李凯媛, 赵彦巧, 张文雅, 等. 生物基气凝胶的制备及其在食品中的应用研究进展 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(15): 481−491. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070148

LI Kaiyuan, ZHAO Yanqiao, ZHANG Wenya, et al. Research Progress on the Preparation of Bio-based Aerogels and Their Application in Food[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(15): 481−491. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070148

· 专题综述 ·

# 生物基气凝胶的制备及其在食品中的应用研究进展

李凯媛, 赵彦巧*, 张文雅, 刘香菲

（天津商业大学生物技术与食品科学学院 天津市食品生物技术重点实验室, 天津 300134）

**摘　要:** 生物基气凝胶是以天然生物大分子为原料制备的一种轻质、多孔、高比表面积的纳米材料，近年来在食品领域展现出巨大的应用潜力。由于生物基气凝胶具有优异的吸附性、缓释性和生物相容性，本文系统综述了生物基气凝胶的制备方法，包括原料的种类、溶胶-凝胶法的机制和干燥工艺，并讨论了生物基气凝胶的物理性质和功能特性，总结了生物基气凝胶在食品保鲜垫、食品新鲜度指示标签、营养递送载体和人造肉中的脂肪替代品等四个方面的应用情况。此外，本文还探讨了生物基气凝胶在规模化生产、食品安全性和消费者接受度等方面的挑战，并展望了其在功能性食品和工业生产中的未来发展方向。

**关键词:** 生物基气凝胶, 溶胶-凝胶法, 吸水性和水稳定性, 保鲜垫, 人造肉脂肪替代品

**中图分类号:** TS201　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)15−0481−11

**DOI:** 10.13386/j.issn1002-0306.2025070148

本文网刊:

# Research Progress on the Preparation of Bio-based Aerogels and Their Application in Food

**LI Kaiyuan, ZHAO Yanqiao*, ZHANG Wenya, LIU Xiangfei**

（College of Biotechnology and Food Science, Tianjin University of Commerce, Tianjin Key Laboratory of Food Biotechnology, Tianjin 300134, China）

**Abstract:** Bio-based aerogel is a lightweight, porous and high specific surface area nanomaterial prepared from natural biomacromolecules, which has shown great potential for application in the food field in recent years. Bio-based aerogels exhibit excellent adsorption, sustained release, and biocompatibility. In this paper, the preparation methods of bio-based aerogels, including the types of raw materials, the mechanism of the sol-gel method and the drying process are systematically reviewed. The physical and functional properties of bio-based aerogels are discussed. The applications of bio-based aerogels in food preservation mats, food freshness indication labels, nutrient delivery carriers, and fat in artificial meat substitutes are summarized. In addition, the challenges of bio-based aerogels in terms of large-scale production, food safety and consumer acceptance are discussed, and the future development of bio-based aerogels in functional food and industrial production is prospected.

**Key words:** bio-based aerogel; sol-gel method; water absorption and water stability; freshness pads; artificial meat fat substitutes

气凝胶是一种轻量级纳米结构材料, 在 20 世纪 30 年代初由 Kisher 发现[1]。气凝胶一般由聚苯胺、聚酰亚胺、聚尿素和二氧化硅等无机材料组成, 具有比表面积大、孔隙率高、密度低、折射率高、介电常

**收稿日期:** 2025−07−14

**基金项目:** 天津商业大学“市级大学生创新创业训练计划”项目（202410069116）。

**作者简介:** 李凯媛（2000−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品营养与健康, E-mail: 3369611728@qq.com。

*** 通信作者:** 赵彦巧（1979−）, 女, 博士, 副教授, 研究方向: 天然产物的提取与分离, E-mail: yqzhao@tjcu.edu.cn。

数低、导热系数低等特点[2−5]。近年来，为了响应绿色、环保、可持续的要求，生物基气凝胶的研究这一课题引起了全球研究人员的广泛关注。

生物基气凝胶是新型的多孔轻质材料，可通过气相（如 $CO_2$）取代湿凝胶基质内的液相成分而得到。用于生物基气凝胶制备的生物聚合物有很多种，包括淀粉、纤维素、海藻酸盐、果胶、改性纤维素、乳清蛋白和蛋清蛋白等。这些生物聚合物不仅来源广泛，而且还具有生物相容性、低毒性和可再生性等特点，常被用于食品相关领域的研究应用。生物聚合物作为生物基气凝胶的基底，可有效克服无机气凝胶易碎的问题。此外，可通过对聚合物分子改性，调控生物基气凝胶的性能，达到拓宽其应用范围的目的[6]。

近年来，随着绿色制造技术的进步和可持续发展理念的普及，生物基气凝胶在食品领域的应用研究逐渐增多。本文对生物基气凝胶的基底种类、制备方法以及生物基气凝胶在食品保鲜垫、食品新鲜度指示标签、营养递送载体和人造肉中的脂肪替代品这四个方面的应用进行综述，并探讨其面临的挑战及未来发展方向。

## 1 生物基气凝胶的基底

### 1.1 多糖

多糖是天然生物质材料，是由至少 10 个单糖通过糖苷键结合的糖链。多糖可通过溶胶-凝胶法和干燥工艺制备多糖基气凝胶，多糖基气凝胶具有高孔隙率、低密度、高比表面积和可生物降解等卓越的特性，在食品领域表现出巨大的潜力。热重实验发现多糖气凝胶的耐高温性能优良，可用于食品保温包装。此外，多糖基气凝胶使更多的官能团暴露于气凝胶表面，对功能活性化合物的吸收和负载能力优异，具有靶向传递载体的能力，可提高装载物的生物利用度，保护装载物免受环境的影响[7]。近年来，多糖基气凝胶常见的多糖类型有淀粉、果胶、纤维素、壳聚糖和海藻酸钠等。

1.1.1 淀粉 淀粉是自然界中最丰富的多糖之一，广泛存在于植物中，如小麦、玉米、水稻、木薯、马铃薯和大豆等。淀粉气凝胶是一种以淀粉为基材的三维多孔网络材料，具有超低密度（0.02~0.1 g/cm$^3$）、高孔隙率（90% 左右）和大比表面积（最高可达 197 m$^2$/g）等特性[8]。与其他生物基气凝胶制备过程相比，淀粉基气凝胶制备中增加了淀粉糊化和回生的步骤，图 1 是淀粉基气凝胶制备步骤。糊化温度和回生时间是淀粉气凝胶制备过程的核心参数[9]。淀粉在水中加热形成糊化溶液，冷却后通过分子链重组形成水凝胶[10]。然后用低表面张力溶剂（如乙醇）替换水凝胶中的水，以减少干燥收缩。最后进行干燥，形成淀粉气凝胶。

淀粉气凝胶微观结构和性质受淀粉来源、直链/支链淀粉比例以及添加剂的影响[12]。玉米淀粉气凝胶呈均匀的三维网络结构，而豌豆淀粉气凝胶因孔径

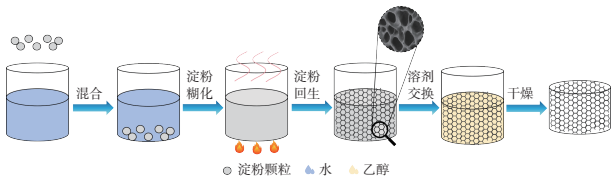



图 1 淀粉基气凝胶制备步骤[11]

Fig.1 Starch-based aerogel preparation steps[11]

分布不均导致孔壁较厚[13]。直链淀粉含量高通常会增强淀粉气凝胶的机械性能。有研究表明，使用直链淀粉含量不同的淀粉制备气凝胶，直链淀粉含量为 40% 的豌豆淀粉气凝胶的比表面积最高，随着直链淀粉含量的增加，淀粉气凝胶比表面积增加，并具有抗体积收缩性[14]。淀粉气凝胶的主要缺点是机械性能差，这一缺点可通过使用物理或化学交联剂得到加强。柠檬酸三钠作为化学交联剂，可以使淀粉气凝胶的硬度增加以及粘附性降低[15]。交联淀粉气凝胶的孔隙分布均匀，结晶度提高 15%[16]。淀粉气凝胶凭借其可降解性、功能可调性和广泛适用性，在食品、医疗、环保等领域展现出巨大潜力。

1.1.2 果胶 果胶是广泛存在于植物细胞壁的杂多糖，因其具有无毒性、生物相容性和生物降解性，所以果胶基气凝胶在药物递送和食品包装领域中应用较为广泛[17]。果胶气凝胶三维网络结构具有超低密度（0.04~0.15 g/cm$^3$）、高孔隙率（>90%）和大比表面积（270~600 m$^2$/g）[18−19]。果胶气凝胶通常具有介孔和微孔结构，孔径范围从纳米到微米不等，这使其在热绝缘、药物控释等领域表现出色。果胶气凝胶有一定的机械强度，压缩模量在 4 MPa 到 18 MPa 之间，且在一定范围内可承受较大形变而不破坏[20]。纯果胶气凝胶的机械强度较低，通过与其他材料复合或添加金属氧化物纳米颗粒可缓解。李菲菲[21] 研究的果胶气凝胶添加 $TiO_2$ 纳米颗粒后，其抗张强度和杨氏模量分别提升了 5.3 倍和 4.2 倍。果胶气凝胶具有约 0.015 W/(m·K)热导率，是优良的热绝缘材料[22]。果胶气凝胶在潮湿环境中容易吸水膨胀，导致结构坍塌和热绝缘性能下降。尽管疏水化处理有所改善，但其长期稳定性仍需进一步研究。

1.1.3 纤维素 纤维素主要存在于植物细胞壁中，是一种天然的高分子化合物，也是来源最丰富的多糖之一。纤维素可通过机械加工、化学处理或生物酶解等方法获得。纤维素作为一种可再生、可生物降解和可生物相容的环境友好型材料，能用来制备具有高孔隙率和高比表面积的气凝胶。纤维素基气凝胶的孔隙率通常高达 90% 以上，密度极低大约为 0.001~0.3 g/cm$^3$[23]。目前，木质纤维素材料已被证实可用于开发气凝胶[24−26]。纤维素材料可以从农业和林业的副产品中提取，例如果壳、叶子、茎和种子。纤维素气凝胶具有坚固的多孔结构，但在水中长时间浸泡时，由于水分子的渗入破坏了弱分子间力（如氢键），纤维素气凝胶会分散悬浮。为了防止吸水并在水中

保持结构完整性，常用聚合物涂层来增强纤维素材料的疏水性。

1.1.4　壳聚糖　壳聚糖气凝胶是一种以壳聚糖（脱乙酰化甲壳素衍生物）为骨架的三维多孔材料。壳聚糖气凝胶兼具气凝胶的轻质、高孔隙率（97%）和壳聚糖的生物降解性、生物相容性等特性[27]。壳聚糖气凝胶分子链上的氨基和羟基赋予其独特的化学活性，可通过物理交联或化学交联（如醛基交联）形成网络结构[28]。壳聚糖气凝胶密度可低至 0.06 g/cm$^3$，孔隙率高达 97%，孔径分布从微孔（<2 nm）到宏孔（>50 nm）[27−28]。纯壳聚糖气凝胶的机械性能偏差，常见的方法是引入木质素磺酸钠、植酸、二氧化硅等成分，以优化机械强度、吸附性能或环境响应性。赵进[29]研究发现纯壳聚糖气凝胶压缩强度约 12.8 kPa·cm$^3$·mg$^{-1}$，木质素磺酸钠加入后，提升至 37.3 kPa·cm$^3$·mg$^{-1}$。复合型壳聚糖气凝胶和壳聚糖气凝胶在食品领域的应用研究已从基础性能探索逐步转向功能化与产业化。

1.1.5　海藻酸钠　海藻酸钠由 $\beta$-D-甘露糖酸和 $\alpha$-L-古洛糖酸通过 1,4-糖苷键交替连接而成，其结构中存在大量羟基和羧基亲水基团[30]。海藻酸钠具有生物相容性、可降解性和环境友好性[31]。海藻酸钠气凝胶孔隙率高达 95.6%，平均孔径为 13 nm~2.25 μm，比表面积达 80 m$^2$/g[32]。海藻酸钠气凝胶的压缩强度随海藻酸钠浓度和补强剂的添加而增强，成—[33]研究的海藻酸钠气凝胶强度达 40 kPa，海藻酸钠-亚甲基双丙烯酰胺气凝胶强度达 80 kPa。海藻酸钠气凝胶导热系数低至 0.029 W/(m·K)，优于传统橡塑材料，并可通过纳米粘土复合提升阻燃性[34]。

### 1.2　蛋白质

蛋白质是生物基气凝胶的理想基底之一。蛋白质具有可降解性、生物相容性、分子可设计性、亲水性、疏水性和凝胶特性，使得蛋白质气凝胶在不同领域都有应用[35]。蛋白质气凝胶通常具有超过 90% 的孔隙率，这使得它们在吸附、催化和药物递送等领域表现出色[36]；其密度通常在 0.3~0.5 g/cm$^3$ 之间，比表面积大，使其在隔热、吸附和传感应用中具有优势[37]；改性后的蛋白质气凝胶机械强度增加，适用于食品包装和生物医学领域[38]。天然蛋白气凝胶易碎，部分气凝胶在高温下结构坍塌，需通过结构改性提升性能。常见的结构改性技术有两个，其一是酶交联技术，夏天利[39]用谷氨酰胺转氨酶改性乳清蛋白气凝胶，压缩模量提升至 14.5 MPa，孔径更均一。其二是复合增强材料法，添加微晶纤维素或碳纳米管，增强机械强度与热稳定性[40]。

### 1.3　改性纤维

改性纤维素是通过机械法、化学法、生物法等方法的修饰，将天然纤维素加工到微米或纳米级别，其中化学改性最为常见，包括酯化、醚化、磺化、接枝共聚等[41]。改性纤维素有纳米纤维素[42]、羧甲基纤维素等，这些改性纤维素具有独特的物理化学性质[43]，例如溶解性、热稳定性、生物降解性和优异的机械性能[44]。

1.3.1　纳米纤维素　纳米纤维素气凝胶是以纳米纤维素为骨架的三维多孔材料，其密度最低可至 1 mg/cm$^3$，孔隙率高达 99.8%[45]。超大比表面积使纳米纤维素气凝胶具有更强的表面活性。纳米纤维素气凝胶还展现出高强度、高韧性和良好的压缩恢复能力[46]。Wang 等[47]制备的纳米纤维素气凝胶压缩强度可达 0.913 MPa，远优于传统二氧化硅气凝胶，兼具柔韧性和弹性。纳米纤维素由于其纳米级尺寸，具有良好的生物降解性。

1.3.2　羧甲基纤维素　羧甲基纤维素是纤维素经羧甲基化改性后的水溶性衍生物，具有丰富的羧酸基团，具备化学可修饰性和生物相容性[48]。羧甲基纤维素气凝胶有天然多糖的可再生、可降解特性，通过溶胶-凝胶法和干燥技术构建三维纳米多孔网络结构，密度可低至 0.0196 g/cm$^3$，孔隙率高达 98.7%[48]。该气凝胶通常表现出更高的机械强度。Touron 等[49]制备的银纳米线-羧甲基纤维素复合气凝胶的杨氏模量比纯银纳米线气凝胶提高了 71 倍。此外，羧甲基纤维素的加入还改善了复合气凝胶的压缩强度，巩玲等[50]的羧甲基纤维素/明胶复合气凝胶的压缩强度达到 3.03 MPa。羧甲基纤维素基气凝胶在高温下的热稳定性和阻燃性能优于传统气凝胶。如羧甲基纤维素/锌铝层状双氢氧化物复合气凝胶表现出更好的热稳定性和阻燃性能[51]。

## 2　生物基气凝胶的制备

生物基气凝胶制备的关键点有两个，第一是通过调节 pH、温度或离子交联（如 $Ca^{2+}$诱导海藻酸钠凝胶化）形成三维网络结构的湿凝胶，这个过程叫溶胶-凝胶法。第二是干燥湿凝胶并保持凝胶的网络结构。湿凝胶制备的过程包括生物聚合物在水中的溶解和凝胶化，随后形成由化学、物理或酶交联剂诱导的网络结构。干燥的目的是除去湿凝胶孔隙中所含的液体从而得到固态网络结构的生物基气凝胶。

### 2.1　溶胶-凝胶法

溶胶-凝胶法是制备气凝胶的核心工艺之一，其核心是通过溶胶（液态胶体）到凝胶（固态网络）的转变[52]。溶胶-凝胶法的具体流程分为五步。第一步前驱体溶解，需选择能溶解前驱体并促进凝胶化的溶剂，如水、乙醇、离子液体等。第二步溶胶的形成，通过物理或化学方法破坏前驱体溶液分子间氢键，形成分散均匀的溶胶[53]。第三步溶胶凝胶化，溶胶通过 pH 调节、温度变化或添加催化剂发生缩聚交联反应引发凝胶化，形成三维网络结构的湿凝胶。pH、温度、反应时间影响凝胶的孔隙率和机械强度。第四步老化，湿凝胶在溶液中静置数小时至数天，通过奥斯特瓦尔德熟化增强网络结构，提高稳定性[54]。第五步溶剂置换，用低表面张力溶剂（如乙醇、丙酮）置换

凝胶中的水分，减少后续干燥时的毛细管力，防止结构塌陷。溶胶-凝胶法可精确调控气凝胶的孔径、孔隙率和比表面积，该方法溶胶混合均匀，可制备高纯度、纳米级多孔材料。多数反应在常温或低温下进行，能耗低。该方法唯一的缺点是周期长，溶胶形成、凝胶化和老化需数天时间。溶胶-凝胶法因其灵活性和结构可控性，是气凝胶制备的主流方法，尤其在生物基气凝胶领域具有不可替代的优势。

### 2.2 干燥工艺

生物基气凝胶的干燥是制备气凝胶最重要的一个环节。干燥工艺对气凝胶的三维网络结构、机械性能以及功能特性有着重要影响。因此，选择正确的干燥方式至关重要。常用的干燥方式有冷冻干燥和超临界 $CO_2$ 干燥。

2.2.1 冷冻干燥　冷冻干燥是降低凝胶孔内的液体温度到冰点以下，然后在真空条件下使其升华，从而制成气凝胶。这种方法适用于热敏感材料，最大程度减少毛细作用力引起的凝胶结构损害。在预冻过程中，凝胶网络结构中有冰晶形成。不断生长的冰晶会破坏凝胶孔道，在凝胶内部形成大的空隙。同时凝胶内的温度梯度会造成孔道壁破损，影响气凝胶结构的完整性[55]。为了避免在凝胶内部形成过大的冰晶，有研究将湿凝胶放入液氮中快速冷却，使成核速率大于冰晶生长速率，在孔道内形成尺寸较小的冰晶[56]。

2.2.2 超临界 $CO_2$ 干燥　超临界 $CO_2$ 干燥是目前制备气凝胶最好的方法，它是通过控制压力和温度使 $CO_2$ 达到临界点置换凝胶中的溶剂，直到孔中的流体混合物均为超临界状态[57]。在恢复常压后，即可得到多孔、无序、具有纳米量级连续网络结构的低密度气凝胶材料[58]。虽然超临界 $CO_2$ 干燥可以保留原始凝胶结构，形成适合控制释放的较小孔径，且去除溶剂完全，但生产成本较高，需要更多的加工步骤来确保湿凝胶稳定性和溶剂替代。

## 3 生物基气凝胶的物理性质和功能特性

生物基气凝胶的物理性质包括形态学、微观结构和机械性能，功能特性有吸水性和水稳定性。生物基气凝胶的物理性质和功能特性通常会受到基底的种类、浓度、交联方式、干燥方法以及制备工艺等因素的影响。

### 3.1 形态学和微观结构

生物基气凝胶的特性在很大程度上依赖于其形态和微结构特性。这些对于优化性能、确保生物相容性、提高机械性能和微调复合输送系统至关重要。

生物基气凝胶的形态学特征包括宏观形态、表面形貌和孔隙结构。宏观形态通常呈现为轻质、多孔的固体，具有低密度和高孔隙率，形态有块状、薄膜状、纤维状或粉末状[59−61]。表 1 是不同生物基气凝胶的形态和应用。宏观形态和孔隙结构决定生物基气凝胶的应用。宏观形态为块状适合隔热和支撑。通过扫描电子显微镜观察，可以看到气凝胶表面由大量的微米级和纳米级孔洞组成，这些孔洞相互连接，形成复杂的三维网络结构[62]。生物基气凝胶的孔隙结构是其最显著的特征之一，涵盖孔隙大小（纳米到微米级）、孔径分布（均匀或不均匀）和形状（圆形、椭圆形或不规则形）[63−64]。孔隙结构影响生物基气凝胶的吸附性和热导率。

生物基气凝胶的微观结构主要由其组成成分和制备工艺决定。壳聚糖、纤维素、海藻酸钠等多糖的分子结构主要由多糖链通过氢键和静电相互作用形成。明胶、大豆蛋白的分子结构主要由蛋白质链通过疏水相互作用和二硫键形成。纳米纤维素气凝胶通过氢键和范德华力组装形成。这些纳米纤维相互交织，形成连续的纳米孔洞网络。在凝胶化过程中，溶胶中的生物大分子通过物理或化学交联形成凝胶[73]。物理交联主要通过氢键、静电相互作用、疏水相互作用等非共价键形成，化学交联主要通过交联剂（如戊二醛）形成共价键[74]。在干燥过程中，冷冻干燥可以保留凝胶中的孔洞结构，形成高孔隙率的气凝胶。超临界干燥可以避免孔洞塌陷，形成高比表面积的气凝胶。

### 3.2 机械性能

生物基气凝胶的机械性能主要由其分子水平的交联结构决定。生物基气凝胶抗压强度约 0.1~5 MPa。生物基气凝胶的机械性能与气凝胶网络的微观结构和形态密切相关，含有较大孔径的气凝胶表现出较低的机械强度。例如黄原胶/琼脂气凝胶孔隙率 94% 时，比模量仍达 4.77 MPa[75]。此外，机械性能也受前体材料特性的影响，研究发现普鲁兰多糖气凝胶的抗压性能随着前体材料质量浓度的增大而提高[76]。在生物聚合物基质中添加交联剂，通过调控交联密度和交联方式，可有效提高气凝胶的机械强度。常见的交联剂有化学交联剂、物理交联剂、酶交联剂、天然交联剂和复合交联剂。通过合理的选择和优化交联剂，可以调控生物基气凝胶的机械性能和功能特性，从而满足不同应用需求。

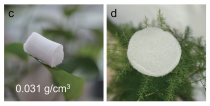
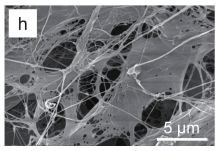
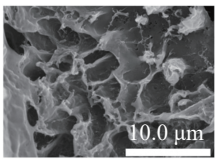
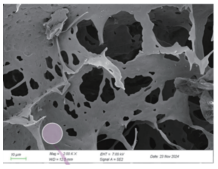
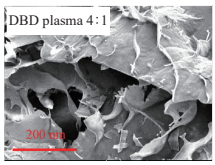
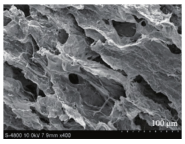
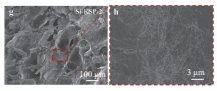
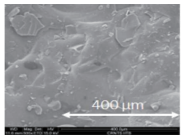
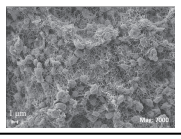
### 3.3 吸水性和水稳定性

气凝胶的吸水性、水稳定性与应用紧密相关。研究表明，气凝胶浸入去离子水可吸收约自身重量 20 倍的水[77]。当干燥的气凝胶与水接触时，水分子很容易被极性分子吸收使结构膨胀并发生水合作用，随后水分子暴露于疏水分子，水分子和疏水基团之间的相互作用力和共价力可维持气凝胶的结构并为其提供弹性。此外，当吸水性和保水力平衡时，气凝胶吸水率将达到最大，若继续吸水其结构则会受到破坏[78]。

气凝胶水稳定性与交联处理有关，探究生物基气凝胶水稳定性常用浸泡法，交联过的气凝胶在水中能长时间保持其原始形态，不会轻易坍塌和分解。而未交联的气凝胶在水中一段时间后，由于吸入过量的

表 1　不同生物基气凝胶的形态和应用

Table 1　Morphology and application of different bio based aerogels

| 基底 | 表面形貌 | 孔隙结构 | 制备方法 | 密度(g/cm³) | 应用 | 来源 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 纤维素 |  |  | 冷冻干燥 | 0.031 | 新型耐热材料代替化石基聚合物泡沫 | [65] |
| 壳聚糖、聚乙烯醇 |  |  | 冷冻干燥 | 0.024 | 新型隔热/隔音的声学材料 | [66] |
| 明胶、阿拉伯胶 |  |  | 冷冻干燥 | 0.06 | 作为智能包装实时监测虾的新鲜度 | [67] |
| 黄原胶、蛋清粉 |  |  | 冷冻干燥 | 0.081±0.006 | 作为新型保温材料对鸡肉进行包装 | [68] |
| 纤维素纳米纤维素、聚乙烯醇 |  |  | 冷冻干燥 | 0.017 | 作为食品保鲜垫吸水、吸油和延长肉类保质期 | [69] |
| 纤维素、海藻酸钠 |  |  | 冷冻干燥 | 0.06603 | 新型隔热阻燃材料 | [70] |
| 海藻酸钠 |  |  | 超临界$CO_2$干燥 | 0.043 | 吸附$\beta$-胡萝卜素进行控制释放 | [71] |
| $\beta$-葡聚糖 |  |  | 超临界$CO_2$干燥 | 0.0348 | 负载乙酰水杨酸并释放 | [72] |

水，三维网络结构被破坏。化学交联法制备的气凝胶通过共价键交联，形成稳定且持久的网络，不易被水破坏，适用于长期应用。而物理交联(如氢键)则交联程度较低，稳定性较差，易在水环境中失效[79]。魔芋葡甘聚糖和可得然胶复合气凝胶的降解研究中观察到，未充分交联的气凝胶在吸水后三维网络结构被破坏，出现塌陷和皱缩，最终变成悬浮形式[80]。

### 3.4　生物基气凝胶释放动力作用

生物基气凝胶作为多孔材料，有开放孔道结构，可快速吸收溶液以及装载活性成分，还能包封和控制释放香料或抗氧化剂等[81−82]。生物基气凝胶活性成分的释放通过多孔扩散、基质降解或刺激响应，实现从快速释放到长效缓释的模式。Amenah 等[83] 通过实验验证基于多糖(黄蓍胶和海藻酸钠)的气凝胶药物释放行为符合幂律模型，该模型的核心机制是扩散主导的释放动力学，这表明药物分子通过气凝胶基质的扩散是释放的主要途径。生物基气凝胶常出现初期快速释放现象。壳聚糖气凝胶在酸性环境中前 20 min 内释放超过 60% 的 5-氟尿嘧啶，随后趋于平衡[84]。生物基气凝胶通过材料改性可实现缓释，改性生物基气凝胶在生物医药领域(如药物递送)应用较多[85]。生物基气凝胶释放活性物质的过程受环境因素影响，基质为亲水性生物聚合物(如纤维素、果胶和海藻酸钠)且交联度较低，吸水后可能发生显著溶胀，呈现类似水凝胶的软质湿润状态，且可能伴随结构强度下降[86−87]。图 2 是亲水性生物基气凝胶释放活性物质受 pH、温度和酶的作用影响的过程。pH、温度和酶是调控亲水性生物基气凝胶释放行为的关键参数。如海藻酸钠基气凝胶在酸性环境中释放受阻，但在中性或碱性环境中可实现完全释放[88]。快速

释放适用于需立即起效的场景(如抗菌初期),而缓释需通过改性、增强交联、缩小孔径或环境响应设计来维持长期活性浓度的需求。

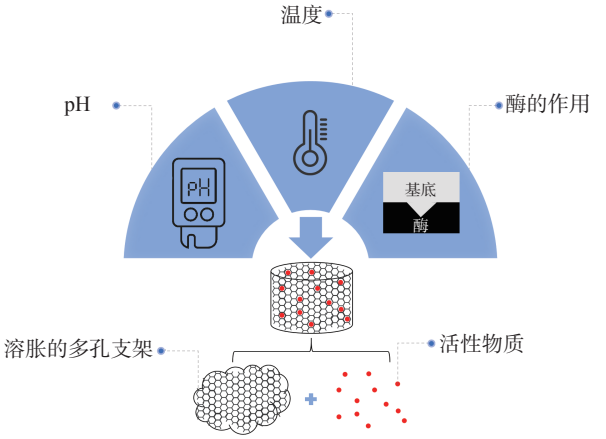



图 2 环境因素影响亲水性生物基气凝胶活性物质的释放过程

Fig.2 Environmental factors affect the release process of active substances from hydrophilic bio-based aerogels

## 4 生物基气凝胶在食品中的应用

生物基气凝胶是一种具有高比表面积、低密度和可调控孔隙结构的多孔材料,因其独特的物理化学性质在食品领域得到了广泛研究。近年来,随着对可持续材料需求的增加,生物基气凝胶逐渐成为研究热点。生物基气凝胶以天然生物大分子为原料,不仅保留了传统气凝胶的优异性能,还具备生物相容性、可降解性和环境友好性。在食品领域,生物基气凝胶常被应用于食品保鲜垫、食品新鲜度指示标签、营养递送载体和人造肉中的脂肪替代品四个方向。

### 4.1 食品保鲜垫

食品保鲜垫是一种新型的保鲜材料,主要用于生鲜食品的保鲜。食品保鲜垫具有吸收食品储存时释放的过量液体、防止细菌生长和延长食品保质期等特点,成为越来越多食品生产和销售企业的选择。然而,传统的食品保鲜垫通常由不可降解的聚乙烯薄膜(上层)、吸收材料(中间层,如:高吸水性树脂、聚丙烯酸钠、聚酰胺)和无纺布(底层)组成[89]。并且,传统吸附垫存在着生产过程复杂、吸收率低、水结合能力差、无抗菌和无抗氧化活性等缺点,导致保鲜效果不明显[89−91]。因此,生物基气凝胶的出现和发展可以有效解决传统保鲜垫带来的问题。

生物基气凝胶以其低密度、高比表面积、高孔隙率、对环境友好和可再生等特点从而被应用。它具有疏松多孔的结构,能够快速吸收食品渗出的水分和油脂,减少食品表面的自由水,避免汁液积累导致的腐败[92]。同时,生物基气凝胶垫不仅用于支撑生鲜产品防止机械损伤,还有助于防止生鲜产品之间的微生物交叉污染[93]。生物基气凝胶还能作为抗菌剂的载体,通过负载抗菌剂或抗氧化成分,生物基气凝胶垫能主动抑制常见食源性病菌(如大肠杆菌、金黄色葡萄球菌)和延缓氧化反应。因此,用生物基气凝胶作为新鲜肉类和果蔬的保鲜垫通过物理吸液和化学抑菌的协同作用,可以延长食品的货架期。图 3 所示为生物基气凝胶保鲜垫的结构和应用。

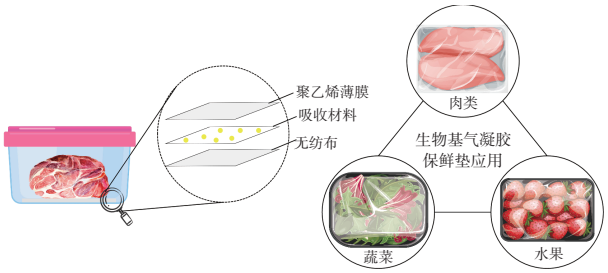



图 3 生物基气凝胶保鲜垫的结构和应用

Fig.3 Structure and application of bio-based aerogel fresh-keeping mats

生物基气凝胶具有凝胶特性和生物相容性,作为保鲜垫它还可以负载一些活性成分。表 2 是生物基气凝胶保鲜垫在食品中的研究现况。生物基气凝胶负载抗菌剂、抗氧化剂、二氧化碳释放剂、除氧剂和乙烯清除剂,可延长食品货架期。

### 4.2 食品新鲜度指示标签

近年来,食品新鲜度指示标签已成为食品科学领域的重要研究热点,生物基气凝胶作为食品新鲜度指示标签是一种新的应用,用于监测食品状况并向消费者传达有关信息。这种以指示标签形式的传感器,可向消费者告知食物的情况,保证食物的品质。pH 敏感颜料和用于颜料固定的基质是食品新鲜度指示标签的主要部分。pH 敏感染料变色的主要原理是利用肉类或海鲜中的蛋白质在酶和微生物分解过程中产生的挥发性胺类改变环境 pH,进而影响生物基气凝胶上附着的变色染料[101]。这些变色染料会产生视觉上可观察到的颜色变化,消费者可以通过观察这种颜色变化来评估食物的变质情况,以确定食物的新鲜度[102]。常见的变色染料有姜黄素[103]、花色苷[104]和甜菜红素[101]等。牛奶储存时间(0~8 h)与 pH 呈负相关,牛奶发生变质时,其 pH 从 6.48 降至 2.94,指示剂颜色(甜菜红素)从亮红(新鲜)变为暗绿(变质)[105]。鱼类发生变质时,其 TVB-N 含量升高(>25 mg/100 g 表示变质),同时传感器(黑米花色苷)ΔRGB(颜色差异值)与 TVB-N 显著相关($R^2$>0.9)[106]。生物基气凝胶具备大比表面积、高孔隙率和复杂的网络结构,这些特点使其成为新鲜度指示标签颜料的固定基质。

### 4.3 营养递送载体

人们对健康营养需求增长,功能性食品和营养补充剂市场需求扩大。但许多功能性成分(如维生素、矿物质、益生菌、抗氧化剂)在加工、储存和消化过程中易失活或降解,导致其生物利用度降低。生物基气凝胶因为其独特的性质,成为理想的营养递送载体。生物基气凝胶通过物理吸附、化学键合或包埋

表 2　生物基气凝胶保鲜垫在食品中的研究现况

Table 2　Research status of bio-based aerogel fresh-keeping pads in food

| 基底 | 功能成分 | 应用的食品 | 主要功效 | 货架期延长天数 | 来源 |
|---|---|---|---|---|---|
| 乳清蛋白 | 肉桂醛 | 樱桃 | 保鲜、抗菌 | 25 ℃下6 d | [39] |
| 明胶、阿拉伯胶 | 姜黄素、纳他霉素 | 猪肉 | 抗菌、保鲜 | 25 ℃下延长6 h | [91] |
| 乳清分离蛋白、大豆壳纳米纤维素、聚乙烯醇 | 肉桂精油 | 牛肉 | 抗菌、抗氧化 | 4 ℃下延长8 d | [93] |
| 纤维素 | 稻草提取物 | 牛肉碎 | 抗脂质氧化，减缓牛肉颜色变化 | 4 ℃下延长9 d | [94] |
| 菠萝皮纳米纤维素 | 单宁酸 | 猪肉 | 抗菌、抗氧化 | 4 ℃下延长6 d | [95] |
| 明胶、二氢淀粉淀粉 | 姜黄素 | 猪肉 | 抗菌 | 4 ℃下延长12 d | [90] |
| 纳米纤维素、海藻酸钠 | 柠檬醛 | 猪肉 | 抗菌、延缓腐败变质 | 25 ℃下延长2 d | [77] |
| 壳聚糖和乳清分离蛋白 | ε-聚赖氨酸盐酸盐 | 鸡肉 | 抗菌、高吸水性 | 4 ℃下延长7 d | [96] |
| 海藻酸钠、聚乙烯醇 | 聚六亚甲基双弧、浒苔多糖 | 羊肉 | 抗菌、抗氧化 | 4 ℃下延长至少12 d | [97] |
| 羧甲基纤维素 | 银纳米颗粒 | 牛肉 | 抗菌、减缓牛肉颜色变化 | 4 ℃下延长7 d | [98] |
| 海藻酸钠、海藻糖 | 柠檬酸、$NaHCO_3$、肉桂精油 | 蔬菜水果 | 抑菌、抗氧化、释放$CO_2$ | 4 ℃下延长5 d | [99] |
| 壳聚糖、二醛纳米纤维素 | 环糊精-肉桂醛包合物 | 草莓 | 抗菌、高吸水 | 22±1 ℃下延长5 d | [100] |

等方式负载功能成分。生物基气凝胶本身可作为膳食纤维来源，同时也能作为益生元或益生菌的递送载体[107]。生物基气凝胶作为营养递送载体，具有缓释性能、保护性能和靶向性能等优异的递送性能。Clare 等[108] 用玉米淀粉气凝胶包封 $Fe^{2+}$和叶酸，提高了二者的生物利用度。通过合理设计优化生物基气凝胶的负载方式、递送性能及制备工艺，可实现功能性成分的高效负载、靶向递送和精准释放，推动其在食品和医药领域的产业化应用。

### 4.4　人造肉中的脂肪替代品

随着肉类产品的消费量逐年稳步上升，人造肉类的研究和发展日益重要。人造肉类的研究主要集中在替代红肉，对动物产品中脂肪替代领域的探索有限[109]。有研究人员提出油凝胶作为脂肪替代品，以获得饱和/反式脂肪酸含量降低的更健康食品。使用气凝胶制造的油凝胶具有很高的吸油能力和优良的含油能力。只要将气凝胶浸入油中，就可以通过表面张力和毛细管力的作用将其转化为油凝胶[110]。根据这一应用，油分子通过毛细管力作用被吸入到气凝胶颗粒的孔隙中，并通过表面-油相互作用紧密地吸附在生物基气凝胶孔隙内和气凝胶颗粒外部。有研究表明，每 1 g 气凝胶的吸油量一般都高于 2 g[111]。Plazzotta 等[112] 以乳清蛋白气凝胶聚集获得的油凝胶为例，其含油量超过了气凝胶颗粒重量的 5 倍。所得材料经离心处理后不脱油，呈现商业固体脂肪的典型塑性行为。随着技术的进步和研究的深入，生物基气凝胶模拟脂肪口感已用于低脂乳制品或肉制品中。

## 5　结论与展望

生物基气凝胶是一种以天然生物高分子（如：多糖、蛋白质和改性纤维素）为原料制备的多孔轻质材料，凭借其高比表面积、可调控孔隙结构和生物相容性等特性，近年来在食品领域的研究逐渐兴起。生物基气凝胶在食品包装、功能性食品载体、吸附等方面展现出独特优势。在实际应用中，生物基气凝胶通过材料复合、结构设计以及表面改性等方式实现性能优化。虽然生物基气凝胶的发展趋势不断向上，但也有瓶颈与挑战。如规模化生产困难，生物基气凝胶制备时用到的超临界 $CO_2$ 干燥设备昂贵，冷冻干燥能耗高，还需继续开发低成本、节能和连续化生产工艺，从而扩大生产规模；食品安全性有待考究，生物基气凝胶中加入的功能成分（如纳米银）和化学交联剂（如戊二醛）在食品应用中存在一定风险，金属纳米颗粒迁移风险需符合 FDA/EFSA 标准，化学交联剂残留可能限制食品应用，需开发天然交联体系；生物基气凝胶稳定性问题，高湿度环境下部分生物基气凝胶易吸湿塌陷的问题有待研究，需通过疏水改性（如硅烷化）解决。生物基气凝胶从实验室到产业化生产中，可以通过优化 $CO_2$ 循环系统缩短干燥时间以及原料与溶剂循环利用节省成本。

生物基气凝胶在食品工业中的机遇与挑战并存。未来要克服这些挑战，并且继续在食品领域深入发展，可以在开发温敏、光敏或气体敏感型智能响应气凝胶、可食用生物基气凝胶、循环经济模式等方向继续研究。通过绿色制造技术、功能精准设计和多学科协同创新，推动生物基气凝胶在食品领域的规模化应用，助力可持续食品工业发展。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

## 参考文献

[1] KISTLER S S. Coherent expanded aerogels and jellies[J]. Nature, 1931, 127(3211): 741.

[2] DHAVALE P R, PARALE G V, CHOI H, et al. Sol-gel synthesized homogeneous nanofibers to multidimensional in-situ and ex-situ silica nanofiber aerogels in thermal management applications[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 503: 158485.

[3] PIERRE A C, PAJONK G M. Chemistry of aerogels and their applications[J]. Chemical Reviews, 2002, 102(11): 4243−4266.

[4] HARYEONG C, TAEHEE K, TAEHO K, et al. Ultralow dielectric cross-linked silica aerogel nanocomposite films for inter-

connect technology[J]. Applied Materials Today, 2022, 28: 101536.
[5] PARALE G V, KIM T, CHOI H, et al. Mechanically strengthened aerogels through multiscale, multicompositional, and multidimensional approaches: A review[J]. Advanced Materials, 2024, 36(18): 2470138.
[6] 王谖阳, 王飞杰, 马淑凤, 等. 多糖基气凝胶食品包装的研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(19): 340−349. [WANG S, WANG F J, MA S F, et al. Research progress on polysaccharide-based aerogel food packaging[J]. Food Science, 2023, 44(19): 340−349.]
[7] SUBHAMOY D, KUMAR A G, POONAM M. Aerogel: Functional emerging material for potential application in food: A review[J]. Food and Bioprocess Technology, 2022, 15(11): 2396−2421.
[8] ZHAO D, ZHANG X, ZHANG Y, et al. Recent advances in the fabrication, characterization and application of starch-based materials for active food packaging: Hydrogels and aerogels[J]. Sustainable Food Technology, 2024, 2(3): 615−634.
[9] LUCILE D, RICHARD B, WALTRAUD V, et al. Starch aerogels: A member of the family of thermal superinsulating materials[J]. Biomacromolecules, 2017, 18(12): 4232−4239.
[10] BAUDRON V, TABOADA M, GURIKOV P, et al. Production of starch aerogel in form of monoliths and microparticles[J]. Colloid and Polymer Science, 2020, 298(4): 1−18.
[11] 沈静敏. 淀粉基双网络水凝胶的构建及其增韧机制研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2025. [SHEN J M. Study on the construction and toughening mechanisms of starch-based double network hydrogel[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2025.]
[12] 卢慧馨, 钟成鹏, 罗舜菁, 等. 淀粉基气凝胶的制备、改性与应用[J]. 中国食品学报, 2024, 24(1): 455−465. [LU H X, ZHONG C P, LUO S J, et al. Starch aerogel: Production, modification and application[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(1): 455−465.]
[13] 吴泽楠, 孔月, 张艺欣, 等. 不同淀粉基气凝胶的制备及其结构表征[J]. 食品科学, 2023, 44(12): 60−66. [WU Z N, KONG Y, ZHANG Y X, et al. Preparation and structural characterization of different starch-based aerogels[J]. Food Science, 2023, 44(12): 60−66.]
[14] WANG Y, SU Y, WANG W, et al. The advances of polysaccharide-based aerogels: Preparation and potential application[J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 226: 115242.
[15] ALI U, SANDRAYEE B, JERROLD D R, et al. *In vitro* digestibility of nanoporous wheat starch aerogels[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(36): 9490−9497.
[16] ABHARI N, MADADLOU A, DINI A. Structure of starch aerogel as affected by crosslinking and feasibility assessment of the aerogel for an anti-fungal volatile release[J]. Food Chemistry, 2017, 221: 147−152.
[17] MOTTOLA S, VISCUSI G, OLIVA G, et al. Pectin/alginate aerogel containing ZnO produced from beetroot extract mediated green synthesis for potential applications in food packaging[J]. Journal of $CO_2$ Utilization, 2025, 91: 103003.
[18] GROULT S, BUDTOVA T. Tuning structure and properties of pectin aerogels[J]. European Polymer Journal, 2018, 108: 250−261.
[19] RUDAZ C. Cellulose and pectin aerogels: Towards their nano-structuration[D]. Latin quarter: Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2013.
[20] CYRIELLE R, RÉMI C, LAURENT B, et al. Aeropectin: Fully biomass-based mechanically strong and thermal superinsulating aerogel[J]. Biomacromolecules, 2014, 15(6): 2188−2195.
[21] 李菲菲. $TiO_2$-果胶复合气凝胶的制备及应用[J]. 数字印刷, 2020(4): 75−80. [LI F F. Preparation and application of $TiO_2$-pectin composite aerogel[J]. Digital Printing, 2020(4): 75−80.]
[22] GROULT S, BUDTOVA T. Thermal conductivity/structure correlations in thermal super-insulating pectin aerogels[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 196: 73−81.
[23] 陶丹丹, 白绘宇, 刘石林, 等. 纤维素气凝胶材料的研究进展[J]. 纤维素科学与技术, 2011, 19(2): 64−75. [TAO D D, BAI H Y, LIU S L, et al. Research progress of cellulose aerogel materials[J]. Journal of Cellulose Science and Technology, 2011, 19(2): 64−75.]
[24] ISAAC B, AMPARO L, PAULA G, et al. Multifunctional cellulosic aerogels from *Posidonia oceanica* waste biomass with antioxidant properties for meat preservation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 185: 654−663.
[25] ISAAC B, AMPARO L, LAURA G G, et al. PLA coating improves the performance of renewable adsorbent pads based on cellulosic aerogels from aquatic waste biomass[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 390: 124607.
[26] ZAMAN A, HUANG F, JIANG M, et al. Preparation, properties, and applications of natural cellulosic aerogels: A review[J]. Energy and Built Environment, 2020, 1(1): 60−76.
[27] 马倩. 壳聚糖-二氧化硅复合气凝胶的制备、改性及其性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2014. [MA Q. Preparation, modification and properties of chitosan-silica composite aerogels[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.]
[28] SATORU T, SHANYU Z, WIM J M, et al. Chemistry of chitosan aerogels: Three-dimensional pore control for tailored applications[J]. Angewandte Chemie (International ed. in English), 2020, 60(18): 9828−9851.
[29] 赵进. 壳聚糖气凝胶的结构设计与性能调控[D]. 成都: 四川师范大学, 2021. [ZHAO J. Structure design and performance regulation of chitosan aerogels[D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2021.]
[30] LIU W, HENNING M, MAGALI C. Application of alginate hydrogels for next-generation articular cartilage regeneration[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23(3): 1147.
[31] 唐茂文. 功能性海藻酸钠基气凝胶的制备及性能研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2019. [TANG M W. Preparation and performance study of functional sodium alginate-based aerogels[D]. Qingdao: Qingdao University, 2019.]
[32] MENG C, ZHANG H, ZHANG S, et al. The preparation of hydrophobic alginate-based fibrous aerogel and its oil absorption property[J]. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 2018, 87: 704−712.
[33] 成一. 海藻酸钠基气凝胶的制备、补强与疏水改性[D]. 海口: 海南大学, 2012. [CHENG Y. Alginate-based aerogels: Preparation, reinforcement and hydrophobic modification[D]. Haikou: Hainan University, 2012.]
[34] BANG T X, DA Z J, YI Y, et al. Nanoclay-reinforced alginate aerogels: Preparation and properties[J]. RSC Advances, 2024, 14(2): 954−962.
[35] LORENZO B D, STELLA P, Michele M, et al. Hydrophilic or hydrophobic coating of whey protein aerogels obtained by supercritical-$CO_2$-drying: effect on physical properties, moisture adsorption and interaction with water and oil in food systems[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2024, 91: 103530.
[36] STEFANNA M P, RODICA A V, BERNADETTE E T, et al.

Polysaccharide-based edible gels as functional ingredients: Characterization, applicability, and human health benefits[J]. Gels, 2022, 8(8): 524.
[37] OLGENBLUM I G, HUTCHESON O B, PIELAK J G, et al. Protecting proteins from desiccation stress using molecular glasses and gels[J]. Chemical Reviews, 2024, 124(9): 5668−5694.
[38] BRODNJAK V U. Hybrid materials of bio-based aerogels for sustainable packaging solutions[J]. Gels, 2023, 10(1): 27.
[39] 夏天利. 乳清蛋白气凝胶的制备、改性及应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2018. [XIA T L. Study on the preparation, modification and application of whey protein aerogel[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2018.]
[40] 敬建伟. 基于各向异性聚酰亚胺气凝胶及其相变材料复合物的制备和应用研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2024. [JING J W, Study on preparation and application of anisotropic polyimide aerogel and its phase change material composites[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2024.]
[41] 姜珊, 孙自强, 邢琪, 等. 纤维素的改性及应用研究进展[J]. 纺织科学与工程学报, 2024, 41(1): 75−85. [JIANG S, SUN Z Q, XING Q, et al. Cellulose modification and application research progress[J]. Journal of Textile Science and Engineering, 2024, 41(1): 75−85.]
[42] CORDAZZO M D, LIRA U Z, NEMER C C M, et al. Influence of hemicellulose content and cellulose crystal change on cellulose nanofibers properties[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 213: 780−790.
[43] LI Q, WANG A J, LONG K Y, et al. Modified Fenton oxidation of cellulose fibers for cellulose nanofibrils preparation[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2019, 7(1): 1129−1136.
[44] MARTYNA R, JOANNA M, MARCIN K, et al. Mechanical properties of bio-composites based on epoxy resin and nanocellulose fibres[J]. Materials (Basel, Switzerland), 2021, 14(13): 3576.
[45] NATHALIE L, LENNART B. Nanocellulose-based foams and aerogels: Processing, properties, and applications[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2017, 5(31): 16105−16117.
[46] 毕胜胜, 董新一, 束兴娟, 等. 纳米纤维素气凝胶及其隔热应用研究进展[J]. 河南化工, 2025, 42(4): 1−7. [BI S S, DONG X Y, SHU X J, et al. Research progress of nanocellulose aerogel and its thermal insulation applications[J]. Henan Chemical Industry, 2025, 42(4): 1−7.]
[47] WANG X Y, YAN X Y, WU Z, et al. Enhanced mechanical stability and hydrophobicity of cellulose aerogels via quantitative doping of nano-lignin[J]. Polymers, 2023, 15(5): 1316.
[48] 林润俊. (羧甲基)纤维素气凝胶的制备、改性及其应用评价[D]. 海口: 海南大学, 2016. [LIN R J. Preparation, modification and application assessment of (carboxymethyl) cellulose aerogels[D]. Haikou: Hainan University, 2016.]
[49] TOURON M, CELLE C, ORGÉAS L, et al. Hybrid silver nanowire-CMC aerogels: from 1D nanomaterials to 3D electrically conductive and mechanically resistant lightweight architectures[J]. ACS Nano, 2022, 16(9): 14188−14197.
[50] 巩玲, 安昕煜, 孔苗苗, 等. 纤维素复合气凝胶的制备及保温隔热性能研究[J]. 功能材料, 2024, 55(1): 1092−1097. [GONG L, AN X Y, KONG M M, et al. Study on the preparation and thermal insulation properties of cellulose composite aerogel[J]. Journal of Functional, 2024, 55(1): 1092−1097.]
[51] 鲁祎辰, 杨伟. 羧甲基纤维素/锌铝层状双氢氧化物气凝胶的制备与性能[J]. 安徽化工, 2017, 43(6): 72−74,77. [LU Y C, YANG W. Preparation and characteristics of carboxymethyl cellulose/ZnAl-layered double hydroxide composite aerogels[J]. Anhui Chemical Industry, 2017, 43(6): 72−74,77.]
[52] 王娟, 李晨, 徐博. 溶胶-凝胶法的基本原理、发展及应用现状[J]. 化学工业与工程, 2009, 26(3): 273−277. [WANG J, LI C, XU B. Basic principle, advance and current application situation of sol-gel method[J]. Chemical Industry and Engineering, 2009, 26(3): 273−277.]
[53] SACHIN C K, RADHAKRISHNA, SHREENAG U M. Synthesis of silicon di oxide nano-particles by sol-gel method for applications in geopolymer composites[J]. Electrochemical Society Transactions, 2022, 107(1): 5533.
[54] SOLMAZ K, PINAR E Y, REIHANEH H, et al. Aerogel-based biomaterials for biomedical applications: from fabrication methods to disease-targeting applications[J]. Advanced Science (Weinheim, Baden-Wurttemberg, Germany), 2023, 10(23): 2204681.
[55] GARCÍA-GONZÁLEZ C A, ALNAIEF M, SMIRNOVA I. Polysaccharide-based aerogels-promising biodegradable carriers for drug delivery systems[J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 86(4): 1425−1438.
[56] ULKER Z, ERKEY C. An emerging platform for drug delivery: aerogelbasedsystems[J].JournalofControlledRelease, 2014, 177: 51−63.
[57] ALEJANDRA R, LUIS J V, ROSAS S A, et al. Biopolymeric fibrous aerogels: The sustainable alternative for water remediation[J]. Polymers, 2023, 15(2): 262.
[58] 曲康. 有机-无机杂化硅气凝胶的制备和表征[D]. 杭州: 浙江大学, 2014. [QU K. Preparation and characterization of organic-inorganic hybrid silica aerogel[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.]
[59] BUDTOVA T, AGUILERA D A, BELUNS S, et al. Biorefinery approach for aerogels[J]. Polymers, 2020, 12(12): 2779.
[60] FENG J Z, SU B L, XIA H S, et al. Printed aerogels: chemistry, processing, and applications[J]. Chemical Society Reviews, 2021, 50(6): 3842−3888.
[61] THAPLIYAL P C, KIRTI S. Aerogels as promising thermal insulating materials: An overview[J]. Journal of Materials, 2014, 1: 127049.
[62] THIERRY W, JUAN P, ADIL A, et al. Fractal structure in silica and composites aerogels[J]. Gels (Basel, Switzerland), 2020, 7(1): 1.
[63] SUCHOROWIEC K, PAPROTA N, PIELICHOWSKA K. Aerogels for phase-change materials in functional and multifunctional composites: A review[J]. Materials, 2024, 17(17): 4405.
[64] NITA E L, GHILAN A, RUSU G A, et al. New trends in bio-based aerogels[J]. Pharmaceutics, 2020, 12(5): 449.
[65] TANG J, WANG L Y, MU Y F, et al. Bamboo aerogel derived from waste bamboo flour for thermal insulation[J]. Materials & Design, 2025, 258: 114588.
[66] PENG J, XIAO Q Y, XUE J Y, et al. Chitosan/polyvinyl alcohol aerogels with improved structure for thermal insulation and noise reduction[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 323: 147175.
[67] WU Y, WANG Y M, CHEN Z X, et al. A colorimetric-stable multifunctional aerogel based on covalent organic framework-loaded blueberry anthocyanin: New prospects for active intelligent food packaging[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 521: 166986.
[68] VAFANIA B, MILAD F, ALIREZA A. High performance thermal insulation aerogels of modified egg white powder and xanthan gum: Production, characterization, and application for food

packaging[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 172: 111872.
[69] ZHAO X M, REN X Y, LI H M, et al. Novel cellulose-PVA bioactive aerogels with portulaca oleracea extracts for chilled meat preservation: Antimicrobial efficacy and microbial community modulation[J]. Food Research International, 2025, 219: 117008.
[70] LIU W, XU J, SUN Q Q, et al. Mechanically robust, flame-retardant, and waterproof kapok fiber/sodium alginate composite aerogel for building thermal insulation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 318(2): 144842.
[71] BARMASE C, BASAK S, SINGHAL R S. Fabrication of $\beta$-carotene loaded alginate oleogels by the aerogel template method: impact of pressure and temperature of supercritical carbon dioxide drying[J]. Food Structure, 2025, 45: 100452.
[72] SALGADO M, SANTOS F, RODRÍGUEZ-ROJO S, et al. Development of barley and yeast $\beta$-glucan aerogels for drug delivery by supercritical fluids[J]. Journal of $CO_2$ Utilization, 2017, 22: 262−269.
[73] DUMOULIN M, HAYASHI R. High pressure, a unique tool for food texturization[J]. Food Science and Technology International, Tokyo, 1998, 4(2): 99−113.
[74] ARBANAH M, DABIN L, YONGHUN S, et al. Recent progress in polysaccharide aerogels: Their synthesis, application, and future outlook[J]. Polymers, 2021, 13(8): 1347.
[75] SINGH V, TIWARI A, TRIPATHI D N, et al. Microwave assisted synthesis of guar-g-polyacrylamide[J] Carbohydrate Polymers, 2004, 58(1): 1-6.
[76] 王艳, 艾玉勇, 肖惠莹, 等. 铜基壳聚糖气凝胶的制备及对铀的吸附性能[J]. 绵阳师范学院学报, 2024, 43(11): 37−46. [WANG Y, AI Y Y, XIAO H Y, et al. Preparation of copper-based chitosan aerogel and its adsorption properties for uranium[J]. Journal of Mianyang Teachers' College, 2024, 43(11): 37−46.]
[77] WANG S Y, WANG F J, LU C H, et al. Citral-loaded nanocellulose/sodium alginate aerogel packaging liner for fresh pork preservation[J]. Food Control, 2024, 155: 110031.
[78] CYNTHIA F C, EVRIM E, ANTONIO M A, et al. Superabsorbent food packaging bioactive cellulose-based aerogels from *Arundo donax* waste biomass[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 96: 151−160.
[79] 苗长瑞, 黄文俊, 李可妮. 水凝胶的制备及其在废水处理领域的应用[J]. Material Sciences, 2024, 14: 761. [MIAO C Z, HUANG W J, LI K N. Preparation of hydrogels and their application in the field of wastewater treatment[J]. Material Sciences, 2024, 14: 761.]
[80] 田润苗, 罗晓宇, 许国娟, 等. 魔芋葡甘聚糖/可得然胶复合气凝胶的生物降解性研究[J]. 食品工业科技, 2023, 44(7): 143−151. [TIAN R M, LUO X Y, XU G J, et al. Study on the biodegradability of konjac glucomannan/curdlan composite aerogel [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(7): 143−151.]
[81] ESCUDERO R R, ROBITZER M, RENZO D F, et al. Alginate aerogels as adsorbents of polar molecules from liquid hydrocarbons: Hexanol as probe molecule[J]. Carbohydrate Polymers, 2008, 75(1): 52−57.
[82] IVANOVIC J, MILOVANOVIC S, ZIZOVIC I. Utilization of supercritical $CO_2$ as a processing aid in setting functionality of starch-based materials[J]. Starch-Starke, 2016, 68(9-10): 821−833.
[83] AMENAH B A, GENADA S, ZEYNEP U. Biodegradable polysaccharide aerogels based on tragacanth and alginate as novel drug delivery systems[J]. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 2024, 109(3): 748−756.
[84] RADWAN P J, PIąTKOWSKI M. P, JANUS Ł, et al. Biodegradable, pH-responsive chitosan aerogels for biomedical applications[J]. RSC Advances, 2017, 7(52): 32960−32965.
[85] 佟亚轩, 高海南, 陈礼平, 等. 生物基气凝胶的改性及功能化研究进展[J]. 中国塑料, 2024, 38(2): 87−94. [TONG, Y X, GAO H N, CHEN L P, et al. Research progress in modification and functionalization of bio-based aerogels[J]. Chinese Plastics, 2024, 38(2): 87−94.]
[86] LI S M, SAMUEL H, NATALIA S. Biopolymer-based hydrogels for harvesting water from humid air: A review[J]. Sustainability, 2023, 15(1): 848.
[87] TARIQ Z, IQBAL D N, RIZWAN M, et al. Significance of biopolymer-based hydrogels and their applications in agriculture: A review in perspective of synthesis and their degree of swelling for water holding[J]. RSC Advances, 2023, 13(35): 24731−24754.
[88] 邵林. 温度/pH 双响应性海藻酸钠气凝胶的研究及其在载药领域的应用[D]. 海口: 海南大学, 2018. [SHAO L. Study on temperature/pH dual responsive alginate aerogel and its application in drug delivery[D]. Haikou: Hainan University, 2018.]
[89] 王洪江, 宋雪健, 孟令伟, 等. 食品包装用 $CO_2$ 吸收衬垫的制备及吸收动力学研究[J]. 包装与食品机械, 2018, 36(1): 1−4. [WANG H J, SONG X J, MENG L W, et al. Preparation and sorption kinetics of $CO_2$ absorption pad for food packaging[J]. Packaging and Food Machinery, 2018, 36(1): 1−4.]
[90] WANG F Q, XU Z P, CHEN L, et al. Super absorbent resilience antibacterial aerogel with curcumin for fresh pork preservation[J]. Food Control, 2024, 159: 110289.
[91] WU Y, LI H B, CHEN M M, et al. An aerogel-based intelligent active packaging with the dual functions of spoilage detection and freshness preservation[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 156: 110289.
[92] SANCHEZ L M, RINCÓN E, DEHARO N J, et al. Vegetable lignocellulosic residues and chitosan as valuable resources in the superabsorbent bio-aerogel development for food conservation [J]. Food and Bioprocess Technology, 2024, 17(5): 1231−1246.
[93] YU K, YANG L, ZHANG N, et al. Superabsorbent, antibacterial, and antioxidant nanocellulose aerogels: Preparation, characterization, and application in beef preservation[J]. Food Chemistry, 2025, 466: 142251.
[94] VILLAMIZAR C L, PEREIRA F J, CASTANEDO M, et al. Hemp cellulose-based aerogels and cryogels: From waste biomass to sustainable absorbent pads for food preservation[J]. Carbohydrate Polymers, 2025, 348(PB): 122887.
[95] DAI H J, LV T Y, LIU S Y, et al. Preparation of nanocellulose light porous material adsorbed with tannic acid and its application in fresh-keeping pad[J]. Food Chemistry, 2024, 444: 138676.
[96] ZHOU X, GUO X, CHAI Y W, et al. Superabsorbent whey protein isolates/chitosan-based antibacterial aerogels: Preparation, characterization and application in chicken meat preservation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 259(P1): 128961.
[97] ZHOU X, WANG F Q, YU Y, et al. Muti-network active aerogel based on PVA, bacterial cellulose, and sodium alginate: characterization, kinetics studies, and application for mutton preservation[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 163: 111033.
[98] YANG J W, ZHANG X H, CHEN L, et al. Antibacterial aerogels with nano-silver reduced *in situ* by carboxymethyl cellulose for fresh meat preservation[J]. International Journal of Biolog-

ical Macromolecules, 2022, 213: 621−630.
[99] XUE J W, MA C Y, YANG S Q, et al. Janus hydrogel loaded with a $CO_2$-generating chemical reaction system: Construction, characterization, and application in fruit and vegetable preservation[J]. Food Chemistry, 2024, 458: 140271.
[100] LAN L, JIANG S, HU X, et al. Nanocellulose-based antimicrobial aerogels with humidity-triggered release of cinnamaldehyde [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 262(P2): 130108.
[101] YANG Z, TONG F, PENG Z W, et al. Development of colorimetric/fluorescent two-channel intelligent response labels to monitor shrimp freshness[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 135: 108125.
[102] KIM D, CAO Y T, DHANUSHKODI M, et al. Bacterial detection: A microneedle technology for sampling and sensing bacteria in the food supply chain[J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31(1).
[103] CAI S Y, SONG G J, ZHANG G F, et al. A multicolor fluorescent sensor array based on curcumin and its analogs as a shrimp freshness indicator[J]. Sensors and Actuators: B. Chemical, 2022, 367: 132153.
[104] TANG Q S, HU J W, LI S, et al. Preparation of an aramid nanofiber-reinforced colorimetric hydrogel employing natural anthocyanin as an indicator for shrimp and fish spoilage monitoring[J]. European Polymer Journal, 2023, 187: 111889.
[105] RAWDKUEN S, KAEWPRACHU P. Valorization of food processing by-products as smart food[J]. Food Preservation and Waste Exploitation, 2020, 107.
[106] AMERI M, AJJI A, KESSLER S. Enhancing seafood freshness monitoring: Integrating color change of a food-safe on-package colorimetric sensor with mathematical models, microbiological, and chemical analyses[J]. Current Research in Food Science, 2024, 9: 100934.
[107] GANESAN K, BUDTOVA T, RATKE L, et al. Review on the production of polysaccharide aerogel particles[J]. Materials, 2018, 11(11): 2144.
[108] CLARE G, SIMÕES P, COSTA F B, et al. Dual-function starch aerogels: Nutraceutical carriers for iron and folic acid delivery[J]. Journal of Drug Delivery Science and Technology, 2024, 100: 106069.
[109] STELLA P, SONIA C, LARA M. Feasibility of protein aerogel particles as food ingredient: The case of cocoa spreads[J]. Journal of Food Engineering, 2023, 351: 111522.
[110] SHAN G C, CUI M Q, WANG X S, et al. Dual-reinforcement strategy: Fabrication of CMC-Na/SPI aerogel-templated oleogels through electrostatic adsorption and chemical crosslinking [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 148(PB): 109525.
[111] LARA M, MIKKONEN K S, GARCÍA G C A. Aerogels as porous structures for food applications: Smart ingredients and novel packaging materials[J]. Food Structure, 2021, 28: 100188.
[112] PLAZZOTTA S, CALLIGARIS S, MANZOCCO L. Structural characterization of oleogels from whey protein aerogel particles[J]. Food Research International, 2020, 132: 109099.