具有良好的抑菌、杀菌、促进种子发芽作用,与对照相比,玉米种子发芽率提高21%。使用该种衣剂处理的棉花种子,与常规拌种相比,每100 m<sup>2</sup>产量可增加4.8 kg。罗兵等<sup>[24]</sup>用不同处理方式、不同处理浓度的壳聚糖

处理黄瓜种子,发现 1.5 mg/mL 的壳聚糖溶液浸种和 0.1 mg/mL 的壳聚糖溶液喷叶处理,黄瓜增产效果最好,产量增加超过 40%。胡雪芳等<sup>[25]</sup>研究了寡聚酸碘对番茄生长、生理特性的影响,试验发现,300~1 200 mg/L 的寡聚酸碘可以明显提升番茄幼苗株高和茎尖内生生长素(IAA)、赤霉素(GA)含量及叶片中总叶绿素含量。并且寡聚酸碘处理的番茄茎秆粗壮,叶色浓绿,生长性状良好。郭卫华等<sup>[26]</sup>用不同浓度的壳寡糖对黄瓜种子进行浸泡催芽,待长至两叶一芯时进行喷施不同浓度的壳寡糖。结果表明,低浓度壳寡糖对黄瓜幼苗生长有促进作用,处理 21 d 后,黄瓜幼苗株高、叶面积、根长等生长指标与对照相比均显著增加;功能叶片的叶绿素含量、光合参数指标显著升高。高浓度壳寡糖(100 mg/L)则抑制黄瓜幼苗生长。

**2.2 植物病害诱抗剂** 壳聚糖具有广谱抗菌性,可以作为天然的杀虫剂、杀菌剂使用。近年来,专家们就壳聚糖及其衍生物在抗菌性方面发挥的作用做了大量科学研究。朱晓红等<sup>[27]</sup>采用生长速率法测定了壳聚糖及壳聚糖铜对 6 种植物病原菌的抑菌效果。结果表明,壳聚糖及壳聚糖铜均具有一定的抑菌性。壳聚糖铜对黄瓜灰霉病菌、棉花褐斑病菌以及棉花红腐病菌的抑制效果要优于壳聚糖。邓雨艳等<sup>[28]</sup>以脐橙为试材研究壳聚糖对果实抗病性的诱导效果。采收后不同时间用 2% 壳聚糖溶液浸泡处理 1 min。2 d 后,柑橘果实青霉病的抗病效果最好。壳聚糖处理提高了脐橙果实过氧化物酶(POD)、谷胱甘肽还原酶(GR)活性,抑制了过氧化氢酶(CAT)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性,同时延缓了果实抗坏血酸(AsA)含量的下降。除此之外,壳聚糖对番茄灰霉病、油菜菌核病等 35 种病原真菌、细菌有一定的抑制作用,抑制效果达 11%~100%<sup>[37-49]</sup>。

**2.3 植物抗逆调控剂** 试验证明,在低温弱光、旱涝、盐碱、高温等逆境条件下,施用壳聚糖及其衍生物可诱导植物产生木质素、抗性蛋白、愈创萜聚糖等多种抗性物质,最大限度降低了逆境胁迫对作物的伤害。张志刚等<sup>[16]</sup>采用水培方法研究了盐胁迫下水杨酸(SA)、壳聚糖对黄瓜叶片光合作用的影响。结果发现,SA、CTS 共同处理的作用效果大于 SA、CTS 单一处理,并且 SA 与 CTS 对盐胁迫下黄瓜叶片叶绿素含量及净光合速率、气孔导度等均存在显著或极显著的互作效应。孙巧峰等<sup>[29]</sup>研究了羧甲基壳聚糖对黄瓜幼苗抗性的影响,用适当浓度的羧甲基壳聚糖处理黄瓜幼苗后,黄瓜叶片中抗氧化酶 SOD、CAT、POD 活性和 V<sub>c</sub>、可溶性糖、脯氨酸(Pro)及叶绿素含量均较高,丙二醛(MDA)含量较低,根系活力也维持了较高的水平;胁迫后于温室条件下恢复 5 d,羧甲基壳聚糖处理的幼苗干物质增加量、光合速率和羧化效率均较高。马彦霞等<sup>[30]</sup>研究了水分胁迫下 CTS 对辣椒幼苗抗旱性的影响,试验结果表明,水分胁迫下喷施不同浓度的 CTS 可明显降低活性氧清除系统中 SOD 和 POD 的活性,提高可溶性蛋白质、还原型谷胱甘肽(GSH)及 AsA 的含量,降低细胞质膜相对透性和 MDA、Pro 的含量。

**2.4 肥料和土壤改良剂** 现在市场上大多数肥料多为水溶

性,具有易流失、被分解或固定的缺点,不仅使得养分利用率大大降低,同时造成经济上的损失和对水资源的污染。因此,提高肥料利用率成了亟待解决的问题<sup>[50]</sup>。而在近年来的研究中,壳聚糖被视为具有开发潜能的原料之一。壳聚糖施入土壤后,土壤中的有益微生物可以分解壳聚糖为植物提供养分,还可以利用其改善自身体系<sup>[51]</sup>,抑制土壤中病原菌的生长和繁殖,而且被分解的壳聚糖是优质的有机肥料,能够促进植物根系生长,促使植物种子提前发芽<sup>[51]</sup>。土壤中的细菌分解甲壳素时会产生甲壳素酶,降低部分真菌的生物活性,还能致使线虫卵死亡。葛少彬<sup>[31]</sup>在辣椒上喷施壳聚糖水溶肥料发现,辣椒的株高、坐果率、单果重等农艺性状有明显增加,产量显著提升。胡祥等<sup>[32]</sup>研究了壳聚糖对土壤理化性状的影响,结果表明,施入壳聚糖酸溶液后,土壤的团粒结构和渗透系数随壳聚糖施用量增加,土壤 pH 降低,土壤碱性得到相应改善。

**2.5 可降解壳聚糖地膜** 地膜覆盖是农业生产中必不可少的一环,常用的材料为聚乙烯薄膜,但它在土壤中很难分解,容易造成土壤环境恶化;同时,聚乙烯薄膜透气性差,影响作物的正常生长。利用壳聚糖及其衍生物的成膜性和生物可降解性,研制壳聚糖生物降解膜,在农业生产上有广阔的应用前景。如制成聚乙烯-甲壳素或聚乙烯-壳聚糖膜,6 个月后能被土壤中的微生物完全降解;而且这种地膜伸缩性好,湿润状态下也有足够的强度<sup>[3]</sup>。

**2.6 果蔬保鲜剂** 壳聚糖作为唯一的天然碱性多糖,它的抗菌性和成膜性以及其独特的生物相容性,可以作为食品保鲜剂和保鲜材料<sup>[52]</sup>。曾春慧等<sup>[3]</sup>将壳聚糖喷雾、涂布或浸泡在刚采摘的水果、蔬菜上,形成一层致密均匀、透明光亮的膜保护层,此膜具有防止果蔬水分流失,保持果蔬原色等效果,同时还能抑制果蔬呼吸强度,降低营养成分的损失。冯波等<sup>[33]</sup>通过体外抗菌性试验和涂膜保鲜试验,研究常温下壳聚糖对葡萄的抑菌保鲜作用。结果表明,壳聚糖能抑制灰霉菌和交链孢菌的生长。1% 壳聚糖涂膜处理葡萄可减缓果肉组织的腐败,减少葡萄在贮存期间的重量损失及单宁、V<sub>c</sub>、可滴定酸等营养成分的损失。匡银近等<sup>[34]</sup>采用平板法试验 7 种不同相对分子质量壳聚糖的系列样品对草莓灰霉病病原真菌的抗菌性能,数据表明,水不溶性壳聚糖的乙酸溶液浸泡采收后草莓 30 s 后,灰霉病菌的侵染被抑制,果实含糖量和 V<sub>c</sub> 含量的下降趋势也得到了延缓,保鲜效果得到了提高。并且相对分子质量在 5×10<sup>4</sup>~20×10<sup>4</sup> 的壳聚糖在 5~10 g/L 质量浓度处理的草莓保鲜效果较好。潘婷婷等<sup>[35]</sup>将连翘提取物与壳聚糖以不同比例进行复配,涂抹圣女果表面,测定了失重率、腐烂率等指标,结果表明不同配比的连翘-壳聚糖复配物均可降低呼吸强度,其中以连翘叶提取物与壳聚糖复配物以 5:1 比例混合时,对圣女果保鲜效果作用最佳。

### 3 展望和建议

壳聚糖及其衍生物的特性是天然无毒的,被广泛应用于农业、食品、环保等领域,并成为当前的研究热点。该研究针对壳聚糖及其衍生物在农业生产上的使用现状,存在问题提

出了展望。壳聚糖及其衍生物已被广泛应用于材料、医疗、食品等多个领域,在农业领域也具有十分广泛的用途,主要用作土壤改良剂、生物降解性地膜、饲料添加剂、植物病害抑制剂、果蔬保鲜剂、植物生长调节剂等多方面,但在农业上的应用研究分散、不深入,虽有部分研究成果,但尚未规模化的应用到农业生产当中,从长远来看其应用还有很大的拓展空间,值得研究人员集中科研力量进一步去研究与探索。

目前市场上壳聚糖处于求大于供的状态,壳聚糖的产量无法满足市场的需求,当前制备壳聚糖的主要原料虾壳和蟹壳,除了受到地域和季节的限制外,生产成本高也是一大问题。基于此,建议一方面开发出新的稳定的壳聚糖资源,作为深化壳聚糖及其衍生物应用的第一步。另一方面,深化壳聚糖及其衍生物应用,探索其不同衍生物的生物活性,通过不同物理和化学方法的改性,制备带有不同基团的多功能壳聚糖衍生物,进一步探索不同衍生物的生物活性,增加高附加值产品的产出,实现其更广泛的应用<sup>[53]</sup>。

## 参考文献

- [1] 杨俊玲. 壳聚糖抗菌性的研究[J]. 纺织学报, 2003, 24(2): 151-153.
- [2] ZHANG H, DU Y G, YU X J, et al. Preparation of chitooligosaccharides from chitosan by a complex enzyme[J]. Carbohydrate research, 1999, 320(3/4): 257-260.
- [3] 曾春慧, 王淑英. 壳聚糖功能材料研究进展[J]. 科技资讯, 2008(34): 9.
- [4] IRITI M, FAORO F. Chitosan as a MAMP, searching for a PRR[J]. Plant signaling & behavior, 2009, 4(1): 66-68.
- [5] TURK H. Chitosan-induced enhanced expression and activation of alternative oxidase confer tolerance to salt stress in maize seedlings[J]. Plant physiology and biochemistry, 2019, 141: 415-422.
- [6] 罗晓, 罗人明, 陈晓. 壳聚糖及其衍生物的生物抑制作用[J]. 精细与专用化学品, 2003(5): 12-14.
- [7] KIM H J, CHEN F, WANG X, et al. Effect of chitosan on the biological properties of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.)[J]. Journal of agriculture and food chemistry, 2005, 53(9): 3696-3701.
- [8] PEN L T, JIANG Y M. Effects of chitosan coating on shelf life and quality of fresh-cut Chinese water chestnut[J]. LWT-journal of food science and technology, 2003, 36(3): 359-364.
- [9] 蒋小姝, 莫海涛, 苏海佳, 等. 甲壳素及壳聚糖在农业领域方面的应用[J]. 中国农学通报, 2013, 29(6): 170-174.
- [10] AGARWAL S, SAIRAM R K, SRIVASTAVA G C, et al. Changes in antioxidant enzymes activity and oxidative stress by abscisic acid and salicylic acid in wheat genotypes[J]. Biologia plantarum, 2005, 49(4): 541-550.
- [11] ROMANAZZI G, NIGRO F, IPPOLITO A. Short hypobaric treatments potentiate the effect of chitosan in reducing storage decay of sweet cherries[J]. Postharvest biology and technology, 2003, 29(1): 73-80.
- [12] 王桂林. 喷施几种外源物质对淹水桃树生理特性的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2015.
- [13] 徐芬芬, 李坚, 罗晓燕. 壳聚糖与水杨酸复配对小白菜霜霉病与盐胁迫复合逆境的诱抗作用[J]. 江苏农业学报, 2011, 27(5): 1059-1062.
- [14] 《中国蔬菜》2009·2 学术论文导读[J]. 中国蔬菜, 2009(1): 12-14.
- [15] 董涛, 张志刚, 尚庆茂. 水杨酸和壳聚糖对黄瓜幼苗耐盐性的共诱导作用[J]. 中国蔬菜, 2009(2): 46-50.
- [16] 张志刚, 尚庆茂. 水杨酸、壳聚糖对盐胁迫下黄瓜叶片光合参数的调节作用[J]. 西北农业学报, 2010, 19(3): 174-178.
- [17] 杜小凤, 吴传万, 杨文飞, 等. 壳聚糖和水杨酸对黄瓜根结线虫的防治[J]. 中国农学通报, 2011, 27(10): 280-283.
- [18] 徐芬芬, 韩金多, 李坚, 等. 钙、水杨酸和壳聚糖复配处理对小白菜抗盐性的诱导[J]. 生物加工过程, 2011, 9(6): 59-62.
- [19] 刘志恒, 李学荣, 孙军德, 等. 几丁聚糖在农业上应用的研究进展[J]. 沈阳农业大学学报, 2001, 32(6): 459-464.
- [20] 蒋桂芳, 宋力, 黄俊生. 农业中壳聚糖的功能与应用研究[J]. 渝西学院学报(自然科学版), 2005, 4(3): 58-60.
- [21] 杜昱光, 白雪芳, 虞星炬, 等. 寡聚糖类物质生理活性的研究[J]. 中国生化药物杂志, 1997, 18(5): 268-270.
- [22] 师素云, 薛启汉, 陈游, 等. 羧甲基壳聚糖对玉米的生理调节功能初探[J]. 中国农业大学学报, 1997, 2(5): 1-6.
- [23] 张勇, 黄德智, 王天琪, 等. 低聚壳聚糖种子包衣剂的制备及应用[J]. 精细化工, 2011, 28(5): 479-483.
- [24] 罗兵, 徐朝莱, 孙海燕. 壳聚糖对黄瓜品质和产量的影响[J]. 南京农业大学学报, 2004, 27(1): 20-23.
- [25] 胡雪芳, 田志清, 梁亮, 等. 寡聚酰胺抑制 TMV 活性测定及对番茄生长影响初探[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(8): 41-49.
- [26] 郭卫华, 赵小明, 杜昱光. 壳聚糖对黄瓜种子萌发和幼苗生长及光合特性的影响[J]. 中国农学通报, 2009, 25(3): 164-169.
- [27] 朱晓红, 桑青, 倪付花, 等. 壳聚糖及壳聚糖铜对 6 种植物病原真菌的抑菌活性[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(18): 9577-9579.
- [28] 邓雨艳, 明建, 张昭其, 等. 壳聚糖诱导脐橙果壳抗病性、水杨酸及活性氧代谢变化[J]. 中国农业科学, 2010, 43(4): 812-820.
- [29] 孙巧峰, 于贤昌, 高俊杰, 等. 羧甲基壳聚糖对黄瓜幼苗抗冷性的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37(11): 1660-1665.
- [30] 马彦霞, 郁继华, 张国斌, 等. 壳聚糖对水分胁迫下辣椒幼苗氧化损伤的保护作用[J]. 中国农业科学, 2012, 45(10): 1964-1971.
- [31] 葛少彬. 含壳聚糖水溶肥料在辣椒上的应用效果研究[J]. 现代农业科技, 2015(7): 85, 87.
- [32] 胡祥, 王瑞霞, 奥岩松. 壳聚糖对土壤理化性状的影响[J]. 土壤通报, 2006, 37(1): 68-72.
- [33] 冯波, 曾虹燕, 袁刚, 等. 壳聚糖对葡萄果实的抑菌作用和涂膜保鲜技术[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2006, 35(1): 98-101.
- [34] 匡银近, 龙晶, 徐东生, 等. 不同相对分子质量的壳聚糖在草莓保鲜中的作用[J]. 食品科学, 2010, 31(2): 241-244.
- [35] 潘婷婷, 高彩玲. 连翘叶提取物与壳聚糖复配物对圣女果保鲜作用的研究[J]. 陕西农业科学, 2020, 66(5): 44-47.
- [36] 周尔槐, 王忠先, 王国庆, 等. 绿色防控技术在井冈山农业科技园区的推广与应用[J]. 现代农业科技, 2013(20): 134-136.
- [37] 刘晓宇, 刘志恒, 吕淑霞. 壳聚糖对植物病原真菌的抑制作用[J]. 安徽农业科学, 2005, 33(2): 225, 282.
- [38] 孟玲, 夏泉. 不同分子量壳聚糖的制备以及对三种植物病原真菌的抑制作用研究[M]//周明国, 陈长军. 中国植物病害化学防治研究: 第 6 卷. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2008.
- [39] 张敏, 何照璞, 彭好文, 等. 壳聚糖基聚合物对 3 种病原真菌抑菌作用研究[J]. 中国果树, 2008(3): 35-37.
- [40] 商文静, 吴云锋, 商鸿生, 等. 壳聚糖对烟草花叶病毒的体外钝化作用[J]. 病毒学报, 2008, 24(1): 76-78.
- [41] 董秋洪, 张祥喜. 壳聚糖对辣椒疫霉病菌和水稻恶苗病菌的抑制作用[J]. 江西农业学报, 2003, 15(2): 58-60.
- [42] 于汉寿, 陈永堂. 壳聚糖对水稻恶苗病菌和油菜菌核病菌的作用[J]. 植物保护学报, 2002, 29(4): 295-299.
- [43] 徐俊光. 壳聚糖对植物病原真菌的抑菌活性及其机理的初步研究[D]. 大连: 中国科学院研究生院(大连化学物理研究所), 2007.
- [44] 胡健, 姜涌明, 殷士学. 壳聚糖抑制植物病原菌生长的研究[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2000, 3(2): 42-44.
- [45] 毕锐, 李春光, 崔娟, 等. 壳聚糖对水稻恶苗病、纹枯病及二化螟抑制效果的分析[J]. 作物杂志, 2008(6): 83-84.
- [46] 唐艳霞. 壳聚糖对香蕉炭疽病防治及其作用机理的初步研究[D]. 广州: 华南师范大学, 2010.
- [47] 白春微, 蒋选利, 丁海霞, 等. 壳聚糖对水稻抗纹枯病抗性诱导的研究[J]. 贵州农业科学, 2010, 38(8): 103-106.
- [48] 张文清, 冯华峰, 左萍萍, 等. 壳聚糖季铵盐的制备和诱导抗稻瘟病的初步研究[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(5): 942-945.
- [49] 何培青, 蒋万枫, 张金灿, 等. 壳聚糖对番茄叶挥发性抗菌物质及植保素日齐素的诱导效应[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2004, 34(6): 1008-1012.
- [50] 陈佳阳, 乐学义. 壳聚糖及其衍生物在农业上的应用[J]. 化学研究与应用, 2011, 23(1): 1-8.
- [51] 张源, 李燕燕, 朱孔杰, 等. 甲壳素的提取及其在农业上的应用[J]. 广州化工, 2015, 43(22): 19-20, 23.
- [52] 王琳玲, 张文清, 夏玮, 等. 壳聚糖及其衍生物抗菌性质的研究进展[J]. 上海生物医学工程, 2006, 27(2): 111-114.
- [53] 彭文怡, 张进萍. 甲壳素及其衍生物在食品工业中的应用[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(12): 11-13.