

纤维素及其衍生物在肉制品中的应用

张 欢, 王稳航*

(天津科技大学食品科学与工程学院, 天津 300457)

摘要: 膳食纤维由于具有多种生理活性被称为第七大营养素, 其在肉品加工中的应用也越来越引起关注。纤维素化学组分单一、结构明确, 在膳食纤维领域具有重要的研究和应用价值。本文归纳了纤维素及其衍生物的种类、理化性质和食品加工性能, 阐述了纤维素与肉中蛋白质的相互作用及影响因素, 介绍了各类纤维素在肉制品中的具体研究进展, 同时探讨了其在降低肉制品脂肪含量、保持水分、提高口感、改善品质、增加健康性等方面的可行性, 为丰富与拓展纤维素在肉制品中的应用提供参考。

关键词: 纤维素; 衍生物; 乳化剂; 脂肪替代物; 肉制品

Application of Cellulose and Its Derivatives in Meat Products: A Review

ZHANG Huan, WANG Wenhong*

(College of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: Dietary fiber is called the seventh nutrient because of its various physiological activities, and its application in meat processing has attracted more and more attentions recently. Cellulose, with homogenous composition and well-defined structure, is an important object for research and application in the field of dietary fiber. This paper summarizes the types of cellulose and its derivatives and their individual physicochemical properties and illustrates the interaction between cellulose and meat proteins and its influencing factors. In addition, it reviews recent progress in the application of various types of cellulose in meat products, and discusses their efficiency in reducing meat fat, maintaining moisture, enhancing taste, improving quality, and benefiting people's health. We believe that this review will provide a thorough reference for enriching and expanding the application of cellulose in meat products.

Keywords: cellulose; derivatives; emulsifiers; fat substitutes; meat products

DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20200106-004

中图分类号: TS251.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-8123 (2020) 04-0088-06

引文格式:

张欢, 王稳航. 纤维素及其衍生物在肉制品中的应用[J]. 肉类研究, 2020, 34(4): 88-93. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20200106-004. <http://www.rlyj.net.cn>

ZHANG Huan, WANG Wenhong. Application of cellulose and its derivatives in meat products: a review[J]. Meat Research, 2020, 34(4): 88-93. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20200106-004. <http://www.rlyj.net.cn>

膳食纤维是指不能在人体小肠内消化吸收、但在人体大肠内完全或部分发酵、聚合度 (degree of polymerization, DP) 大于10、可食用且对人体有益的碳水化合物聚合体^[1]。膳食纤维可分为水溶性和水不溶性两大类: 水不溶性膳食纤维是植物细胞壁的组成成分, 多存在于植物的根、茎、叶、果、皮中, 常见的有木质素、纤维素和一些半纤维素; 水溶性膳食纤维则主要存

在于植物细胞液、细胞间质、藻类细胞内, 如海藻酸钠、卡拉胶、果胶等以及部分微生物发酵产物, 如黄原胶。此外, 多糖的水解物以及天然寡糖也被称为可溶性膳食纤维。

随着营养学的深入发展, 大量研究证明, 膳食纤维在抗癌、降血脂、降胆固醇和治疗糖尿病等方面有重要作用, 同时还能改善肠道菌群^[2]。世界卫生组织及各

收稿日期: 2020-01-06

基金项目: 天津市科技重大专项与工程项目 (17ZXHLNC00010); 国家自然科学基金面上项目 (31771994)

第一作者简介: 张欢 (1995—) (ORCID: 0000-0002-1704-6035), 女, 硕士研究生, 研究方向为动物资源与功能食品。

E-mail: 2363107144@qq.com

*通信作者简介: 王稳航 (1977—) (ORCID: 0000-0003-0219-8287), 男, 研究员, 博士, 研究方向为动物资源与功能食品。

E-mail: wangwenhang@tust.edu.cn

国卫生机构将膳食纤维摄入量作为维持人体健康的必要因素之一，称其为人体所需“第七种营养素”。此外，除了生理功能，膳食纤维本身也具有重要的食品加工性能。不同来源的膳食纤维，如麸皮、橙皮纤维，可以填充到肉类产品中取代脂肪或提高水结合能力、改善质地等。王健等^[3]将柑橘纤维作为脂肪替代物生产低脂香肠；刘云等^[4]将燕麦膳食纤维添加于肉脯配方中，降脂效果明显，产品口感良好，实现了营养互补。提升与拓展膳食纤维在肉制品中的应用已成为一个重要的研究方向。

纤维素是丰富的可再生聚合物资源，也是潜力巨大的膳食纤维来源，广泛存在于棉花纤维或木材以及其他自然资源（海洋和陆生植物、水果和蔬菜、细菌等）中。据估计，每年通过光合作用可以合成 $10^{11} \sim 10^{12}$ t纤维素，由于纯度高、非致敏性、不被人体消化吸收和肠内发酵产气等优点，纤维素产品在食品领域的地位和影响力不断提高。纤维素是由D-葡萄糖以 β -1,4糖苷键连接而成的多糖，DP为1 000~15 000，由晶态和无定型区构成。天然状态下的纤维素不溶于水，在水中仅表现出极小的膨胀状态，但表面丰富的羟基可以进行交换、氧化和取代等反应，如酯化和醚化等，使其在水中膨胀（最高5%）至完全溶于水（100%），从而提高应用范围。另外，利用酸、碱及其他物理方法作用于纤维素无定型区解离纤维素，以开发各种不同性能的产品，也是纤维素的重要利用途径。

目前食品业已广泛使用的纤维素及其衍生物主要有微晶纤维素（microcrystal cellulose, MCC）和一些纤维素醚（羧甲基纤维素（carboxymethyl cellulose, CMC）、羟丙基甲基纤维素（hydroxypropyl methylcellulose, HPMC）、甲基纤维素（methylcellulose, MC）、乙基纤维素（ethylcellulose, EC）等），以及最近开发的纳米微纤维素（cellulose nanofibrils, CNF）、纳米微晶纤维素（cellulose nanocrystals, CNC）、细菌纤维素（bacterial cellulose, BC）、非晶态纤维素（amorphous cellulose, AC）。这些纤维素产品具有不同的理化性质和食品加工性能，在食品领域，包括肉制品加工中有着巨大的应用潜力。

纤维素成分单一、结构明确，易于研究，同时，商业化程度高、产品种类多，作为一种膳食纤维在肉制品加工领域具有重要的研究意义和应用价值，近年来已引起国内外研究人员的广泛关注。本文综述纤维素及其衍生物的种类、性质、功能以及在肉制品中的应用，并对其开发应用进行展望，旨在开拓与丰富纤维素在肉制品加工领域中的研究开发和实际应用。

1 纤维素及其衍生物概况

纤维素及其衍生物的分类及性质如表1所示。

表1 纤维素及其衍生物分类及性质

Table 1 Classification and properties of cellulose and its derivatives

种类	性质
纤维素	CNF 比表面积大、剪切变稀、结晶性好、化学性质活泼，可作稳定剂
	CNC
	AC 凝胶性、水结合能力强、具有乳液稳定性，可用于脂肪代替物
	MCC 可复性剪切变稀、热稳定性好、表面积大、表面活性强、具有协同作用
纤维素衍生物	MC 非离子型、增稠，具有成膜性、热凝胶性、热稳定性
	EC 非离子型、水溶性小，具有疏水性、热塑性
	HPMC 可逆热成胶性、冷水可溶、pH值稳定，可用于食品保鲜
	CMC 阴离子型、pH值敏感、能溶于水、持水性好

1.1 MCC的制备及性质

MCC通常由稀酸，如稀盐酸水解得到，酸优先作用于纤维素的无定型区，暴露出形成纤维素晶体聚集体的结晶位点，水解完成后，过滤后得到的滤饼被中和并彻底清洗以去除杂质，然后脱水干燥，研磨成粉末级别；MCC的DP通常小于400，晶体截面比例约为70%，非晶态比例为30%；相比之下，纤维素粉作为一种精细研磨的天然纤维素，平均含有45%结晶区和55%非晶态区^[5]。

一定质量浓度的MCC分散液可形成触变性凝胶，具有可复性剪切变稀特性，非离子型，对热稳定，在较宽的温度范围内具有良好的热稳定性，可作为乳浊剂、泡沫稳定剂及冻融稳定剂等，DP低，具有巨大的表面积和毛细管作用，能使冷冻甜点具有更好的形状、质地和热抗性^[6]。同时，MCC与其他食品胶体具有协同作用：添加少量CMC可显著提高MCC的水化性和分散性，其商业产品也称为纤维素胶或胶体MCC^[7]，纤维素胶在酸性系统中可以防止MCC和蛋白质絮凝；MCC与淀粉，如改性糯玉米淀粉，在黏度、剪切稳定性和耐热性方面表现出协同作用^[8]。

1.2 CNC/CNF的制备及性质

生物体内自组装的纤维素大分子由纳米级的晶体和无定型区的纤维素组成，利用化学法、物理机械与化学法相结合、酶解法等降解纤维素可获得CNC和CNF。其中CNC的制备主要以强酸水解为主，在强酸作用下，纤维素的无定型区域被选择性降解，剩余的纤维素部分呈现为纳米尺寸的纤维素晶体，即为CNC^[9]。CNC为长棒状，直径2~20 nm，长度约100~600 nm，最大长度达1 μ m，结晶度高、杨氏模量高、机械性能优良^[10]。CNF是在保留天然纤维素原有DP的基础上对其进行反复高强度的物理处理，如高压均质化后得到的纳米级纤维素产品，与CNC相比，CNF拥有更大的长径比，易于形成空间网络结构，凝胶所需浓度较低^[10]。随着纳米纤维素开发技术的进步和生产成本的不断降低，人们开始探讨其在食品领域中的潜在应用。纳米纤维素具有很多加工特性，比如表面积大，可以用作包装材料的增强剂；具有流变性能（剪切变稀），在水溶液中可

以形成稳定胶体，还能够在乳状液滴周围形成空间屏障，阻止其聚结，从而稳定乳状液，还可用于食品稳定剂、脂肪替代物和增稠剂等^[11]。目前已有研究开始尝试将纳米纤维素作为低热量增稠剂和悬浮稳定剂应用于食品中^[12]，例如，由于CNF具有缠绕性和界面特性，可作为新型Pickering乳液的颗粒乳化剂^[13]，用于沙拉酱或其他低脂、无脂食品的开发。

1.3 BC的制备及性质

BC是一种微生物来源的纳米纤维素，主要由气杆菌属、醋杆菌属等合成。最早发现木醋杆菌具有合成BC的能力，它也是目前已知的BC合成能力最强的菌种。BC与植物、藻类和其他生物中的纤维素分子结构相同，均由 β -1,4糖苷键连接而成，以单一的纤维形式存在，性质稳定、结晶度高、易降解且持水性好，分子间通过范德华力和氢键形成网状机械屏障来保持水分；BC具有独特的悬浮、增稠、保水、稳定和流体特性，可用作肉制品的成型剂、结合剂和增稠剂等；此外，细菌纳米纤维素（bacterial nanocellulose, BNC）在纳米纤维素产品中保水能力最强，是一种高效、低热量的食品质构改良剂^[14]。

1.4 AC的制备及性质

AC也称为再生纤维素（regenerated cellulose, RC），以天然纤维素为原料制备而成。通常将微晶纤维素溶于磷酸等酸性溶液中至溶解状态，再经过稀释、生成沉淀、离心、洗涤直至pH值接近中性，形成AC，在实际制备中，AC通常为微晶纤维素和非晶纤维素的混合物^[15]。另外，也可从结晶度低的谷物原料中提取AC，作为一种不溶性纤维用于食品中脂肪替代品的开发。

AC没有任何味道，也没有热量价值，可直接以粉末形式添加，也可以凝胶形式添加。由于AC的高保水能力，可以增加黏度，赋予肉质的感官特性和类似于脂肪的质地，因此可用作脂肪替代物^[16]。与MCC相比，AC具有凝胶性、高水合能力和乳液稳定性^[17]。此外，凝胶状AC具有与动物脂肪相似的外观和口感，并且几乎不与其他营养物质发生相互作用^[18]。

1.5 纤维素醚的制备及性质

纤维素醚是由天然纤维素经过化学改性（取代反应、加成反应等）得到的，即纤维素中羟基的氢被烃基取代的生成物。根据取代基团的不同，纤维素醚可分为CMC、HPMC、MC、EC等，在食品中多用作乳化剂、稳定剂、增稠剂等。

1.5.1 CMC

CMC是用氢氧化钠水溶液对纤维素进行处理，然后与一氯乙酸或其钠盐反应制得，最小相对分子质量为17 000，DP约为100；长链CMC具有低取代度的可逆盐敏感性（0.7以下），可用于肉制品注射，其特性为阴离子型、带负电荷，可与带正电荷的蛋白质发生作用，对pH

值敏感、能溶于水、稀碱溶液和有机溶剂、流变性好，可用于脂肪产品的替代物，有较强的持水性，可作为冻融稳定剂、蛋白保护剂、增稠剂、质构改良剂等用于食品工业中^[19]。

1.5.2 其他纤维素醚（HPMC、MC、EC）

HPMC、MC为水溶性纤维素醚，具有热塑性和良好的流变性能，在水中可以形成稳定的胶体，可以作为功能添加剂应用于食品中。董福家等^[20]在鸡米花外层面糊中添加HPMC，显著提高了鸡米花的脆性，降低了外壳水分和脂肪含量。EC具有醇溶特性，也可作为制备油凝胶的材料。Zhang Kai等^[21]将EC用于制备肉桂精油凝胶，其结构更加致密，显著提高了植物精油的缓释性和稳定性。目前，纤维素醚（CMC除外）在肉制品中的应用鲜有报道，其独特的成膜性、凝胶性等理化性质可能会对肉制品的品质造成重要影响，值得进一步深入研究。

2 纤维素及其衍生物与肉中蛋白质的相互作用

蛋白质是畜禽肉（除去脂肪组织）最重要的组成成分，可分为肌原纤维蛋白、肌浆蛋白及以胶原蛋白为主的结缔组织蛋白。将纤维素及其衍生物作为膳食纤维加入到肉制品中，与肉中的蛋白质不可避免地会发生一系列复杂的相互作用，而这些作用受到体系环境条件，如pH值、温度和离子强度等的影响，深入研究这些作用及影响机制将有利于改善肉蛋白凝胶的性质和相应的肉制品品质。

2.1 纤维素与蛋白质的相互作用方式

在水相体系中，纤维素和蛋白质之间存在着复杂的弱键相互作用，如静电相互作用、范德华力、氢键、疏水作用等，其中以静电相互作用、疏水作用最为重要。静电相互作用可分为静电引力和静电斥力，具体表现为分子之间相互吸引（异性相吸）或相互排斥（同性相斥）。蛋白质在中性条件下大多带负电荷，纤维素不带电荷或带负电荷，由于体系的复杂性和多变的外界条件使二者之间的静电相互作用具有不确定性，如可以通过调节离子强度和pH值来改变分子间的静电相互作用性质和强度^[22]。疏水相互作用是通过聚合物的疏水基与水相互排斥而导致聚合物具有相互聚集的趋势，一般发生在蛋白质之间，而HPMC、MC由于甲基、羟丙基的引入其疏水性也会增强，进而增大与蛋白质的结合作用。范德华力产生于分子和原子间的相互吸引作用，又称分子作用力，实质是一种电性的吸引力，会影响分子的溶解性等，由于蛋白质和纤维素大多为离子型聚合物，这一作用力对二者间相互作用的贡献性应该较小。氢键是指X—H（X指一种原子）与电负性较大的原子Y以氢为桥梁形成的X—H \cdots Y（X和Y可以是同一种原子）形式的分子间或

分子内作用力，氢键是一种吸引力，具有饱和性和方向性。蛋白质和纤维素之间氢键形成与否和形成数量的多少也能影响二者间的相互作用。

根据上述不同情况，蛋白质和纤维素可能以多种方式相互作用：1) 在体系浓度较低或相互排斥作用较弱时，蛋白质和纤维素可能是共溶的，在这种情况下，虽然2种分子整体上是相互排斥的，但体系仍保持着稳定的均相状态，形成同时包含2种聚合物的单相体系；2) 体系浓度较高或相互排斥作用增强时，由于静电排斥或热力学失衡，蛋白质和纤维素可能在热力学上不相容，导致混合体系发生两相分离，在这种情况下，2种聚合物相分离为两相，1个富含纤维素，1个富含蛋白质（隔离型相分离）；3) 体系浓度较高或相互吸引作用增强时，蛋白质和纤维素可能在热力学上相容，发生聚集形成不溶性复合物（结合型相分离），其浓度较低时也可能呈溶解状态（图1）^[23]。在具体的肉制品体系中，由于蛋白质浓度高以及热诱导会使肉蛋白质变性形成凝胶，整个体系表现为高黏弹体，分子移动性低，相行为不明显，纤维素与蛋白质的作用方式应主要为第2种和第3种形式。

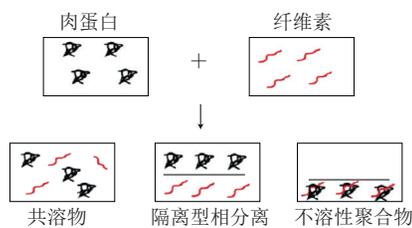


图1 纤维素和肉蛋白的相互作用方式示意图^[23]

Fig. 1 Schematic diagram of the interaction between cellulose and meat protein^[23]

2.2 影响纤维素与蛋白质相互作用的因素

肉作为一个复杂的胶体系统，环境条件（如pH值、温度和离子强度）会影响纤维素与蛋白质间的相互作用^[24]，其具体影响取决于纤维素和肉蛋白的分子特性。一般来说，不溶性纤维素基本不带电荷，受pH值变化影响很小，除非pH值低至足以引起水解，而可溶性纤维素，如CMC是带有一定比例负电荷的单体，当pH值大于4.0时，CMC始终带负电荷；相反，肉类蛋白质的带电性很大程度上取决于等电点pH值，即体系的pH值低于肉蛋白等电点（约为5.0）时蛋白带正电荷，而高于等电点时带负电荷；因此，无论pH值如何，纤维素与肉蛋白之间并不存在强烈的静电相互作用，但CMC与肉蛋白在pH值5.0以下会有一个相互吸引的静电作用，pH值5.0以上有相互排斥的静电作用^[22]。最近提出的蛋白质表面电荷分布不均一性学说，即在同一条件下，部分区域带正电荷，其他区域带负电荷，这也增加了纤维素与肌肉中蛋

白质相互作用的复杂性。蛋白质与纤维素的静电相互作用通常也被系统中存在的离子所调节，如在较高盐浓度下，由于添加的离子会屏蔽各自聚合物的表面电荷，静电相互作用（如CMC和肉蛋白之间）可能会降低。

另外，温度可能同时影响静电相互作用和范德华力，因而也会影响非带电聚合物和带电聚合物（如水不溶性纤维素和肉类蛋白，或CMC和肉类蛋白）的相互作用^[25]。此外，其他添加剂也会影响纤维素与蛋白质间的相互作用，例如，蔗糖已经被证明可以提高蛋白质的溶解度，因此也可以提高蛋白质-多糖溶液的共溶性^[26]。

2.3 纤维素的添加对肉蛋白凝胶性能的影响

纤维素的添加对肉蛋白凝胶的形成及其性质有重要影响。添加稳定的RC乳液可提高肉制品的组织、结构和功能品质。Hu Hongyan等^[27]研究热诱导过程中添加RC对肌原纤维蛋白（myofibrillar protein, MP）凝胶的影响，结果表明，RC乳液显著提高了MP复合凝胶的持水能力、硬度和黏弹性。Zhao Yinyu等^[28]研究RC对MP凝胶的影响，结果表明，添加RC后，凝胶保水性和质构性能均有所提高，黏弹性增强，形成均匀、致密的凝胶结构，可以有效改善MP凝胶的功能品质。

有研究报道，添加CNF有助于提高盐溶蛋白（salt-soluble protein, SSP）凝胶的保水性^[29]。张小微^[30]将不同分子质量的HPMC（E4M和E15LV）与CNF共同添加于SSP体系，发现添加HPMC后，凝胶的硬度得到提高，但保水性下降，其影响性与HPMC的分子质量呈正相关。

3 纤维素在肉制品中的应用

3.1 MCC、CMC添加到香肠中的研究

MCC作为一种稳定剂和脂肪替代品，近年来已被用于熟肉和乳化产品。不溶性纤维素颗粒能够破坏肉中的蛋白质结构，避免冷缩和鲜肉贮藏过程中产生的胶状稠度。此外，MCC在水中分散后能形成球状胶体溶液，使油水混合液的水相被胶化，阻止油滴间的靠近，这种胶体溶液可以产生类似脂肪的流变特性和口感。

CMC具有优良的保水性能和胶体特性，不同的CMC可以不同程度地提高肉制品的保水性能，而MCC在维持肉制品体系的稳定状态方面具有显著效果；由于性能上具有互补性，二者也经常配合使用以提高使用效果。研究表明，添加CMC的低脂肉制品蒸煮水分损失率由10%降低到6%^[31]，而CMC的加入导致肉糜结构失稳，肉糜受热后不能再转化为连续的蛋白质网络^[22]；将不同的CMC添加到含1.8% NaCl的乳化型香肠中，添加质量分数大于1%的CMC可降低未加热/加热肉糜的储能模量，并降低加热后肉糜的硬度，而与所添加的CMC类型无关^[32]。MCC与肉制品基质高度相容^[22]，添加MCC后肉制品的蒸

煮损失率增加12%~15%，纤维素凝胶的黏弹性不受脂肪含量变化的影响，硬度和脆性和咀嚼性等随脂肪含量的降低而增加^[31]。由此可以看出，CMC和MCC在功能上可以互补，将二者以不同比例添加于肉制品中，有望开发出保水性能优良、体系稳定的产品。

3.2 CNF/CNC替代肉制品成分的研究

CNF/CNC可以作为肉制品中一些有效成分（如磷酸盐和脂肪等）的替代物，提高产品健康指数，还可以和其他物质产生协同作用以改善肉制品品质。将CNF添加到乳化肠配方中发现，0.5% CNF成功替代了0.5%聚磷酸盐和1%淀粉，且没有对生肉糜或熟香肠的脂肪和保水性能产生负面影响^[33]；使用1% CNF水溶液和CNF棕榈油酸乳化液（palm oil pickering emulsion, CPOE），以油水体积比1:1替代乳化香肠的原有动物脂肪，结果表明，用CPOE制备的产品具有较高的硬度、回弹性和咀嚼性，添加CNF后，产品的质构得到明显改善^[34]。

3.3 BC添加到肉制品中的研究

BC具有良好的保水性，将BC添加到肉制品中能够不同程度地提高产品保水性，降低水分损失，改善产品硬度、咀嚼性和黏结性等。研究表明，向鸡肉中分别添加不同质量分数的BC，肉饼的水分损失率和油滴尺寸随BC添加量增加而降低，添加1.0% BC时水分损失率最小^[35]。此外，将质量分数0.267% BC添加到向日葵油低脂低钠肉用乳剂中，能够使肉糜的水结合性能、硬度、黏结性和咀嚼性均有所提高，但进一步添加则对这些性能产生负面影响^[36]。

3.4 AC替代肉制品脂肪的研究

AC没有任何味道，也没有热量价值，并且具有高保水能力，凝胶性能好，适宜在肉制品中添加使用。研究表明，猪皮、水和AC质量比为1:1:0.2的凝胶可以表现出与脂肪相似的感官感受^[37]。用AC凝胶代替乳化熟香肠中的猪背脂肪，在不影响产品合格率的前提下，可替代高达100%猪背脂肪^[38]，同时，AC还能降低脂肪含量和脂质氧化，增强乳液稳定性和氧化稳定性，且随AC添加量的增加，油滴尺寸减小、乳化稳定性提高，并表现出凝胶状特性，可作为脂肪的有效替代品^[39-41]。

4 结语

纤维素作为一种传统的食品配料，随着纳米技术的发展和纳米纤维素开发技术的日益成熟，再次引起了食品领域特别是肉制品加工业的重视。虽然纤维素作为水不溶物时难以在食品中应用，但是其经过物理处理或化学改性之后得到的纳米纤维素及其衍生物表现出良好的食品加工特性，如凝胶性、乳化性和黏结性等，可以在很大程度上改善肉制品品质，这对于开发新型健康肉制

品、增强肉制品的功能性、提高我国居民的健康水平具有重要意义。同时，由于纤维素组成单一、结构明确，也可作为研究纳米颗粒与生物聚合物、多糖与蛋白质相互作用的重要研究对象，有助于进一步阐释外源添加物，如膳食纤维与肉蛋白之间的结合机制，对肉制品最终品质的提高具有重要帮助。纤维素及其衍生物作为一种来源广泛、成本低廉、性能优良的食品配料，将会给传统肉制品工业的发展带来新一轮变革。

参考文献：

- [1] 胡杨, 周梦舟. 膳食纤维在食品中应用的研究进展[J]. 粮油食品科技, 2017, 25(4): 48-51. DOI:10.16210/j.cnki.1007-7561.2017.04.010.
- [2] 吕秉霖, 袁东. 膳食纤维的改性及应用[J]. 粮食科技与经济, 2019, 44(3): 78-81. DOI:10.16465/j.gste.cn431252ts.20190318.
- [3] 王健, 张坤生, 任云霞. 柑橘纤维在低脂肪肉制品中的应用研究[J]. 中国食品添加剂, 2016(6): 177-181.
- [4] 刘云, 蒲彪, 张瑶. 膳食纤维在功能性肉制品中的应用[J]. 肉类研究, 2007, 21(4): 30-32.
- [5] KENT R A, STEPHENS R S, WESTLAND J A. Bacterial cellulose fiber provides an alternative for thickening and coating[J]. Food Technology, 1991, 45(6): 108-111. DOI:10.1016/S0021-9673(01)83890-5.
- [6] 朱墨书棋, 骆微, 林春香. 微晶纤维素的研究现状及发展趋势[C]// 海西纸业论坛暨学术交流年会. 福州: 福建省造纸学会, 2014: 88-91.
- [7] 谭Z, 林奇M G, 塞斯特里克M, 等. 微晶纤维素和羧甲基纤维素的稳定剂组合物、制备方法和应用: CN201280048399.X[P]. 2014-06-04.
- [8] 李浩, 张浩, 赵城彬, 等. 纤维素和聚葡萄糖对玉米淀粉凝胶糊化及流变特性的影响[J]. 食品工业, 2018, 39(8): 59-63.
- [9] 张秀伶, 王稳航. 纳米纤维素研究及在食品工业中的应用前景[J]. 食品工业科技, 2016, 37(21): 377-382. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2016.21.065.
- [10] 张雅佩, 程绍玲, 周景蓬, 等. 纳米微晶纤维素的性质与应用研究进展[C]// 中国造纸学会第17届学术年会论文集. 北京: 中国造纸学会, 2016: 41-44.
- [11] 蔡晨晨, 陆登俊, 马瑞佳, 等. 纳米纤维素在食品行业中应用研究进展[J]. 食品与机械, 2019, 35(7): 231-236. DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2019.07.044.
- [12] ENDES C, CAMARERO-ESPINOSA S, MUELLER S, et al. A critical review of the current knowledge regarding the biological impact of nanocellulose[J]. Journal of Nanobiotechnology, 2016, 14(1): 78-91. DOI:10.1186/s12951-016-0230-9.
- [13] 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. DOI:10.1016/j.foodhyd.2014.07.027.
- [14] SAMPAIO L M P, PADRAO J, FARIA J, et al. Laccase immobilization on bacterial nanocellulose membranes: antimicrobial, kinetic and stability properties[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 145: 1-12. DOI:10.1016/j.carbpol.2016.03.009.
- [15] JIA Xuejuan, CHEN Yingwen, SHI Chong, et al. Rheological properties of an amorphous cellulose suspension[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 39: 27-33. DOI:10.1016/j.foodhyd.2013.12.026.
- [16] 范晓全, 乔彩利, 刘慕华, 等. 再生纤维素凝胶对发酵香肠品质的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(15): 49-55. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201615009.



- [17] HU Hongyan, XING Lujuan, HU Yaya, et al. Effects of regenerated cellulose on oil-in-water emulsions stabilized by sodium caseinate[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 52: 38-46. DOI:10.1016/j.foodhyd.2015.06.019.
- [18] JIA Xuejuan, CHEN Yingwen, HU Yaya, et al. Preparation and characterization of cellulose regenerated from phosphoric acid[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, 61(50): 12405-12414. DOI:10.1021/jf4042358.
- [19] 罗淑玲, 傅红, 张虹, 等. 乙基纤维素对油脂流变性质和凝胶特性的影响[J]. *中国粮油学报*, 2015, 30(12): 70-75. DOI:10.3969/j.issn.1003-0174.2015.12.013.
- [20] 董福家, 孙钦秀, 陈倩, 等. 面糊中添加羟丙基甲基纤维素对微波复热鸡米花品质的影响[J]. *食品工业*, 2015, 36(9): 104-108.
- [21] ZHANG Kai, WANG Wenhong, WANG Xiao, et al. Fabrication, physicochemical and antibacterial properties of ethyl cellulose-structured cinnamon oil oleogel: a relation of ethyl cellulose viscosity and oleogel performance[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 99(8): 4063-4071. DOI:10.1002/jsfa.9636.
- [22] 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. DOI:10.1016/j.meatsci.2012.08.025.
- [23] 操义平. 多糖/蛋白质混合体系复杂相行为的研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2016: 1-5.
- [24] TOLSTOGUSOV V B. Functional properties of food proteins and the role of protein-polysaccharide interaction[J]. *Food Hydrocolloids*, 1991(4): 429-468. DOI:10.1016/S0268-005X(09)80196-3.
- [25] TURGEON S L, BEAULIEU M, SCHMITT C, et al. Protein-polysaccharide interactions: phase-ordering kinetics, thermodynamic and structural aspects[J]. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 2003, 8(4): 401-414. DOI:10.1016/j.cocis.2003.08.013.
- [26] ANTIPOVA A S, SEMENOVA M G. Effect of sucrose on the thermodynamic incompatibility of different biopolymers[J]. *Carbohydrate Polymers*, 1995, 28(4): 359-365. DOI:10.1016/0144-8617(96)00002-1.
- [27] HU Hongyan, PEREIRA J, XING Lujuan, et al. Thermal gelation and microstructural properties of myofibrillar protein gel with the incorporation of regenerated cellulose[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2017, 86: 14-19. DOI:10.1016/j.lwt.2017.07.015.
- [28] ZHAO Yinyu, ZHOU Guanghong, ZHANG Wangang. Effects of regenerated cellulose fiber on the characteristics of myofibrillar protein gels[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2019, 209: 276-281. DOI:10.1016/j.carbpol.2019.01.042.
- [29] ZHANG Xiaowei, WANG Wenhong, WANG Yanan, 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, 84: 1-8. DOI:10.1016/j.foodhyd.2018.05.046.
- [30] 张小微. 纳米微纤维素(NFC)-蛋白凝胶制备与特性研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2018: 19-21.
- [31] BARBUT S, MITTAL G S. Effect of three cellulose gums on the texture profile and sensory properties of low fat frankfurters[J]. *International Journal of Food Science*, 1996, 31(3): 241-247. DOI:10.1046/j.1365-2621.1996.00337.x.
- [32] GIBIS M, SCHUH V, ALLARD K, et al. Influence of molecular weight and degree of substitution of various carboxymethyl celluloses on unheated and heated emulsion-type sausage models[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 159: 76-85. DOI:10.1016/j.carbpol.2017.01.058.
- [33] PARÉS D, ÀNGELS PÈLACH M, TOLDRÀ M, et al. Nanofibrillated cellulose as functional ingredient in emulsion-type meat products[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2018, 11(7): 1393-1401. DOI:10.1007/s11947-018-2104-7.
- [34] WANG Yanan, WANG Wenhong, JIA Hongjiao, 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. DOI:10.1111/1750-3841.14164.
- [35] 郭艳, 吴进, 李腾宇, 等. 细菌纤维素对鸡肉品质及蛋白性质的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(3): 135-143. DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2019.03.017.
- [36] MARCHETTI L, MUZZIO B, CERRUTTI P, et al. Bacterial nanocellulose as novel additive in low-lipid low-sodium meat sausages. Effect on quality and stability[J]. *Food Structure*, 2017, 14: 52-59. DOI:10.1016/j.foostr.2017.06.004.
- [37] MIRIAM D O F, CIPRIANO T M, DA CRUZ A G, et al. Properties of bologna-type sausages with pork back-fat replaced with pork skin and amorphous cellulose[J]. *Meat Science*, 2015, 104: 44-51. DOI:10.1016/j.meatsci.2015.02.002.
- [38] ALMEIDA C M, WAGNER R, MASCARIN L, et al. Production of low-fat emulsified cooked sausages using amorphous cellulose gel[J]. *Journal of Food Quality*, 2015, 37(6): 437-443. DOI:10.1111/jfq.12104.
- [39] ZHAO Yinyu, HOU Qin, ZHUANG Xinbo, et al. Effect of regenerated cellulose fiber on the physicochemical properties and sensory characteristics of fat-reduced emulsified sausage[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 97: 157-163. DOI:10.1016/j.lwt.2018.06.053.
- [40] ZHAO Yinyu, HOU Qin, CAO Songmin, 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. DOI:10.1016/j.foodhyd.2018.07.044.
- [41] HU Hongyan, PEREIRA J, XING Lujuan, et al. Effects of regenerated cellulose emulsion on the quality of emulsified sausage[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016, 70: 315-321. DOI:10.1016/j.lwt.2016.02.055.