

尧梅香, 荣利远, 王诚远, 等. 多孔淀粉的制备及其在食品领域的应用研究进展 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(20): 440-448. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022110199

YAO Meixiang, RONG Liyuan, WANG Chengyuan, et al. Research Progress on Preparation of Porous Starch and Its Application in Food Field[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(20): 440-448. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022110199

· 专题综述 ·

多孔淀粉的制备及其在食品领域的应用研究进展

尧梅香¹, 荣利远^{2,*}, 王诚远^{1,2}, 韩秀英², 井莹², 谢建华^{2,*}

(1.江中食疗科技有限公司, 江西九江 330000;

2.南昌大学食品科学与资源挖掘全国重点实验室, 江西南昌 330047)

摘要: 多孔淀粉是天然淀粉经物理、化学或生物酶法处理得到一种改性淀粉, 具有高孔隙率、高比表面积、吸附性强等特点。多孔淀粉的特殊结构赋予了其丰富的功能和应用前景, 且不同方法制备的多孔淀粉存在结构差异以及性能差异, 其应用潜力也存在不同。为了进一步促进多孔淀粉在食品工业的实际应用, 本文总结了近年来多孔淀粉的常用制备方法, 讨论分析了多孔淀粉在食品领域的应用现状和前景。本文发现常用的多孔淀粉制备方法都存在不足之处, 如物理法制备的多孔淀粉表面孔隙不均匀, 化学法会导致化学残留, 生物酶法则是制备成本高、经济效益差等, 这些方法亟需进一步优化工艺以实现在食品工业的广泛推广。超声、微波等物理加工技术和化学改性辅助酶法制备多孔淀粉具有效率高, 易推广等特点, 成为当前的研究热点。多孔淀粉由于其优异的结构和功能特性, 在食品领域的应用受到广泛关注。多孔淀粉包埋的食品营养物质能有效避免被胃肠道中的酶水解, 提高其生物可及性。负载有抗菌、抗氧化活性物质的多孔淀粉制备的食品包装材料具有优异抗氧化和抗菌能力, 可延长食品的保质期。多孔淀粉经过化学改性后表现出和脂肪类似的感官体验, 可用于制备脂肪替代物, 改善高脂肪摄入带来的健康问题。本研究为未来多孔淀粉的合理制备以及其在食品工业中的应用提供了参考。

关键词: 多孔淀粉, 制备方法, 食品应用

中图分类号: TS231

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)20-0440-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022110199



本文网刊:

Research Progress on Preparation of Porous Starch and Its Application in Food Field

YAO Meixiang¹, RONG Liyuan^{2,*}, WANG Chengyuan^{1,2}, HAN Xiuying², JING Ying², XIE Jianhua^{2,*}

(1.Jiang Zhong Food Therapy Technology Co., Ltd., Jiujiang 330000, China;

2.State Key Laboratory of Food Science and Resources, Nanchang University, Nanchang 330047, China)

Abstract: The porous starch is prepared using physical, chemical or enzymatical methods, possessing the characteristic of high porosity, high surface area and adsorption capacity. The porous starch possesses a functional performance and application prospect due to the porous structure, and the structural and functional characteristics of porous starch may be different due to the preparation methods, resulting in the different application potential. The preparation methods and the application status of porous starch is reviewed in this work to promote the practical application of porous starch in food industry. There are some shortcomings in the preparation methods of porous starch, the surface pores of porous starch prepared using physical method are not uniform, the chemical method cause chemical residue, and the enzymatical method has high preparation cost and poor economic benefits. These modified methods should be further optimized to widespread

收稿日期: 2022-11-17

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (31972034)。

作者简介: 尧梅香 (1977-), 女, 本科, 研究方向: 食药两用资源开发与利用, E-mail: ymx@jzsl.net。

* 通信作者: 荣利远 (1996-), 男, 硕士, 研究方向: 食品组分相互作用, E-mail: 434944829@qq.com。

谢建华 (1982-), 男, 博士, 研究方向: 食品化学与营养学、食品生物活性成分结构与功能, E-mail: jhxie@ncu.edu.cn。

promotion in the food industry. The application of porous starch was widely concerned due to its structure and functional characteristics. The preparation of porous starch by enzymatic combined with physical processing or chemical modification has become a research hotspot due to the characteristics of high efficiency and easy popularization. The porous starch can be used to load food nutrients, effectively preventing them from being hydrolyzed in the gastrointestinal tract and improving its bioaccessibility. Food packaging prepared with porous starch has good antioxidant and antibacterial capabilities due to its load of antibacterial and antioxidant substances, which can extend the shelf life of food. The chemically modified porous starch exhibits a sensory experience similar to fat, and it can be used to prepare fat substitutes to ameliorate health problems associated with high fat intake. This review will provide a guideline for the rational preparation and applications of porous starch in food industry in the future.

Key words: porous starch; preparation method; food application

淀粉是应用最广泛的天然生物聚合物之一,为人类的生命活动提供了大部分能量,具有安全、便宜、可生物降解等多种优良特性^[1]。由于其优异的天然特性,淀粉在食品工业中被广泛用作食品稳定剂、增稠剂、胶凝剂和保水剂^[2]。随着食品科技的发展,食品加工对淀粉原料有了更高的要求。天然淀粉存在老化、热稳定性差、水不溶性和 pH 敏感性等缺点,严重限制了其在食品工业中的实际应用^[3]。因此,国内外学者通过物理法^[4]、化学法^[5]和生物酶法^[6]对淀粉进行改性,从而获得理化性能更好的改性淀粉。Liu 等^[7]发现中国木瓜籽胶通过包裹淀粉颗粒和影响直链淀粉的相互作用防止了淀粉老化,增加了胶/虎果块茎淀粉混合物的冻融稳定性。Lin 等^[8]报道黄原胶和魔芋胶显著提高了绿豆淀粉凝胶的 K 值和动态模量(G' , G''),降低了酶解速率。

天然淀粉较小的比表面积和孔隙体积限制了其作为吸附剂的应用,多孔淀粉的开发能有效改善该缺陷^[9]。多孔淀粉,又称有孔淀粉或微孔淀粉,是指在淀粉表面和内部含有孔洞结构的一类淀粉^[10]。相比于天然淀粉,多孔淀粉的表面出现明显的空洞(图 1)^[11],其表面孔洞由表面向中心延伸,1.0~1.5 μm 的微孔均匀或不均匀地分布于淀粉颗粒表面^[12]。李敏等^[13]发现生物酶法制备的多孔淀粉孔径大小从 5.39 nm 提升至 11.13 nm,比表面积从 1.57 m^2/g 提升至 3.91 m^2/g ,高比表面积和孔体积赋予了其优良的吸附和缓释特性。包彤红^[14]报道经过溶剂交换法改性后,木薯多孔淀粉的吸油率从 91.87% 增加至 174.33%,吸水率从 83.00% 显著增加到 895.77%。目前,多种改性方法已被应用于制备多孔淀粉,且多孔淀粉的生产效率和理化性质与其制备方法息息相关,因此不同制备方法之间对比也是本文的研究重点之一。近年来,多孔淀粉在食品领域的应用也得到广泛关注,其被用于食品营养物质运载、脂肪替代和食品保鲜等领域。Zhao 等^[15]设计了植酸-壳聚糖包裹的多孔淀粉载体材料用于口服给药,该递送体系实现了疏水性紫杉醇在结肠内持续释放,有效提升了其生物利用度。通过喷雾干燥法将红薯多孔淀粉和阿拉伯胶制备成粉末黄油,其可以替代传统的食用黄油,从而改善传统黄油因脂肪含量高而易氧化变质,影响

产品质量和货架期的缺陷^[16]。Lei 等^[17]将紫甘薯多孔淀粉基微胶囊应用于橄榄油的负载,结果表明该负载材料具有良好的橄榄油负载率和氧化稳定性,且工艺易于规模化,有潜力成为一种新兴的食品工业油保护方法。

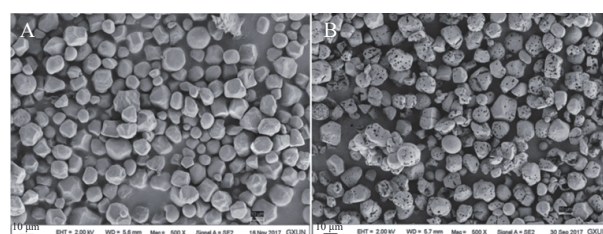


图 1 玉米淀粉(A)和微孔玉米淀粉(B)的 SEM 照片(500 $\times$)^[11]

Fig.1 The SEM pictures of core starch (A) and porous core starch (B) (500 $\times$)

为了进一步促进多孔淀粉在食品工业的实际应用,本文通过对比物理、化学和生物酶法制备多孔淀粉中存在的优势及不足,提出多孔淀粉在制备方法中亟需改进的工艺优化建议。本文综述了多孔淀粉在食品领域的应用现状及其前景,主要包括多孔淀粉在食品营养物质运输、脂肪替代物制备以及食品活性包装领域的应用。本综述提供的信息将有助于人们了解多孔淀粉在食品领域应用中的潜力,以及拓展改性淀粉在食品工业中的实际应用。

1 多孔淀粉的制备方法

1.1 物理法制备多孔淀粉

物理法是指利用物理手段通过破坏淀粉结构产生孔洞,常见方法有:机械挤压法、微波法、超声波法、湿热处理法和冻融等。机械挤压法通常由混合、搅拌、加热、喷涂和膨胀几个步骤对淀粉进行改性,在淀粉糊喷涂过程中采取强大的压力差快速蒸干水分,从而使淀粉中形成疏松的孔洞结构^[18]。机械挤压法制备的多孔淀粉的孔隙率与含水率呈负相关,与温度呈正相关。然而,机械挤压法制备多孔淀粉具有孔径不均匀的缺点,制备效率不高。

微波法具有高效、环保的特点,其制备效率主要受微波功率、处理时间和淀粉用量的影响^[19]。微波的热效应促使淀粉颗粒在交变磁场中通过分子摩擦形成多孔结构。如图 2A 所示,排列有序的淀粉颗粒

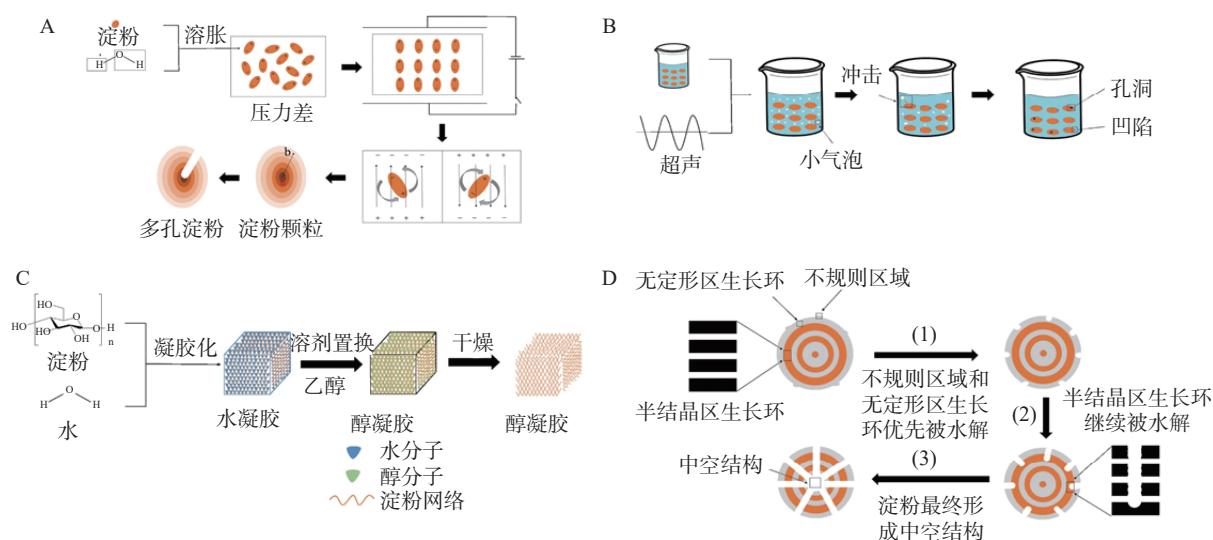


图2 微波法(A)、超声法(B)、溶剂置换法(C)和酶解法(D)制备多孔淀粉机理^[20]

Fig.2 Preparation mechanism of porous starch by (A) microwave method (A), ultrasonic method (B), solvent exchange and (C) enzymatic hydrolysis (D)

在微波产生的交变磁场作用下发生高频振动。高频振动产生的热能促使淀粉粒中的水分迅速蒸发,在淀粉粒内部产生高压,从而导致淀粉颗粒膨胀并破裂,形成孔隙^[21]。微波法制备多孔淀粉简单经济,但具有一定的局限性,其不适用于制备细孔淀粉。类似于微波处理,超声处理具有低能耗、操作便利等特点,如图2B,超声导致液体中出现气泡,在不停的声波刺激中,气泡体积膨胀直至破裂,破裂产生的冲击波导致周围的淀粉颗粒表面出现孔洞^[22]。超声波处理时间、功率和频率是影响多孔淀粉孔径大小的重要因素, Hu 等^[23]报道与单频超声(20 kHz 或 25 kHz)处理相比,双频超声(20 kHz+25 kHz)处理更能有效制备多孔淀粉。另外,微波和超声波处理常用于辅助酶解法制备多孔淀粉,有效提高酶解多孔淀粉得率,制备的多孔淀粉孔径、孔深和孔数目与对照组相比效果更好,表现出较好的吸油率和吸附特性^[24]。

湿热处理是指在较低的水分含量(35%以下),和较高温度(100℃以上)下对淀粉进行改性处理,湿热处理能有效改善多孔淀粉的理化性质,但是其一般不单独应用于多孔淀粉的制备^[25]。张倩倩等^[26]发现与普通酶法相比,湿热处理辅助酶法制备多孔淀粉其酶解时间缩短一半便可达到同等的吸附效果,有效提高了酶解制备多孔淀粉的效率。冻融处理是将淀粉颗粒进行冷冻和解冻循环的一个过程,多次的冻融循环能促使淀粉分子内部相分离和冰晶生长,从而影响淀粉的微观结构和理化性质,该方法常被用于辅助酶处理制备多孔淀粉^[27]。由于冻融处理后淀粉颗粒中出现孔洞,增强了淀粉对酶解的敏感性,因此冻融辅助酶处理淀粉比单独酶处理产生更多的孔隙,经联合处理后的多孔淀粉对水、油的吸附能力、溶胀能力和溶解度均有所提高^[28]。

物理法具有操作便捷、安全、无化学残留、经济等优势,但是物理法制备多孔淀粉往往会由于水分的

不均匀分布导致多孔淀粉的孔径分布不均,而且物理法加工伴随的较高温度也会破坏淀粉结构,不利于多孔淀粉的工业推广和应用^[29]。因此,物理加工方法常被应用于化学和生物酶改性的预处理手段,经物理加工处理后的天然淀粉颗粒对化学法和生物酶法改性更加敏感,提高了其生产效率和改性效果^[30-31]。

1.2 化学法制备多孔淀粉

化学法通过酸、交联剂和酯化剂等化学试剂的处理使淀粉颗粒表面出现由外向内延伸的孔洞^[32]。化学法主要包括溶剂交换法、乳液交联法和酸水解法等,溶剂交换法是利用淀粉水凝胶网络中的水与溶剂(如乙醇、丙酮)进行交换,避免水凝胶结构在直接风干下坍塌和收缩^[14]。如图2C所示,水溶性直链淀粉凝胶化后形成网状结构,淀粉凝胶网络之间吸收了大量的水分子。随后,用乙醇取代凝胶网络中的水,并通过真空干燥去除乙醇得到多孔淀粉。溶剂交换法制备的多孔淀粉的结构受溶剂浓度和干燥条件的影响^[33]。溶剂交换法制备的多孔淀粉颗粒表面存在大量的空洞,呈珊瑚状,且溶剂交换处理没有改变淀粉的结晶类型,制备过程未产生新的官能团^[14]。

乳液交联法也是实验室常用于制备多孔淀粉的方法之一,该方法将淀粉溶液作为水相分散于油相中,在水相中发生交联反应从而制备具有多孔结构的淀粉颗粒。乳液交联法降低了淀粉分子间的相互作用力,制备的多孔淀粉表面结构丰富,比表面积大,表现出良好的吸附能力。乳液交联法解决了多孔淀粉结构易碎的缺陷,其制备工艺简单,不需要价格昂贵的酶,降低成本,有利于在工业中推广。在污水净化中有较好的应用前景^[34]。魏晓岩等^[35]发现 N, N-亚甲基双丙烯酰胺交联的多孔淀粉表面粗糙,存在大量的空洞,吸附性能力明显增强,能有效吸附废水中的有害物质。

酸水解法则是在保持淀粉颗粒完整性的基础

上,利用盐酸使天然淀粉部分水解,从而在淀粉颗粒表面形成孔洞结构。酸水解是从淀粉颗粒的表面逐渐向颗粒内部进行,从在表面形成的凹痕逐步水解扩大形成凹坑和孔洞,最终反应进行到颗粒中心,淀粉核被反应成空腔结构,且空腔与孔洞之间有微细通道连接。与生物酶法相比,酸水解法有极高的价格优势,但是其反应速率较慢,随机性强,难以形成稳定有效的孔洞,目前仍停留在实验室阶段^[36]。酸法醇介质则是在酸水解法的基础上,利用乙醇作为介质改进酸水解的效率,该方法具有工艺过程简单,容易控制的特点。乙醇介质的存在可以影响水分子进入淀粉颗粒内部与淀粉的糖苷键发生的反应和速度,因此通过控制乙醇浓度可以将淀粉在高于水介质中糊化温度的情况下发生水解反应,并保持淀粉颗粒的基本结构,进而有效加快淀粉水解的速率,缩短反应时间,降低生产成本^[37]。

近年来,多种新型化学法被应用于制备多孔淀粉。分子插入法是通过致孔剂结合酸间接处理来制备多孔淀粉,Pourjavadi 等^[38]选择碳酸钙颗粒作为致孔剂处理天然淀粉,然后利用盐酸去淀粉颗粒中存在的碳酸钙颗粒,从而获得多孔淀粉。该天然淀粉制备的水凝胶作为亚甲基蓝吸附剂,吸附量达到 $714.29 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。另外,有研究发现巯基琥珀酸能与淀粉形成分子间氢键,相比于盐酸,巯基琥珀酸处理有利于形成更多的多孔结构^[39]。化学法相对于物理法和生物酶法具有设备要求低,耗能小,生产成本低等优势,但化学方法制备过程中容易造成化学残留,随机性强,孔隙度低等缺陷,不利于其在食品工业中的推广应用。

1.3 生物酶法制备多孔淀粉

生物酶法是利用酶对淀粉分子结构的水解作用,从而催化淀粉颗粒的内部和表面产生孔隙,该方法具有反应条件温和,催化效率和底物特异性高等特点^[40]。经研究发现, α -淀粉酶和糖化酶水解淀粉具有良好的效果,被广泛应用于多孔淀粉的制备。单一酶的作用效果有限,因此往往需结合多种酶共同作用来制备多孔淀粉^[41-42]。Zhang 等^[43]和吴季勤等^[44]利用 α -淀粉酶和糖化酶成功制备多孔淀粉,并评估了其吸附性能。在酶解过程中,多孔淀粉的孔洞是沿着非还原性末端逐渐形成的,孔隙的尺寸随着水解程度变深变大,从而允许水渗透到淀粉颗粒内部^[45]。其机理如图 2D 所示,淀粉颗粒的不规则内部和无定型区域被葡萄糖淀粉酶水解,然后酶沿着淀粉分子的非还原端水解。此外,由于淀粉的水膨胀, α -淀粉酶更容易进入淀粉颗粒内部进行随机内切,从而为糖化酶提供了新的非还原端,使水解不断深入淀粉分子内部,最后在酶的作用下,淀粉的表面和内部形成中空结构。酶用量、反应环境等因素都不同程度地影响酶解效率和多孔淀粉的吸附效果,其影响效果排序为:酶用量>反应时间>pH>酶配比>反应温度>淀粉浓

度^[10]。另外,生物酶制备多孔淀粉的过程中改变了淀粉颗粒的结构,其理化性质也随之改变, α -淀粉酶和糖化酶酶解处理能明显降低淀粉的糊化粘度和提高其糊化温度和相对结晶度^[46]。

生物酶法制备多孔淀粉的生产成本较高,且单一使用酶制备多孔淀粉存在局限性。近年来,研究人员开始将其他加工技术应用到酶法制备多孔淀粉中。最常见的就是结合物理加工方法来辅助酶解制备多孔淀粉,利用物理预处理加工对淀粉颗粒的破坏作用,能有效提高淀粉颗粒对酶的敏感性,从而节约酶的用量以及酶解时间,提高多孔淀粉的制备效率。干热预处理可明显破坏淀粉的表面结构,促进了酶解反应的进行,有效提高了酶解效率,其制备的多孔淀粉比表面积和总孔容显著增大,表现出更强的吸附能力。吴丽荣等^[47]发现超声预处理有助于复合酶法制备多孔淀粉,超声波处理的淀粉表面出现皱褶、裂缝和凹陷,酶解后的淀粉表面出现了多而深且较大的孔。生物酶法结合化学改性也是提高酶解效率的有效手段之一,董芝宏等^[48]发现三偏磷酸钠(Sodium trimetaphosphate, STMP)交联可以提高酶解淀粉颗粒的稳定性,提高用酶量,使颗粒多孔增加,从而提高吸附率。OSA 改性的多孔淀粉则是表现出更好的精油保留能力,因为 OSA 中的长链烯基与精油分子形成范德华力,减小了精油挥发程度,提高缓释效果。相对于物理法和化学法制备多孔淀粉,生物酶法制备多孔淀粉具有独特的优势,表现在安全,工艺简单,酶制剂易得,工艺条件易控制等。然而,生物酶法制备多孔淀粉在食品工业的大规模应用往往受其较高的生产成本所限制,因此探究如何降低酶用量,提高酶解效率是生物酶法制备多孔淀粉的重要研究方向,如将生物酶法结合物理法、化学法等其他方法是提高酶解效率的有效手段。

2 多孔淀粉在食品领域的应用

天然淀粉具有安全无毒、易降解等特点,经改性后的多孔淀粉具有高比表面积和孔体积,表现出优良的吸附和缓释特性。近年来,多孔淀粉在食品领域的应用受到广泛的关注^[49],其主要应用在营养物质运载、脂肪替代以及食品活性包装上。

2.1 食品营养物质运载

随着食品科技的发展,人们对功能性食品的需求一直在增长,具有特殊功能的食品营养物质可以有效影响人体的身体机能,在心理疾病,慢性疾病的预防和发展中发挥重要作用,以及对于具有特殊饮食要求的人群具有重要意义,如病人、老人、儿童、特殊工作者等^[50]。然而,常见的营养物质或生物活性化合物很容易被热疗、光束和氧气降解,或者在胃肠道中被消化酶水解失活。因此,国内外学者往往将食品营养物质进行包埋递送,从而改善其生物利用度^[51]。

多孔淀粉的多孔隙结构能将食品营养物质束缚在淀粉孔隙中,多孔淀粉的包覆能避免被运载营养物

质被外界环境所干扰,从而达到营养物质的保护作用^[52]。近年来,多孔淀粉由于其良好的生物相容性、可降解性、吸附性和价格低廉等优点已经被广泛应用于食品营养物质的负载^[9,53],包括日常食品^[16]、维生素^[54-55]、多酚^[56]、益生菌^[57]及其他生物活性物质^[58]等。传统食用黄油由于脂肪含量高容易氧化变质,严重影响其感官品质和货架期,傅新征等^[16]以红薯多孔淀粉和阿拉伯胶为壁材包覆的粉末黄油具有良好的抗氧化性,且易于使用和储运。维生素、多酚和益生菌等生物活性物质在保健食品领域发挥重要的作用^[59-60],这些活性物质在食品工业中的实际应用受到其吸收率低和生物利用度差的限制,多孔淀粉可以为这些活性物质提供强保护以应对应激环境,如酸、盐和热环境(图3)。多孔淀粉通过化学吸附或强表面络合多酚类物质,在保持多酚生物活性不被破坏的基础上提高了其在人体内的生物可及性^[61]。多孔淀粉的气孔、通道和空腔结构为益生菌提供了生存空间,具有较高的益生菌装载效率,多孔淀粉负载可以避免益生菌受胃肠道环境的影响,促进人体胃肠健康^[57]。另外,食品加工过程容易导致食品风味物质的损失,严重影响食品的感官品质,风味物质的封装可以防止风味物质发生不必要的化学反应^[62],延长其储存时间^[63]。Belingheri等^[62]评估了多孔淀粉作为风味物质运输的潜在可能性,然而多孔淀粉对于风味物质的运载还鲜有报道,在未来的研究中进一步探究其对风味物质的运输具有重要意义。

2.2 食品脂肪代替

脂肪是人类生存不可或缺的营养物质^[64],但脂肪的过量摄入会导致各种健康问题,如肥胖、高血压和心血管等慢性疾病,甚至会提高患癌症风险^[65]。食品的脂肪含量也关系到消费者对于该产品的购买欲望。近年来,国内外学者发现多孔淀粉经交联、酯化或醚化等处理后与脂肪具有类似的口感和质地,可以作为脂肪的替代物。目前,多孔淀粉的脂肪替代物主

要被应用于制备低脂肉制品^[66]、人造黄油^[67]及蛋黄酱^[68]等。钱和等^[69]利用多孔淀粉替代贡丸中的部分脂肪,改善了低脂贡丸的质构特性,降低了贡丸的总热量及生产成本。传统的食用黄油因为脂肪含量高易氧化变质,严重影响其产品质量和货架期,研究人员发现多孔淀粉经改性处理可优化其流变学和感官性质,制备的淀粉基脂肪替代物拟脂拟油性较好,可替代传统黄油为食品提供润滑性以及黏稠度。吴珊等^[70]通过工艺优化制备的交联氧化酯化多孔淀粉比普通淀粉具备更强的粘稠性和乳化性,有利于作为脂肪替代物应用于沙拉酱的制作中。总之,多孔淀粉形成的网络凝胶结构可以截留大量的水分子,从而具有一定的流动性,赋予淀粉基脂肪替代物类似脂肪的质感和口感^[71]。多孔淀粉基脂肪替代物由于其热量低、来源广、产量高和生物相容性好等特点,被认为是理想的脂肪替代物。多孔淀粉基脂肪替代物能保持脂肪的优良特性,并缓解脂肪对人体健康的不利影响^[72],可以很好地满足特定消费人群对于低脂和健康饮食的需求,在保健食品领域具有良好的应用前景。

2.3 食品包装

在食品包装中添加具有抗菌或抗氧化的活性成分,可以延缓食源性病原体和氧化引起的食品质量恶化^[73]。多孔淀粉经过喷雾干燥或冷冻干燥微胶囊化可以保护这些活性抗氧抗菌成分不受恶劣环境的影响,调节其释放行为。因此多孔淀粉可以作为这些活性成分的缓释或控释材料,从而延长其在活性包装膜的作用时间或满足特定的保存要求。Miao等^[74]发现多孔淀粉对茶多酚具有良好的吸附能力,以玉米淀粉/茶多酚负载的多孔淀粉为材料铸造的可降解食品包装膜成分分布均匀,具有良好的机械性能、防紫外线性能、热稳定性和抗氧化性能。类似地,以负载茶多酚的多孔淀粉为芯材,麦芽糊精为壁材,采用冷冻干燥法制备微胶囊,并将其作为活性膜中茶多酚的缓释载体,该缓释活性膜具有抗氧化活性和缓释性能,

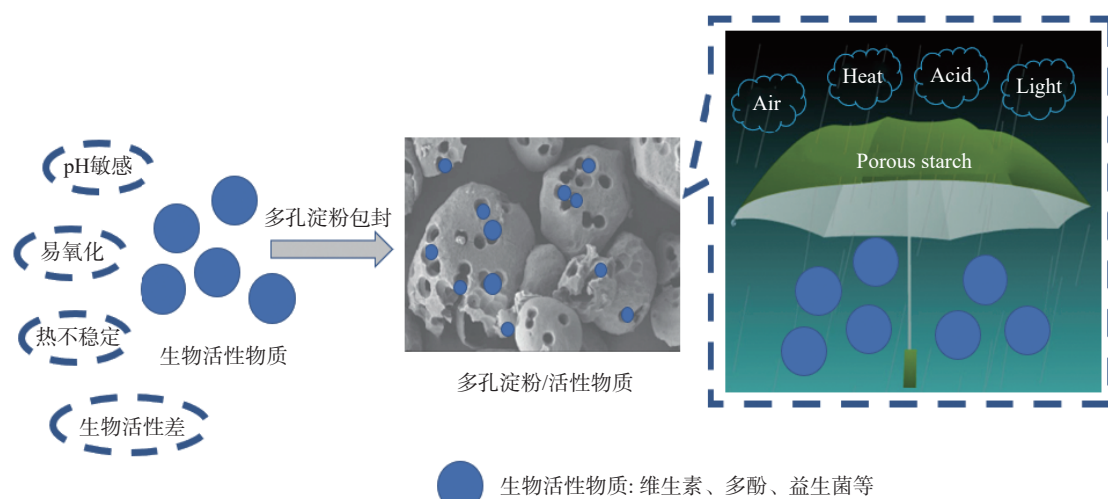


图3 多孔淀粉对生物活性物质的保护功能示意图

Fig.3 Schematic diagram of the protective effect of porous starch on bioactive substances

可有效地延长食品的保质期^[63]。由于淀粉良好的生物相容性,多孔淀粉的引入可以改善复合包装材料的延展性和热稳定性。Miao 等^[75]添加负载茶多酚的多孔淀粉能将聚乙烯醇包装膜的拉伸强度从 5.09 MPa 增加到 25.58 MPa,断裂延伸率从 126% 增加至 346%。多孔淀粉作为良好的生物活性物质负载体,以及其良好的生物相容性,在可降解包装薄膜中具有极大的应用潜力。然而目前国内关于以负载抗氧化和抗菌物质的多孔淀粉为基的包装薄膜研究较少,探索利用多孔淀粉优良的负载特性负载具有抗氧化和抗菌等特性的精油或金属氧化物将是个有趣的研究方向。

2.4 其他

随着食品科技的发展,多孔淀粉在食品领域的研究也愈发深入。多孔淀粉较大的比容积和比表面积赋予了其良好的吸水、吸油能力。利用多孔淀粉优异的吸油能力,多孔淀粉被应用于功能性食用油的制备,江慧娟等^[76]利用多孔淀粉包埋制得的粉末油脂能显著延长食用紫苏籽油的氧化时间,有效延长其保质期。邱英华等^[77]以木薯多孔淀粉为芯材,吸附蚕蛹油制备的蚕蛹油微胶囊,可以直接食用并长期稳定贮存。食用精油具有挥发性强、稳定性差、香气不持久和携带不便等缺点,依赖于多孔淀粉的高吸油特性,多孔淀粉在食用精油的固定和缓释的应用具有潜力。固化后的杜香精油粉末比未固化精油的缓释持香效果更显著,以及表现出更好的热学稳定性^[78]。付秋莹等^[79]发现羧甲基壳聚糖和海藻酸钠包覆的百里香精油/多孔淀粉具有良好的缓释性能,可以延长百里香精油的主要成分麝香草酚在室温下的释放时间。另外,天然淀粉的多羟基的亲水结构导致其乳化效果较弱,多孔淀粉经丁酸酐改性后具备较好的乳化性和乳化稳定性,该乳液在食品和医药等行业的药物包埋和靶向释放中有很好的应用前景^[79]。谢梦焕等^[80]以 3-氯-2 羟丙基三甲基氯化铵为醚化剂,采用碱催化干法制备了阳离子多孔淀粉,阳离子多孔淀粉能有效吸收部分卷烟烟气中的有害成分(小分子醛),从而降低烟气对人体的伤害。总之,多孔淀粉特殊的多孔结构赋予了其优异的吸附特性,结合吸附特性和可食用性,多孔淀粉在食品领域的应用具有较好的前景,在未来研究中亟需进一步探究。

3 结论与展望

多孔淀粉是一种经物理、化学或者生物酶法改性制备的一种具有蜂窝状多孔结构的改性淀粉,具有较大的比表面积和优良的吸附性能,兼具生物相容性好和生物可降解等优点。常用的多孔淀粉制备方法都存在不足之处,如物理法制备的多孔淀粉表面孔隙不均匀,化学法会导致化学残留,生物酶法则是制备成本高,经济效益差等,这些方法亟需进一步优化工艺以实现在食品工业的广泛推广。超声、微波等物理加工或者化学改性辅助酶制备多孔淀粉有效提高淀粉颗粒的酶解效率,降低生产成本,促进多孔淀粉

在食品工业的大规模应用。多孔淀粉的多孔结构赋予了其极强的吸附缓释能力,在食品领域被广泛应用于生物活性物质和营养物质的负载缓释。例如,多孔淀粉负载的食品营养物质能受胃肠道环境中的干扰,提高其生物利用率。添加负载抗菌、抗氧化活性物质的多孔淀粉可提高食品活性包装的抗氧化和抗菌能力,从而延长食品的保质期。为了进一步促进多孔淀粉在食品工业的实际应用,未来有必要继续优化多孔淀粉的制备方法,改进多孔淀粉制备的效率以及成孔质量、孔隙率和孔隙稳定性。另外,不同来源的天然淀粉具有不同的结构特征,包括粒径、结晶结构和直/支链比例等,探究多孔淀粉的制备效率和吸附性能与天然淀粉来源之间的关系可能对多孔淀粉在食品工业中的推广具有重要意义。

参考文献

- [1] ZHENG J, HUANG S, ZHAO R Y, et al. Effect of four viscous soluble dietary fibers on the physicochemical, structural properties, and *in vitro* digestibility of rice starch: A comparison study[J]. *Food Chemistry*, 2021, 362: 130181.
- [2] RONG L Y, SHEN M Y, WEN H L, et al. Effects of xanthan, guar and *Mesona chinensis* Benth gums on the pasting, rheological, texture properties and microstructure of pea starch gels[J]. *Food Hydrocolloids*, 125: 107391.
- [3] RONG L Y, SHEN M Y, WEN H L, et al. Eggshell powder improves the gel properties and microstructure of pea starch-*Mesona chinensis* Benth polysaccharide gels[J]. *Food Hydrocolloids*, 125: 107375.
- [4] RAZA H, LIANG Q F, AMEER K, et al. Dual-frequency power ultrasound effects on the complexing index, physicochemical properties, and digestion mechanism of arrowhead starch-lipid complexes[J]. *Ultrason Sonochem*, 2022, 84: 105978.
- [5] ZENG Q H, ZHANG L, LIAO W Y, et al. Effect of xanthan gum co-extruded with OSA starch on its solubility and rheological properties[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 147: 111588.
- [6] GENG D H, LIN Z, LIU L, et al. Effects of ultrasound-assisted cellulase enzymatic treatment on the textural properties and *in vitro* starch digestibility of brown rice noodles[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 146: 111543.
- [7] LIU H M, MIAO W B, WANG R, et al. Improvement of functional and rheological features of tigernut tuber starch by using gum derived from Chinese quince seeds[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 143: 111180.
- [8] LIN S, LIU X N, CAO Y, et al. Effects of xanthan and konjac gums on pasting, rheology, microstructure, crystallinity and *in vitro* digestibility of mung bean resistant starch[J]. *Food Chemistry*, 2021, 339: 128001.
- [9] 王华瑜,沈朝璐,袁玥,等.负载姜黄素的玉米多孔淀粉微球的优化制备、理化性质及释放研究[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(3): 182-188. [WANG H Y, SHEN Z L, YUAN Y, et al. Optimized preparation, physicochemical properties, and *in vitro* release research of curcumin loaded corn porous starch microspheres[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49(3): 182-188.]
- [10] 薛瑞,杨良竹,王永利,等.大米多孔淀粉制备工艺的研究[J]. *广州化工*, 2020, 48(18): 66-69. [XUE R, YANG L Z, WANG Y L, et al. Study on preparation method of rice porous starch[J].

Guangzhou Chemical Industry, 2020, 48(18): 66-69.]

[11] 杨慧, 樊艳叶, 赵佩莹, 等. 微孔淀粉对2,4-二硝基苯酚的负载与缓释[J]. 食品工业科技, 2019, 40(17): 13-18. [YANG H, FAN Y Y, ZHAO P Y, et al. Loading and sustained release of 2, 4-dinitrophenol from microporous starch[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(17): 13-18.]

[12] 施晓丹, 汪少芸. 多孔淀粉的制备与应用研究进展[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(2): 187-195. [SHI X D, WANG S Y. Research progress in preparation and application of porous starch[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(2): 187-195.]

[13] 李敏, 汪月, 苟丽娜, 等. 丁酸酐改性多孔淀粉作为 Pickering 乳液稳定剂的应用研究[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(18): 198-204, 212. [LI M, WANG Y, GOU L N, et al. Application of butyric anhydride modified porous starch as Pickering emulsion stabilizer[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(18): 198-204, 212.]

[14] 包尔红, 司美双, 吴修利. 溶剂交换法制备木薯多孔淀粉及吸附性能研究[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(3): 49-52. [BAO G H, SI M S, WU X L. Preparation of tapioca porous starch by solvent exchange method and its adsorption properties[J]. Cereals & Oils, 2022, 35(3): 49-52.]

[15] ZHAO B B, DU J, ZHANG Y Y, et al. Polysaccharide-coated porous starch-based oral carrier for paclitaxel: Adsorption and sustained release in colon[J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 291: 119571.

[16] 傅新征, 叶珊珊, 吴玉琼, 等. 红薯多孔淀粉应用于喷雾干燥法制备粉末黄油的研究[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(2): 74-78. [FU X Z, YE S S, WU Y Q, et al. The application of sweet potato porous starch in preparation of powder butter by spray drying[J]. Cereals & Oils, 2022, 35(2): 74-78.]

[17] LEI M, JIANG F C, CAI J, et al. Facile microencapsulation of olive oil in porous starch granules: Fabrication, characterization, and oxidative stability[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 111: 755-761.

[18] OFFIAH V, KONTOGIORGOS V, FALADE K O. Extrusion processing of raw food materials and by-products: A review[J]. Critical Reviews In Food Science and Nutrition, 2019, 59(18): 2979-2998.

[19] NAWAZ H, SHAD M A, SALEEM S, et al. Characteristics of starch isolated from microwave heat treated lotus (*Nelumbo nucifera*) seed flour[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 113: 219-226.

[20] CHEN J H, WANG Y X, LIU J, et al. Preparation, characterization, physicochemical property and potential application of porous starch: A review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 148: 1169-1181.

[21] ZHANG Y N, CHEN P, LIU S Y, et al. Effects of feedstock characteristics on microwave-assisted pyrolysis-A review[J]. Biore-source Technology, 2017, 230: 143-151.

[22] ZHU F. Impact of ultrasound on structure, physicochemical properties, modifications, and applications of starch[J]. Trends in Food Science & Technology, 2015, 43(1): 1-17.

[23] HU A J, JIAO S T, ZHENG J, et al. Ultrasonic frequency effect on corn starch and its cavitation[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 60(2): 941-947.

[24] 王伟健, 尹显洪, 雷福厚, 等. 微波超声波辅助酶解法制备多孔木薯淀粉[J]. 中国食品添加剂, 2019, 30(12): 160-170. [WANG W J, YIN X H, LEI F H, et al. Preparation of porous tapioca starch

by microwave ultrasoundassisted enzymatic hydrolysis[J]. China Food Additives, 2019, 30(12): 160-170.]

[25] 刘庆庆, 陆红佳, 游玉明, 等. 湿热处理温度对多孔淀粉理化性质的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(7): 61-66. [LIU Q Q, LU H J, YOU Y M, et al. Effect of heat-moisture treatment temperature on physicochemical properties of porous starch[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(7): 61-66.]

[26] 张倩倩, 徐超, 曹俊英, 等. 湿热处理辅助酶法制备大米多孔淀粉及其性质研究[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(1): 66-71. [ZHANG Q Q, XU C, CAO J Y, et al. Preparation and properties of rice porous starch assisted by hydrothermal treatment[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(1): 66-71.]

[27] WANG L, XIE B J, XIONG G Q, et al. The effect of freeze-thaw cycles on microstructure and physicochemical properties of four starch gels[J]. Food Hydrocolloids, 2013, 31(1): 61-67.

[28] ZHAO A Q, YU L, YANG M, et al. Effects of the combination of freeze-thawing and enzymatic hydrolysis on the microstructure and physicochemical properties of porous corn starch[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 83: 465-472.

[29] LUO X M, CAO J H, GONG H Y, et al. Phase separation technology based on ultrasonic standing waves: A review[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 48: 287-298.

[30] 王建坤, 谢鹏远, 李凤艳, 等. 微波辅助多孔马铃薯淀粉的制备及其最佳工艺参数[J]. 天津工业大学学报, 2015, 34(5): 18-22.

[31] WANG J K, XIE P Y, LI F Y. Synthesis of porous potato starch with microwave and its optimum polymerization conditions[J]. Journal Of Tianjin Polytechnic University, 2015, 34(5): 18-22.]

[32] 王伟健, 夏璐, 雷福厚, 等. 微波超声波辅助酸酶序解法制备木薯多孔淀粉[J]. 食品科技, 2019, 44(6): 308-315. [WANG W J, XIA L, LEI F H, et al. Preparation of cassava porous starch by microwave ultrasonic assisted acid enzyme sequencing[J]. Food science and technology, 2019, 44(6): 308-315.]

[33] 余世锋, 邢禹哲, 宫春宇. 臭氧氧化处理对糯性玉米淀粉颗粒微观结构特性的影响[J]. 食品科技, 2021, 46(6): 234-237. [YU S F, XING YZ, GONG C Y. Effects of ozone oxidation treatment on the microstructure properties of waxy corn starch[J]. Food Science And Technology, 2021, 46(6): 234-237.]

[34] OLIYAEI N, MOOSAVI-NASAB M, TAMADDON A M, et al. Preparation and characterization of porous starch reinforced with halloysite nanotube by solvent exchange method[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 123: 682-690.

[35] 常贵娟, 肖武, 李祥村, 等. 乳液交联法制备多孔淀粉及其吸附性能[J]. 化工进展, 2014, 33(5): 1290-1295. [CHANG G J, XIAO W, LI X C, et al. Preparation and adsorption properties of porous starch prepared by emulsion crosslinking method[J]. Chemical Industry And Engineering Progress, 2014, 33(5): 1290-1295.]

[36] 魏晓岩, 汪月, 杨素, 等. 交联淀粉吸附特性及吸附动力学研究[J]. 食品与发酵科技, 2018, 54(1): 50-56. [WEI X Y, WANG Y, YANG S, et al. Study on adsorption characteristics and adsorption kinetics of crosslinked starch[J]. Food and Fermentation Sciences & Technology, 2018, 54(1): 50-56.]

[37] 杨巍巍, 印方平. 酸法制备玉米多孔淀粉的工艺优化及其产品特性的研究[J]. 现代食品科技, 2009, 25(5): 538-541, 545. [YANG W W, YIN F P. Preparation of corn porous starch by acid hydrolysis and its properties[J]. Modern Food Science And Technology, 2009, 25(5): 538-541, 545.]

[38] 王宇高, 张黎明. 酸法醇介质制备玉米多孔淀粉[J]. 粮食与饲料工业, 2009(6): 28-30. [WANG Y G, ZHANG L M. Preparation of porous corn starch with acid-alcohol media[J]. Cereal &

Feed Industry, 2009(6): 28–30.]

[38] POURJAVADI A, NAZARI M, KABIRI B, et al. Preparation of porous graphene oxide/hydrogel nanocomposites and their ability for efficient adsorption of methylene blue[J]. *RSC Advances*, 2016, 6(13): 10430–10437.

[39] BAO L P, ZHU X Y, DAI H X, et al. Synthesis of porous starch xerogels modified with mercaptosuccinic acid to remove hazardous gardenia yellow[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016, 89: 389–395.

[40] 包彤红, 司美双, 吴修利. 复合酶法油莎豆多孔淀粉的制备及其性质研究[J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(14): 160–164.

[BAO G H, SI M S, WU X L. Preparation and properties of porous starch of cyperus esculentus by compound enzymes[J]. *Food Research and Development*, 2022, 43(14): 160–164.]

[41] BENAVENT-GIL Y, ROSELL C M. Morphological and physicochemical characterization of porous starches obtained from different botanical sources and amylolytic enzymes[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2017, 103: 587–595.

[42] AGGARWAL P, DOLLIMORE D. A thermal analysis investigation of partially hydrolyzed starch[J]. *Thermochimica Acta*, 1998, 319(1–2): 17–25.

[43] ZHANG B, CUI D P, LIU M Z, et al. Corn porous starch: Preparation, characterization and adsorption property[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2012, 50(1): 250–256.

[44] 吴季勤, 张泽英, 严奉伟. 大米多孔淀粉的制备及其吸附性能研究[J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(10): 4626–4628. [WU J Q, ZHANG Z Y, YAN F W. The preparation and adsorbing capability of porous starch from rice[J]. *Journal of Anhui Agri*, 2013, 41(10): 4626–4628.]

[45] AO Z, SIMSEK S, ZHANG G Y, et al. Starch with a slow digestion property produced by altering its chain length, branch density, and crystalline structure[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007, 55(11): 4540–4547.

[46] 王翠玲, 戴常军, 王晶等. 不同酶处理对多孔大米淀粉性能的影响[J]. *中国食品学报*, 2023, 23(5): 21–30. [WANG C L, DAI C J, WANG J, et al. Effects of different enzyme treatments on the properties of porous rice starch[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2023, 23(5): 21–30.]

[47] 吴丽荣, 叶兴乾, 田金虎, 等. 超声辅助复合酶法制备碎米多孔淀粉及结构比较[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(6): 120–126.

[WU L R, YE X Q, TIAN J H, et al. Preparation of porous broken rice starch by ultrasound assisted composite enzymatic method and comparison of their properties[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2020, 35(6): 120–126.]

[48] 董芝宏, 凌嘉艳, 黄欣颖, 罗志刚. 3 种多孔淀粉载体性质及吸附精油缓释性研究[J]. *粮食与油脂*, 2019, 32(6): 57–61. [DONG Z H, LING J Y, HUANG X Y, et al. Study on properties of three porous starch carriers and sustained release of essential oil adsorbed[J]. *Cereals & Oils*, 2019, 32(6): 57–61.]

[49] 陶利, 渠广民, 李兆明, 等. 多孔淀粉在食品药品中的应用进展[J]. *食品与药品*, 2018, 20(6): 480–483. [TAO L, QU G M, LI Z M, et al. Application of porous starch in food and medicine[J]. *Food and Drug*, 2018, 20(6): 480–483.]

[50] MUTH A K, PARK S Q. The impact of dietary macronutrient intake on cognitive function and the brain[J]. *Clinical Nutrition*, 2021, 40(6): 3999–4010.

[51] GAUTAM M, SANTHIYA D. Pectin/PEG food grade hydrogel blend for the targeted oral co-delivery of nutrients[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2019,

577: 637–644.

[52] HAN X Y, MA P, SHEN M Y, et al. Modified porous starches loading curcumin and improving the free radical scavenging ability and release properties of curcumin[J]. *Food Research International*, 2023, 168: 112770.

[53] 王宇霞, 马云翔, 苟丽娜, 等. 羧甲基多孔淀粉表征及其对槲皮素吸附研究[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(20): 105–111.

[WANG Y X, MA Y X, GOU L N, et al. The characterization of carboxymethyl porous starch and its adsorption on quercetin[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(20): 105–111.]

[54] JASIM A, LINU T, MEHRAJFATEMA Z, et al. Dry granulation of vitamin D₃ and iron in corn starch matrix: Powder flow and structural properties[J]. *Food Research International*, 2023, 165: 112497.

[55] 侯晓苹, 赵娟, 侯晓莉, 等. 维生素 C、茶碱和 BSA 在微孔淀粉上的吸附/释放动力学考察[J]. *中国医药工业杂志*, 2015, 46(8): 860–865, 914. [HOU X P, ZHAO J, HOU X L, et al. Adsorption and release kinetics of vitamin C, theophylline and bovine serum albumin from microporous starch[J]. *Chinese Journal of Pharmaceuticals*, 2015, 46(8): 860–865, 914.]

[56] WANG H L, LÜ J, JIANG S W, et al. Preparation and characterization of porous corn starch and its adsorption toward grape seed proanthocyanidins[J]. *Starch-Stärke*, 2016, 68(11–12): 1254–1263.

[57] LI H, THUY HO V T, TURNER M S, et al. Encapsulation of *Lactobacillus plantarum* in porous maize starch[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016, 74: 542–549.

[58] 王文艳, 刘沙彦, 王征. 2 种包埋绿原酸产品体内外抗氧化能力的研究[J]. *扬州大学学报(农业与生命科学版)*, 2022, 43(1): 42–48. [WANG W Y, LIU S Y, WANG Z. Study on the anti-oxidation ability of two kinds of embedded chlorogenic acid products *in vivo* and *in vitro*[J]. *Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition)*, 2022, 43(1): 42–48.]

[59] DENG N, DENG Z, TANG C, et al. Formation, structure and properties of the starch-polyphenol inclusion complex: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 112: 667–675.

[60] CHEN Z, FARAG M A, ZHONG Z, et al. Multifaceted role of phyto-derived polyphenols in nanodrug delivery systems[J]. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 2021, 176: 113870.

[61] JIANG S W, YU Z Y, HU H L, et al. Adsorption of procyanidins onto chitosan-modified porous rice starch[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2017, 84: 10–17.

[62] BELINGHERI C, CURTI E, FERRILLO A, et al. Evaluation of porous starch as a flavour carrier[J]. *Food Function*, 2012, 3(3): 255–261.

[63] BELINGHERI C, FERRILLO A, VITTADINI E. Porous starch for flavor delivery in a tomato-based food application[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 60(1): 593–597.

[64] ESHAG OSMAN M F, MOHAMED A A, MOHAMED AHMED I A, et al. Acetylated corn starch as a fat replacer: Effect on physicochemical, textural, and sensory attributes of beef patties during frozen storage[J]. *Food Chemistry*, 2022, 388: 132988.

[65] 魏新悦, 刘甜甜, 韩晓津, 等. 脂肪替代物的研究进展[J]. *农业科技与装备*, 2022(2): 44–46. [WEI X Y, LIU T T, HAN X J, et al. Research progress of fat[J]. *Substitutes Agricultural Science & Technology and Equipment*, 2022(2): 44–46.]

[66] 郭畅, 李艳青, 鹿保鑫. 脂肪替代物在鸡肉丸中的应用[J]. *肉类工业*, 2020(11): 13–17. [GUO C, LI Y Q, LU B X. Application of fat substitute in chicken meatballs[J]. *Meat Industry*,

2020(11): 13-17.]

[67] 李君, 崔怀田, 刘瑞琦, 等. 脂肪替代物在低脂人造黄油中的应用研究进展[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(6): 173-180, 189. [LI J, CUI H T, LIU R Q, et al. Research progress on application of fat substitute in low-fat margarine[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(6): 173-180, 189.]

[68] 马传国, 曹昕琪. 脂肪替代物在蛋黄酱中的应用研究进展[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2022, 43(4): 119-127. [MA C G, CAO X Q. Application research progress of fat substitutes in mayonnaise[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2022, 43(4): 119-127.]

[69] 钱和, 朱仁宏, 姚卫蓉等. 多孔淀粉在低脂贡丸中的代脂研究[J]. 食品科技, 2005(4): 22-25. [QIAN H, ZHU R H, YAO W R, et al. Study on porous starch in low fat emulsified meat ball[J]. China Food Additives, 2005(4): 22-25.]

[70] 吴珊, 申瑾, 包军鹏, 等. 粳米多孔淀粉的多重改性工艺优化及其性质分析[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(3): 53-56, 61. [WU S, SHEN J, BAO J P, et al. Optimization of multiple modification process and property analysis of japonica rice porous starch[J]. Cereals & Oils, 2022, 35(3): 53-56, 61.]

[71] 冯朵, 丁振, 曹盼盼, 等. 预处理辅助酶解制备多孔淀粉及其在食品领域中的应用[J]. 美食研究, 2022, 39(2): 87-94. [FENG D, DING Z, CAO P P, et al. Porous starch prepared by pre-treatment assisted enzymatic hydrolysis and its application in food field[J]. Journal of Researches on Dietetic Science and Culture, 2022, 39(2): 87-94.]

[72] 师丽丽, 杨天奎, 牟英. 淀粉基脂肪替代物原料研究进展[J]. 粮食与油脂, 2012, 25(11): 43-45. [SHI L L, YANG T K, MOU Y. Research progress of based-starch fat substitutes materials[J]. Cereals & Oils, 2012, 25(11): 43-45.]

[73] YANG Y, SHI Y, CAO X, et al. Preparation and functional properties of poly (vinyl alcohol)/ethyl cellulose/tea polyphenol electrospun nanofibrous films for active packaging material[J]. Food Control, 2021, 130: 108331.

[74] MIAO Z, ZHANG Y, LU P. Novel active starch films incorporating tea polyphenols-loaded porous starch as food packaging materials[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 192: 1123-1133.

[75] MIAO Z, LÜ R, TENG S, et al. Development of antioxidant active packaging films with slow release properties incorporated with tea polyphenols-loaded porous starch microcapsules[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 222(Pt A): 403-412.

[76] 江慧娟, 吕小兰, 黄赣辉. 多孔淀粉粉末紫苏籽油的制备及其抗氧化性[J]. 食品科学, 2013, 34(12): 95-98. [JIANG H J, LÜ X L, HUANG G H. Preparation of perilla seed oil powder and its antioxidant activity[J]. Food Science, 2013, 34(12): 95-98.]

[77] 邱英华, 覃懿, 覃荣灵, 等. 木薯多孔淀粉在制作蚕蛹油微胶囊中的应用[J]. 食品研究与开发, 2011, 32(2): 59-61. [QIU Y H, TAN Y, TAN R L, et al. Preparation of microcapsulated lycopene powder with cassava porous starch[J]. Food Research and Development, 2011, 32(2): 59-61.]

[78] 张茜, 赵修华, 康荷笛, 等. 多孔淀粉固化杜香精油的制备及缓释性能研究[J]. 植物研究, 2021, 41(1): 152-160. [ZHANG Q, ZHAO X H, KANG H D, et al. Preparation and slow controlled release of porous starch solidifying rhododendron tomentosum oil[J]. Bulletin of Botanical Research, 2021, 41(1): 152-160.]

[79] 付秋莹, 宋海燕. 百里香精油/多孔淀粉微胶囊的制备及性能研究[J]. 包装工程, 2020, 41(7): 77-82. [FU Q Y, SONG H Y. Preparation and properties of thyme essential oil/porous starch microcapsules[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(7): 77-82.]

[80] 谢梦煊, 宁敏, 徐迎波等. 阳离子多孔淀粉的制备及其对卷烟挥发性醛类吸附研究[J]. 食品与生物技术学报, 2016, 35(11): 1142-1147. [XIE M H, NING M, XU Y B, et al. Preparation of cationic porous starch and its adsorption of volatile aldehydes in cigarette smoke[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2016, 35(11): 1142-1147.]