DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2019.07.044

纳米纤维素在食品行业中应用研究进展

Research progress on the application of nano-cellulose in food industry

蔡晨晨 陆登俊 马瑞佳 刘涛 范镯曦 吕明达

CAI Chen-chen LU Deng-jun MA Rui-jia LIU Tao FAN Zhuo-xi LV Ming-da

(广西大学轻工与食品工程学院, 广西 南宁 530004)

(Light Industry and Food Engineering College, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China)

摘要:概述了纳米纤维素的种类,包括微纤化纤维素、纳米纤维素晶体和细菌纳米纤维素,以及3种纳米纤维素的特性及其主要制备方法;重点介绍了纳米纤维素在食品领域的应用,主要包括其作为食品添加剂、功能性食品成分及食品包装材料等其他用途,并对其未来发展进行展望。

关键词: 纳米纤维素; 食品添加剂; 功能性食品; 食品包装

Abstract: Nanocellulose has unique structure, mechanical and optical properties, such as high surface area and high aspect ratio, rheological properties and non-cytotoxicity and genotoxicity. At present, nanocellulose materials have been studied in automobile, construction and textile industries, but they still have great potential in food industry. In this paper, the types of nanocellulose, including microfibrillated cellulose (MFC), nanocellulose crystal (NCC) and bacterial nanocellulose (BNC), as well as the properties of these three nanocellulose and their main preparation methods were briefly summarized. The application of nanocellulose in the field of food, including its use as food additive, functional food ingredients and food packaging materials, was introduced, and its future development was prospected. The aim is to make reference for the future development.

Keywords: nano-cellulose; food additives; functional food; food packaging

纤维素作为一种天然可再生材料,无毒、来源广泛等特性使其成为一种具有极大开发使用价值的再生材料^[1]。纤维素来源包括蔗渣、棉花、木质素提取等,也可由一些细菌产生,如醋酸杆菌^[2]。纳米纤维素是以天然

纤维素为原料制备得到的的纳米级高分子材料,通常被定义为直径 <100 nm的超微细纤维^[3],具有优良的机械性能、光学性能和生物降解性能,即高纯度、高强度、高聚合度、高结晶度^[4]、高亲水性、高透明度、高杨氏模量和超精细结构等性质^[5-6]。

纳米纤维素晶体表面含有大量的羟基,使其表面化学活性较强,且水悬浮液带负电荷,具有典型流变学特性,在强大的剪切力作用下其水悬浮液可独立形成稳定胶状液^[7],可作为增强体加入到基体中增强材料的性能^[8]。其作为一种新型的纳米生物材料,纳米纤维素具有广阔的应用前景,以及革新工业食品系统的潜力、解决相关健康问题和可持续性相关的问题。本文简要介绍了纳米纤维素类别及其制备方法,重点阐述了纳米纤维素在食品行业的应用研究进展。

1 纳米纤维素

由于纳米纤维素和纳米纤维素复合材料独特的、潜在的有用特性引起了人们的极大兴趣,包括丰富、可再生、高强度、生态友好和低重量。根据纳米纤维素制备方法和尺寸的不同将纳米纤维素主要分为三类:微纤化纤维素(microfibrillated cellulose, MFC)、纳米纤维素晶体(Nano-cellulose crystals, NCC)和细菌纳米纤维素(Bacterial nanocellulose, BNC)。制备方法主要包括物理法、化学法和生物法,其中物理法用于制备微纤化纤维素^[9-10],化学法主要用于制备纳米纤维素晶体,生物法用于制备细菌纤维素。

1.1 微纤化纤维素

微纤化纤维素(MFC),又称纤维素微纤维、微纤维纤维素或纳米纤化纤维素^[11]。MFC是天然纤维素经机械处理,得到的一维尺寸的纳米级别的新型高分子材料。由于其具有较大的长宽比和网状结构及高机械性能、高膨胀表面积、高纵横比、轻量等特性受到越来越多关注。

在制备微纤化纤维素的研究中,高压均质法得到广泛应用,对前期预处理过程起重要作用,Zhang等^[12]制备

基金项目: 广西研究生教育创新计划资助项目(编号: YCSW2019040);广西区特色本科专业建设项目—食品科学与工程(制糖工程)

作者简介: 蔡晨晨,女,广西大学在读硕士研究生。

通信作者: 陆登俊(1978—),女,广西大学副教授,博士。

E-mail: dj6688@126.com

收稿日期: 2018-09-18

MFC 采用了化学预处理方法和高压均质化对漂白牛皮竹浆进行处理,制备得到 MFC。该研究发现,NaOH 的用量与 MFC 的水保留值之间存在线性关系,可以用来预测 MFC 的水保留值;高压均质化对 MFC 的性能有明显的影响,随着均质化数量的增加,每一轮均质化的水保留值增加量减少。目前也有研究将酶法和机械处理法结合,Renuka 等^[13]在以大麻为原材料制备微纤化纤维素试验中,使用了对果胶、半纤维素和纤维素有特异性的酶进行预处理,再结合均质化将预处理后的纤维分解成纳米纤维素,可得到平均直径为 29.5 nm 的微纤化纤维素。此研究为其他来源的材料用于制备微纤化纤维素提供了研究方法。

1.2 纳米纤维素晶体

NCC 具有刚性和高稳定性等显著特性,且具有可再生性和经济性,其纳米结构适用于药妆产品、纳米载体与药物传递系统、包装材料和食品添加剂等。

NCC 主要由化学法制得,且其原料来源广泛,如马铃薯皮、香蕉秸秆、开心果壳、棕榈枣纤维、西米籽壳、玉米芯、玉米皮以及棉花秸秆等。有学者^[14]以马铃薯皮为原料,采用氢氧化钠、乙酸缓冲液和亚氯酸钠碱解法制备了 NCC,再用硫酸进行酸性水解提高其产量。Garusinghe 等^[15]利用氢氧化钠溶液处理天然棉花以此消除半纤维素和木质素,并收集处理后的纤维素,再通过硫酸水解得到纳米纤维素。Elias 等^[16]利用漂白、碱性处理和酸水解的方法,成功地从油棕榈叶(OPFL)中提取了纳米纤维素晶体。姚进等^[17]以油茶果壳为研究对象,采用亚硫酸盐预蒸煮将纤维素、半纤维素和木素、茶皂素等组分进行分离,然后经硫酸热水解得到油茶果壳纳米纤维素。

1.3 细菌纳米纤维素

细菌纤维素是由多种细菌新陈代谢的产物形成的不含木素、半纤维素以及其他抽提物的高结晶度的三维网状结构^[18]。这种结构使得 BNC 有着一些特有的特性,如高纯度、高结晶度、较大的机械强度、高保水值、抗菌性、无毒性、生物相容性和生物降解性等,从而在多个领域有着广泛应用,如生物医药与组织工程、食品、电学、造纸、功能材料等^[19]。但是目前对于以细菌纤维素制备纳米纤维素的研究尚未得到广泛开展。

甜菜糖蜜、干酪乳清是食品工业副产品,将其可作为生产细菌纤维素的培养介质,Mahdieh 等^[20]以甜菜糖蜜、干酪乳清为原料用葡萄糖酸菌生产细菌纤维素,并采用硫酸水解法制备细菌纤维素纳米晶;研究发现,经酸处理过的以甜菜糖蜜为原料,细菌纳米纤维素具有最高浓度和生产力,且其平均直径和长度分别为 (25 ± 5) , (306 ± 112) nm,此研究为大规模生产细菌纳米纤维素提供了研究基础。也有研究用高压均质法制备细菌纳米纤维素,汪雪娇^[21]将细菌纤维素进行打碎预处理,然后在 20 MPa

条件下经高压均质机均质 3 次,将悬浮液进行离心,除去上层清液,得到细菌纳米纤维素沉淀。

2 纳米纤维素在食品行业的应用

纳米纤维素在最初作为膳食纤维的作用之外,已在食品工业中得到了认可和应用;其作为膨化剂已被用于乳制品、烘焙食品、甜点、香肠、冷冻食品等食品体系中,为此类产品提供了更好的口感和其他感官特性。纳米纤维素在食品行业的应用主要包括 3 种:作为食品添加剂、作为功能性食品、作为食品包装材料;尤其用于食品包装已得到广泛研究^[22-24],是其在食品工业中最常见的应用。

2.1 作为食品添加剂

纳米纤维素作为一种天然的乳化和稳定成分可作为食品添加剂来提高各种食品的均匀性和稳定性^[25-26]。纳米纤维素易于稳定油-水(O/W)乳剂,由于水比油更湿润^[27-28];同时其可作为固体物质的优良悬浮介质,也可作为有机液体的乳化剂,因此纳米纤维素可作为食品添加剂用于稳定食品中的油脂^[29]。

微纤化纤维素是由含有无定形和结晶带的纤维组成,因此其结晶性更差、具有流变特性,易形成三维网络,这些特性促进了其在食品工业中的应用,进一步的研究已证明了它在糕点面团、奶昔中的应用和减少冰淇淋融化,这些应用与它的胶体性能和在水中能够稳定油(O/W)乳剂的能力有关。Velásquez 等^[30]将微纤化纤维素加入到低脂冰淇淋中,研究得到纳米纤维素的含量在 5%~10%时,作用效果与其对脂肪结构的吸附作用有关,且加入纳米纤维素后,低脂冰淇淋的感官性能得到了改善,甚至在受到热冲击后也得到了改善。Winuprasith 等^[31]将山竹果中提取的微纤化纤维素添加到(质量分数 10%)豆油水包油型乳剂(O/W, pH 7.0)中,随着 MFC 浓度的增加,乳剂的平均液滴尺寸和颜色强度均增大;且 MFC 颗粒主要吸附在乳状液滴的油水界面;同时在 0.05%~0.70% 质量浓度范围内任意改变 MFC 浓度,乳剂均能在 80 d 内稳定聚结,但随着 MFC 浓度的降低,乳剂的乳化稳定性逐渐降低;此研究结果对颗粒稳定食品乳剂的合理设计和生产具有重要意义。

细菌纳米纤维素具有高持水性、高结晶度、高聚合度且不易受 pH、温度、离子强度的影响,与蛋白质具有良好的相容性,可形成胶状网状结构^[32];Guo 等^[33]将细菌纳米纤维素和大豆分离蛋白以质量比 1:20 的比例添加到冰淇淋中,此比例混合物具有与奶油最相似的结构特性,将其加入冰淇淋中作为奶油的替代品,可得到低热量、耐熔融、质地优良的冰淇淋。

纳米纤维素作为食品添加剂的研究尚未得到广泛而全面的开展,目前其主要作为食品乳化剂较多,后续研究

应扩大其应用方向,并将其应用于更多产品。但对于在食品中纳米纤维素添加剂的添加量有待更多研究。

2.2 作为功能性食品成分

纳米纤维素是一种膳食纤维^[34],对人体健康起着有益的作用。其可以增加葡萄糖的黏度并限制葡萄糖的扩散^[35-36];同时纳米纤维素的含水量高于非晶态纤维素,也可用来降低许多加工食品的能量密度^[37]。在1987年就有研究将15%~65%(质量分数)的纳米纤维素和85%~35%(质量分数)的水溶性糖组成粉末状的食品和药物,该粉末状物质可添加到食品中,用于治疗肠道疾病^[38]。纳米纤维素在食品系统中作为一种膳食纤维具有潜在的应用前景。

在纳米纤维素控制食品黏度以及控制葡萄糖吸收的研究中发现,纳米纤维素对溶液黏度、淀粉消化和葡萄糖吸收有一定影响。其中Liu等^[39]发现纳米纤维素并不影响 α -淀粉酶和 α -糖苷酶的作用,但明显抑制葡萄糖扩散,推迟淀粉分解,减少期间释放的葡萄糖体外消化的淀粉,即1%(质量分数)的纳米纤维素延迟了淀粉溶解过程中26.6%的葡萄糖释放;当纳米纤维素浓度 $>0.5\%$ 时,其黏度增加,使其具有极大的潜在降血糖能力;这些结果表明,NFC可能有助于构建食品中的黏度,并抑制含淀粉产品体内的葡萄糖吸收。

同时,对于纳米纤维素作为膳食纤维在改善产品质量的研究中,李小红等^[40]以甘蔗渣纤维素为原料制备得到纳米纤维素,将其用于制作膳食纤维面包,并从面包品质、感官评分、全质构分析三方面对纳米纤维素进行评价;当纳米纤维素添加量为8%时,面包心水分含量由38.46%增加到45.91%,烘焙损失由11.85%减小到8.87%,虽然面包的比容从5.48下降到5.31,但是感官评分为93分(满分100分),此高膳食纤维面包的口感良好,无粗糙纤维感。对于香肠的口感改善研究中,胡建雪^[41]将纳米纤维素添加到香肠中,与未添加纳米纤维素的空白组相比,添加纳米纤维素后对香肠的色泽、弹性和内聚性影响较小,而水分含量升高,且硬度、咀嚼性降低。

目前将微纤化纤维素以及纳米纤维素晶体用作膳食纤维的研究较为广泛,但后续研究在考虑成本的同时应对人类是否有安全问题考虑在内;同时细菌纳米纤维素作为食品功能性成分的研究鲜见。

2.3 作为食品包装材料

纳米纤维素是一种生物可降解、无毒、环保的纳米材料,在食品包装领域具有巨大的应用潜力,对于利用不同酸从廉价生物质和工业废料中制备纳米纤维素,并进行表面改性和接枝使纳米纤维素适当分散到聚合物基体中,显著提高了其力学性能和阻隔性能。为了保证纳米纤维素在聚合物基体中的良好稳定性和分散性,必须对工艺参数进行适当的选择和优化。

2.3.1 纳米纤维素/乙烯传感器膜 在植物生长发育的过程中,乙烯能促进果实成熟,促进植物萌发;在果实成熟过程中,通过呼吸活动被释放,但成熟果实具有易碎等特点,因此乙烯对成熟果实的贮藏和运输造成困难。低浓度的乙烯气体可以刺激苹果、香蕉、芒果和猕猴桃等水果在可控的湿度和温度下成熟;西瓜、橘子、荔枝和葡萄都是在完全成熟的状态下收获的,即在较高乙烯浓度下进行采收,因此乙烯气体的监测^[42]具有重要意义,通过对乙烯气体浓度的监测,可以确定果实采收时间。

Pirsa等^[43]研究了一种细菌纳米纤维素/ KMnO_4 薄膜,根据薄膜的吸收光谱可以得到充足的乙烯传感信息,即此膜可方便地用于气相中乙烯气体的监测;在试验中,研究者考察了不同浓度的 KMnO_4 溶液对薄膜的物理与光学特性的影响;其中在 KMnO_4 最高浓度下,得到薄膜的吸湿数值最高;并随着其浓度的增加导致聚合物网络的松散度增加;同时利用纳米纤维素乙烯薄膜对香蕉包装中乙烯浓度进行了监测。但对于此种技术的研究并未得到较大范围的发展,由于相关的细菌纳米纤维素的产业化生产还待进一步研究。

2.3.2 纳米纤维素抗菌膜 纳米纤维素具有高聚合度、高强度、高结晶度、高亲水性等优良性能,易于制备各类复合材料;其聚集体相互交织成网状结构,可以显著提高其增强聚合物的韧性,可以作为食品包装材料的增强助剂代替传统增塑剂。目前具有抗菌作用的纳米纤维素复合包装材料^[44]是当前研究的热点,尤其将具有抗菌性的天然抗菌物质^[45]与纳米纤维素进行复合,由这两种材料复合得到的包装材料具有极大的研究发展潜力。

在纳米纤维素抗菌膜的研究中,Noorbakhsh等^[46]采用酸水解法制备了纳米纤维素,并通过湿法工艺将其加入到含有壳聚糖的明胶和淀粉基体中;将纳米纤维素含量增加到10%,可使断裂强度提高到 $8\,121\text{ MN/m}^2$;将壳聚糖的含量从5%增加到30%,使食物的保鲜时间延长至15 d。纳米纤维素/壳聚糖复合膜还可添加其他具有抗菌性的物质,以此可增强膜的抗菌效果。Salari等^[47]研究发现 Ch/AgNPs 纳米复合膜对食源性病原菌具有较强的抗菌活性,可作为提高食品保质期的活性食品包装材料。在对于新鲜蔬果保鲜的研究中,董峰^[48]利用流延法制备成纳米纤维素/壳聚糖复合膜,并应用于草莓保鲜,在 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 贮藏7 d时间里复合膜组草莓的失重率、腐烂率、呼吸强度和电导率分别比对照组低37.8%,70.6%,36%,28%;硬度、色度、有机酸、还原糖含量、维生素、可溶性固形物含量、花青素含量和总酚含量比对照组高26.4%,53.0%,9.2%,20.0%,42.4%,42.3%,24.0%,40.0%,即在颜色、味道、质地、气味和整体可接受度等方面得分均优于对照组草莓。

此外,陈姗姗等^[49]利用壳聚糖的抗菌性,以大豆分离

蛋白为成膜基材,添加葵花籽壳纳米纤维素,通过流延法制备了抗菌可食膜;在 NCC : CS : SPI 质量比为 1.25 : 0.75 : 2.00, pH 值 3.59, 丙三醇质量浓度 0.02 g/mL 时,可食膜性能(抗拉强度、断裂伸长率、水蒸气透过系数和氧气透过率)的综合分达到最高为 0.63。

目前对纳米纤维素抗菌膜的研究多集中于将壳聚糖与纳米纤维素结合,而抗菌物质种类多样且可降解、无毒性,如:植物精油、蜂蜡等;将纳米纤维素与这些抗菌剂进行复合,在制备抗菌纳米纤维素膜的过程中,物质之间的相互影响作用、成膜效果、抗菌性等方面还有待进一步研究。

2.3.3 纳米纤维素复合涂层 纳米纤维素涂层是涂在食品包装内层表面或者直接涂在需保存的食品材料表面的,与普通的涂层材料相比,纳米纤维素具有特殊的气体屏障功能,能改善机械性能,使其在生物软包装领域具有巨大发展潜力;微纤化纤维素和纳米纤维素晶体均为高聚合物,具有较高的粘结能和较强的链间吸引力,在低湿度条件下,其空隙体积小,扩散现象有限,故具有较低的透气性,可进一步提高食品质量和安全性且效率高、成本低。

纳米纤维素的这种特性增加了 CO₂、O₂ 等气体的扩散难度,在一定程度上可延长食品货架期,对食品气调包装具有极大意义。在食品包装表面进行纳米纤维素涂层,可增强包装的气体屏障作用,Fotie 等^[50]将以棉绒为来源的纳米纤维素在 PET 膜上进行涂布,在不同相对湿度下考察纳米纤维素涂层对 O₂、CO₂ 渗透率的影响,其研究结果对于延长中等或较高相对湿度值的易腐食品的保质期至关重要。

纳米纤维素优异的光学性能和结构性能,如低密度和高生物降解率等,当其直接涂布于食品表面时,可对食品的品质、理化性质及贮藏时间产生一定影响,达到延长保质期的目的,如 Jafari 等^[51]将纳米纤维素结合麦芽糊精对藏红花进行涂布,用于减少藏红花中有效物质藏红花的挥发,结果表明相比传统的涂层材料两者的结合可最大限度地保留藏红花的。

涂层易在食品货架期内受到不同程度的破坏,且纳米纤维素涂层目前尚未实现工业化,因此提高涂层的作用时间以及将其进行更广泛的推广,是今后该方面的主要研究工作。

2.4 其他应用

近年来,水果和蔬菜中的农药残留问题引起了人们的广泛关注。人类食用被杀虫剂污染的食品可能导致潜在的健康问题,如癌症、脑瘤等^[52];此外,农产品中的农药残留会对农场的利益造成一定损害。因此,对农业和食品中农药残留快速检测的分析技术提出了强烈的要求^[53]。

拉曼光谱法被公认为是一种快速、无创检测样品的的方法,在此技术中,纳米纤维素由于其高表面积更适于作为对应的检测基底,也更适于规模化生产且对试样表面具有更强附着力。如将银纳米颗粒涂在纳米纤维素薄膜上,用作拉曼光谱法的基底,用于检测苹果中噻苯达唑的含量;同时以纳米纤维素膜为基底,其透明、灵活、可塑,更能满足残留农药的现场检测要求。Chen 等^[54]研究了一种呈凝胶状,且具柔性、灵敏的银纳米颗粒/纳米纤维素薄膜基底,薄膜呈胶状结构、制备时间缩短且性能良好。

3 结论

纳米纤维素的制备方法已得到广泛而深入的研究,作为食品添加剂、功能性食品成分、食品包装材料以及在其他领域的应用应得到更广泛的研究,其中,在食品行业,具有抗菌性的以及其他具有保鲜作用的纳米纤维素复合材料也应得到广泛重视。现如今纳米包装膜的研究趋势将向着安全、高效、经济 3 个方向发展,传统的以石油为来源的聚合物包装产品已不能满足食品包装安全方面的需要。可再生、可降解和抗菌性材料将受到更多科学界和工业界的广泛关注,具有抗菌效果且具有良好成膜效果的抗菌性纳米纤维素材料将会在食品行业得到更广泛的应用。

参考文献

- [1] DIETOR K, FRIEDERIKE K, SEBASTAIN M, et al. Nanocelluloses: A new family of nature-based materials[J]. *Angewandte Chemie*, 2011, 50(24): 5 438-5 466.
- [2] HUANG Ying, CHEN Ying-ming. An overview of fermentation production and application of bacterial cellulose[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 627: 878-884.
- [3] ETZAEEL E P, SANDRA D, NACEUR B, et al. Green process for chemical functionalization of Nanocellulose with Carboxylic acids[J]. *Biomacromolecules*, 2014, 15(12): 4 551-4 560.
- [4] 王阳, 赵国华, 肖丽, 等. 源于食品加工副产物纳米纤维素晶体的制备及其在食品中的应用[J]. *食品与机械*, 2017, 33(2): 1-5.
- [5] 叶代勇. 纳米纤维素的制备[J]. *化学进展*, 2017(10): 1 568-1 575.
- [6] NG H M, LEE T S, TEE T T, et al. Extraction of cellulose nanocrystals from plant sources for application as reinforcing agent in polymers[J]. *Composites Part B-engineering*, 2015, 75: 176-200.
- [7] DOUGLAS G, GLORIA O, RYAN M, et al. Adhesion and surface issues in cellulose and nanocellulose[J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2008, 22: 545-567.
- [8] KOONYAN L, YVONNE A, LARS B, et al. On the use of

- nanocellulose as reinforcement in polymer matrix composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2014, 105: 15-27.
- [9] ZHAO Jiang-qi, ZHANG Wei, ZHANG Xiao-dan, et al. Extraction of cellulose nanofibrils from dry softwood pulp using high shear homogenization [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2013, 97(2): 695-702.
- [10] ELDHO A, DEEPA B, LALY A P, et al. Environmental friendly method for the extraction of coir fibre and isolation of nanofibre[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2013, 92(2): 1 477-1 483.
- [11] NATHALIE L, ISABELLE D, ALAIN D, et al. Microfibrillated cellulose-Its barrier properties and applications in cellulosic materials: A review[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2012, 90(2): 735-764.
- [12] ZHANG Jun-hua, SONG Hai-nong, LIN Lu, et al. Microfibrillated cellulose from bamboo pulp and its properties[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2012, 39: 78-83.
- [13] RENUKA D, SURAJ S. Environmentally benign pretreatments for producing microfibrillated cellulose fibers from hemp[M]. Georgia: American Chemical Society, 2014.
- [14] CHEN D, LAWTON D, THOMPSON M, et al. Biocomposites reinforced with cellulose nanocrystals derived from potato peel waste[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2012, 90(1): 709-716.
- [15] UTHPALA G, SWAMBABU V, VIKRAM R, et al. Nanocellulose-montmorillonite composites of low water vapour permeability[J]. *Colloids and Surfaces A: Physico-chemical and Engineering Aspects*, 2018, 540: 233-241.
- [16] NURSYAFIQAH E, SHEELA C, NURSYAFREENA A, et al. Structure and properties of oil palm-based nanocellulose reinforced chitosan nanocomposite for efficient synthesis of butyl butyrate[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 176: 281-292.
- [17] 姚进, 李知函, 史军华, 等. 油茶果壳中纳米纤维素的分离与成膜性能[J]. *精细化工*, 2018, 35(11): 1-11.
- [18] SHI Zhi-jun, ZHANG Yue, GLYN P, et al. Utilization of bacterial cellulose in food[J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 35: 539-545.
- [19] 孙勇慧, 刘鹏涛, 刘忠. 细菌纤维素的应用进展[J]. *材料导报*, 2015, 29(5): 62-67.
- [20] MAHDIEH S, MAHMOOD S, REZA R, et al. Preparation and characterization of cellulose nanocrystals from bacterial cellulose produced in sugar beet molasses and cheese whey media[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 122: 280-288.
- [21] 汪雪娇. 基于纳米细菌纤维素复合膜的制备及其性能研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [22] CUSHEN M, KERRY J, MORRIS M A, et al. Nanotechnologies in the food industry: Recent developments, risks and regulation[J]. *Trends in Food Science and Technology*, 2012, 24(1): 30-46.
- [23] CLARA S, DONATELLA D, SOSSIO C. Food packaging based on polymer nanomaterials[J]. *Progress in Polymer Science*, 2011, 36(12): 1 766-1 782.
- [24] AZEREDO C, ROSA F, MATTOSO C. Nanocellulose in bio-based food packaging applications[J]. *Industrial Crops and Products*, 2017, 97: 664-671.
- [25] CUNHA A G, MOUGEL J, CATHALA B, et al. Preparation of double pickering emulsions stabilized by chemically tailored nanocelluloses [J]. *Langmuir*, 2014, 30(31): 9 327-9 335.
- [26] MIKULCOVA V, BORDES R, KASPARKOVA V. On the preparation and antibacterial activity of emulsions stabilized with nanocellulose particles[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 61: 780-792.
- [27] NAIR S, ZHU JY, RAGAUSKAS J. High performance green barriers based on nanocellulose [J]. *Sustainable Chemical Processes*, 2014, 2(1): 1-7.
- [28] TZOUMAKI V, MOSCHAKIS T, KIOSSEOGLOU V, et al. Oil-in-water emulsions stabilized by chitin nanocrystal particles[J]. *Food Hydrocolloids*, 2011, 25(6): 1 521-1 529.
- [29] 郭正旭, 卢晓黎, 邱思. 比较纳米晶纤维素和猪肉脂肪对肉糜凝胶品质的影响[J]. *食品与机械*, 2012, 28(6): 80-83.
- [30] SQUEZ-COCK J, SERPA A, VLEZ L, et al. Influence of cellulose nanofibrils on the structural elements of ice cream[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 87: 204-213.
- [31] WINUPRASITH T, SUPHANTHARIKA M. Properties and stability of oil-in-water emulsions stabilized by microfibrillated cellulose from mangosteen rind[J]. *Food Hydrocolloids*, 2015, 43: 690-699.
- [32] OKIYAMA A, MOTOKI M, YAMANAKA S. Bacterial cellulose IV: Application to processed foods [J]. *Food Hydrocolloids*, 1993, 6(6): 503-511.
- [33] GUO Yan, ZHANG Xiao-hao, HAO Wen-hui, et al. Nanobacterial cellulose/soy protein isolate complex gel as fat substitutes in ice cream model[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 198: 620-630.
- [34] ANDRADE D R M, MENDONCA M H, HELM C V, et al. Assessment of nano cellulose from peach palm residue as potential food additive Part II: Preliminary studies [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2015, 52(9): 5 641-5 650.
- [35] FABEK H, MESSERSCHMIDT S, BRULPORT V, et al. The effect of in vitro digestive processes on the viscosity of dietary fibres and their influence on glucose diffusion[J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 35: 718-726.
- [36] QI Jing, LI Yue, MASAMBA K G, et al. The effect of chemical treatment on the In vitro hypoglycemic properties

- of rice bran insoluble dietary fiber[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 52: 699-706.
- [37] JORFI M, FOSTER E J. Recent advances in nanocellulose for biomedical applications[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2015, 14(132): 41 719.
- [38] GOMEZ H C, SERPA A, VELÁSQUEZ-COCK J, et al. Vegetable nanocellulose in food science: A review[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 57: 178-186.
- [39] LIU Ling-ling, KERR W L, KONG Fan-bin, et al. Influence of nano-fibrillated cellulose (NFC) on starch digestion and glucose absorption[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 196: 146-153.
- [40] 李小红, 王栋, 周良春. 纳米纤维素制备及其在面包中的应用[J]. *中国食品添加剂*, 2018(6): 118-124.
- [41] 胡建雪. 纳米纤维素纤维的制备及其在食品中的应用[D]. 无锡: 江南大学, 2015: 44-50.
- [42] SRIVIDHYA V, SUJATHA K, PONMAGAL R S. Ethylene gas measurement for ripening of fruits using image processing[J]. *Indian Journal of Science and Technology*, 2016, 9(31): 112-116.
- [43] PIRSA S, CHAVOSHIZADEH S. Design of an optical sensor for ethylene based on nanofiber bacterial cellulose film and its application for determination of banana storage time[J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2018, 29(5): 1 385-1 393.
- [44] NING Rui-zhi, WU Chun-nan, TAKEUCHI M, et al. Preparation and characterization of zinc oxide/TEMPO-oxidized cellulose nanofibril composite films[J]. *Cellulose*, 2017, 24(11): 4 861-4 870.
- [45] ZIVANOVIC S, DAVIS R H, GOLDEN D A. 8-Chitosan as an antimicrobial in food products[M]//TAYLOR T M. *Handbook of natural antimicrobials for food safety and quality*. Oxford: Woodhead Publishing, 2015: 153-181.
- [46] NOORBAKHS-SOLTANI S M, ZERAFAT M M, SAB-BAGHI S. A comparative study of gelatin and starch-based nano-composite films modified by nano-cellulose and chitosan for food packaging applications[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 189: 48-55.
- [47] SALARI M, SOWTI KHIABANI M, REZAEI MOKAR-RAM R, et al. Development and evaluation of chitosan based active nanocomposite films containing bacterial cellulose nanocrystals and silver nanoparticles[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 84: 414-423.
- [48] 董峰. 基于果蔬包装的纳米纤维素/壳聚糖复合膜的制备、性能及应用[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2015: 89-118.
- [49] 陈珊珊, 陶宏江, 王亚静, 等. 葵花籽壳纳米纤维素/壳聚糖/大豆分离蛋白可食膜制备工艺优化[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(8): 306-314.
- [50] FOTIE G, AMOROSO L, MURATORE G, et al. Carbon dioxide diffusion at different relative humidity through coating of cellulose nanocrystals for food packaging applications[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2018, 18: 62-70.
- [51] JAFARI S M, BAHRAMI I, DEHNAD D, et al. The influence of nanocellulose coating on saffron quality during storage[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 181: 536-542.
- [52] LOZOWICKA B. Health risk for children and adults consuming apples with pesticide residue[J]. *Science of The Total Environment*, 2015, 502: 184-198.
- [53] DROGU S, DEMARIA F. Pesticide residues and trade, the apple of discord? [J]. *Food Policy*, 2012, 37(6): 641-649.
- [54] CHEN Jie, HUANG Mei-zhen, KONG Li-li, et al. Jellylike flexible nanocellulose SERS substrate for rapid in-situ non-invasive pesticide detection in fruits/vegetables[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2019, 205: 596-600.

(上接第 175 页)

- [5] 虞立霞, 姚奎章, 夏君霞, 等. 核桃对发育期小鼠认知功能的改善作用[J]. *营养学报*, 2015, 37(2): 185-188.
- [6] WANG Shuai, LI Han-yang, DAI Lian-yi, et al. Effects of walnuts on sleep improvement in mice and its mechanism[J]. *ACTA Nutrimenta SINICA*, 2017, 39(2): 189-193.
- [7] 付艾妮, 朱书秀, 艾永循, 等. 核桃仁提取物对阿尔茨海默病模型大鼠学习记忆能力和海马区神经元的保护作用[J]. *医药导报*, 2015, 34(6): 722-725.
- [8] 周丽莎, 朱书秀, 望庐山. 核桃仁提取物对老年痴呆模型大鼠 Ach, ChAT 及 AchE 活性的影响[J]. *中国医院药学杂志*, 2011, 31(6): 446-449.
- [9] 冯贞, 方晓璞. 核桃加工副产物综合利用途径[J]. *中国油脂*, 2018, 43(9): 71-74, 87.
- [10] 樊永波, 陶兴无, 马琳, 等. 核桃饼粕对大鼠学习、记忆和抗氧化功能的影响[J]. *食品科学*, 2013, 34(17): 323-326.
- [11] 乌兰, 刘睿, 杜倩, 等. 核桃肽对小鼠的抗疲劳作用[J]. *中国食物与营养*, 2018, 24(12): 50-54.
- [12] ZHU Chao, CAO Jian-ming, ZHOU Hai-tao, et al. Effect of *Morinda officinalis* radix on the exercise capacity in rats and oxidation resistance of mitochondrial [J]. *Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae*, 2013, 19(3): 219-222.
- [13] ZHANG Zhong-qi, YUAN Li, YANG Ming, et al. The effect of *Morinda officinalis* How, a Chinese traditional medicinal plant, on the DRL 72-s schedule in rats and the forced swimming test in mice [J]. *Pharmacology Biochemistry & Behavior*, 2002, 72(1): 39-43.
- [14] 傅宏征, 张晓威, 张礼和, 等. 黄海棠的化学成分研究[J]. *中国海洋药物*, 1998(1): 13-16.
- [15] 刘艳霞, 史文中, 倪雅娟, 等. 尖叶假龙胆全草中环烯醚萜苷类成分的分离与鉴定[J]. *沈阳药科大学学报*, 2016, 33(9): 702-705, 722.
- [16] 毛婷. 肉苁蓉苯乙醇苷与槲子黄色素混合物抗缺氧疲劳作用研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2018: 20-25.