

壳寡糖控制果蔬采后病害及诱导抗病性研究进展

闫佳琪, 张忆楠, 赵玉梅, 曹建康*, 姜微波
(中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083)

摘要: 壳寡糖 (oligochitosan, OCH) 是一类由N-乙酰氨基葡萄糖或氨基葡萄糖通过 β -1,4-糖苷键连接起来的低聚合度水溶性的氨基葡聚糖, 在农业、食品、医药等领域具有广泛用途。本文综述了OCH对果蔬采后病原菌生长的抑制活性, 以及OCH相对分子质量和使用浓度对其抑菌活性的影响。进一步综述了OCH对采后病害的控制作用, 对果蔬诱导抗病性、活性氧代谢和抗病相关酶活性的影响。OCH是一种对环境友好的、生物源采后病害诱导剂。OCH及其复配处理在果蔬采后病害防治方面将具有重要应用前景。

关键词: 壳寡糖; 果蔬; 抑菌活性; 采后病害; 诱导抗病性

Progress of Research on Control of Postharvest Diseases of Fruits and Vegetables and Induction of Disease Resistance with Oligochitosan

YAN Jiaqi, ZHANG Yinan, ZHAO Yumei, CAO Jiankang*, JIANG Weibo
(College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Oligochitosan (OCH) is a water-soluble low carbohydrate polymer consisting of β -1,4-linked 2-acetamido-D-glucose and β -1,4-linked 2-amino-D-glucose units. OCH has been universally used in the fields of agriculture, food and medicine. Antifungal activity of OCH on the growth of pathogens causing postharvest diseases of fruits and vegetables, and how its application is affected by molecular weight and concentration are reviewed in this paper. Inhibitory effect of OCH on postharvest diseases, and the effect of OCH on the induced infection resistance, the metabolism of reactive oxygen species (ROS) and the activities of defense-related enzymes in fruits and vegetables are further discussed. Therefore, OCH is an environment-friendly biological inducer for the resistance to postharvest diseases. The application of OCH and its combinations with other materials will provide a promising method for the prevention of postharvest diseases of fruits and vegetables.

Key words: oligochitosan; fruits and vegetables; antifungal activity; postharvest diseases; induced disease resistance

中图分类号: TS255

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2015) 21-0268-05

doi:10.7506/spkx1002-6630-201521050

壳寡糖 (oligochitosan, OCH) 是由壳聚糖经过部分水解而得到的产物, 由2~10个N-乙酰氨基葡萄糖或氨基葡萄糖通过 β -1,4-糖苷键连接而成的低聚糖^[1-2]。与壳聚糖相比, OCH具有黏度低、水溶性好、易被生物体吸收等优点, 因此具有更多的生物活性和生理功能, 在生物化工、医疗保健、食品加工、农业生产等领域得到广泛的应用。研究表明, OCH不仅具有广谱的抑菌活性, 还可诱导果蔬对病原菌侵染的抗病性, 从而抑制采后病害和减少腐烂损失^[3-16]。OCH还能够通过抑制果蔬呼吸代谢、阻止水分的散失、保持果实硬度、推迟转色、延缓可溶性固形物、抗坏血酸和可滴定酸等含量的下降, 从而改善贮藏品质^[13-22]。因此, OCH在果蔬贮藏保鲜和病害控制方面具有

广阔的应用前景。曾有学者报道过OCH诱导植物抗病性的综述^[1-2,23-24], 但至今尚未见到有关OCH抑制采后病原菌生长、控制果蔬采后病害和诱导抗病性的综述。

1 OCH对果蔬病原菌的抑制作用

离体实验研究表明, OCH能对多种果蔬采后病原菌的生长产生抑制作用 (表1)。但是, 由于受到制备工艺、聚合度 (degree of polymerization, DP)、相对分子质量 (molecular weight, M_w)、脱乙酰度 (degree of deacetylation, DD)、使用浓度等因素的影响, OCH对果蔬采后病原菌的抑制效果具有较大差异。

收稿日期: 2015-01-14

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (31371846; 31071625); 国家高技术研究发展计划 (863计划) 项目 (2012AA101606)

作者简介: 闫佳琪 (1984—), 女, 硕士, 研究方向为果蔬采后病理。E-mail: jiaqidexiang@163.com

*通信作者: 曹建康 (1976—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为果蔬采后病理与贮藏保鲜。E-mail: cjk@cau.edu.cn

表1 壳寡糖对果蔬主要采后病原菌生长的抑制作用
Table 1 Inhibitory effect of OCH on the growth of the main invading postharvest pathogens in fruits and vegetables

病原菌	壳寡糖特性	使用水平	作用效果
苹果褐腐病菌		0.25~2 g/kg	抑制病原菌孢子萌发、芽管伸长和菌丝体生长 ^[3]
梨黑斑病菌	M_w 为6 kD	0.1~5.0 g/L	抑制病原菌孢子萌发、芽管伸长和菌丝体生长 ^[4]
梨轮纹病菌			
胡萝卜核盘菌		2 g/L	对该菌的生长无抑制作用 ^[5]
杏青霉病菌 杏黑斑病菌 杏软腐病菌	M_w 分别为3、5、10 kD; DD为85%	2.5~20 g/L	随着 M_w 增大, OCH对病原菌的抑菌作用增强; 随浓度的增加, OCH对病原菌的抑制作用增强。 OCH对杏黑斑病菌具有极强的抑制作用 ^[6]
番茄灰霉病菌	M_w 为1 429 D; DD为95.4%; DP为8.3	0.5~6 g/L	抑制病原菌孢子萌发和菌丝体生长 ^[7]
番茄软腐病菌	M_w 分别为17.4、23.8、30.7 kD; DD为75%~85%	15~30 g/L	抑制病原菌孢子萌发和菌丝体的生长。但在不同 M_w 、浓度、病菌来源之间, OCH抑菌作用有一定差异 ^[8-9]
香蕉炭疽病菌	M_w 为5 kD; DD为95%	4~8 g/L	抑制病原菌菌丝体生长 ^[10]
番茄灰霉病菌	M_w 分别为 0.5×10^4 、 3.7×10^4 、 5.7×10^4 、 2.9×10^5 g/mol		抑制病原菌菌丝体生长; 50%抑菌质量浓度分别为1.392、1.520、1.998、2.407 g/L。随着 M_w 减小, OCH抑菌活性增强 ^[11]
桃褐腐病菌	6 kD	0.1~5.0 g/L	抑制病原菌孢子萌发、芽管伸长和菌丝体生长 ^[12]
枣黑霉病菌	M_w 为10 kD; DD为85%	0.5~20 g/L	抑制病原菌菌丝体生长 ^[13]
柑橘炭疽病菌	M_w 为1.5~2 kD	10~40 g/L	抑制病原菌孢子的萌发和菌丝体生长 ^[14]
草莓灰霉病菌			
草莓核盘病菌			
草莓炭疽病菌	M_w 分别为2 133、3 726 D	1.0~10.0 g/L	抑制病原菌菌丝体生长 ^[25]
柑橘青霉病菌			
番茄枯萎病菌			
茄链格孢菌			
灰葡萄孢菌			
葫芦科刺盘孢菌	M_w 分别为2 133、3 726 D	0.25~2 g/L	抑制病原菌菌丝体生长 ^[26-27]
尖孢镰刀菌			
辣椒疫霉菌			
葡萄灰霉病菌	M_w 为5 kD; DD为10%	0.075~0.3 g/L	抑制病原菌菌丝体生长 ^[28]
匍枝根霉菌	DD>90%	0.5~2.0 g/L	抑制病原菌孢子萌发和菌丝体生长 ^[29]
尖孢镰刀菌			
灰葡萄孢菌			
葫芦科刺盘孢菌			
芦笋茎枯病菌	DD为20%	0.02~0.15 g/L	抑制病原菌菌丝体生长, 但对意大利青霉菌无抑制作用 ^[30]
意大利青霉菌			
梨黑斑病菌			
核盘病菌			
油菜核盘菌	DD>95%	0.2~2 g/kg	OCH水平高于0.2 g/kg时才抑制病原菌的生长, 水平达到1 g/kg时可完全抑制菌丝体的生长 ^[31]

注:表中“使用浓度”为相关文献报道的有效使用浓度范围。各文献使用的浓度单位不同,在表中转换为g/L或g/kg以便比较。表2同。

1.1 M_w 对OCH抑菌活性的影响

M_w 是影响OCH抑菌活性的重要因素(表1)。 M_w 过高或过低都可能影响OCH的抑菌活性,如3 kD和5 kD的OCH抑菌效果要明显高于2 kD和7 kD的OCH^[32]。一般地,较低 M_w 的OCH具有较强的抑菌活性,例如OCH对

番茄灰霉病菌生长的抑制作用随着其 M_w 的减小而增强^[11]; 15 kD比357 kD的OCH更能有效地抑制柑橘青霉病菌的生长^[17]。然而,过低 M_w 的OCH的抑菌活性却会下降,如3 kD的OCH对杏主要病原菌的抑菌作用显著低于5 kD和10 kD的OCH^[6]; 1~2 kD的OCH能对多种植物病原菌的生长产生抑制作用,而500 D的OCH基本没有抑菌活性^[33-34]; 3 726 D比2 133 D的OCH对草莓炭疽病和番茄枯萎病菌具有更强的抑菌效果,而425 D的OCH基本没有抑菌活性^[25]; 20 kD的OCH能强烈抑制构巢曲霉菌的生长,而800 D的OCH不但没有抑制反而促进了该菌的生长^[35]。然而,也有报道认为OCH的 M_w 与其抑菌活性之间无明显关系,如17.4、23.8、30.7 kD的OCH都可有效地抑制番茄软腐病菌孢子萌发和菌丝体生长,但不同 M_w 的OCH之间差异并不显著^[8-9]。

1.2 OCH质量浓度对其抑菌活性的影响

一般地,OCH的抑菌活性具有浓度效应(表1)。OCH对梨黑斑病菌和轮纹病菌孢子萌发、芽管伸长和菌丝体生长的抑制作用均随OCH浓度的增加而增强,OCH抑制这两种病原菌菌丝体生长的半抑制浓度(50% inhibiting concentration, IC_{50})分别为1.46 g/L和0.35 g/L^[4]。OCH抑制苹果和桃褐腐病菌菌丝体生长的 IC_{50} 分别为0.8 g/kg^[3]和0.5 g/L^[12]。OCH抑制枣黑霉病菌菌丝体生长的 IC_{50} 分别为0.76 g/L和1.69 g/L(分别在培养4 d和6 d时测定)^[13]。4 g/L的OCH就能有效地抑制香蕉炭疽病菌的生长^[10]。20 g/L的OCH能对多种侵染杏果实的病原菌的生长产生强烈的抑制作用^[6]。40 g/L的OCH甚至能完全抑制大部分植物病原真菌的生长^[34]。

不同质量浓度OCH抑菌活性也可能无明显差异。如1.5、2.0、2.5、3.0 g/L的OCH均能有效地抑制番茄软腐病菌孢子萌发和菌丝体生长,但不同质量浓度之间差异不显著^[8-9]。OCH对柑橘炭疽病菌孢子萌发的抑制作用随其质量浓度的增加而加强,但是对菌丝体生长的抑制作用却随其质量浓度的增加反而下降^[14]。

1.3 OCH抑制果蔬病原菌的机制

OCH的抑菌活性与其能改变菌丝体生长形态有关^[29]。OCH可引起尖孢镰刀菌细胞内液泡的扭曲、变形、质膜的加厚和特殊芽管的生成^[27];引起香蕉炭疽病菌菌丝体的扭曲、凹陷变形、断裂破损和变细^[10];引起桃褐腐病菌细胞质膜的完整性降低^[12],从而抑制病原菌的正常生长。OCH还能致使番茄灰霉病菌病原菌菌丝分枝增多、菌体分隔增加,使分生孢子形成受阻,并使菌丝细胞膜透性改变而造成菌丝体内含物的渗漏^[7]。OCH处理可导致番茄软腐病菌生长滞缓,胞壁增厚^[36]。研究发现,OCH还能渗入病原菌细胞内部干扰细胞的正常生长,如穿透疫霉菌的细胞膜而进入细胞质中,与细胞内

DNA、RNA等目标物强烈结合，从而抑制病原菌的生长繁殖^[26]。

2 OCH对果蔬采后病害的控制作用

采前喷施OCH或采后OCH浸泡处理都能够抑制多种果蔬采后病害。OCH抑制采后病害的效果呈一定的质量浓度效应（表2）^[3-4,10-11,15-19]。如5 g/L比0.5 g/L的OCH更能有效地抑制由桃褐腐病菌侵染引起的桃果实褐腐病的发生^[15]。但是，OCH处理后能够进入或残留在果蔬上的量往往低于其半抑菌浓度^[3,10,12-13,16]，可能难以直接抑制果蔬上病原菌的生长。

表2 壳寡糖对主要果蔬采后病害的抑制作用
Table 2 Inhibitory effect of OCH on main postharvest diseases of fruits and vegetables

果蔬名称	壳寡糖特性	使用水平与方式	作用效果
脐橙	M_w 为1.5~2 kD	15 g/L，采前喷施	提高柑橘果实采收时的单果质量，降低烂果率和落果率 ^[4]
‘赛买提’杏	M_w 为5 kD；DD为90%	0.1、0.5、2.5 g/L，采前4次喷施	抑制采后杏果实腐烂发生率 ^[4]
‘金甜蜜’哈密瓜	M_w 为5 kD；DD为90%	0.05、0.5、5.0 g/L，采前4次喷施	抑制采后甜瓜果实腐烂 ^[4]
桃		0.5、5 g/L，采后浸果10 min	抑制由桃褐腐病菌侵染引起的桃果实褐腐病 ^[15]
桃	M_w 为6 kD	损伤孔注入0.5或5 g/L OCH，再接种病原菌	抑制由桃褐腐病菌侵染引起的桃果实褐腐病 ^[15]
‘白里’肥城桃	M_w 为4~5 kD；DD为85%	15 g/L，采后浸果10 min	抑制了肥城桃果实褐腐病病斑的扩展 ^[27]
‘红富士’苹果		损伤孔接种病原菌后，再注入0.9 g/kg OCH	抑制由桃褐腐病菌侵染引起的苹果褐腐病 ^[3]
‘北碚447’锦橙	M_w 为1.5~2 kD；DD为85.5%	15 g/L，采后浸果1 min	抑制由柑橘炭疽病菌引起的柑橘果实炭疽病 ^[38]
柑橘	M_w 分别为15.1、357 kD；DD为96.2%	0.5、1、2 g/L，采后浸泡涂膜	抑制由柑橘青霉菌、意大利青霉菌、蒂腐病菌、灰霉病菌等侵染引起的柑橘果实病害和自然腐烂 ^[17]
雪花梨	M_w 为6 kD	损伤孔接种病原菌后，再注入0.1、0.5、1.0、1.5、5.0或10 g/L OCH	抑制由梨黑斑病菌和引起的梨果实病害扩展 ^[4]
胡萝卜		2 g/L，采后浸泡涂膜	降低胡萝卜腐烂率和腐烂程度，抑制由胡萝卜核盘菌侵染引起的病害 ^[5]
大枣	M_w 为10 kD；DD为85%	0.5、1、2、5、10 g/L，采后浸果20 min	抑制由枣黑霉病菌侵染引起的枣果实黑霉病和自然腐烂 ^[13]
大枣	M_w 分别为2、5、10 kD；DD为85%	0.7 g/L，采前4次喷施	抑制由褐腐病菌和枣黑霉病菌侵染引起的枣果实采后病害和自然腐烂 ^[14]
大枣	M_w 为10 kD；DD为85%	0.3、0.7、1.0 g/L，采前4次喷施	
‘BaXi’香蕉	M_w 为5 kD；DD为95%	5、10、20 g/L，采后浸果2~3 min	抑制由香蕉炭疽病菌引起的香蕉果实炭疽病病斑扩展 ^[10]
番茄	M_w 分别为0.5×10 ⁴ 、3.7×10 ⁴ 、5.7×10 ⁴ 、2.9×10 ⁵ g/mol	损伤孔接入0.5、1、2或4 g/L OCH后，再接种病原菌	抑制由番茄灰霉病菌侵染引起的番茄果实灰霉病 ^[11]

OCH的 M_w 对其抑制采后病害的效果影响较大。Chien等^[17]报道低 M_w （15.1 kD）比高 M_w 的OCH（357 kD）更能有效地抑制由柑橘青霉菌、意大利青霉菌、蒂腐病菌和灰霉病菌等多种病原菌侵染引起的柑橘果实病害和自然腐烂。Badawy等^[11]则认为一定 M_w （5.7×10⁴ g/mol）的OCH对番茄果实灰霉病具有较强的抑制作用， M_w 过高或过低都会降低OCH的防治效果。Yan Jiaqi等^[16]报道10 kD的OCH抑制枣果实采后褐腐病和黑霉病的效果较

好，但与其他 M_w 的OCH的差异并不显著。OCH对果蔬病害的防治效果还可能与其聚合度及脱乙酰度有关^[23]，但目前尚无相关报道。

3 OCH诱导果蔬抗病性的作用及机制

3.1 OCH对果蔬抗病性的诱导作用

OCH被认为是一种“植物疫苗”，它能诱导激活蛋白激酶抗性信号传导途径，诱发病程相关蛋白基因的表达并建立诱导抗病性，从而增强植物自身防御系统对病原物侵染的抵抗能力^[23-24,39-40]。H₂O₂可能是介导OCH诱导植物抗病性的重要抗性信号分子^[24,41-43]。在植物细胞壁和细胞膜上均有OCH专一性结合位点，OCH能在几分钟内穿过细胞壁与细胞膜结合，激发一系列抗性反应^[44]，如激发表皮细胞中H₂O₂的产生和累积^[43]。研究表明， M_w 为1.5 kD左右的OCH诱导植物抗病性的效果较为明显^[41,45-46]。OCH的抗性诱导活性还与其聚合度及脱乙酰度密切相关。低聚合度及高脱乙酰度的OCH诱抗活性较高，特别是乙酰化程度为95%或聚合度大于7的OCH往往具有高效的抗病诱导生物活性^[23]。至于OCH控制采后病害的作用，可能与其激发果蔬生化防御反应和诱导抗病性有关^[3-5,10-13,15-17]，但仍需要深入地研究。

3.2 OCH诱导果蔬抗病性的机制

尽管有报道表明OCH能诱导果实病程相关蛋白基因PR1、PR10、几丁质酶基因及β-1,3-葡聚糖酶基因的表达^[37]，但是关于OCH诱导果蔬抗病性分子机制的研究仍然很少。目前，有关OCH诱导果蔬抗病性机制的研究主要集中在其对活性氧代谢和抗性相关酶活性的影响上。

3.2.1 OCH对果蔬活性氧代谢的影响

H₂O₂作为抗性信号分子介导了OCH对植物组织抗病性的诱导^[24,41-43]。在采后，OCH处理也能激发果实H₂O₂的产生和积累，从而诱导增强果实抗病性^[38]。超氧化物歧化酶（super oxide dismutase，SOD）和过氧化氢酶（catalase，CAT）是重要的活性氧代谢相关酶，SOD能催化超氧阴离子转化形成H₂O₂，而CAT能催化H₂O₂进一步转化形成H₂O^[38]。采前喷施OCH的枣果实采收后具有较高的SOD活性和较低的CAT活性，这种变化有利于果实组织中H₂O₂的积累和抗病性的诱导^[16]。OCH处理影响活性氧代谢的作用可能是多方面的，如OCH可使桃果实CAT活性先升高随后逐渐降低并低于对照^[15]，能提高柑橘果实SOD和CAT等酶活性以及还原型谷胱甘肽、抗坏血酸等抗氧化物质的水平^[38]，这些变化实际上有利于果实组织清除活性氧分子和保护自身免受自由基的伤害。进一步研究发现，OCH处理能诱导草莓悬浮培养细胞的活性氧迸发，峰值出现在诱导后20~30 min；同时，OCH处理也诱导了SOD和CAT等酶活性的上升，但

最大值出现在处理后60~90 min^[42]。可见, OCH首先激发组织活性氧快速积累和诱导增强果蔬抗病性, 随之, 也激发了果蔬活性氧代谢系统的自我保护机制, 以清除过量积累的活性氧对自身造成的可能危害^[16,38,42]。

3.2.2 OCH对果蔬抗性相关酶活性的影响

UCH能诱导植物组织中几丁质酶(chitinase, CHT)和 β -1,3-葡聚糖酶(β -1,3-glucanase, GLU)等病程相关蛋白的表达, 激活苯丙氨酸解氨酶(phenylalanin ammonia-lyase, PAL)和过氧化物酶(peroxidase, POD)等抗性相关酶的活性, 从而诱导增强抗病性^[1,16,24,46]。GLU和CHT可水解病原微生物细胞壁的主要成分几丁质和 β -1,3-葡聚糖, 破坏真菌细胞壁成分, 具有直接的抗菌作用。POD和PAL参与了植物组织抗性生化代谢和防御生化反应。据报道, OCH处理可激活梨中POD、CHT和GLU等酶活性, 增强果实对黑斑病和轮纹病的抗性^[4]; 激活并维持香蕉较高水平的PAL、GLU、CHT活性, 增强果实对炭疽病的抗性^[10]; 激发桃中POD、CHT和GLU等基因转录表达和酶活性的提高, 增强果实对褐腐病的抗性^[15,37]; 维持枣采后较高的POD和GLU活性及普遍抗性^[16]。此外酚类物质也可能参与了UCH诱导的果蔬生化防御反应和抗病性的形成^[11]。比如UCH可诱导葡萄叶片白藜芦醇的积累以及刺激CHT和GLU等酶活性的升高, 增强对灰霉病和霜霉病的抗性^[45]。可见, 激发抗性相关酶活性是UCH诱导果蔬抗病性的重要方式。

4 结 语

UCH无毒、无味, 可生物降解, 具有良好的生物相容性、水溶性和成膜性, 这些特性为UCH在果蔬采后保鲜和贮藏病害控制方面的应用提供了广阔的前景。由于UCH来源、制备、分离与纯化工艺的限制, 单一聚合度或 M_w 的UCH不易获得。实际应用的UCH往往是由不同聚合度或 M_w 的单体所组成的混合物, 这对研究UCH的抑菌、诱导抗病性等生物活性与其结构、浓度、 M_w 、聚合度、脱乙酰度等理化性质之间的关系带来一定影响。随着制备工艺与分离技术的发展, 将来有望获得具有更高纯度、更高生物活性的UCH。此外, 将UCH与一些化学物质如硅^[3]、硫酸铜^[45]、1-甲基环丙烯^[47]等复配使用, 可以进一步提高其抑菌活性和诱导果蔬抗病性的能力, 这为扩大UCH在果蔬等园艺产品采后保鲜防腐领域的应用提供了有效的途径。

参考文献:

[1] 刘幸海, 李正名, 王宝雷, 等. 具有农业生物活性壳寡糖的研究进展[J]. 农药学报, 2006, 8(1): 1-7.

- [2] KIM S K, RAJAPAKSE N. Enzymatic production and biological activities of chitosan oligosaccharides(COS): a review[J]. Carbohydrate Polymers, 2005, 62(4): 357-368.
- [3] YANG Lingyu, ZHAO Pan, WANG Li, et al. Synergistic effect of oligochitosan and silicon on inhibition of *Monilinia fructicola* infections[J]. Journal of the Science and Food Agriculture, 2010, 90(4): 630-634.
- [4] MENG Xianghong, YANG Lingyu, KENNEDY J F. 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.
- [5] MOLLOY C, CHEAH L H, KOOLAARD J P. Induced resistance against *Sclerotinia sclerotiorum* in carrots treated with enzymatically hydrolysed chitosan[J]. Postharvest Biology and Technology, 2004, 33(1): 61-65.
- [6] 贾盼盼, 刘晓丹, 吝晨晨, 等. 壳寡糖对杏果实采后主要病原菌抑菌作用的研究[J]. 新疆农业科学, 2012, 49(2): 290-295.
- [7] 王婷, 吕淑霞, 贺靖文, 等. 酶法制备壳寡糖对番茄灰霉病菌抑制机理初探[J]. 生物技术, 2009, 19(6): 29-32.
- [8] HERNÁNDEZ-LAUZARDO A N, BAUTISTA-BANÑOS S, VELÁZQUEZ-DEL VALLE M G, et al. Antifungal effects of chitosan with different molecular weights on *in vitro* development of *Rhizopus stolonifer* (Ehrenb.: Fr.) Vuill[J]. Carbohydrate Polymers, 2008, 73(4): 541-547.
- [9] GUERRA-SÁNCHEZ M G, VEGA-PÉREZ J, VELÁZQUEZ-del VALLE M G, et al. Antifungal activity and release of compounds on *Rhizopus stolonifer* (Ehrenb.:Fr.) Vuill. by effect of chitosan with different molecular weights[J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2009, 93(1): 18-22.
- [10] MENG Xiangchun, TANG Yanxia, ZHANG Aiyu, et al. Effect of oligochitosan on development of *Colletotrichum musae* *in vitro* and *in situ* and its role in protection of banana fruits[J]. Fruits, 2012, 67(3): 147-155.
- [11] BADAWY M E I, RABEA E I. Potential of the biopolymer chitosan with different molecular weights to control postharvest gray mold of tomato fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2009, 51(1): 110-117.
- [12] YANG Lingyu, ZHANG Jianlei, BASSETT C L, et al. Difference between chitosan and oligochitosan in growth of *Monilinia fructicola* and control of brown rot in peach fruit[J]. LWT-Food Science and Technology, 2012, 46(1): 254-259.
- [13] YAN Jiaqi, CAO Jiankang, JIANG Weibo, et al. Effects of oligochitosan on postharvest *Alternaria* rot, storage quality, and defense responses in Chinese jujube (*Zizyphus jujuba* Mill. cv. Dongzao) fruit[J]. Journal of Food Protection, 2011, 74(5): 783-788.
- [14] 邓丽莉, 黄艳, 周玉翔, 等. 采前壳寡糖处理对柑橘果实贮藏品质的影响[J]. 食品科学, 2009, 30(24): 428-432.
- [15] MA Zengxin, YANG Lingyu, YAN Haixia, et al. Chitosan and oligochitosan enhance the resistance of peach fruit to brown rot[J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 94(1): 272-277.
- [16] YAN Jiaqi, CAO Jiankang, JIANG Weibo, et al. Effects of pre-harvest oligochitosan sprays on postharvest fungal diseases, storage quality, and defense responses in jujube (*Zizyphus jujuba* Mill. cv. Dongzao) fruit[J]. Scientia Horticulturae, 2012, 142: 196-204.
- [17] CHIEN P J, SHEU F, LIN H R. Coating citrus(Murcott tangor) fruit with low molecular weight chitosan increases postharvest quality and shelf life[J]. Food Chemistry, 2007, 100(3): 1160-1164.
- [18] 刘豆豆, 朱璇, 王静, 等. 采前壳寡糖处理对杏果实贮藏品质的影响[J]. 现代食品科技, 2012, 28(10): 1272-1276.

- [19] 朱璇, 李娜, 王梓怡, 等. 采前喷施壳寡糖对甜瓜贮藏品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2013, 34(9): 103-106.
- [20] 陈奕兆, 王亦佳, 刚成诚, 等. 壳寡糖、PVP处理对冷藏水蜜桃的保鲜效果比较[J]. 食品科学, 2013, 34(18): 332-336. doi:10.7506/spkx1002-6630-201318068.
- [21] 邓丽莉, 黄艳, 周玉翔, 等. 壳寡糖处理对柑桔果实贮藏品质的影响[J]. 食品工业科技, 2009, 30(7): 287-290.
- [22] 刘弘, 张艳, 汪小伟, 等. 壳寡糖处理对翠冠梨果实贮藏品质的影响[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2012, 34(6): 30-35.
- [23] 张付云, 赵小明, 白雪芳, 等. 壳寡糖诱导植物抗病性研究进展[J]. 中国生物防治, 2008, 24(2): 174-178.
- [24] YIN Heng, ZHAO Xiaoming, DU Yuguang. Oligochitosan: a plant diseases vaccine: a review[J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 82(1): 1-8.
- [25] 陈建国, 郑连英. 不同酶切方式制备的壳寡糖抑菌活性的研究[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2006, 40(11): 1905-1908.
- [26] XU Junguang, ZHAO Xiaoming, WANG Xiuli, et al. Oligochitosan inhibits *Phytophthora capsici* by penetrating the cell membrane and putative binding to intracellular targets[J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2007, 88(2): 167-175.
- [27] XU Junguang, ZHAO Xiaoming, HAN Xiuwen, et al. Antifungal activity of oligochitosan against *Phytophthora capsici* and other plant pathogenic fungi *in vitro*[J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2007, 87(3): 220-228.
- [28] TROTEL-AZIZ P, COUDERCHET M, VERNET G, et al. Chitosan stimulates defense reactions in grapevine leaves and inhibits development of *Botrytis cinerea*[J]. European Journal of Plant Pathology, 2006, 114(4): 405-413.
- [29] ROBLES-MARTÍNEZ L, GUERRA-SÁNCHEZ M G, HERNÁNDEZ-LAUZARDO A N, et al. Effects of chitosan and oligochitosan on development and mitochondrial function of *Rhizopus stolonifer*[J]. Journal of basic microbiology, 2014, 54(Suppl 1): 42-49.
- [30] ZHANG Mi, TAN Tianwei, YUAN Huizhu, et al. Insecticidal and fungicidal activities of chitosan and oligo-chitosan[J]. Journal of Bioactive and Compatible Polymers, 2003, 18(5): 391-400.
- [31] 尹恒, 王文霞, 卢航, 等. 壳寡糖诱导油菜抗菌核病机理研究初探[J]. 西北农业学报, 2008, 17(5): 81-85.
- [32] 陶凤云, 林强, 赵伟. 壳寡糖对植物病原真菌抑制效果的影响因素研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(35): 15559-15561.
- [33] 胡健, 姜涌明, 殷士学. 壳寡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): 42-43.
- [34] 刘晓宇, 刘志恒, 吕淑霞. 壳寡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.
- [35] HAI Le, DIEP T B, NAGASAWA N, et al. Radiation depolymerization of chitosan to prepare oligomers[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2003, 208(1): 466-470.
- [36] ALFARO-GUTIÉRREZ I C, GUERRA-SÁNCHEZ M G, HERNÁNDEZ-LAUZARDO A N, et al. Morphological and physiological changes on *Rhizopus stolonifer* by effect of chitosan, oligochitosan or essential oils[J]. Journal of Phytopathology, 2014, 162: 723-730.
- [37] 古荣鑫, 朱丽琴, 刘娜, 等. 壳寡糖与紫甘薯花青素处理对采后肥城桃褐腐病的控制效果及机理研究[J]. 果树学报, 2013, 30(5): 835-840.
- [38] 黄艳, 明建, 邓雨艳, 等. 壳寡糖诱导柑橘果实抗病作用中的活性氧变化[J]. 食品科学, 2009, 30(22): 344-348.
- [39] CHEN Yafei, ZHAN Yong, ZHAO Xiaoming, et al. Functions of oligochitosan induced protein kinase in tobacco mosaic virus resistance and pathogenesis related proteins in tobacco[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2009, 47(8): 724-731.
- [40] YIN Heng, ZHAO Xiaoming, BAI Xuefang, et al. Molecular cloning and characterization of a *Brassica napus* L. MAP kinase involved in oligochitosan-induced defense signaling[J]. Plant Molecule Biology Reporter, 2010, 28(2): 292-301.
- [41] LIN Wuling, HU Xiangyang, ZHANG Wenqing, et al. Hydrogen peroxide mediates defence responses induced by chitosans of different molecular weights in rice[J]. Journal of Plant Physiology, 2005, 162(8): 937-944.
- [42] 郭红莲, 白雪芳, 李曙光, 等. 壳寡糖诱导草莓细胞活性氧代谢的变化[J]. 园艺学报, 2003, 30(5): 577-579.
- [43] LI Yan, YIN Heng, WANG Qing, et al. Oligochitosan induced *Brassica napus* L. production of NO and H₂O₂ and their physiological function[J]. Carbohydrate Polymers, 2009, 75(4): 612-617.
- [44] 赵小明, 于炜婷, 白雪芳, 等. 壳寡糖与草莓细胞结合过程的研究[J]. 园艺学报, 2005, 32(1): 20-24.
- [45] AZIZ A, TROTEL-AZIZ P, DHUICQ L, et al. Chitosan oligomers and copper sulfate induce grapevine defense reactions and resistance to gray mold and downy mildew[J]. Phytopathology, 2006, 96(11): 1188-1194.
- [46] 胡健, 陈云, 陈宗祥. 壳寡糖对水稻纹枯病不同抗性品种几丁质酶诱导的研究[J]. 江苏农业研究, 2000, 21(4): 37-40.
- [47] MA Lin, CAO Jiankang, XU Limin, et al. Effects of 1-methylcyclopropene in combination with chitosan oligosaccharides on post-harvest quality of apricot fruits[J]. Scientia Horticulturae, 2014, 179: 301-305.