

基于纳米纤维素的食物包装薄膜制备及应用研究进展

袁思月, 朱 铭, 张 蕊, 刘鹏涛

(中国轻工业造纸与生物质精炼重点实验室, 天津市制浆造纸重点实验室,
天津科技大学轻工科学与工程学院, 天津 300457)

摘要:食品保鲜包装材料可以延长食品的保质期和避免食品浪费;当前,纳米纤维素已被广泛用于食品保鲜包装材料。本文综述了纳米纤维素食品包装薄膜的制备方法、添加纳米纤维素对典型食品包装薄膜性能的影响、基于纳米纤维素的抗菌涂层和包装材料在食品保鲜方面的典型应用。今后的研究应侧重于提高纳米纤维素基包装材料质量的稳定性和降低生产成本。

关键词:纳米纤维素;食品;包装;抗菌

包装在食品保鲜中起着保护食品免受外界污染、延缓食品变质的作用。从生产开始,包括加工、处理、储存和分销,直到消费者手中,包装材料在整个制造过程中伴随着食品并保护食品免受污染^[1]。特别是水果和蔬菜,更加需要妥善存放和保鲜,从而延长保质期。一方面,传统的存放方法存在诸多局限性;另一方面,化学处理可能会产生对环境或人体健康有毒的物质^[2]。因此,开发高性能食品保鲜包装材料是解决食品变质浪费问题的有效方法。石油基塑料因其成本低、性能稳定、成型性好、透明度好、耐磨性好,已成为包装材料的首选,是最常用的食品包装材料。然而,塑料的长期大规模使用导致了塑料污染,会危害环境和人体健康^[3]。

为了替代塑料制品,研究人员不断致力于绿色食品包装的开发,倾向于使用生物相容性和环保材料,从而实现可持续性发展。此外,通过向绿色食品包装中添加抗菌剂,可以有效抑制食源性微生物的生长,是食品包装领域的研究热点^[4]。目前,绿色包装材料主要是指可生物降解聚合物,它们来源于各种自然资源,如淀粉、纤维素、壳聚糖和植物或动物来源的蛋白质^[5]。

纤维素分布广泛,同时它具有优良的机械性能和低廉的价格,是制备可降解食品包装材料的原料

之一。纤维素是由葡萄糖组成的大分子多糖,不溶于水及一般有机溶剂,是植物细胞壁的主要成分。由于结构复杂,羟基之间存在很强的相互作用,这使得纤维素更倾向于自缔合和键合^[6]。除此之外,纤维素的功能性强^[7],改性潜力也很大^[8],通过化学修饰将基团引入到其分子链上,可以改变纤维素的疏水性,从而扩大纤维素在食品包装领域的应用^[9]。当纤维素的尺寸减小到纳米级时,热稳定性和机械性能都会更好^[10]。所以,纳米纤维素(nanocellulose, NC)是绿色食品包装的理想材料。

本文对纳米纤维素食品包装薄膜的制备方法和应用进行了介绍,分析了纳米纤维素对于复合薄膜性能的影响,以期能为纳米纤维素增强的生物质基食品包装的研究提供参考。

1 纳米纤维素食品包装薄膜的制备方法

1.1 溶液浇铸法

溶液浇铸法适用于制备植物基生物聚合物可生物降解薄膜^[11]。因此,大多数纳米纤维素食品包装薄膜仍主要采用常规溶液浇铸法制备。通常是,先将生物聚合物溶液和增塑剂或交联剂混合,然后将混合溶液倒入成膜板中,再放入烘箱中干燥,待膜表面残留的溶剂挥发后便得到薄膜。GE等^[12]以

纤维素纳米纤维(cellulose nanofibers, CNF)和羧甲基纤维素(carboxymethyl cellulose, CMC)的混合溶液为成膜溶液,在70 °C干燥12 h后得到了CNF/CMC复合薄膜,该薄膜具有均匀的表面、较高的透明度和优异的力学性能。LI等^[13]将双醛纳米纤维素与单宁通过缩合反应制备的反应性单宁纳米纤维素(tannin-nanocellulose, TANC)微凝胶加入明胶(gelatin, GE)基质中,利用溶液浇铸法制备了具有潜在活性的食品包装薄膜(图1)。结果表明:所制备的薄膜表现出了较好的机械性能、抗氧化性和紫外稳定性,在具有可持续性的活性食品包装材料领域具有潜在的应用前景。GARG等^[14]将50 mL瓜尔胶混合纳米纤维素的成膜溶液均匀地铺布在玻璃板表面,然后放入30 °C的烘箱中干燥48 h,得到交联瓜尔胶/纳米纤维素基薄膜,具有较好的机械性能。总体上,溶液浇铸法方法简单、安全,可在短时间内减少生物质有机分子因不稳定而降解的问题。

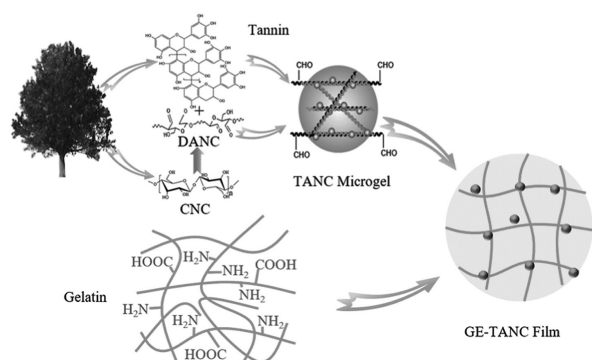


图1 明胶-单宁纳米纤维素食品包装膜的制备过程^[13]

1.2 直接熔融法

直接熔融法是一种高效、环保、安全的加工工艺,其通过加热和压力作用,使材料和薄膜分子间的距离缩小,形成一定的粘接力,从而实现粘接和成型。VILARINHO等^[15]采用直接熔融法制备了以聚乳酸(poly-lactic acid, PLA)为载体,同时负载纤维素纳米晶体(cellulose nanocrystals, CNC)和绿茶提取物(green tea extract, GTE)的环保抗氧化生物活性纳米复合薄膜。综合材料性能和延缓脂质氧化来看,当CNC的质量分数为2%时,薄膜的性能最佳。

1.3 其他方法

关于薄膜的制备方法,除传统的浇铸、直接熔融法之外,还有静电纺丝^[16]、3D打印^[17]、超临界溶剂

浸渍等新颖的制备方法。这些方法往往比传统方法更昂贵、更复杂,但也有其独特的优势。例如,静电纺丝可制备出具有高表面积、孔隙率大和染料分散均匀的薄膜^[16];3D打印技术有利于成膜物质的稳定,同时改善了薄膜的机械性能和视觉效果^[17]。

2 纳米纤维素基复合食品包装薄膜的性能

纳米纤维素通常分为三种:第一种是纤维素纳米纤维(CNF),直径2~100 nm,长度可超过10 μm,具有高比表面积、高纵横比和大量表面羟基^[18]。第二种是纤维素纳米晶体(CNC),通常长0.05~0.5 μm,宽度为3~5 nm,呈类似针状和棒状形态^[19]。最后一种是细菌纳米纤维素(bacterial nanocellulose, BNC),直径约为10~100 nm,长度为几微米^[20]。与CNF和CNC相比,BNC具有更高的纯度和结晶度。

纤维素薄膜因具有亲水性、机械性能差、阻隔性能差、缺乏活性等特点,限制了其在包装材料上的应用。由于食品的复杂性和多样性,不可能制定出良好食品包装的通用规则;但人们普遍认为,食品包装须具备良好的机械性能、阻隔性能和稳定性,从而起到在运输、储存和销售过程中保护食品的作用^[21]。因此,需要更深层次地研究纤维素材料的制备技术,以改善纤维素基食品包装材料的性能。

2.1 纳米纤维素与蛋白质复合

蛋白质形成的网络可以让薄膜具有可塑性和弹性,这使得蛋白质非常适合作为生物聚合物包装材料的组分^[22]。与纯蛋白质薄膜相比,大部分纳米纤维素增强的蛋白质薄膜的机械性能都得到了提高,还具有更优异的光学、阻隔和抗菌性能。QIN等^[23]深入研究了不同类型的纳米纤维素对辣椒叶蛋白(capsicum leaf protein)基生物纳米复合膜性能的影响,发现不同类型纳米纤维素具有不同的表面微观形态和羟基、氢键的位点数量。这导致它们在蛋白质基质中的空间分布和分子间交联程度存在显著差异,使得BNC-蛋白质基生物纳米复合薄膜(protein-based bionanocomposite film, PBBF)的抗拉强度最大,木质素纳米纤维素(lignin nanocellulose)-PBBF的柔韧性最好,CNC-PBBF的水接触角最大,CNF-PBBF的透光率最高。MOSTAFA等^[24]将大豆分离蛋白(soy protein isolate, SPI)和纳米纤维素溶于水,然后加入甘油作为增塑剂制备薄膜,发现薄膜的机械、阻隔和理化性能得到了增强,但薄膜

的抗氧化和抗菌性能并未改善。SOGUT^[25]观察到纳米纤维素稳定的佛手柑油(bergamot oil, BO)与乳清分离蛋白(whey protein isolate, WPI)薄膜结合增强了WPI薄膜的机械性能和水蒸气渗透性(water vapor permeance, WVP),采用纳米纤维素稳定的BO与直接采用BO相比在薄膜中释放的更慢,延长了薄膜的抗氧化和抑菌作用。MARTELLI-TOSI等^[26]研究了加入由酶法和酸处理法制备的大豆秸秆纳米纤维素对大豆分离蛋白薄膜的影响。结果显示:CNF能够更加规则地分布在薄膜基体内,从而改善了大豆蛋白薄膜的力学性能,降低了其水蒸气渗透性;CNC与蛋白质膜基质之间发生了连锁反应,使薄膜变得更脆、更粗糙,水溶性更低。QAZANFARZADEH等^[27]的研究表明:燕麦壳纳米纤维素(oat husk nanocellulose, ONC)的加入改变了乳清分离蛋白(WPI)薄膜的特性,材料的透明度和水蒸气渗透性降低,其中添加5% ONC的WPI基纳米复合薄膜具有最高的抗拉强度和杨氏模量;但随着ONC含量的进一步增加,会导致填料团聚,从而影响薄膜的性能。通过与纯薄膜对比发现,ONC的亲水性会对纳米复合材料产生不良的影响,导致断裂伸长率变小和水溶性增加。HUANG等^[28]通过用叶酸(folic acid, FA)接枝改性氧化纤维素纳米纤维素(oxidized cellulose nanocellulose, TOCN)并借助真空辅助过滤,成功制备出紫外屏蔽效果好、透明度高和拉伸强度高的纤维素基物质薄膜。PAPADAKI等^[29]的研究表明:细菌纤维素纳米晶须(bacterial cellulose nanowhiskers, BCNW)的加入显著增强了浓缩乳清蛋白(whey protein concentrate)薄膜的机械性能,薄膜的拉伸强度、杨氏模量随着BCNW的添加量增加(从0.5%增加到5%)而升高,在添加5%时分别达到最大的2.5 MPa和120 MPa。

2.2 纳米纤维素与多糖复合

与蛋白质基薄膜相比,多糖基薄膜的气体阻隔性能、机械性能和分子间连接能力较差。CAO等^[30]将羧基化纳米纤维素(carboxylated nanocellulose)掺入大豆多糖(soybean polysaccharide)薄膜中,发现X射线衍射(XRD)图谱中特征峰的位置并未明显改变,并且从傅里叶红外光谱(FTIR)中找出了大豆多糖、甘油和羧基化纳米纤维素之间存在氢键的证据,说明与羧基化纳米纤维素共混虽然一定程度上削弱了薄膜的透光率和亲水性,但同时也改善了薄

膜的力学和阻隔性能。CHAICHI等^[31]首次用结晶纳米纤维素(crystalline nanocellulose)去改善果胶食用膜的机械性能和水蒸气渗透性能。加入5%结晶纳米纤维素的复合薄膜性能最好,其抗拉强度提高了84%,水蒸气渗透性降低了40%;同时,原子力显微镜(AFM)图像显示,结晶纳米纤维素在果胶基质中有良好的分散性,表明填料和基质之间存在一定相互作用。YUAN等^[32]以纳米纤维素为增强材料、聚六亚甲基双胍(PHMB)为抗菌剂,采用浇铸法成功制备了淀粉基复合抗菌薄膜。该淀粉基复合膜具有优越的物理性能、良好的透光率、透水性和优良的抗菌性能,可用于食品保鲜包装。ZHANG等^[33]通过结合TEMPO氧化纳米纤维素固定化银纳米颗粒(AgNPs)和壳聚糖,开发了一种可用于果蔬保鲜且具有高阻隔性和持久抗菌性能的新型复合膜。该复合薄膜控制了水和氧的进入,具有良好的溶胀性、溶解性和优异的机械性能,可以持久地抗菌和保鲜,且绿色可降解。DEHNAD等^[34]采用相对分子质量为 $6 \times 10^5 \sim 8 \times 10^5$ 的壳聚糖、直径为20~50 nm的纳米纤维素和甘油制备了壳聚糖-纳米纤维素生物复合薄膜并研究了其性能。结果表明:纳米纤维素的加入降低了壳聚糖聚合物的玻璃化转变温度,壳聚糖基质和分散的纳米纤维素等可以良好地结合在一起,使用复合薄膜显著延长了碎肉的保质期。

2.3 其他

除传统的蛋白质和多糖基之外,纳米纤维素还可以增强其他类型的薄膜。QIAO等^[35]利用带负电荷的纳米原纤维化纤维素(nanofibrillated cellulose, NFC)与羧基化纳米原纤维化纤维素(carboxylated nanofibrillated cellulose, C-NFC)可以和带正电的十二烷基精氨酸乙酯盐酸盐(lauryl arginine ethyl ester hydrochloride, LAE)静电键合的原理,成功开发了含有LAE、LAE/NFC或LAE/C-NFC的淀粉/聚乙烯醇(polyvinyl alcohol, PVA)活性膜。与淀粉/PVA/LAE薄膜相比,含有NFC或C-NFC的薄膜拉伸强度增加,柔韧性、水敏性、水蒸气和氧阻隔性能均有所下降;此外,由于具有较高负表面电荷的纳米纤维素与LAE间具有更强的静电相互作用,从而减缓了LAE的释放,表现出了更好的抗菌活性。ZHU等^[36]开发了聚乙烯醇/纳米纤维素复合膜。结果表明:添加纳米纤维素降低了聚乙烯醇组分的结晶度,提高了复合膜的初始分解温度和耐热性。

3 纳米纤维素食品包装薄膜的应用

现阶段,科研人员对纤维素增强生物基食品包装薄膜的研究逐渐深入。GARG等^[14]制备了具有高阻隔性和机械性能的可降解瓜尔胶/纳米纤维素基新型交联抗菌膜。与传统食品包装膜相比,瓜尔胶/纳米纤维素基新型交联抗菌膜改善了薄膜的疏水性和热稳定性,可以作为多层包装的初级或二级层来保护食品;存在的问题是,材料表面粗糙度会因为化学键和纳米填料在聚合物基质中均匀分散而降低。ZHANG等^[37]发现纤维素纳米晶体(CNC)和纤维素纳米纤维(CNF)可以作为改善可食用食品包装薄膜性能的优良添加剂,但需要注意控制加入量;此外,CNC和CNF可作为优良的控释剂和稳定剂,能显著提高食用食品包装膜的抗氧化和抗菌性能。REN等^[38]的研究表明:将银纳米粒子掺入竹材CNF中,以此体系制备的薄膜具有很强的抗菌活性,非常适合用作可生物降解的食品包装材料。MUGWAGWA等^[39]制备了乙酰化半纤维素(acetylated hemicellulose)-乙酰化纳米纤维素(acetylated nanocellulose)包覆的聚己内酯(polycaprolactone)薄膜,该薄膜可以作为含水、酒精、脂肪的食品和酸性食品的活性包装。赵恩靓等^[40]利用没食子酸(gallic acid, GA)对2,2,6,6-四甲基哌啶-1-氧基(TEMPO)氧化的纤维素纳米纤丝(TOCNF)进行改性,获得改性纤维素纳米纤丝(GA-TOCNF),并将其与玉米醇溶蛋白(Zein)共混制备可食性薄膜,之后将GA-TOCNF/Zein膜液涂于圣女果上,发现该薄膜可有效抑制圣女果的质量减少、硬度下降、可溶性固形物含量减少,对圣女果起到了一定的保鲜效果。李慧等^[41]制备的聚乙烯醇/纤维素纳米晶体/石榴皮多酚复合抗菌薄膜具有良好的抗氧化活性和抗菌活性;同时,随着石榴皮多酚添加量的增加,复合抗菌薄膜的力学性能、透光率、水接触角均下降,水蒸气透过率、抗氧化活性、抗菌性均增加。任宇轩^[42]以TEMPO氧化纤维素纳米纤维为原料,通过酰胺化反应使烟酰胺与纳米纤维进行化学接枝,并将单宁酸用作交联改性剂,制备了可用于食品包装的改性薄膜。薄膜表现出优异的紫外屏蔽能力和良好的机械性能,同时热稳定性也得到了提高。

在关于细菌纳米纤维素增强的食品包装方面,ALMEIDA等^[43]制备的热塑性淀粉、细菌纳米纤维

素(BNC)和没食子酸(GA)生物基三元复合薄膜是有创新性、可持续的绿色活性包装材料。当BNC的质量分数为10%、GA的质量分数为1%时,薄膜表现出的氧阻隔性最高,可广泛应用于软包装应用。与商业低密度聚乙烯相比,该纳米复合薄膜在延缓新鲜切片苹果的褐变和失重方面具有明显的优势。在增强薄膜物理性质方面,MOSTAFA等^[24]的研究表明:纤维素纳米颗粒的加入改善了大豆分离蛋白(SPI)食用薄膜的理化、机械和阻隔性能。

4 总结与展望

随着生活质量的提高,人们对食品的需求也随之提高,推动了全球食品包装的快速发展。开发可生物降解的环保材料来取代石油基塑料,以延长食品的保质期是迫切需要解决的问题。近年来,基于纳米纤维素的食品包装材料在微观结构、力学性能、多功能化、改性研究等方面获得飞跃性发展,扩大了其在抗菌食品包装领域的应用;同时,还需要对纳米纤维素抗菌食品包装材料进行更深入研究。

首先,在纳米纤维素的制备及本身特性方面,现有方法无法获得具有稳定结构的纳米纤维素,且生产规模不可控,不同生产批次的纳米纤维素均匀度不同,这些因素会影响纳米纤维素基包装材料质量的稳定性。纳米纤维素表面富含羟基,具有亲水性,因而在潮湿环境中易吸水而塌陷,影响其力学性能,不利于食品包装的长期稳定应用。

其次,在制备抗菌食品包装薄膜时,需要注意多糖、蛋白质等原料对薄膜骨架结构的选择。不同类型的生物大分子具有不同的化学结构和功能,对成膜后的性能有不同的影响。同时,还需考虑溶剂的极性和选择用于提高薄膜质量的合适助剂。

再次,高成本导致多数纳米纤维素食品抗菌薄膜的研制只能在实验室中进行。所以,急需在技术经济和生命周期评估方面为开发具有成本效益和环境友好的工业规模纳米纤维素抗菌食品包装薄膜生产工艺提供指导。此外,在实际应用中,还需要考虑纳米纤维素包装材料的加工性和密封性。

参考文献:

- [1] SINGH A K, LEE M, JANG D, et al. Non-conventional starch nanoparticles: novel avenues towards improving sustainability of the food packaging sector[J]. Trends in

- food science & technology, 2024, 143: 104273.
- [2] PALANISAMY S, SELVARAJU G D, SELVAKESAVAN R K, et al. Unlocking sustainable solutions: nanocellulose innovations for enhancing the shelf life of fruits and vegetables—a comprehensive review[J]. International journal of biological macromolecules, 2024, 261(1): 129592.
- [3] MGHILI B, BEN-HADDAD M, ZERRAD O, et al. Tackling marine plastic pollution in Morocco: a review of current research, regulatory measures, and future challenges [J]. Regional studies in marine science, 2024, 69: 103286.
- [4] DENG Z A, ZHAO Z, SHEN C, et al. Preparation of amphiphilic polyquaternium nanofiber films with antibacterial activity via environmentally friendly microfluidic-blow-spinning for green food packaging applications [J]. Food chemistry, 2024, 444: 138632.
- [5] ZHONG Y J, GODWIN P, JIN Y C, et al. Biodegradable polymers and green-based antimicrobial packaging materials: a mini-review[J]. Advanced industrial and engineering polymer research, 2020, 3(1): 27–35.
- [6] YUSUF J, SAPUAN S M, ANSARI M A, et al. Exploring nanocellulose frontiers: a comprehensive review of its extraction, properties, and pioneering applications in the automotive and biomedical industries[J]. International journal of biological macromolecules, 2024, 255: 128121.
- [7] ALMEIDA R O, MALONEY T C, GAMELAS J A F. Production of functionalized nanocelluloses from different sources using deep eutectic solvents and their applications [J]. Industrial crops and products, 2023, 199: 116583.
- [8] HAN Z R, ZHU H, CHENG J H. Structure modification and property improvement of plant cellulose: based on emerging and sustainable nonthermal processing technologies[J]. Food research international, 2022, 156: 111300.
- [9] RAMAKRISHNAN R, KIM J T, ROY S, et al. Recent advances in carboxymethyl cellulose-based active and intelligent packaging materials: a comprehensive review[J]. International journal of biological macromolecules, 2024, 259(1): 129194.
- [10] LUO Q G, SHEN H M, ZHOU G F, et al. A mini-review on the dielectric properties of cellulose and nanocellulose-based materials as electronic components[J]. Carbohydrate polymers, 2023, 303: 120449.
- [11] CHAWLA P, SRIDHAR K, KUMAR A, et al. Production of nanocellulose from corn husk for the development of antimicrobial biodegradable packaging film[J]. International journal of biological macromolecules, 2023, 242(2): 124805.
- [12] GE J, LU W Y, ZHANG H, et al. Exploring sustainable food packaging: nanocellulose composite films with enhanced mechanical strength, antibacterial performance, and biodegradability[J]. International journal of biological macromolecules, 2024, 259(2): 129200.
- [13] LI M, GUO L K, MU Y X, et al. Gelatin films reinforced by tannin-nanocellulose microgel with improved mechanical and barrier properties for sustainable active food packaging[J]. Food hydrocolloids, 2024, 149: 109642.
- [14] GARG R, RANA H, SINGH N, et al. Guar gum/nanocellulose based novel crosslinked antimicrobial film with enhanced barrier and mechanical properties for food packaging[J]. Journal of environmental chemical engineering, 2023, 11(2): 109254.
- [15] VILARINHO F, STANZIONE M, BUONOCORE G G, et al. Green tea extract and nanocellulose embedded into polylactic acid film: properties and efficiency on retarding the lipid oxidation of a model fatty food[J]. Food packaging and shelf life, 2021, 27: 100609.
- [16] 程恩, 叶冬蕾, 程德宝, 等. 明胶基静电纺丝纳米纤维及其应用[J]. 中国塑料, 2024, 38(4): 103–108.
- [17] 张隽齐, 杨柳榴, 陈芳. 3D 打印技术在膜剂制备中的研究进展[J]. 中国医药工业杂志, 2024, 55(3): 326–334.
- [18] VERA-LOOR A, RIGOU P, MARLIN N, et al. Oxidation treatments to convert paper-grade *Eucalyptus* kraft pulp into microfibrillated cellulose[J]. Carbohydrate polymers, 2022, 296: 119946.
- [19] DA SILVA J B A, VIEIRA S R, PESSÔA L C, et al. Impact of ionic liquid's cation alkyl chain length and reaction time on cellulose nanocrystals preparation[J]. Carbohydrate polymer technologies and applications, 2023, 6: 100390.
- [20] CURVELLO R, RAGHUWANSHI V S, GARNIER G. Engineering nanocellulose hydrogels for biomedical applications[J]. Advances in colloid and interface science, 2019, 267: 47–61.
- [21] ZHANG M Y, BIESOLD G M, CHOI W, et al. Recent advances in polymers and polymer composites for food packaging[J]. Materials today, 2022, 53: 134–61.
- [22] HADIDI M, JAFARZADEH S, FOROUSH M, et al. Plant protein-based food packaging films; recent advances in fabrication, characterization, and applications[J]. Trends in food science & technology, 2022, 120: 154–173.
- [23] QIN Q Y, ZHANG X Y, GAO B, et al. Insight into the effect of different nanocellulose types on protein-based bio-nanocomposite film properties[J]. International journal of

- biological macromolecules, 2024, 257(1): 127944.
- [24] MOSTAFA H, AIROUYUWAA J O, HAMED F, et al. Structural, mechanical, antioxidant and antibacterial properties of soy protein isolate (SPI)-based edible food packaging films as influenced by nanocellulose (NC) and green extracted phenolic compounds from date palm leaves[J]. Food packaging and shelf life, 2023, 38: 101124.
- [25] SOGUT E. Active whey protein isolate films including bergamot oil emulsion stabilized by nanocellulose[J]. Food packaging and shelf life, 2020, 23: 100430.
- [26] MARTELLI-TOSI M, MASSON M M, SILVA N C, et al. Soybean straw nanocellulose produced by enzymatic or acid treatment as a reinforcing filler in soy protein isolate films[J]. Carbohydrate polymers, 2018, 198: 61–68.
- [27] QAZANFARZADEH Z, KADIVAR M. Properties of whey protein isolate nanocomposite films reinforced with nanocellulose isolated from oat husk[J]. International journal of biological macromolecules, 2016, 91: 1134–1140.
- [28] HUANG X X, HUANG R, ZHANG Q, et al. Preparation of sustainable oxidized nanocellulose films with high UV shielding effect, high transparency and high strength[J]. International journal of biological macromolecules, 2024, 263(Pt2): 130087.
- [29] PAPADAKI A, MANIKAS A C, PAPAZOGLU E, et al. Whey protein films reinforced with bacterial cellulose nanowhiskers: improving edible film properties via a circular economy approach[J]. Food chemistry, 2022, 385: 132604.
- [30] CAO L L, LIU J Y, MENG Y Z, et al. A tear-free and edible dehydrated vegetables packaging film with enhanced mechanical and barrier properties from soluble soybean polysaccharide blending carboxylated nanocellulose[J]. International journal of biological macromolecules, 2024, 264(2): 130707.
- [31] CHAICHI M, HASHEMI M, BADI F, et al. Preparation and characterization of a novel bionanocomposite edible film based on pectin and crystalline nanocellulose[J]. Carbohydrate polymers, 2017, 157: 167–175.
- [32] YUAN Y L, CHEN H Y. Preparation and characterization of a biodegradable starch-based antibacterial film containing nanocellulose and polyhexamethylene biguanide[J]. Food packaging and shelf life, 2021, 30: 100718.
- [33] ZHANG Z J, JIANG Q M, YANG G H, et al. TEMPO-oxidized nanocellulose immobilized AgNPs modified chitosan composite film with durable antibacterial and preservative properties for fruits and vegetables package[J]. Industrial crops and products, 2023, 205: 117430.
- [34] DEHNAD D, MIRZAEI H, EMAM - DJOMEH Z, et al. Thermal and antimicrobial properties of chitosan-nanocellulose films for extending shelf life of ground meat[J]. Carbohydrate polymers, 2014, 109: 148–154.
- [35] QIAO J X, DONG Y Y, CHEN C W, et al. Development and characterization of starch/PVA antimicrobial active films with controlled release property by utilizing electrostatic interactions between nanocellulose and lauroyl arginate ethyl ester[J]. International journal of Biological macromolecules, 2024, 261(1): 129415.
- [36] ZHU L, FENG L, LUO H X, et al. Characterization of polyvinyl alcohol-nanocellulose composite film and its release effect on tetracycline hydrochloride[J]. Industrial crops and products, 2022, 188: 115723.
- [37] ZHANG W L, ZHANG Y Q, CAO J K, et al. Improving the performance of edible food packaging films by using nanocellulose as an additive[J]. International journal of biological macromolecules, 2021, 166: 288–296.
- [38] REN D, WANG Y, WANG H K, et al. Fabrication of nanocellulose fibril-based composite film from bamboo parenchyma cell for antimicrobial food packaging[J]. International journal of biological macromolecules, 2022, 210: 152–160.
- [39] MUGWAGWA L R, CHIMPHANGO A F A. Enhancing the functional properties of acetylated hemicellulose films for active food packaging using acetylated nanocellulose reinforcement and polycaprolactone coating[J]. Food packaging and shelf life, 2020, 24: 100481.
- [40] 赵恩靓, 贾文倩, 王海宁, 等. 改性纳米纤维素/玉米醇溶蛋白可食膜的制备及性能研究[J]. 包装工程, 2023, 44(17): 1–8.
- [41] 李慧, 田家瑶, 庞姗姗, 等. 聚乙烯醇/纳米纤维素/石榴皮多酚复合抗菌薄膜性能研究[J]. 食品与机械, 2023, 39(4): 103–109.
- [42] 任宇轩. 改性纳米纤维素复合薄膜增效紫外屏蔽及其应用性能研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2023.
- [43] ALMEIDA T, KARAMYSHEVA A, VALENTE B F A, et al. Biobased ternary films of thermoplastic starch, bacterial nanocellulose and gallic acid for active food packaging [J]. Food hydrocolloids, 2023, 144: 108934.

(下转第14页)