

纤维素改性及其在肉制品中应用研究进展

米红波, 李毅, 邓婷月, 仪淑敏, 李学鹏, 陈敬鑫, 励建荣

(渤海大学食品科学与工程学院, 生鲜农产品贮藏加工及安全控制技术国家地方联合工程研究中心, 国家鱼糜及鱼糜制品加工技术研发分中心, 辽宁锦州 121013)

摘要: 纤维素 (Cellulose) 是存在于自然界中的一种丰富的可再生资源, 但由于分子内和分子间氢键作用及高度结晶的聚集态结构, 使得天然纤维素难溶于大多数溶剂, 限制了纤维素的开发与应用。纤维素改性后在保持原有特性的基础之上, 又具有引入羟基、酰胺基、氨基等活性官能团赋予的新性能, 结晶度和聚合度明显降低, 能够在食品生产中赋予产品优良的品质, 受到越来越多国内外研究学者的广泛关注。本文综述了改性纤维素的种类和特性、与肉类蛋白质间的相互作用及其在肉制品中的应用, 并提出了目前存在的问题和未来发展方向, 为进一步深入研究改性纤维素提供参考, 推动纤维素的高值化利用。

关键词: 纤维素; 改性; 蛋白; 肉制品; 应用

文章编号: 1673-9078(2021)02-298-307

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.2.0632

Research Progress of Cellulose Modification and its Application in Meat Products

MI Hong-bo, LI Yi, DENG Ting-yue, YI Shu-min, LI Xue-peng, CHEN Jing-xin, LI Jian-rong

(College of Food Science and Technology, Bohai University; National & Local Joint Engineering Research Center of Storage, Processing and Safety Control Technology for Fresh Agricultural and Aquatic Products, National R & D Branch Center of Surimi and Surimi Products Processing, Jinzhou 121013, China)

Abstract: Cellulose is a kind of abundant and renewable resource in nature. However, it is difficult to dissolve natural cellulose in most solvents due to its intra- and inter-molecular hydrogen bonding and its highly crystalline aggregate structure, which limits the development and application of cellulose. The modification of cellulose, while being capable of retaining its original characteristics, enabled new properties such as reduced crystallinity and degree of polymerization through introducing active functional groups such as hydroxyl, amide, and amino groups, thereby endowing products with high quality during food production and extensive attention from domestic and international scholars. This article summarizes the types and characteristics of modified cellulose, as well as the interactions between modified cellulose and meat proteins and its application in meat products. The currently existing problems and the future development directions were also put forward to provide references for further research on modified cellulose and promote the value-added utilization of cellulose.

Key words: cellulose; modification; protein; meat products; application

引文格式:

米红波, 李毅, 邓婷月, 等. 纤维素改性及其在肉制品中应用研究进展[J]. 现代食品科技, 2020, 37(2): 298-307

MI Hong-bo, LI Yi, DENG Ting-yue, et al. Research progress of cellulose modification and its application in meat products [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 37(2): 298-307

纤维素是自然界中分布最广、含量最丰富的碳水化合物, 每年全球植物可生产超过数亿吨的纤维素, 使这种多糖成为最大的有机碳库^[1]。在各种可持续资

收稿日期: 2020-07-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31701629; 31972107); 辽宁省“兴辽英才计划”青年拔尖人才项目 (XLYC1807133; XLYC1907040)

作者简介: 米红波 (1986-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 水产品加工及贮藏

通讯作者: 陈敬鑫 (1985-), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 农产品加工及贮藏

源中, 纤维素因具有取之不尽、用之不竭的物质基础, 作为唯一的碳可再生资源, 被普遍认为可以补充或部分取代不可再生资源, 成为人类未来发展所依赖的重要资源。

纤维素是由 D-吡喃葡萄糖环通过 β -1,4-糖苷键以 C_1 椅式构象连接而成的线型高分子化合物, 化学结构如图 1 所示, 分子式为 $(C_6H_{10}O_5)_n$ 。纤维素是由结晶区和非结晶区交错构成的, 其中非结晶区中的大部分羟基在葡萄糖环上处于游离状态, 容易发生化学反应;

而结晶区的羟基基团庞大,在分子内和分子间形成了大量氢键,严重阻碍了纤维素表面与化学试剂或生物酶等的有效接触和相互作用^[2],这对其成型、加工和应用都极为不利。因此采用物理、化学或生物方法改变纤维素固有的特性,形成具有其它功能性质的纤维素衍生物并开拓改性纤维素在各个领域中的应用,已成为目前研究的热点。目前,纤维素衍生技术已很成熟,然而,改性纤维素来源广泛、种类和制备技术繁多,用于食品工业的改性纤维素还具有一定的局限性,虽然一些纤维素衍生物无法直接加入食品进行食用,如氧化、酯化、交联纤维素,但依旧可作为功能性包装薄膜应用于食品加工中发挥作用,因此了解不同技术方法下制备的各类改性纤维素在食品包装中发挥的作用,可以为纤维素的高值化利用及今后在食品领域的大规模应用提供一定的参考。同时,不同改性纤维素对肉制品的作用不同,如微晶纤维素,羧甲基纤维素、羟丙基甲基纤维素等醚化纤维素,以及利用特殊工艺制备的细菌纤维素(BC),纳米纤维素等,作为配料适量的添加在肉制品中均能不同程度的改善肉制品的品质,对提高凝胶特性、降低蒸煮损失、减少脂肪含量、延长肉制品的货架期等方面均有影响,因此,了解改性纤维素的特性及其与肉类蛋白质间的相互作用机制,对不同的肉制品选择适当的改性纤维素种类和用量是极其必要的。本文主要介绍常见的改性纤维素的制备,阐述改性纤维素与肉类蛋白质之间的相互作用及其在肉制品加工和包装中的应用,旨在为改性纤维素的深入研究及新型高质量食品的开发提供参考。

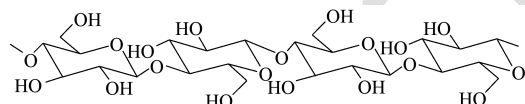


图1 纤维素结构

Fig.1 Cellulose structure

1 改性纤维素

改性是通过纤维素表面的羟基引入官能团或其他

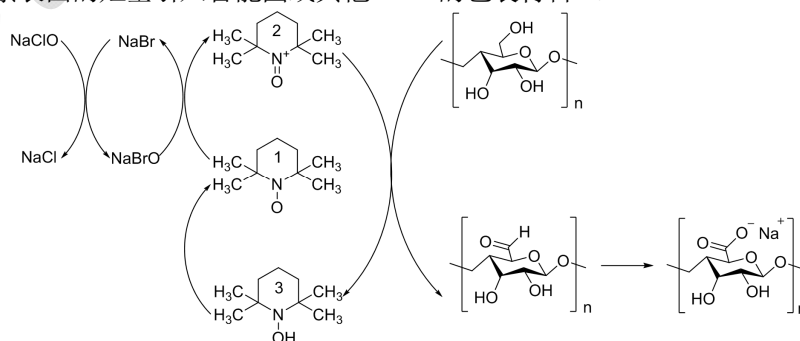


图2 TEMPO 体系氧化纤维素机理^[7]

Fig.2 The mechanism of TEMPO-mediated oxidation of cellulose^[7]

的元素,改变纤维素的部分化学结构和性能,最终成为一种具有特殊功能的大分子物质^[3]。纤维素的改性主要有化学改性、物理改性和生物改性三种方法,其中化学改性的应用和研究较为广泛。

1.1 化学改性纤维素

天然纤维素分子中的每个葡萄糖单元环上均有 3 个羟基,可发生与羟基有关的一系列化学反应,如氧化、酯化、醚化、交联、接枝共聚等。

1.1.1 氧化纤维素

目前,纤维素的氧化反应分为非选择性氧化和选择性氧化。非选择性氧化的发生是随机的,发生的位置不固定,生成的产物多样,结果较为复杂;而选择性氧化能有效抑制纤维素氧化过程中的过度降解,保证其具有一定的机械性能。如高碘酸盐只针对纤维素的两个仲羟基进行选择性氧化。利用高碘酸钠为氧化剂,在 48 °C 的条件下反应 19 h 制得氧化程度较高,且溶于热水的二醛纤维素,将其与纳米微晶纤维素混合制备出的薄膜具有较高的透明度、拉伸强度、弹性模量和氧气隔离性能^[4]。2,2,6,6-四甲基哌啶-1-氧自由基(TEMPO)氧化体系(TEMPO/NaBr/NaClO)可选择性地氧化伯羟基,而对仲羟基无作用,其氧化纤维素 C₆ 伯羟基的机理见图 2。Hai 等^[5]制备了一种无需化学溶解的几丁质纳米纤维和竹纤维素纳米纤维混合而成的绿色纳米复合材料,其中竹纤维素纳米纤维的分离采用 TEMPO 氧化和水反碰撞法。随着竹纤维素纳米纤维浓度的增加,纳米复合材料的拉伸强度和弹性模量分别增加了 3 倍和 1.3 倍且该纳米复合材料可在一周内完全生物降解,有望在食品包装中得到应用。采用不同比例的壳聚糖、TEMPO 纤维素纳米纤维和山梨醇制备的生物复合膜在 40 °C 的烤箱中烘烤 2~4 d,随着壳聚糖比例的增加,膜表面的沙门氏菌、大肠杆菌 O157:H7 和单核增生李斯特菌的生长明显降低,还能显著提高膜的抗氧化活性,可以成功地用于多种食品的包装材料^[6]。

1.1.2 酯化纤维素

纤维素分子链上活泼的羟基与酸性介质(酸、酸酐、酰卤)等发生酯化反应得到的产物为纤维素酯类^[8],可分为纤维素无机酸酯和有机酸酯。Fotie 等^[9]制备了三种类型的纤维素纳米晶体(CNCs):通过硫酸从木浆中提取的 CNC_{SO_3H} ,通过硫酸铵从棉短绒中提取的 CNC_{COOH} 和通过对前两种 CNC_{COOH} 和 CNC_{SO_3H} 进行酯化获得的 CNC_{COOR} ,在不同类型的塑料薄膜上使用三种类型的 CNCs 进行涂覆,最后用溶剂型聚氨酯粘合剂进行了层压。酯化在不改变结晶度或不损害晶体完整性的情况下,创造出对水不太敏感的结构,与未改性的 CNCs 相比显著地改善了气体阻隔性,覆有酯化纤维素纳米晶体的聚合物层压后可实现 90%~100% 的氧气阻隔性,即使在较高的相对湿度(80%)情况下透氧率也显示出非常低的值,选择用于层压的可密封塑料将使 CNCs 迅速应用于食品包装中,从而取代现在使用的油基材料。

1.1.3 醚化纤维素

醚化纤维素是指在碱性介质中,纤维素分子每个葡萄糖单元的 C_2 、 C_3 和 C_6 羟基全部或部分被其他基团取代^[10]。根据其取代基的不同分为混合醚类和单一醚类。也可根据其改性后离子性不同分为:阴离子纤维素醚、阳离子纤维素醚、分子链上既有阴离子基团又有阳离子基团的两性离子纤维素醚和非离子纤维素醚^[11]。以羧甲基纤维素(CMC)、羟乙基纤维素(HEC)、羟丙基纤维素(HPC)、羟丙基甲基纤维素(HPMC)等为代表的纤维素醚产品已实现商品化^[12]。对微晶纤维素(MCC)进行阳离子醚化得到改性 MCC,因其在淀粉膜基质中具有更好的分散性和相容性,淀粉复合薄膜的拉伸能力、水蒸气阻隔能力等得到提高^[13]。陈妮娜等^[14]制备的藕粉-CMC-茶树油可食膜具有热水速溶性,可直接把食品和包装膜一起用热水冲泡后食用,还可在较长时间内保持良好的阻湿、阻氧、阻油性,有望替代传统塑料膜应用在方便面、速溶固体饮料、豆奶粉等食品的内包装袋。

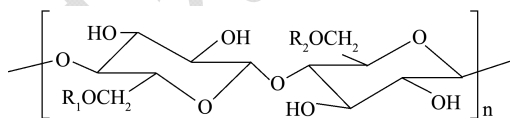


图3 纤维素醚结构式

Fig.3 Cellulose ether structure

1.1.4 交联纤维素

纤维素高分子与双官能团化合物在交联剂的作用下生成交联键(即桥键)而呈现网状结构的反应,称为纤维素的交联。以小麦蛋白质、甲基纤维素为原料,乙醇/水溶液为溶剂,采用流延法制备的交联型可食性

复合膜材料,具有较高的营养价值,透明,可食用,可降解,无任何污染,可防止气体、水蒸气和溶质等在食品、肉制品内部迁移,避免风味、质构、营养成分等在贮运过程发生变化,延长食品货架期。以 CMC 为基材,添加藕粉、甘油、茶多酚、蜂蜡制备复合膜,用氯化钙对复合膜进行交联改性制备了可食用的交联 CMC-藕粉复合膜能直接接触猪肉表面,用复合膜和 PE 膜双层保鲜膜包装冷鲜猪肉,可阻止高水分猪肉中水分的迁移和散失,起到了良好的持水和抗菌、抗氧化作用^[15]。

1.1.5 接枝共聚纤维素

以纤维素表面活性羟基作为接枝点,一种(或多种)单体在纤维素高分子主链上,通过引发在羟基处生成支链的反应,称为纤维素的接枝。这种改性方法能保持纤维素的原有主链和结晶结构,同时赋予新的性能。经接枝胺化反应制备的 MCC 结晶度降低、热稳定性提高,对水体中二价铜离子的络合能力和吸附能力大大提高^[16]。以造纸中的木浆为原料,过硫酸钾为引发剂,将木浆中的纤维素与壳聚糖进行接枝共聚,可合成具有抗菌性能的纤维素材料^[17]。

1.2 物理改性纤维素

纤维素的物理改性方法包括蒸汽爆破、机械研磨、微波辅助提取法等,主要用于去除一些对纤维素起保护作用的成分。Chen 等^[18]采用机械高压蒸汽分离稻秆中的纤维素,并将其填充到聚丙烯中作改性剂。Cherian 等^[19]利用蒸汽爆破技术处理菠萝叶纤维,首次成功提取其纤维素纳米纤维。由纤维素经漂白处理和机械分散后精制而成的纤维素粉以及利用无机酸捣成浆状,解聚后除去非结晶部分并提纯而得的 MCC 等均是物理改性制得。

1.3 生物改性纤维素

生物改性主要是利用果胶酶、半纤维素酶、纤维素酶等生物酶来处理纤维素。采用的方法主要有生物抛光、生物酶退浆、改善聚合物表面的物理结构、微生物合成等^[20]。这种方法可以对纤维进行局部的氧化、水解和吸附且不损伤纤维素强度,具有环保、专一、作用温和等优点^[21]。但纤维素酶价格昂贵、加工时间较长,且此方法主要应用于造纸行业,因此应用范围较窄^[22]。

2 改性纤维素在肉制品中的应用

肉类是高质量蛋白质和许多微量营养素的重要来源,具有很高的生物学价值。改性纤维素可作为增稠

剂、稳定剂、保水剂、乳化剂等应用在肉制品加工过程中,可与肉制品中的蛋白质和脂质相互作用形成乳化小液滴,以共聚物或填充物的形式被束缚在蛋白质的三维网络结构中,从而减小了乳化肉糜凝胶的空隙,提高蛋白质的热稳定性和体系的凝胶强度^[23]。同时,改性纤维素可调节分散体系中连续相的流变性及网状结构,延迟相分离和由重力引起的乳状液分层^[24],还

可吸附在油-水界面上,在乳化液滴周围形成空间屏障,降低界面张力并防止液滴聚结^[25]。研究改性纤维素对肉制品品质的影响及其与肉类蛋白质在加工过程中的相互作用机制,将为生产出更加健康、符合新时代消费理念的食品提供参考,具有深远意义。

2.1 改性纤维素与肉类蛋白质的相互作用机理

表 1 蛋白质与纤维素间氢键的形成^[26]

Table 1 H-Bond formation between protein and cellulose^[26]

作用对象	化合物	氢键	施主原子	受主原子	氢键长度
肌动蛋白	纤维素	UNK1:H35 - GLY156:O	H35	O	2.17
		UNK1:H42 - LYS336:O	H42	O	2.05
		UNK1:H34 - ASP157:OD1	H34	OD1	2.38
		LEU16:N - UNK1:O23	N	O23	3.16
		LYS18:NZ - UNK1:O14	NZ	O14	2.62
		THR303:OG1 - UNK1:O2	OG1	O2	2.97
		THR303:OG1 - UNK1:O10	OG1	O10	2.20
胶原蛋白	纤维素	UNK1:H48 - GLN45:OE1	H48	OE1	2.05
		UNK1:H34 - GLY155:O	H34	O	2.23
		UNK1:H35 - UNK1:O2	H35	O2	2.19
		UNK1:H51 - UNK1:O18	H51	O18	2.23
		UNK1:H51 - ASP46:OD1	H51	OD1	2.19
		GLN45:NE2 - UNK1:O23	NE2	O23	2.78
		GLY155:N - UNK1:O9	N	O9	3.07
肌球蛋白	纤维素	ALA157:N - UNK1:O25	N	O25	2.64
		UNK1:H42 - ASP461:OD1	H42	OD1	1.95
		UNK1:H42 - ASP461:OD2	H42	OD2	2.16
		UNK1: H35 - SER242:O	H35	O	2.18
		UNK1: H41 - PHE244:O	H41	O	2.10
		UNK1:H48 - SER180:OG	H48	OG	1.98
		SER180:OG - UNK1:O23	OG	O23	2.55
		GLY181:N - UNK1:O23	N	O23	2.76
		LYS184:NZ - UNK1:O14	NZ	O14	3.17
		THR185:OG1 - UNK1:O20	OG1	O20	2.92
		SER242:N - UNK1:O20	N	O20	3.05
		SER242:OG - UNK1:O19	OG	O19	3.20
		SER242:OG - UNK1:O20	OG	O20	2.64
ARG243:NH1 - UNK1:O10	NH1	O10	3.20		
ALA463:N - UNK1:O25	N	O25	2.90		

肉类蛋白质包括肌原纤维蛋白、肌浆蛋白及以胶原蛋白为主的结缔组织蛋白。在肉制品加工过程中,肌原纤维蛋白在油滴周围聚集,并参与形成三维网状凝胶,有助于提高乳状液的稳定性、持水能力和肉制品的质地。如表 1 所示,添加纤维素后,肌动蛋白通过肉中 20 个氨基酸残基(Asp11, Asn12, Gly13, Ser14,

Gly15, Leu16, Lys18, Ser155, Gly156, Asp157, Gly182, Arg210, Lys213, Glu214, Gly301, Gly302, Thr303, Tyr306, Lys336, Tyr337) 和七个不同的氢键与纤维素发生相互作用;胶原蛋白通过 11 个氨基酸残基(His43, Gly44, Gln45, Asp46, Thr49, Val144, Gly153, Ser154, Gly155, Gln156, Ala157) 和 6 个

氢键与纤维素发生相互作用；肌球蛋白分子具有两个球状头部和杆状尾部的不对称结构，通过尾对尾静电相互作用与不溶性纤维素结合，有 25 个氨基酸残基（Glu179, Ser180, Gly181, Lys184, Thr185, Asn238, Asn240, Ser241, Ser242, Arg243, Phe244, Gly245, Tyr266, Leu267, Glu269, Asp461, Ile462, Ala463, Gly464, Phe465, Glu466, Phe468, Glu474, Ile478, Asn479）和 14 个氢键与纤维素发生相互作用^[26]。纤维和肉蛋白之间的氢键越多，产品就越坚固，Yadav 等^[27]观察到加入苹果渣和玉米麸皮后，鸡肉香肠硬度增加，而加入番茄渣后硬度降低。纤维素经改性后，引入一些活性基团，结晶度和聚集度降低，可及度提高，与肉类蛋白质之间相互作用发生改变，必然会导致肉制品感官上的变化。

纤维素与蛋白质之间的相互作用主要是非共价作用力，包括静电相互作用（相互吸引或排斥）、疏水相互作用、氢键、范德华力等。蛋白质含有大量的氨基和羧基残基，使其带有正电荷或负电荷，在等电点（pI）时，蛋白质的静电荷为零，肌球蛋白溶解性最低，持水能力最弱。由于体系的复杂性和外界条件的多变性使改性纤维素与蛋白质之间的相互作用具有不确定性。静电相互作用形成的复合物具有可逆性，可通过调节离子强度和 pH 值来改变纤维素和蛋白质之间的静电相互作用性质和强度^[28]。离子强度能够影响肌原纤维蛋白的溶解能力，低离子强度下，能够形成很好的凝胶网络结构，高离子强度下，凝胶结构随机且无序^[29]。肌球蛋白的凝胶特性依赖于 pH 值，热凝胶形成过程中，肌球蛋白会发生变性聚集，随后相互交联形成有序的三维网状结构，并把水包裹其中，当 pH 值高于 pI 时，增加的负电荷会导致凝胶网络中肌球蛋白分子间产生静电斥力并为周围水分子提供了

更多的氢键结合位点，增大了水合作用表面积，最终表现为凝胶的保水性提高。肉类蛋白质在受热变性后形成网状结构，添加的改性纤维素以其特殊结构能够及时吸收并结合蛋白质在热变性过程中失去的水分，从而提高肉制品的感官特性。

改性纤维素添加到肉制品中后，可能会导致三种微观现象的发生：产生复合物、共溶和相分离^[30]，这种相互作用对于肉制品加工过程中的质地和微观结构至关重要。蛋白质和纤维素之间的吸引相互作用可导致可溶性或不溶性复合物的形成，存在于单相体系中。当样品浓度和体系离子强度较低、蛋白质与纤维素带有相反电荷时，两者之间存在强烈的相互作用，发生聚集形成不溶性复合物，特别是当 pH 值在蛋白质等电点和多糖解离常数之间最易发生复合凝聚（缔合型相分离），又称热力学相容性。共溶往往是在样品浓度较低时，形成稳定的单一均相体系，在这一体系中蛋白质与纤维素之间不发生相互作用或以可溶性复合物的形式存在。当样品浓度和体系离子强度足够高并在一定 pH 条件下，蛋白质与纤维素之间的相互排斥作用较强，进而在体系中发生迁移，聚集成两个不相容的体系，一个纤维素富集相，一个蛋白质富集相（离散型相分离），也称为热力学不相容^[31]。

2.2 改性纤维素对肉制品凝胶特性、乳化特性和保水性的影响

重组肉制品在加工过程中蛋白质分子内和分子间的键合或相互作用决定了肉糜的流变特性和热诱导凝胶的物理性质，改性纤维素能在重组蛋白凝胶中提供凝聚力，其对肉制品凝胶特性、乳化特性和保水性的影响如表 2 所示。

表 2 改性纤维素对肉制品凝胶特性、乳化特性和保水性的影响

Table 2 Effect of modified cellulose on gelation, emulsification and water retention of meat products			
纤维素类型	产品	研究结果	参考文献
CNF	乳化香肠	香肠的脂肪含量和蒸煮损失降低，水分含量和明度值提高	[33]
HPMC	鱼糜	HPMC 的加入可稳定鱼糜凝胶结构，改善其流变性能。	[34]
RC	肉糜	油滴尺寸减小，乳液稳定性提高	[35]
CMC	低脂法兰克福香肠	分子量低的 CMC 导致乳状液稳定性下降	[36]
BC	海豚鱼糜	具有纤维素-蛋白质相分离网络混合凝胶的特性，可改善海豚鱼糜的凝胶强度	[37]
BC	中式肉丸	获得较好的多汁性和咀嚼性	[38]
BC	鸡肉饼	微观结构更加密致，BC 添加量为 0.6% 时，咀嚼度下降	[39]
BC	乳化香肠	降低了乳化香肠的蒸煮损失，改善其质构特性及脂肪分布，使结构均匀	[40]

羧化纳米纤维素(cNFC)可改善鸡肉盐溶性蛋白的凝胶强度和持水性,且在谷氨酰胺转胺酶的存在下网络结构更加致密,因此,可应用于重组肉制品中^[32]。与对照组(全脂香肠)相比,添加纤维素纳米纤维的香肠脂肪含量降低,蒸煮损失减少,且具有更高的弹性和感官接受度^[33]。HPMC的分子链上含有羟丙基和甲基,具有独特的加热凝胶和冷却熔融能力。HPMC的加入可稳定鱼糜凝胶结构,改善其流变性能,且添加HPMC粉体比添加HPMC溶胶更有效地稳定鱼糜蛋白网络,更好地承受鱼糜在应力作用下的变形和流动^[34]。Zhao等^[35]研究了再生纤维素(RC)对猪肉肌原纤维蛋白-猪油乳化液稳定性和微观结构的影响,当RC浓度高于0.4%时,乳化液具有良好的增稠性和较强的凝胶网络结构,浓度达到0.8%时,在连续的水相中形成了三维网络结构,提供了更高的粘度和空间屏障来固定油滴,有效抑制乳化液分层现象。同时,RC可吸附在油-水界面上形成皮克林乳液,减小油滴尺寸,防止其聚集和絮凝。

Lin等^[36]研究了四种具有不同分子量和取代度的CMC对低脂法兰克福香肠的影响,分子量的降低导致乳状液稳定性的下降,而法兰克福香肠的理化组成和加工产率保持不变。BC因其纤维网络细、生物相容性好、保水性强、抗张强度高优点,被广泛用作食品配料。碱处理产生的BC网状结构不仅能有效地约束水分子,增强保水性,而且在一定外力作用下还能进行结构修饰,防止蠕变引起的水渗出,添加BC的鱼糜具有纤维素-蛋白质相分离网络混合凝胶的特性,5%的BC可改善海豚鱼糜的凝胶强度^[37]。另外,BC可作为潜在的功能性成分应用于中式乳化肉制品中,与对照组相比,添加10%的BC可使中式肉丸获得较好的多汁性和咀嚼性,且不会对产品的凝胶特性和贮藏稳定性造成不利影响^[38]。郭艳^[39]探究了BC对鸡肉饼保水性和质地的影响,发现添加BC的鸡肉饼微观结构更加致密,BC与蛋白质可良好兼容。当BC添加量为0.6%时,对鸡肉饼品质的改善效果最佳,但过量的BC将使鸡肉饼的咀嚼度下降。同时,BC可以在较低添加量(0.5%)下降低乳化香肠的蒸煮损失,改善其质构特性及脂肪分布,使乳化香肠结构均匀,同时不会对样品颜色造成影响^[40]。

2.3 改性纤维素在低脂肉制品中的应用

脂肪含量与肉制品的口感、风味有着密不可分的关系,主要起乳化、减少蒸煮损失、改善持水性、提高产品风味、多汁性及嫩度等作用^[41]。随着人们消费水平的提高,过量脂肪的摄入会引发肥胖、高血压、

高血脂等潜在危害,减少肉制品中的脂肪含量,选择合适的脂肪替代物已经引起众多学者的关注。

Gibis等^[42]发现CMC和MCC可作为肉制品潜在的脂肪替代物,当CMC浓度超过0.5%时,会使牛肉饼的微观结构、感官和质构特性出现差异,MCC的添加浓度为2%时,油炸牛肉饼柔软多汁,感官评分最佳且口感为脂肪样。这是因为CMC浓度较高时,热处理后形成的蛋白质网络结构的强度下降,而MCC与牛肉蛋白质基质高度相容,加热油炸后可形成含有肉粒和脂肪颗粒的蛋白质网络,使得产品质构得到改善。CMC可以降低高蛋白低脂香肠配方的质地硬度,MCC可以改善蛋白质凝胶网络的完整性,这种组合可用于生产脂肪含量较低的健康肉制品^[28]。同时,CMC和MCC可提高牛肉饼在加热过程中的水分结合能力,降低脂肪含量,同时抑制极性杂环胺的形成。随着CMC或MCC含量的增加,肉饼中的杂环胺含量明显降低,这可能是由于前体物质葡萄糖和肌酸向肉饼表面的质量迁移减少或与葡萄糖单体的额外抑制反应所致^[43]。将HPMC与菜籽油相结合构建成固体状的油凝胶替代动物脂肪(牛脂)以降低肉饼中饱和脂肪的水平,HPMC的硬度和剪切力明显高于牛脂,在50%的替换水平时肉饼的蒸煮损失明显降低,质地也变得更加柔软,整体可接受性最高,可显著降低饱和脂肪与不饱和脂肪的比例,从而生产出更具营养价值的肉饼^[44]。用RC乳化液代替50%猪背脂肪可在不影响乳化香肠感官品质的条件下有效地改善其脂肪酸组成和氧化稳定性^[45]。

无定形纤维素也是一种低热量,不易消化的无味纤维,通常从谷物来源获得,具有良好的保水能力,可增加粘度并提供与脂肪相同的多汁和质地等感官特性,掺入无定形纤维素可降低乳化熟香肠的脂肪和胆固醇水平。用无定形纤维素完全取代猪肉脂肪会导致n-6/n-3比的含量降低,共轭亚油酸和异油酸含量增加^[46]。而半量(50%)替代猪肉脂肪,可使发酵香肠中的脂肪和胆固醇含量分别降低45%和15%^[47]。

薛璐等^[48]利用BC不能被人体消化吸收利用这一优良特点,制得了添加大豆乳清BC的低脂肉肠,15%的BC和0.5%的卡拉胶结合使用可使肉肠的组织状态、风味、颜色等与对照组相比无明显差别,同时,肉肠热量降低了56.07%。将纳米微晶纤维素作为脂肪替代品添加到兔肉糜凝胶中,与猪肉脂肪相比,纳米微晶纤维素体积小且羟基可与蛋白质及水分子形成氢键,从而形成了致密的网络结构,因此降低了肉糜凝胶的蒸煮损失,提高了凝胶的保水性、硬度、黏结性和咀嚼性^[49]。另外,0.5%的纳米纤化纤维素(NFC)可

以成功地取代乳化香肠传统配方中 0.5% 的聚磷酸盐和 1% 的淀粉,对生面团或熟香肠的脂肪和持水性均未产生负面影响,不含磷酸盐和淀粉的 NFC 香肠与对照香肠具有相似的组成和质量特性^[50]。

2.4 改性纤维素在肉制品包装中的应用

天然纤维素经过改性后具有良好的成膜性、优异的机械强度和化学稳定性,可作为包装膜用于食品工业。抗菌包装膜作为新一代食品包装材料,能够提高或保持包装食品的微生物安全性、质量和感官特性而受到广泛关注^[51]。抗菌膜通常是利用抗菌剂与多糖、蛋白质和脂类等高分子聚合物混合制备而成^[52]。将抗菌效果好、能力强的聚六亚甲基双胍盐酸盐接枝于纤维素分子链上,制得接枝改性抑菌纤维素薄膜,用于鲜猪肉的包装,发现对照组在常温和低温下的变质时间分别为 48 h 和 96 h,而接枝改性抑菌纤维素膜裹包的鲜猪肉保质期分别为 96 h 和 192 h,货架寿命延长一倍^[53]。Khezrian 等^[54]以纳米蒙脱土-壳聚糖和纳米蒙脱土-CMC 为基料,分别加入不同浓度的山楂精油和无花果提取物制备了新型薄膜,作为骆驼肉碎的活性包装材料,包装在抗菌膜中的样品的微生物种群(嗜冷菌、假单胞菌、大肠杆菌、乳酸菌、单核细胞增生李斯特菌等)明显低于对照组,薄膜的氧气阻隔性抑制了需氧菌的生长,有效防止了微生物腐败,脂肪和蛋白质在冷藏过程中的氧化,提高了肉糜货架期。加入迷迭香提取物的 CMC 食用薄膜可有效地抑制牛肉的腐败,降低牛肉的化学变性程度,延缓脂肪氧化^[55]。Soni 等^[56]将牛至精油和百里香精油作为抗菌物质添加到 CMC 中制备了可食用薄膜来包裹鸡肉,与不含精油的可食性薄膜相比,混合加入 0.02% 的牛至精油和 0.03% 的百里香精油具有最强的抗菌作用,最适合作为涂覆食用膜。羔羊肉在 4±1 °C 下的货架期是 6 d,而利用混入 1.0% 的二氧化钛和 2.0% 的迷迭香精油的 CNF 纳米复合薄膜包装后,保质期可延长至 15 d,有效地保持羔羊肉的微生物和感官品质,且其对革兰氏阳性菌的抑制作用大于对革兰氏阴性菌的^[57]。

肉类及其衍生产品是极易腐败的食品,在不适当的储存条件下会迅速变质。可食用薄膜或涂膜提供了一种有效的方法来保存和包装这些食品,通过防止水分流失和抑制微生物生长,可提高肉制品的货架期,尤其是纳米纤维素膜具有机械强度高、粒径小、可完全降解等特点,以瓜果皮壳核籽、稻草秸秆、豆渣甘蔗渣等为代表的农副产品中富含的纤维素已被很多研究者用作制备来源。目前,消费者的主要关注点是安全性问题,而成本和大规模制备工作则是食品专业人

士的主要研究内容。随着传统薄膜逐步退出市场,功能性包装膜和涂膜材料将有着广阔的前景。

3 结论

植物纤维素是一种来源丰富的天然产物,利用各种方法将其进行改性并应用于肉制品中,不仅实现了纤维素基材的高值化利用、减少不可再生能源的消耗,还可满足消费者对天然食品添加剂、低热量、低脂肪肉制品的诉求,同时,改性纤维素可简化加工过程、降低产品成本、赋予产品良好的感官品质、表现出良好的食品加工特性,因此在各个领域都受到了广泛的关注。而了解纤维素改性后结构发生的变化,肉类蛋白质与纤维素的相互作用机制,分析改性纤维素对食品品质的影响显得尤为重要。下一步如何开发出纤维素改性过程中健康无毒害的引发体系、如何从富含纤维素的副产物中提取并制备出环保、经济且高性能的改性纤维素、如何找到更多可作为配料的绿色、安全、可降低脂肪含量、提高食用品质的改性纤维素将成为亟待解决的问题。目前,纳米技术已发展到一定高度,纳米纤维素的制备及其在食品工业中的应用将有着不容小觑的发展趋势。因此,将改性纤维素作为食品添加剂、脂肪替代物、功能性食品原料和新型包装材料等应用到肉制品中将是未来的重要研究方向。

参考文献

- [1] Wang S, Lu A, Zhang L N. Recent advances in regenerated cellulose materials [J]. *Progress in Polymer Science*, 2016, 53: 169-206
- [2] Nishiyama Y, Sugiyama J, Chanzy H, et al. Crystal structure and hydrogen bonding system in cellulose Ia from synchrotron X-ray and neutron fiber diffraction [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2003, 125(47): 14300-14306
- [3] 陈筠. 纤维素纳米晶的炔基化修饰及其改性材料的研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015
CHEN Jun. Alkynylated modification of cellulose nanocrystals and study on its modified materials [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015
- [4] Plappert S F, Quraishi S, Pircher N, et al. Transparent, flexible, and strong 2,3-dialdehyde cellulose films with high oxygen barrier properties [J]. *Biomacromolecules*, 2018, 19(7): 2969-2978
- [5] Hai L, Choi E S, Zhai L, et al. Green nanocomposite made with chitin and bamboo nanofibers and its mechanical, thermal and biodegradable properties for food packaging [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020,

- 144: 491-499
- [6] Soni B, Mahmoud B, Chang S, et al. Physicochemical, antimicrobial and antioxidant properties of chitosan/TEMPO biocomposite packaging films [J]. Food Packaging and Shelf Life, 2018, 17: 73-79
- [7] Fraschini C, Chauve G, Bouchard J. Tempo-mediated surface oxidation of cellulose nanocrystals (CNCs) [J]. Cellulose, 2017, 24: 2775-2790
- [8] 劳超,杨晓光,李一,等.甘蔗渣纤维素的改性及应用进展[J].广州化学,2017,42(2):71-76
LAO Chao, YANG Xiao-guang, LI Yi, et al. Progress in modification and application of bagasse cellulose [J]. Guangzhou Chemical, 2017, 42(2): 71-76
- [9] Fotie G, Gazzotti S, Ortenzi M A, et al. Implementation of high gas barrier laminated films based on cellulose nanocrystals for food flexible packaging [J]. Applied Sciences, 2020, 10(9): 1-17
- [10] Fox-Beyer B S, Wüllen C V. Theoretical modelling of the adsorption of thallium and element 113 atoms on gold using two component density functional methods with effective core potentials [J]. Chemical Physics, 2012, 395(2): 95-103
- [11] 梁亚琴,胡志勇.两性纤维素醚的合成及流变性能的研究[J].应用化工,2009,38(3):402-404
LIANG Ya-qin, HU Zhi-yong. Study on rheological property and synthesis of amphoteric hydroxyethylcellulose [J]. Applied Chemical Industry, 2009, 38(3): 402-404
- [12] 张桂锋,杨楠.纤维素醚化改性研究进展[J].合成材料老化与应用,2020,49(1):107-109,122
ZHANG Gui-feng, YANG Nan. Research progress on etherification modification of cellulose [J]. Synthetic Material Aging and Application, 2020, 49(1): 107-109, 122
- [13] 王文涛,韩丽娜,翟晓松,等.微晶纤维素的醚化改性及其在淀粉膜中的应用[J/OL].食品科学,2020-03-30
WANG Wen-tao, HAN Li-na, ZHAI Xiao-song, et al. Etherification modification of microcrystalline cellulose and its application in starch films [J]. Food Science, 2020-03-30
- [14] 陈妮娜,曾稍俏,王美容.藕粉-羧甲基纤维素-茶树油可食膜的制备及在食品内包装上的应用[J].粮食与油脂,2017,30(11):45-50
CHEN Ni-na, ZENG Shao-qiao, WANG Mei-rong. Preparation of the edible films based on lotus root starch, carboxymethyl cellulose and tea tree oil and the application in food inner packaging [J]. Cereals & Oils, 2017, 30(11): 45-50
- [15] 陈妮娜,曾稍俏,黄木花,等.交联羧甲基纤维素-藕粉复合膜对冷鲜猪肉的保鲜[J].农产品加工,2016,13:14-17
CHEN Ni-na, ZENG Shao-qiao, HUANG Mu-hua, et al. Preservation of chilled pork by composite films based on crosslinked carboxymethyl cellulose/lotus root starch [J]. Farm Products Processing, 2016, 13: 14-17
- [16] 任凯,盛佳乐,陈家宝,等.微晶纤维素改性制备 Cu²⁺吸附材料的研究[J].森林与环境学报,2019,39(3):330-336
REN Kai, SHENG Jia-le, CHEN Jia-bao, et al. Modification of microcrystalline cellulose for preparing Cu²⁺ adsorption materials [J]. Journal of Forest and Environment, 2019, 39(3): 330-336
- [17] 贺连萍,胡开堂.纤维素壳聚糖抗菌材料的制备[J].纤维素科学与技术,2006,14(1):41-46
HE Lian-ping, HU Kai-tang. Preparation of antibiosis material polymerized from cellulose and chitosan [J]. Journal of Cellulose Science and Technology, 2006, 14(1): 41-46
- [18] Chen M, Ma Y, Xu Y, et al. Isolation and characterization of cellulose fibers from rice straw and its application in modified [J]. Polypropylene Composites, 2013, 52(15): 1566-1573
- [19] Cherian B M, Leão A L, Souza S F, et al. Isolation of nanocellulose from pineapple leaf fibres by steam explosion [J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 81(3): 720-725
- [20] 邢磊,杨世琦.改性纤维素的吸附性能及应用研究进展[J].中国农学通报,2020,36(3):59-65
XING Lei, YANG Shi-qi. Adsorption properties and application of modified cellulose: a review [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36(3): 59-65
- [21] 安红玉,杨建忠,郭昌盛.纤维素的改性技术研究进展[J].成都纺织高等专科学校学报,2016,33(3):160-163
AN Hong-yu, YANG Jian-zhong, GUO Chang-sheng. Research progress of cellulose modification technology [J]. Journal of Chengdu Textile College, 2016, 33(3): 160-163
- [22] 闫瑛,徐永建.纤维素纤维功能化改性预处理技术研究进展[J].黑龙江造纸,2013,41(3):24-28
YAN Ying, XU Yong-jian. Research progress on pretreatment technologies of cellulose fiber modification [J]. Heilongjiang Pulp & Paper, 2013, 41(3): 24-28
- [23] 孙迪.不同脂肪对肌原纤维蛋白乳化液稳定性及肉糜凝胶特性的影响[D].锦州:渤海大学,2019
SUN Di. Effects of fats on the stability of myofibrillar protein emulsions and gel properties of meat batters [D]. Jinzhou: Bohai University, 2019
- [24] 董磊,刘田静,孔令姗,等.蛋白质和多糖在界面处的相互作用研究进展[J].食品工业科技,2014,35(23):397-400
DONG Lei, LIU Tian-jing, KONG Ling-shan, et al. Research

- progress in the interaction between proteins and polysaccharides at the interface [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2014, 35(23): 397-400
- [25] 冯洁茹,张鑫浩,赵春进,等.蛋白质-多糖在乳液油-水界面相互作用研究进展[J].*发酵科技通讯*,2019,48(1):14-18
FENG Jie-ru, ZHANG Xin-hao, ZHAO Chun-jin, et al. Advances in protein-polysaccharide interaction at oil-water interface of emulsion [J]. *Bulletin of Fermentation Science and Technology*, 2019, 48(1): 14-18
- [26] Ahmad S S, Khalid M, Younis k. Interaction study of dietary fibers (pectin and cellulose) with meat proteins using bioinformatics analysis: an in-silico study [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2020, 119
- [27] Yadav S, Malik A, Pathera A, et al. Development of dietary fibre enriched chicken sausages by incorporating corn bran, dried apple pomace and dried tomato pomace [J]. *Nutrition & Food Science*, 2016, 46(1): 16-29
- [28] Schuh V, Allard K, Herrmann K, et al. Impact of carboxymethyl cellulose (CMC) and microcrystalline cellulose (MCC) on functional characteristics of emulsified sausages [J]. *Meat Science*, 2013, 93(2): 240-247
- [29] Hermansson A M, Harbitz O, Langton M. Formation of two types of gels from bovine myosin [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1986, 37(1): 69-84
- [30] Doublier J L, Gamier C, Renard D, et al. Protein-polysaccharide interactions [J]. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2000, 5(3/4): 202-214
- [31] 许威,崔继来,李娟,等.蛋白质/多糖自组装及其应用[J].*食品研究与开发*,2017,38(20):204-207
XU Wei, CUI Ji-lai, LI Juan, et al. Protein/polysaccharide self-assembly and its applications [J]. *Food Research and Development*, 2017, 38(20): 204-207
- [32] Zhang X, Wang W, Wang Y, et al. Effects of nanofiber cellulose on functional properties of heat-induced chicken salt-soluble meat protein gel enhanced with microbial transglutaminase [J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 1-8
- [33] Wang Y, Wang W, Jia H, et al. Using cellulose nanofibers and its palm oil pickering emulsion as fat substitutes in emulsified sausage [J]. *Journal of Food Science*, 2018, 83(6): 1740-1747
- [34] Chen H H, Huang Y C. Rheological properties of HPMC enhanced surimi analyzed by small- and large-strain tests-II: effect of water content and ingredients [J]. *Food Hydrocolloids*, 2008, 22: 313-322
- [35] Zhao Y, Hou Q, Cao S, et al. Effect of regenerated cellulose fiber on the properties and microstructure of emulsion model system from meat batters [J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 87: 83-89
- [36] Lin K C, Keeton J T, Gilchrist C L, et al. Comparisons of carboxymethyl cellulose with differing molecular features in low-fat frankfurters [J]. *Journal of Food Science*, 1988, 53(6): 1592-1595
- [37] Lin S B, Chen L C, Chen H H. Physical characteristics of surimi and bacterial cellulose composite gel [J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2011, 34: 1363-1379
- [38] Lin K W, Lin H Y. Quality characteristics of Chinese-style meatball containing bacterial cellulose (Nata) [J]. *Journal of Food Science*, 2004, 69(3): 107-111
- [39] 郭艳.细菌纤维素对鸡肉饼和冰淇淋品质的影响[D].西安:西北农林科技大学,2018
GUO Yan. Study on the effect of bacterial cellulose on product qualities of chicken patties and ice cream [D]. Xian: Northwest A&F University, 2018
- [40] 孙旭春.细菌纤维素对乳化肠品质影响的研究[D].西安:西北农林科技大学,2017
SUN Xu-chun. Study on the effect of bacterial cellulose on emulsified sausages [D]. Xi'an: Northwest A&F University, 2017
- [41] Yoo S S, Kook S H, Park S Y, et al. Physicochemical characteristics, textural properties and volatile compounds in comminuted sausages as affected by various fat levels and fat replacers [J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2007, 42: 1114-1122
- [42] Gibis M, Schuh V, Weiss J. Effects of carboxymethyl cellulose (CMC) and microcrystalline cellulose (MCC) as fat replacers on the microstructure and sensory characteristics of fried beef patties [J]. *Food Hydrocolloids*, 2015, 45: 236-246
- [43] Gibis M, Weiss J. Inhibitory effect of cellulose fibers on the formation of heterocyclic aromatic amines in grilled beef patties [J]. *Food Chemistry*, 2017, 229: 828-836
- [44] Oh I, Lee J, Lee H G, et al. Feasibility of hydroxypropyl methylcellulose oleogel as an animal fat replacer for meat patties [J]. *Food Research International*, 2019, 122: 566-572
- [45] Hu H, Pereira J, Xing L, et al. Effects of regenerated cellulose emulsion on the quality of emulsified sausage [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2016, 70: 315-321
- [46] Almeida C M, Wagner R, Mascarin L G, et al. Production of low-fat emulsified cooked sausages using amorphous cellulose gel [J]. *Journal of Food Quality*, 2014, 37(6): 437-443

- [47] Campagnol P C B, Santos B A D, Wagner R, et al. Amorphous cellulose gel as a fat substitute in fermented sausages [J]. *Meat Science*, 2012, 90(1): 36-42
- [48] 薛璐,杨谦,李晓东.细菌纤维素在低脂肉肠中的应用[J].食品科学,2005,26(3):272-274
XUE Lu, YANG Qian, LI Xiao-dong. Application of bacterial cellulose to low-fat sausage [J]. *Food Science*, 2005, 26(3): 272-274
- [49] 郭正旭,卢晓黎,邱思.比较纳米晶纤维素和猪肉脂肪对兔肉糜凝胶品质的影响[J].食品与机械,2012,28(6):80-83
GUO Zheng-xu, LU Xiao-li, QIU Si. Comparison between nanocrystalline cellulose and fat on the qualities of rabbit meat gel [J]. *Food & Machinery*, 2012, 28(6): 80-83
- [50] Parés D, Pèlach M À, Toldrà M, et al. Nanofibrillated cellulose as functional ingredient in emulsion-type meat products [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2018, 11(7): 1393-1401
- [51] Wang L F, Rhim J W, Grapefruit seed extract incorporated antimicrobial LDPE and PLA films: effect of type of polymer matrix [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2016, 74: 338-345
- [52] Kakaei S, Shahbazi Y. Effect of chitosan-gelatin film incorporated with ethanolic red grape seed extract and *Ziziphora clinopodioides* essential oil on survival of *Listeria monocytogenes* and chemical, microbial and sensory properties of minced trout fillet [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2016, 72: 432-438
- [53] 李杨,高珊珊,刘光发,等.抑菌纤维素膜包装对鲜猪肉品质的影响研究[J].包装工程,2012,33(11):5-9
LI Yang, GAO Shan-shan, LIU Guang-fa, et al. Study on quality impact of fresh pork packaged by antibacterial cellulose film [J]. *Packaging Engineering*, 2012, 33(11): 5-9
- [54] Khezrian A, Shahbazi Y. Application of nanocomposite chitosan and carboxymethyl cellulose films containing natural preservative compounds in minced camel's meat [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 106: 1146-1158
- [55] Liu Q, Han J, Zhang Y, et al. Antimicrobial and antioxidant activities of carboxymethyl cellulose edible films incorporated with rosemary extracts on fresh beef during refrigerated storage [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 1915: 1187-1194
- [56] Soni A, Kandeepan G, Mendiratta S K, et al. Development and characterization of essential oils incorporated carrageenan based edible film for packaging of chicken patties [J]. *Nutrition & Food Science*, 2016, 46(1): 82-95
- [57] Sani M A, Ehsani A, Hashemi M. Whey protein isolate/cellulose nanofibre/TiO₂ nanoparticle/rosemary essential oil nanocomposite film: its effect on microbial and sensory quality of lamb meat and growth of common foodborne pathogenic bacteria during refrigeration [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2017, 251: 8-14

(上接第 212 页)

- [26] 申江,张现红,胡开永.菠菜低温真空干燥实验研究[J].食品工业科技,2014,35(5):269-272
SHEN Jiang, ZHANG Xian-hong, HU Kai-yong. An experiment study of low-temperature vacuum drying on spinach [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2014, 35(5): 269-272
- [27] 刘云鹤,司雨,焦玉凤,等.蒿属植物中黄酮类成分及其药理活性的研究进展[J].特产研究,2020,1:80-94
LIU Yun-he, SI Yu, JIAO Yu-feng, et al. Research advances on constituents and pharmacological activities of flavonoids in *Artemisia* species [J]. *Special Wild Economic Animal and Plant Research*, 2020, 1: 80-94
- [28] 张晓明,齐晓光,陈玉波,等.草莓类黄酮化合物的研究进展[J].北方园艺,2020,44(1):128-133
ZHANG Xue-ming, QI Xiao-guang, CHEN Yu-bo, et al. Research advances of flavonoids in strawberry [J]. *Northern Horticulture*, 2020, 44(1): 128-133
- [29] 黄周艳,刘玟君,陈勇,等.三七黄酮研究进展[J].辽宁中医药大学学报,2020,22(1):81-84
HUANG Zhou-yan, LIU Wen-jun, CHEN Yong, et al. Research progress of *Panax notoginseng* flavonoids [J]. *Journal of Liaoning University of TCM*, 2020, 22(1): 81-84
- [30] 邹晶晶,蔡璇,曾祥玲,等.桂花不同品种开花过程中香气活性物质的变化[J].园艺学报,2017,44(8):1517-1534
ZOU Jing-jing, CAI Xuan, ZENG Xiang-ling, et al. Changes of aroma-active compounds in different cultivars of *Osmanthus fragrans* during flowering [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2017, 44(8): 1517-1534