

# 虾青素及其递送系统在疾病预防和功能食品应用中的研究进展

崔馨瑶, 苏文涛, 宋勋禹\*

(大连工业大学食品交叉科学研究院, 食品学院, 海洋食品加工与安全控制全国重点实验室, 国家海洋食品工程技术研究中心, 大连市精准营养重点实验室, 辽宁大连 116034)

**摘要:** 虾青素是一种具有卓越抗氧化活性的天然类胡萝卜素, 但其疏水性、稳定性差及生物利用度低的问题严重限制了其应用。多种载体体系已被应用于虾青素的高效递送, 如脂质基系统、天然聚合物基系统和智能响应型递送系统, 这些体系提升了虾青素的稳定性、溶解度、生物利用度及靶向性。基于递送系统的优化, 虾青素的多种生物活性功能得以更有效发挥, 例如保护眼部健康、缓解肠道炎症、抗糖尿病及其并发症、抗癌、保护皮肤健康、预防心血管健康, 以及改善代谢性肝病等。目前, 虾青素在功能食品中的应用仍面临挑战。为了系统梳理虾青素递送体系的研究进展与应用瓶颈, 本文回顾近年来新兴的虾青素递送体系, 并对其增强的营养功能和分子机制进行了综述, 同时也对虾青素在功能性食品方面的应用和发展前景进行总结, 以期对虾青素及其递送系统的研究和应用提供理论基础。

**关键词:** 虾青素; 递送系统; 营养功能; 功能食品

文章编号: 1673-9078(2026)06-35-46

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.6.1580

## Research Progress on Astaxanthin and Its Delivery Systems in Disease Prevention and Functional Food Applications

CUI Xinyao, SU Wentao, SONG Xunyu\*

(Academy of Food Interdisciplinary Science, School of Food Science and Technology, Dalian Polytechnic University, State Key Laboratory of Marine Food Processing and Safety Control, National Engineering Research Center of Seafood, Dalian Key Laboratory of Precision Nutrition, Dalian, 116034, China)

**Abstract:** Astaxanthin is a natural carotenoid with remarkable antioxidant activity; however, its hydrophobicity, poor stability, and low bioavailability strongly limit its practical applications. Various delivery systems have been developed for the efficient delivery of astaxanthin, including lipid-based, natural polymer-based, and smart responsive delivery systems, which enhance astaxanthin stability, solubility, bioavailability, and targeting. Optimized delivery systems enable astaxanthin to more effectively exert its biological activities, including protecting eye and skin health, alleviating intestinal inflammation, combating diabetes and its complications, fighting cancer, preventing cardiovascular diseases, and ameliorating metabolic liver diseases. However, the application of astaxanthin in functional foods continues to encounter significant challenges. To systematically summarize the research progress and limitations in the application of astaxanthin delivery systems, this review discusses emerging astaxanthin delivery

引文格式:

崔馨瑶,苏文涛,宋勋禹.虾青素及其递送系统在疾病预防和功能食品应用中的研究进展[J].现代食品科技,2026,42(6):35-46.

CUI Xinyao, SU Wentao, SONG Xunyu. Research progress on astaxanthin and its delivery systems in disease prevention and functional food applications [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(6): 35-46.

收稿日期: 2025-08-05 ; 修回日期: 2025-10-12 ; 接受日期: 2025-10-16

基金项目: 辽宁省自然科学基金 (2025-BS-0467); 大连工业大学引进人才科研启动项目 (LJBKY2025065)

作者简介: 崔馨瑶 (2003-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品精准营养, E-mail : cuixinyao2025@163.com

通讯作者: 宋勋禹 (1994-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品精准营养, E-mail : xunyu\_song@163.com

systems, the nutritional functions they enhance, and the underlying molecular mechanisms. Further, it outlines the developmental and application prospects of astaxanthin in functional foods, providing a theoretical foundation for future research and application.

**Key words:** astaxanthin; delivery system; nutritional function; functional foods

虾青素 (Astaxanthin) 是一种脂溶性酮式类胡萝卜素, 其分子结构中含有的共轭双键以及末端的羧基和羟基赋予其强大的抗氧化活性<sup>[1]</sup>。结构组成是影响虾青素生物活性的核心因素, 其共轭双键的不同旋转状态使虾青素形成顺式和反式异构体, 其中顺式异构体的生物利用度较高<sup>[2]</sup>。另一方面, 虾青素在 C3 和 C3' 位的羟基构型差异, 使虾青素具有三种立体异构体, 包括 3R,3'R、3S,3'S 和 3R,3'S 形式<sup>[3]</sup>。虾青素的获取途径主要包括化学合成和天然提取。合成虾青素虽成本较低, 但其是三种立体异构体的混合物; 而天然虾青素的主要构型为 3S, 3'S<sup>[4]</sup>。研究表明, 3S, 3'S 异构体的抗氧化和抗衰活性优于其他异构体<sup>[5]</sup>。鉴于合成虾青素的低生物活性, 天然虾青素仍是膳食补充的首选。

虾青素作为一种天然活性物质可有效抑制炎症因子, 具有抗氧化和抗炎活性, 能够清除 DPPH 和加尔万氧基自由基并淬灭单线态氧<sup>[6]</sup>, 其抗氧化活性是同类型  $\beta$ -胡萝卜素的 10 倍<sup>[7]</sup>。虾青素可以缓解糖尿病、癌症、心血管疾病和代谢性肝病等疾病进程, 同时也能保护皮肤和眼部健康 (图 1)<sup>[8]</sup>。然而, 较差的水溶性和稳定性以及体内的低生物利用度, 严重制约了其生理功能的发挥和食品领域应用, 因此, 开发高效递送系统并深入探究其营养保健功能及在功能食品中的应用潜力至关重要。

采用食源性生物大分子, 如膳食纤维、蛋白和脂质, 构建保护性递送架构, 可有效增虾青素在复杂食品体系中的分散性、贮藏稳定性以及生物可及性。目前, 虾青素的递送系统主要包括脂质体<sup>[9]</sup>、固体纳米脂质载体<sup>[10]</sup>、纳米结构脂质载体<sup>[11]</sup>以及乳液<sup>[12]</sup>体系等。在此基础上研发的新型智能响应系统, 如 pH 响应<sup>[13]</sup>、线粒体靶向<sup>[14]</sup>和炎症靶向<sup>[15]</sup>系统, 能够实现虾青素在炎症区域的精准富集。这不仅赋予了虾青素更高的生物可及性和生物利用度, 还显著增强了其对慢性疾病的干预作用。

本文将着重介绍基于天然大分子的新型虾青素稳态递送体系, 并深入阐述智能响应系统对虾青素靶向性和功能性的改善效果及其分子机制。递送系统可降低食品基质和加工过程对虾青素的影响, 有助于扩展其应用前景。此外, 本文还将讨论当前面临的应用挑战, 以期对虾青素递送载体的设计以及在功能食品开发中

的应用提供参考。

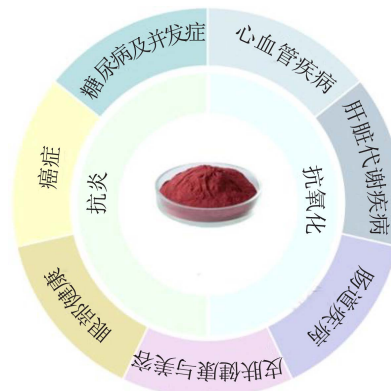


图 1 虾青素的营养保健功能

Fig.1 Nutritional and health benefits of astaxanthin

## 1 虾青素递送系统

### 1.1 脂质基递送系统

脂质基递送系统是一类以脂质为核心载体材料, 通过物理或化学方式包载虾青素的纳米或微米级的输送体系, 主要通过脂质体、固体脂质纳米粒、纳米结构脂质载体、脂质基乳液等结构类型对虾青素进行递送 (表 1)。

#### 1.1.1 脂质体

脂质体通常是用磷脂和甾醇合成, 结构上与细胞膜的磷脂双分子层相似, 具有维持生物活性、提高生物利用度等优点, 被广泛应用于虾青素的递送<sup>[16]</sup>。利用大豆磷脂和胆固醇制备的脂质体封装虾青素可显著提升虾青素的生物可及性, 游离虾青素的生物可及性为 6.54%, 而封装在脂质体内的虾青素生物可及性达到 39.61%<sup>[21]</sup>。脂质体中添加的胆固醇可以调节膜流动性和提高脂质体的稳定性, 但摄入过量易引发心血管等疾病。采用油酸植物甾醇以及海参硫酸化甾醇来替代胆固醇制备新型脂质体, 不仅能降低胆固醇的摄入, 还可以提高虾青素的抗氧化性能和稳定性<sup>[22,23]</sup>。此外, 利用壳聚糖对脂质体表面进行修饰, 与未修饰脂质体相比, 其稳定性、抗氧化性以及虾青素的包封率均有所提升<sup>[24]</sup>。除了利用多糖对脂质体表面进行改性外, 还可以利用聚乙二醇改性、肽和蛋白改性等方法对传统脂质体加以修饰, 使其更好的发挥递送功能<sup>[25]</sup>。

表 1 不同基质虾青素递送体系的研究  
Table 1 Research on astaxanthin delivery systems with different matrices

| 递送体系    |          | 载体原材料            | 尺寸范围/nm                | 包封率/%        | 负载量/%       | 生物可及性/%      | 参考文献 |
|---------|----------|------------------|------------------------|--------------|-------------|--------------|------|
| 脂质基     | 脂质体      | 磷脂、油酸植物甾醇        | 100~220                | 89.45 ± 0.78 | 1.49 ± 0.02 | —            | [9]  |
|         | 脂质体      | 大豆卵磷脂            | 105.8 ± 1.2            | 88.83        | 1.96        | —            | [16] |
|         | 固体脂质纳米粒  | 硬脂酸、吐温           | 118、136.6              | 89.06        | 20.55       | —            | [10] |
|         | 纳米结构脂质载体 | 棕榈硬脂酸甘油酯、油酸      | 142.8 ± 5.02           | 94.1 ± 2.06  | 23.5 ± 1.48 | —            | [11] |
|         | 脂质基乳液    | 魔芋葡甘露聚糖、麦醇溶蛋白、藻油 | 6.37 × 10 <sup>3</sup> | —            | —           | 22.37 ± 0.62 | [12] |
|         | 脂质基乳液    | 酪蛋白酸钠、果胶、壳聚糖、棕榈油 | 1 052.0 ± 20.8         | —            | —           | > 65         | [17] |
| 蛋白基     | 纳米颗粒     | 浓缩乳清蛋白、油树脂       | 80~130                 | 96           | —           | 76           | [18] |
| 多糖基     | 纳米颗粒     | 低聚壳聚糖、海藻酸盐       | 264 ± 32               | 71.3 ± 2.2   | 6.9 ± 1.6   | 61.5         | [19] |
| 蛋白 / 多糖 | 纳米颗粒     | 玉米醇溶蛋白、低聚壳聚糖     | 80~100                 | 94.34 ± 0.64 | 6.51 ± 0.04 | —            | [20] |

1.1.2 脂质纳米颗粒

固体脂质纳米颗粒（SLN）和纳米结构脂质载体（NLC）是两种常见的脂质纳米颗粒<sup>[26]</sup>。SLN 是以可生物降解的和具有生物相容性的固体脂质为基质，将虾青素包封于固体脂质中以提高虾青素的稳定性和生物利用度，并实现控制释放<sup>[27]</sup>。利用硬脂酸、大豆油、吐温 20 制备的 SLN 包封虾青素，其稳定性优于游离虾青素，并且体外释放研究显示，利用硬脂酸添加量为 1 wt% 的 SLN 包封后，虾青素在胃肠液中的累积释放率降低，说明 SLN 可以延缓虾青素的释放<sup>[28]</sup>。NLC 中液体脂质的加入可以降低脂质结晶度，使脂质基质结构无序，从而容纳更多的活性物质<sup>[29]</sup>。采用比例为 70:30 的棕榈酸鲸蜡酯和大豆油为原料制备负载虾青素的 NLC，其虾青素保留率为 68.52%，经 40 ℃ 储藏 30 d 后其抗氧化活性仅下降 7.16%。大豆油的加入破坏了棕榈酸鲸蜡酯的晶体结构，使脂质基质可以捕获更多的虾青素，从而提高虾青素的保留率<sup>[30]</sup>。

1.1.3 脂质基乳液

乳液是由油和水两相构成的体系，针对脂溶性虾青素的递送体系通常为 O/W 乳液。乳化剂对乳液界面液滴聚结具有决定性影响，是决定负载虾青素乳液稳定性的主要因素。陈佳玲等<sup>[31]</sup>比较了吐温 80、酪蛋白酸钠、辛烯基琥珀酸淀粉钠和改性大豆磷脂四种乳化剂对虾青素纳米乳液的界面张力、稳定性和生物可及性的影响，其中以辛烯基琥珀酸淀粉钠最佳，其生物可及性可达 33.65%。在 4 ℃ 和 25 ℃ 存储 8 d 后，虾青素保留率仍可达 91.14% 和 86.21%。相比未糊化淀粉，糊化辛烯基琥珀酸酐改性薏仁淀粉作为稳定剂的虾青素乳液乳化性更好，且虾青素的保留率高于 50%，生物可及性可提高至 16.32%<sup>[32]</sup>。

除通过改良乳化剂来提高乳液的稳定性外，还可以通过形成多层乳液和 Pickering 乳液来抑制乳液体系

的絮凝、乳化和分离，从而有效包封虾青素。多层乳液形成的多层界面更有助于保护油滴中的虾青素不易被降解<sup>[33]</sup>。与单层乳液相比，由肌原纤维蛋白-壳聚糖复合物制备的虾青素负载多层乳液有着更高的 pH 和温度稳定性，更优的抗脂质和蛋白质氧化能力<sup>[34]</sup>。利用壳聚糖和银耳多糖逐层封装虾青素的纳米乳液提高了虾青素的物理和化学稳定性，生物可及性高达 60%<sup>[35]</sup>。除了双层封装外，Sun 等<sup>[17]</sup>利用酪蛋白酸钠、果胶和壳聚糖逐层趁机制备的三层乳液也展现出较好的稳定性，并能实现在肠道中释放。

Pickering 乳液是一种使用固体颗粒作为稳定剂的新型乳液，这些固体颗粒吸附在油水界面，形成一层保护膜，从而防止液滴聚集<sup>[36]</sup>。以麦醇溶蛋白与魔芋葡甘露聚糖的比例为 1:1 制备的麦醇溶蛋白 / 魔芋葡甘露聚糖胶体颗粒稳定负载虾青素的 Pickering 乳液，生物可及性提高 4.5 倍，达到 22.37%<sup>[12]</sup>。利用 0.7 wt% 的纳米纤维素稳定 Pickering 乳液可提高乳液的稳定性，但虾青素的生物可及性较低，可能是由于高浓度的纳米纤维素会抑制脂肪酶的分解，不利于虾青素释放<sup>[37]</sup>。类似的，Zhang 等<sup>[38]</sup>制备的由魔芋葡甘露聚糖和 κ-卡拉胶稳定的 Pickering 乳液凝胶展现出致密的网络结构，导致体外消化过程中游离脂肪酸的释放量降低，同时虾青素的生物可及性也降低。

1.2 天然聚合物基递送系统

1.2.1 蛋白基纳米颗粒

蛋白基递送系统主要是利用乳清蛋白、大豆蛋白等通过疏水相互作用、氢键或共价键结合包载虾青素，蛋白质在虾青素的表面形成保护屏障以增强虾青素的稳定性和生物利用度。基于马铃薯蛋白制备的虾青素负载纳米颗粒，在胃肠道模拟消化后，封装率高达 78%，基于 Caco-2 细胞模型测得虾青素纳米颗粒的



生物利用度是未包埋的 7 倍<sup>[39]</sup>。Yang 等<sup>[40]</sup>通过比较乳清蛋白、玉米面筋、乳铁蛋白、大豆蛋白和酪蛋白酸钠等蛋白质基质封装虾青素酯的微胶囊的性能,发现利用乳清蛋白包封虾青素的热稳定性好,包封率可达 93.73%,生物利用度是未包封虾青素的 3.15。除此之外,以盐溶性南极磷虾蛋白为载体的虾青素负载纳米颗粒, DPPH 和 ABTS 自由基清除率降低,显著增强了虾青素的抗氧化性能<sup>[41]</sup>。

### 1.2.2 多糖基递送体系

多糖基递送系统是利用壳聚糖、海藻酸钠、果胶、阿拉伯胶或环糊精等多糖包载虾青素,以提高其溶解度和胃肠稳定性。研究发现,在阿拉伯树胶、黄原胶、果胶和甲基纤维素四种多糖制备的虾青素纳米分散体中,由阿拉伯树胶制备的纳米分散体展现了较好的物理稳定性,其平均粒径最小,为 295 nm,但其化学稳定性较差,10 ℃ 储存 30 d 后损失率达到了 86.27%<sup>[42]</sup>。单一多糖基递送系统在稳定性方面存在局限性,利用壳寡糖和海藻酸盐制备的虾青素负载纳米颗粒,封装效率达到 71.3%,稳定性和抗氧化活性均有所提高。包封后虾青素的生物可及性比游离虾青素高 5 倍、生物利用度高 15 倍<sup>[19]</sup>,可见复合多糖共同递送可以提高虾青素递送效率。

### 1.2.3 蛋白/多糖复合递送体系

相比较单一体系,蛋白质/多糖复合递送体系可以进一步提升虾青素的稳定性。例如,将明胶和阿拉伯胶共同使用制备虾青素的纳米分散体,使其物理稳定性更好,而当明胶与油酸蔗糖复合所制备的纳米分散体的粒径更小,为 121.4 nm,主要是油酸蔗糖的界面张力低,更易形成小液滴<sup>[43]</sup>。由牛血清白蛋白和壳聚糖制备的纳米颗粒分别包封虾青素的 H 型和 J 型聚集体,封装效率分为 93.6% 和 95.9%,提高虾青素聚集体的水分散性和稳定性<sup>[44]</sup>。除了二元复合物外,壳聚糖、酪蛋白酸盐和葡聚糖制备的三元复合物纳米颗粒对 3% 负载比的虾青素进行封装,封装效率达到 70.2%,虾青素质量浓度为 40  $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$  时 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除率高于游离虾青素,达到 85.6%<sup>[45]</sup>。

## 1.3 智能响应型递送系统

### 1.3.1 pH 响应

虾青素的稳定性主要受光、热、氧以及 pH 值等因素影响,容易在加工、储存和消化的过程中分解。在胃部的强酸性环境下,裸露的虾青素很容易遭到破坏,导致其有效成分减少<sup>[46]</sup>。pH 响应型递送系统中添加 pH 敏感材料,环境 pH 值的变化会触发 pH 敏感

材料的性质改变,可以保护虾青素在强酸性环境下不易被分解,在适宜的 pH 条件下释放,实现靶向治疗。研究表明壳聚糖和银耳多糖逐层封装虾青素的纳米乳液能够在 pH 值  $\geq 7$  时实现 pH 响应型释放,在 pH 值为 1.2 的模拟胃液消化阶段虾青素释放不明显,而在模拟肠液消化阶段虾青素的释放量显著增加<sup>[35]</sup>。利用明胶、酪蛋白酸钠、大豆油和具有 pH 响应性的结冷胶制备的 W/O/W 乳液填充水凝胶共包封虾青素和藻蓝蛋白,封装率分别为 90.82% 和 94.1%。虾青素免受酸性胃液影响,生物可及性显著提高<sup>[13]</sup>。Huang 等<sup>[47]</sup>采用原花青素和海参肽制备了具有 pH 响应性能的纳米颗粒,虾青素的保留率在 pH 值为 2.0、5.0 和 7.0 时分别为 69.39%、28.41% 和 88.75%。肿瘤微环境比正常组织环境 pH 值低,可以利用 pH 梯度实现药物在肿瘤区域的释放,增加肿瘤附近的药物浓度虾青素纳米颗粒在 pH 值为 5.0 的酸性肿瘤微环境中释放,可以减少对正常组织的药物干扰,实现肿瘤靶向递送<sup>[48]</sup>。

### 1.3.2 线粒体靶向

线粒体是产生三磷酸腺苷的主要场所,为体内细胞提供能量。氧化应激引起的线粒体功能障碍会产生过量的 ROS,导致细胞氧化受损<sup>[49]</sup>。通过将虾青素靶向递送到线粒体,能够有效减轻氧化应激,改善线粒体功能障碍<sup>[14,50,51]</sup>。Chen 等<sup>[14]</sup>利用三苯基溴化膦 (TPP) 修饰的分离乳清蛋白-葡聚糖偶联物对虾青素封装,制备成具有线粒体靶向性的虾青素负载纳米颗粒,该纳米颗粒能有效减少  $\text{H}_2\text{O}_2$  诱导的 ROS 的生成,使线粒体膜电位处于正常状态。该团队另一项研究中发现,虾青素负载线粒体靶向纳米颗粒能够增加超氧化物歧化酶、过氧化氢酶两种抗氧化酶活性,提高谷胱甘肽含量并降低丙二醛含量,还可以缓解  $\text{H}_2\text{O}_2$  诱导 RAW264.7 细胞的氨基酸和能量代谢紊乱,有效缓解氧化应激<sup>[50]</sup>。利用乳酸、海藻酸钠、TPP 和 2-羟丙基- $\beta$ -环糊精通过酯化反应制备负载虾青素的双功能肝细胞-线粒体靶向纳米系统,能够降低乙醇诱导的 HepaRG 肝细胞中 ROS 水平至 62.20%,低于其余对照组;同时细胞的线粒体膜电位提升至 97.35%,有效缓解细胞氧化损伤<sup>[51]</sup>。

### 1.3.3 炎症靶向

虾青素可以影响巨噬细胞、树突状细胞和中性粒细胞等炎症细胞,通过调节多个信号通路来影响炎症反应,包括 PI3K/AKT、Nrf2、NF- $\kappa$ B、MAPK 和 JAK-2/STAT-3,还可以通过减少 IL-1 $\beta$ 、IL-6、TNF- $\alpha$  和 MCP-1 等促炎因子的产生来减少炎症作用<sup>[52]</sup>。虾青素的炎症靶向递送系统旨在提高虾青素在炎症部位的

生物利用度和治疗效果。Cui 等<sup>[15]</sup>构建了靶向透明质酸修饰的基于牛奶外泌体的虾青素递送系统,可以靶向的在 RAW264.7 巨噬细胞中积累,并有效改善由脂多糖诱导的小鼠模型中 ROS 的产生和线粒体电位膜去极化,从而防止巨噬细胞的激活,还可以通过抑制 IL-1 $\beta$ 、IL-6 和其他炎症因子的表达来减少炎症的产生。被 TPP 修饰的分离乳清蛋白-甘露糖偶联物基于美拉德反应制备成虾青素负载纳米颗粒,具有巨噬细胞和线粒体双靶向递送特性、良好的抗氧化活性和高封装率,并且能够通过减少巨噬细胞的 M1 极化和促进 M2 极化来缓解由葡聚糖硫酸钠诱导的结肠炎<sup>[53]</sup>。

## 2 递送系统提高虾青素对疾病的预防作用

氧化应激和炎症是多种慢性疾病的共同致病因素,虾青素的共轭双键可清除 ROS 并增强超氧化物歧化酶、谷胱甘肽过氧化物酶和过氧化氢酶等抗氧化酶的活性,从而提高机体清除自由基的能力。虾青素可以通过减少促炎因子和增加抗炎因子两方面发挥抗炎作用(图2)。虾青素抑制 MAPK、PI3K/Akt 以及 JKA2/STAT3 信号通路减少促炎因子表达作用。PI3K/Akt 信号通路在细胞生长、分化和炎症反应中发挥重要作用,可以抑制下游 NF- $\kappa$ B 通路的激活来减少 IL-1 $\beta$ 、IL-6 和 TNF- $\alpha$  等促炎因子的生成<sup>[54]</sup>。虾青素还能激活 Nrf2/ARE 通路从而诱导 HO-1 的表达,促进 IL-4、IL-10、IL-11 和 IL-13 等抗炎因子的生成<sup>[55]</sup>。Nrf2 通路的激活促进下游抗氧化基因的表达,增强细胞的抗氧化能力,有效减少氧化损伤。

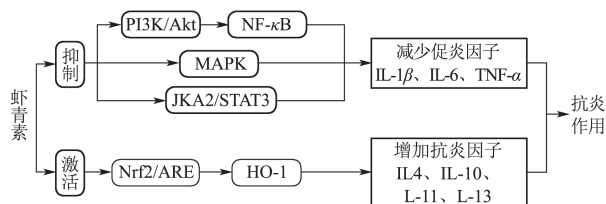


图2 虾青素的抗炎机制

Fig.2 The anti-inflammatory mechanism of astaxanthin

### 2.1 眼部健康防护

蓝光是可见光谱中能量最高的光,长期暴露于蓝光之下会导致视网膜色素上皮细胞氧化应激,导致线粒体损伤和细胞凋亡<sup>[56]</sup>,诱发年龄相关性黄斑变性(AMD)和干眼症(DED)等疾病<sup>[57]</sup>。虾青素可以减少由蓝光诱导的661W感光细胞的ROS以及8-羟基-2'-脱氧鸟苷、硝基酪氨酸和丙烯醛三项氧化应激标志物,通过激活 PI3K/Akt 通路上调 Nrf2 调节的 II 期抗氧化酶(HO-1 和 NQO1),此外也增加了抗凋亡蛋白 Bcl-2 的表达,能够减少细胞凋亡<sup>[58]</sup>。

AMD 作为一种神经退行性眼病,其主要影响因素是眼部氧化损伤和脉络膜新生血管形成<sup>[59]</sup>。小鼠实验表明,虾青素可以抑制 NF- $\kappa$ B 通路的激活,并减少血管内皮生长因子、IL-6、细胞间粘附分子、MCP-1、VEGFR 受体等炎症因子的表达,有效抑制脉络膜新生血管的形成<sup>[60]</sup>。Chang 等<sup>[61]</sup>将虾青素和阿西替尼共封装于聚乳酸-乙醇酸共聚酯形成的纳米药物,在单剂量结膜下给药时与诱发湿性 AMD 的因素展现出协同作用,并在眼部周围的生物相容性较好,对湿性 AMD 有很好的治疗效果。

DED 的发病机制与高渗性激活角膜上皮细胞和免疫细胞中的氧化应激引起的眼表炎症等损伤有关<sup>[25]</sup>。Hou 等<sup>[62]</sup>研究发现可以利用虾青素来强化 SLC7A11/GPX4 通路影响细胞自噬和铁死亡过程来改善 DED。通过改善谷胱甘肽过氧化物酶和谷胱甘肽的表达,可以清除脂质过氧化物,从而缓解铁死亡造成的线粒体膜损伤和细胞裂解。此外,虾青素可以通过调节 Keap1-Nrf2/HO-1 信号通路减少氧化应激并抑制 MMP-9 和 IL-1 $\beta$  两种炎症因子的表达,有效缓解小鼠由苯扎氯铵诱导的 DED<sup>[63]</sup>。人群实验结果也证明,虾青素可以用于防治轻中度的 DED。60 名 DED 患者接受每日 12 mg 的虾青素口服干预,为期一个月,结果显示其泪膜稳定性、角膜和结膜上皮细胞修复以及睑板腺分泌功能等指标均有明显改善<sup>[64]</sup>。

### 2.2 肠道保护

炎症性肠病是一种胃肠道慢性炎症性疾病,包括溃疡性结肠炎和克罗恩病。2021 年,全球炎症性肠病患病人数共 3 830 119 例,新增病例 375 140 例<sup>[65]</sup>。利用结肠靶向递送系统将虾青素精准递送到肠道炎症区域并延缓释放,可以有效发挥其对炎症性肠病的治疗效果。利用壳聚糖-熊果酸和食用透明质酸制备的虾青素递送系统,能够通过乳铁蛋白絮凝将虾青素选择性锚定在 CD44 受体靶点,实现精准递送并提高虾青素的表观溶解度至 975.3 mg·L<sup>-1</sup>,比游离虾青素高 517.3 倍,促炎因子 IL-6 和 TNF- $\alpha$  的下调以及抗炎因子 IL-10 的上调展现出良好的抗炎活性<sup>[66]</sup>。Zhang<sup>[67]</sup>基于酪蛋白酸盐、壳聚糖-TPP 和海藻酸钠构建的具备 pH 响应释放和线粒体靶向能力载有虾青素的花椰菜样载体,可以抑制氧化应激引起的 ROS 的过度产生和线粒体膜电位的去极化,从而缓解葡聚糖硫酸钠诱导的结肠炎。在调节肠道菌群方面,利用海藻酸钠和聚硫化丙烯制备的 ROS 和 pH 双响应型虾青素纳米颗粒来改善结肠炎,干预后肠道菌群中的乳杆菌属和 *Leptospiraceae* 的丰度上调、厚壁菌门和拟杆菌属比例等也会发生变化<sup>[68]</sup>。Zhang 等<sup>[69]</sup>制备了富含虾青素的结肠靶向海藻酸



盐微球, 可以增加结肠炎小鼠结肠长度并减轻结肠粘膜炎症, 并显著降低肠道拟杆菌门的丰度, 维持拟杆菌门和厚壁菌门的正常比例, 有效缓解结肠炎。

### 2.3 抗2型糖尿病及其并发症

由胰岛素抵抗和 $\beta$ 细胞功能障碍引发的2型糖尿病已成为全球范围的慢性疾病之一。已有动物研究表明, 虾青素可以减少2型糖尿病小鼠的果糖胺和促炎因子TNF- $\alpha$ 水平, 抑制JAK2/STAT3和NF- $\kappa$ B信号通路, 从而降低小鼠血糖并减轻胰岛素抵抗<sup>[70]</sup>。链脲佐菌素诱导的糖尿病大鼠食用虾青素3周后, 血糖和总胆固醇(T-CHO)水平显著降低, 而血液中的高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)水平升高, 脂联素等与胰岛素敏感性相关基因表达增加<sup>[71]</sup>。虾青素还可显著降低糖尿病小鼠的ROS、丙二醛、一氧化氮水平并提高超氧化物歧化酶、谷胱甘肽还原酶活性<sup>[72]</sup>。

长期糖尿病还会引发糖尿病肾病、糖尿病心肌病、糖尿病周围神经病变和糖尿病视网膜病变等微血管并发症<sup>[73]</sup>。虾青素对上述并发症也有一定的预防功效, 研究表明以100 mg·kg<sup>-1</sup>的剂量给药4周, 可通过调节NOX4、Fractalkine、Nrf2和AP-1来减轻糖尿病大鼠的心肌病和肾损伤<sup>[74]</sup>。缓解神经并发症主要通过抑制tau蛋白磷酸化和修复DNA损伤, 研究发现虾青素与二甲双胍联合使用都有效降低血糖水平并减少tau蛋白磷酸化和DNA片段化, 可以改善血糖水平和认知功能<sup>[75]</sup>。针对糖尿病引起的视网膜病变, 虾青素也有很好的预防效果。虾青素可以通过激活Nrf2/keap1通路减少氧化应激, 增加视网膜总厚度和神经节细胞层细胞数量, 缓解视网膜组织损伤<sup>[76]</sup>。

### 2.4 抗癌作用

多项体内外研究显示, 虾青素具有抗结直肠癌、胃癌、黑色素瘤、肠癌、乳腺癌和肝癌等癌症的潜力。虾青素可以通过直接诱导肿瘤细胞凋亡、抑制肿瘤侵袭和转移等多途径来预防癌症<sup>[77]</sup>。通过构建靶向递送体系, 能够增强虾青素的生物利用度, 提升抗癌效果<sup>[78,79]</sup>。

乙二醇壳聚糖纳米颗粒能够将虾青素递送到基于B16F10人黑色素瘤细胞的动物肺转移模型中, 并有效抑制癌细胞的转移<sup>[78]</sup>。利用含有虾青素和5-氟尿嘧啶的 $\beta$ -乳球蛋白纳米胶囊诱导HCT116结直肠癌细胞可使其凋亡, 同时由于虾青素提高了抗癌效果<sup>[79]</sup>。除了上述机制外, 虾青素还可以通过间接调节肠道菌群和肠道免疫功能来发挥抗癌作用。Ren等<sup>[80]</sup>发现虾青素可以提高机体的抗H22肝细胞肿瘤免疫反应来增强索拉菲尼的抗肝细胞肿瘤效果, 同时也促进可以增强肠道中抗肿瘤免疫的阿克曼氏菌的增殖, 以此提高对肿

瘤的抑制作用。通过抑制PI3K/AKT/NF- $\kappa$ B/STAT3通路的信号传导, 虾青素可以抑制SCC131和SCC4口腔癌细胞的生长<sup>[81]</sup>。基于上述通路, 虾青素还可以通过促进C666-1鼻咽癌细胞凋亡<sup>[82]</sup>, 减少SK-N-SH神经母细胞瘤细胞系的侵袭和转移<sup>[83]</sup>。

### 2.5 皮肤健康与美容

通过修复DNA损伤和避免光照氧化, 虾青素还能有效的保护皮肤健康。小鼠服用含有虾青素单酯的AIN-93G日粮70 d后, 皮肤中积累的虾青素可以有效预防光老化, 其不仅可以减少紫外线对表皮和真皮基质中聚丝蛋白代谢和脱屑的损伤<sup>[84]</sup>, 增加皮肤中胶原纤维和毛细血管密度并降低皱纹形成的概率<sup>[85]</sup>。虾青素抵抗光老化的能力与其结构类型也有一定关联, 细胞实验表明, 富含Z-异构体的虾青素与全E-异构体的虾青素相比, 能够更好的促进抗弹性蛋白酶活性并抑制抗黑色素和黑色素前体变黑, 但前者对单线态氧的清除率较低且在一定程度上抑制I型胶原的释放<sup>[86]</sup>。动物实验中, Z-异构体比全E-异构体虾青素对紫外线的防护作用要好, 可以更好的保护豚鼠肌肤免受紫外线的照射损伤并减少色素沉着<sup>[87]</sup>。有关虾青素抗衰老活性的人群实验中, 每日4 mg的剂量连续摄入虾青素4周后, 30名中年志愿者血浆中的MDA水平、角质脱屑水平、微生物数量减少, 实现面部肌肤年轻化<sup>[88]</sup>。除此之外, 虾青素对特异性皮炎有一定的调节作用, 通过减少IL-4、IL-5和L-组氨酸脱羧酶等炎症因子的mRNA表达来预防皮肤瘙痒<sup>[89]</sup>。动物实验表明, 磷脂酰胆碱脂质体包封的虾青素对邻苯二甲酸酐诱导的特异性皮炎的治疗效果比游离虾青素要好, 有效的抑制STAT3、NF- $\kappa$ B的转录活性和p50、p65的核易位<sup>[90]</sup>。

### 2.6 心血管疾病的预防及保护

动脉粥样硬化是一种脂质代谢紊乱引发的慢性心血管疾病, 该疾病的机制主要是低脂密度蛋白被氧化为氧化性低密度脂蛋白(LDL-C)后被吞噬细胞吞噬形成泡沫细胞并释放促炎因子<sup>[91]</sup>。虾青素可以通过抑制氧化性LDL-C生成的方式减少泡沫细胞的形成, 从而有效缓解动脉粥样硬化, 通过抑制RhoA/ROCK信号通路可以抑制氧化应激和炎症反应<sup>[92]</sup>。另一种治疗途径为加速胆固醇外排, 减少巨噬细胞内胆固醇的积累从而抑制泡沫细胞的形成, 研究表明虾青素可以通过激活ABCA1表达来实现这一机制<sup>[93]</sup>。此外, 虾青素还可以通过激活PI3K/CDC42通路促进泡沫细胞胆固醇外排, 通过PI3K/RAC1/TGF- $\beta$ 1通路诱导炎症和泡沫细胞脂肪分解, 从而抑制泡沫细胞的形成, 有效预防动脉粥样硬化<sup>[94]</sup>。刘爱阳<sup>[95]</sup>以N-琥珀酰壳聚糖和

聚乙二醇包封脂质体制备的虾青素肠道靶向递送载体,不仅提高了虾青素生物利用率,且小鼠血清 T-CHO、甘油三酯(TG)显著降低,血脂中 LDL-C 的升高以及 HDL-C 的降低都有利于改善动脉粥样硬化,同时血浆中的 IL-1 $\beta$ 、IL-6、IL-17 和 TNF- $\alpha$  降低,而抗炎因子 IL-10 有所升高,主动脉斑块面积减小并提高其稳定性。负载虾青素的聚乳酸-乙醇酸纳米颗粒通过 Nrf2/SLC7A11/GPX4 通路来调节巨噬细胞铁死亡和氧化应激,从而减少斑块面积<sup>[96]</sup>,有效抑制动脉粥样硬化的发展。

## 2.7 代谢性肝病的预防和保护

代谢相关脂肪性肝病(MAFLD)是全球最常见的肝脏疾病之一,其主要是与肝脂肪变性,脂肪组织功能障碍及胰岛素抵抗相关<sup>[97]</sup>。研究显示,虾青素可以通过减少氧化应激和阻断 TGF- $\beta$ 1 信号传导在 MAFLD 中发挥抗炎和抗纤维化作用<sup>[98]</sup>。车彤彤<sup>[99]</sup>构建的肝实质细胞和线粒体双靶向虾青素载运体系不仅可以精准递送到肝脏部位,还可以降低丙二醛和超氧化物歧化酶的含量,有效改善肝脏炎症损伤。郝薛宇等<sup>[100]</sup>制备的负载虾青素的亚麻籽粕蛋白/果胶乳液,能有效减少肝脏 ROS、TG、T-CHO 含量。游离虾青素组 TG 和 T-CHO 分别降低 20.1% 和 22.1%,而负载虾青素的乳液分别降低 44.2% 和 31.9% 的 TG 和 T-CHO 含量,显著提升对 MAFLD 的干预效果。虾青素递送体系能够增强对氧化应激和促炎因子的抑制作用,从而有效改善 MAFLD 疾病进程。

## 3 虾青素在功能食品中的应用和挑战

### 3.1 虾青素在功能食品中的应用

鉴于虾青素的活性功能和着色特性,其已被广泛应用于烘焙食品、蛋制品、乳制品及个性化功能食品的开发。在烘焙食品领域,将虾青素粉按照不同比例替代全麦面粉制成饼干时,产品的葡萄糖释放量随着虾青素粉比例的升高而降低,而总酚含量则随着添加比例的升高而增加,抗氧化性显著提升<sup>[101]</sup>。但是,虾青素自身的鱼腥味可能影响食品感官特性,因此需严格控制添加量。Yousef 等<sup>[102]</sup>指出,以 20% 的比例用虾青素替代小麦粉和糕点粉制作的饼干,其色泽、稳定性较好,且不会影响饼干本身的风味;但需注意高温加工对虾青素的影响,提高其最终保留率是发挥营养保健功能的关键。

除烘焙领域外,富含虾青素的营养强化鸡蛋也广受关注,蛋黄中的卵磷脂可有效促进胃肠道对虾青素的吸收,提高其生物利用率<sup>[103]</sup>。张馨月等<sup>[104]</sup>将虾青素以占日粮 4%~5% 的含量投喂海兰白蛋鸡,蛋鸡产

的虾青素鸡蛋中的虾青素含量为 58.34  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ,鸡蛋中蛋白质和 DPPH、ABTS<sup>+</sup> 自由基清除率有所提高,脂肪含量降低,且虾青素鸡蛋的色泽、质地和口感较好。也有研究表示,虾青素补充会降低鸡蛋蛋黄中维生素的富集,提高脂肪酸富集<sup>[105]</sup>。

此外,虾青素的生物利用度与食品基质密切相关。例如,虾青素纳米分散体系在脱脂牛奶中稀释后的体外细胞摄取率要比在橙汁中稀释的高<sup>[106]</sup>,这为其在功能性乳制品开发中的应用提供了依据。物理稳定性强的乳液体系更有利于维持虾青素稳定性,将虾青素加到较低 pH 值、较强凝胶强度或较小液滴尺寸的乳液体系中更加稳定<sup>[107]</sup>。维持功能性乳制品中虾青素的稳定性还需要适宜的加工条件,巴氏杀菌参数设定为 60  $^{\circ}\text{C}$  杀菌 30 min 时富含虾青素蛋黄的酸奶品质稳定、抗氧化活性和保留率较高<sup>[108]</sup>。

通过 3D 打印技术,还可将负载虾青素的递送体系应用于个性化食品定制领域。鲈鱼蛋白微凝胶颗粒稳定的高内相 Pickering 乳液,不仅提高了虾青素的稳定性和生物可及性,且该乳液的粘弹性、恢复率和触变性都适合应用于 3D 打印<sup>[109]</sup>。利用南极磷虾水溶性蛋白复合物制备的高内相 Pickering 乳液,具有良好的弹性固体性能和粘弹性,同时包封的虾青素更具稳定性<sup>[110]</sup>。除 Pickering 乳液外,双凝胶(Bigels)作为一种由水凝胶和油凝胶的双相系统,更有利于生物活性物质的稳定性和释放速率。Wang 等<sup>[111]</sup>由蜂蜡基油凝胶作为油相和明胶果胶水凝胶作为水相制成的 Bigels(图 3),添加 6% 蜂蜡的 Bigels 热稳定性、离子稳定性和 pH 稳定性较好,可用于食品 3D 打印。相关 3D 打印食品的开发,符合老年群体的健康需求,不仅可以干预老年人普遍面临的慢性病、咀嚼吞咽困难、营养吸收能力下降等问题,还兼顾功能性与适口性。

### 3.2 虾青素在应用过程中面临的挑战

虾青素存在的生物利用度低等问题虽然现已通过递送系统得到有效的解决,但不同的递送系统之间仍有不足之处,需要进一步优化。除此之外,虾青素的抗癌、抗糖尿病等营养保健功能大多是基于细胞、动物实验得出的结论,临床实验相对较少,其实际治疗效果仍需进一步研究。对于功能性食品来说,虽已有大量研究表明虾青素可以添加到饼干、酸奶、鸡蛋等日常食品中,但许多仍未应用至实际生产中。我国市面上现存的含有虾青素的功能性食品种类较少,可能是由于虾青素稳定性较差,需要适宜的食品加工工艺来维持其在功能食品中的生物活性。虾青素的递送系统可以有效解决其稳定性差和生物利用度低等问题,但在食品加工过程中的应用研究尚且不足。



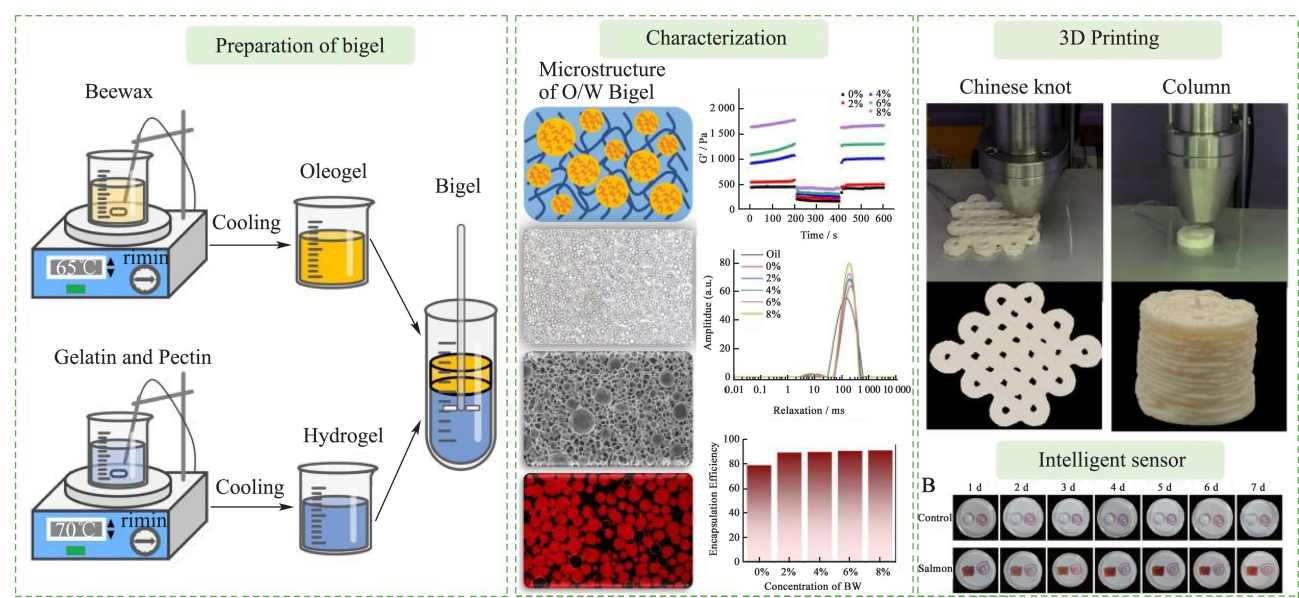


图 3 Bigels 的制备流程、表征以及 3D 打印的应用

Fig.3 Preparation process, characterization, and 3D printing applications of Bigels

4 总结

目前，虾青素的递送系统包括乳液、脂质体、固体脂质纳米颗粒、纳米结构脂质载体、纳米颗粒以及凝胶等形式。其中，乳液体系能同时承载水溶性和脂溶性的活性成分且质地轻薄，有利于虾青素的释放。但乳液易发生分层，稳定性较差，现已通过改良乳化剂、开发多层乳液和 Pickering 乳液来改善这一问题。除此之外乳液和凝胶尺寸较大，导致虾青素的生物利用度低于纳米级载体。纳米结构脂质载体凭借其无序网络结构，具有高于脂质体和固体脂质纳米颗粒的虾青素载药量，还可以延缓虾青素的体内释放。此外，通过天然聚合物构建的纳米颗粒体系，可以实现虾青素的智能响应释放，但是单一蛋白或多糖的体系稳定性有限，需要复合改性。pH 响应、线粒体靶向以及炎症靶向等智能响应性递送系统的开发，进一步实现了虾青素的精准递送，从而更有效的发挥其在眼部、肠道、皮肤、癌症、肝脏代谢、糖尿病以及心脏代谢等疾病的预防效果。

基于虾青素及其递送体系已开发了多种功能性食品，如烘焙制品、乳制品、营养强化鸡蛋以及 3D 打印食品。然而，虾青素在功能食品应用中仍面临挑战，保健功能多基于细胞与动物实验，临床研究不足，实际疗效需进一步验证；虾青素的活性在食品加工过程中易被破坏，需优化工艺参数；现有的递送系统多针对药物设计，与食品基质兼容性待提升，并且生物安全性评估需加强。未来研究应聚焦三方面，一是开展更多虾青素保健功能的临床研究，明确其在人体中的

作用剂量与机制；二是优化食品加工工艺，结合递送系统特性，开发适配虾青素的功能食品生产技术；三是设计食品级虾青素递送系统，提升与食品基质的兼容性，同时加强载体生物安全性评估，推动虾青素及其递送系统在功能食品领域的规模化应用，为大众健康提供更多营养解决方案。

参考文献

[1] SEABRA L M J, PEDROSA L F C. Astaxanthin: structural and functional aspects [J]. Revista De Nutricao-Brazilian Journal of Nutrition, 2010, 23(6): 1041-1050.

[2] HONDA M, MURAKAMI K, OSAWA Y, et al. Z-Isomers of astaxanthin exhibit greater bioavailability and tissue accumulation efficiency than the All-E-Isomer [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(11): 3489-3495.

[3] DUTTA S, KUMAR S P J, BANERJEE R. A comprehensive review on astaxanthin sources, structure, biochemistry and applications in the cosmetic industry [J]. Algal Research-Biomass Biofuels and Bioproducts, 2023, 74: 103168.

[4] HUANG J J, XIE Q, LIN S L, et al. Microalgae-derived astaxanthin: bioactivities, biotechnological approaches and industrial technologies for its production [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2025, 65: 7358-7392.

[5] LIU X J, LUO Q X, RAKARIYATHAM K, et al. Antioxidation and anti-ageing activities of different stereoisomeric astaxanthin *in vitro* and *in vivo* [J]. Journal of Functional Foods, 2016, 25: 50-61.

[6] DOSE J, MATSUGO S, YOKOKAWA H, et al. Free radical scavenging and cellular antioxidant properties of Astaxanthin [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2016, 17(1): 103.

[7] ZHAO T, YAN X J, SUN L J, et al. Research progress on



- extraction, biological activities and delivery systems of natural astaxanthin [J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 91: 354-361.
- [8] DONOSO A, GONZÁLEZ-DURÁN J, MUÑOZ A A, et al. Therapeutic uses of natural astaxanthin: An evidence-based review focused on human clinical trials [J]. Pharmacological Research, 2021, 166: 105479.
- [9] ZHONG C, LIU T, DIAO J, et al. Preparation and characterization of astaxanthin-loaded liposomes by phytosterol oleate instead of cholesterol [J]. Food Chemistry, 2025, 462: 141008.
- [10] YARMOHAMMADI A, ARKAN E, NAJAFI H, et al. Protective effects of astaxanthin solid lipid nanoparticle as a promising candidate against acute kidney injury in rats [J]. Naunyn-Schmiedeberg's Archives of Pharmacology, 2025, 398(4): 4491-502.
- [11] SHEHATA M K, ISMAIL A A, KAMEL M A. Nose to brain delivery of astaxanthin-loaded nanostructured lipid carriers in rat model of alzheimer's disease: preparation, *in vitro* and *in vivo* evaluation [J]. International Journal of Nanomedicine, 2023, 18: 1631-1658.
- [12] ZHANG Y, WANG H T, HOU Y T, et al. Pickering emulsion stabilized by gliadin nanoparticles for astaxanthin delivery [J]. Journal of Food Engineering, 2023, 345: 111417.
- [13] YU H J, WANG H T, SU W T, et al. Co-delivery of hydrophobic astaxanthin and hydrophilic phycocyanin by a pH-sensitive water-in-oil-in-water double emulsion-filled gellan gum hydrogel [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 131: 107810.
- [14] CHEN Y N, TIE S S, ZHANG X D, et al. Preparation and characterization of glycosylated protein nanoparticles for astaxanthin mitochondria targeting delivery [J]. Food & Function, 2021, 12(17): 7718-7727.
- [15] CUI W A, TIE S S, GUO M, et al. Engineering milk-derived exosome for enhancing cellular astaxanthin [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2022, 70(35): 10794-10806.
- [16] LUO F, WANG S, ZHANG X W, et al. Extraction of astaxanthin from haematococcus pluvialis and preparation of astaxanthin liposomes [J]. Molecules, 2024, 29(14): 3320.
- [17] SUN Y, SUN J H, ZHAO M T, et al. Utilization of layer-by-layer deposition to improve the stability of astaxanthin emulsions: Triple-layer coatings formed using sodium caseinate-pectin-chitosan [J]. Food Chemistry, 2025, 478: 143636.
- [18] ZANONI F, VAKARELOVA M, ZOCCATELLI G. Development and characterization of astaxanthin-containing whey protein-based nanoparticles [J]. Marine Drugs, 2019, 17(11): 627.
- [19] SORASITTHIYANUKARN F N, MUANGNOI C, ROJSITTHISAK P, et al. Chitosan oligosaccharide/alginate nanoparticles as an effective carrier for astaxanthin with improving stability, *in vitro* oral bioaccessibility, and bioavailability [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 124: 107246.
- [20] JIANG G L, ZHU M J. Preparation of astaxanthin-encapsulated complex with zein and oligochitosan and its application in food processing [J]. Lwt-Food Science and Technology, 2019, 106: 179-185.
- [21] PAN L, MENG H J, LI J Q, et al. Enhancement of astaxanthin bioaccessibility by encapsulation in liposomes: an *in vitro* study [J]. Molecules, 2024, 29(8): 1687.
- [22] ZHONG C, LIU T H, DIAO J, et al. Preparation and characterization of astaxanthin-loaded liposomes by phytosterol oleate instead of cholesterol [J]. Food Chemistry, 2025, 462: 141008.
- [23] SRIHERA N, LI Y, ZHANG T T, et al. Preparation and characterization of astaxanthin-loaded liposomes stabilized by sea cucumber sulfated sterols instead of cholesterol [J]. Journal of Oleo Science, 2022, 71(3): 401-410.
- [24] ZHANG X P, WU Z J, ZHANG W, et al. Surface modification by chitosan for improving stability and antioxidative activity of astaxanthin-loaded liposomes [J]. Lwt-Food Science and Technology, 2024, 198: 116033.
- [25] LIU B Q, ZAN L T, LI X H, et al. Modification of liposomes: preparation, purpose, methods and the application in food [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2024, 59(6): 3523-3536.
- [26] TANG C H, CHEN H L, DONG J R. Solid lipid nanoparticles (SLNs) and nanostructured lipid carriers (NLCs) as food-grade nanovehicles for hydrophobic nutraceuticals or bioactives [J]. Applied Sciences-Basel, 2023, 13(3): 1726.
- [27] MUNIR M, ZAMAN M, WAQAR M A, et al. Solid lipid nanoparticles: a versatile approach for controlled release and targeted drug delivery [J]. Journal of Liposome Research, 2024, 34(2): 335-348.
- [28] LI M M, ZAHI M R, YUAN Q P, et al. Preparation and stability of astaxanthin solid lipid nanoparticles based on stearic acid [J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2016, 118(4): 592-602.
- [29] GUNAWAN M, BOONKANOKWONG V. Current applications of solid lipid nanoparticles and nanostructured lipid carriers as vehicles in oral delivery systems for antioxidant nutraceuticals: A review [J]. Colloids and Surfaces B-Biointerfaces, 2024, 233: 113608.
- [30] ZHIHROTULWIDA D, ROSITA N, SOERATRI W. Development of astaxanthin-loaded nanostructured lipid carriers using a combination of cetyl palmitate and soybean oil [J]. Journal of Research in Pharmacy, 2024, 28(6): 2038-2045.
- [31] 陈佳玲,冯裕杰,张育昆,等.不同乳化剂类型对虾青素纳米乳液物化特征、稳定性和生物利用度的影响[J].食品工业科技, 2025,46(20):122-134.
- [32] XU Y, SUN L P, ZHUANG Y L, et al. Influence of gelatinized octenyl succinic anhydride-modified waxy adlay seed starch on the properties of astaxanthin-loaded emulsions: Emulsion properties, stability and *in vitro* digestion properties [J]. Food Chemistry, 2024, 457: 140105.
- [33] YAN S Z, ZHANG S, ZHU H P, et al. Recent advances in protein-based multilayer emulsions: fabrication, characterization, and applications: a review [J]. Food Reviews International, 2023, 39(8): 5666-5683.
- [34] HUANG M Y, XU Y J, XU L, et al. The evaluation of mixed-layer

- emulsions stabilized by myofibrillar protein-chitosan complex for delivering astaxanthin: Fabrication, characterization, stability and *in vitro* digestibility [J]. Food Chemistry, 2024, 440: 138204.
- [35] GE Y B, JIANG X J, PENG W B, et al. Preparation, characterization, and stability of chitosan-tremella polysaccharide layer-by-layer encapsulated astaxanthin nanoemulsion delivery system [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 282: 136741.
- [36] DE CARVALHO-GUIMARAES F B, CORREA K L, DE SOUZA T P, et al. A review of pickering emulsions: perspectives and applications [J]. Pharmaceuticals, 2022, 15(11): 1413.
- [37] SAECHIO S, AKANITKUL P, THIYAJAI P, et al. Astaxanthin-loaded pickering emulsions stabilized by nanofibrillated cellulose: impact on emulsion characteristics, digestion behavior, and bioaccessibility [J]. Polymers, 2023, 15(4): 901.
- [38] ZHANG X F, NING Y L, CHAI L W, et al. Physicochemical properties and *in vitro* digestive behavior of astaxanthin loaded Pickering emulsion gel regulated by konjac glucomannan and x-carrageenan [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 278: 134710.
- [39] EDELMAN R, ENGELBERG S, FAHOUM L, et al. Potato protein- based carriers for enhancing bioavailability of astaxanthin [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 96: 72-80.
- [40] YANG L, LI F, CAO X Y, et al. Stability and bioavailability of protein matrix-encapsulated astaxanthin ester microcapsules [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 102(5): 2144-2152.
- [41] GUAN G J, YANG Y, ZHANG Y Y, et al. Pioneering application of Antarctic krill protein in astaxanthin steady-state delivery [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 307: 141813.
- [42] ANARJAN N, TAN C P. Physico-chemical stability of astaxanthin nanodispersions prepared with polysaccharides as stabilizing agents [J]. International Journal of Food Sciences and Nutrition, 2013, 64(6): 744-748.
- [43] ANARJAN N, NEHDI I A, SBIHI H M, et al. Preparation of astaxanthin nanodispersions using gelatin-based stabilizer systems [J]. Molecules, 2014, 19(9): 14257-14265.
- [44] ZHAO Y Y, LIU J X, ZHANG S M, et al. Fabrication and characterization of the H/J-type aggregates astaxanthin/bovine serum albumin/chitosan nanoparticles [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 223: 1186-1195.
- [45] HU Q B, HU S Q, FLEMING E, et al. Chitosan-caseinate-dextran ternary complex nanoparticles for potential oral delivery of astaxanthin with significantly improved bioactivity [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 151: 747-756.
- [46] LI B F, LEE J Y, LUO Y C. Health benefits of astaxanthin and its encapsulation for improving bioavailability: A review [J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2023, 14: 100685.
- [47] HUANG S S, HUA Z, WANG K Y, et al. Synthesis and application of astaxanthin-loaded procyanidins/sea cucumber peptide nanoparticles with good antioxidant and pH-responsive capacities [J]. Food Research International, 2025, 203: 115821.
- [48] BHATTACHARYA S. Structure-property relationships of ph-responsive polymeric nanoparticles: enhancing targeted drug delivery systems in colon cancer therapy [J]. Journal of Macromolecular Science Part B-Physics, 2025, 10: 1-16.
- [49] KIM S H, KIM H. Inhibitory effect of astaxanthin on oxidative stress-induced mitochondrial Dysfunction-A mini-review [J]. Nutrients, 2018, 10(9): 1137.
- [50] CHEN Y N, FEI S Y, ZHANG L J, et al. Mitochondria-targeted nanoparticles for encapsulating astaxanthin: exploring the reason for alleviating oxidative damage [J]. Food Science and Human Wellness, 2025, 14(1): 9250080.
- [51] HUA Z, ZHANG X D, CHEN Y N, et al. A bifunctional hepatocyte-mitochondrion targeting nanosystem for effective astaxanthin delivery to the liver [J]. Food Chemistry, 2023, 424: 136439.
- [52] CHANG M X, XIONG F. Astaxanthin and its effects in inflammatory responses and inflammation-associated diseases: recent advances and future directions [J]. Molecules, 2020, 25(22): 5342.
- [53] LIU K J, TIAN X Y, FEI S Y, et al. Macrophage and mitochondrion dual-targeting astaxanthin nanoparticles prepared by Maillard reaction for colonic inflammation alleviation [J]. Marine Life Science & Technology, 2025, 7(2): 352-365.
- [54] LEE S J, BAI S K, LEE K S, et al. Astaxanthin inhibits nitric oxide production and inflammatory gene expression by suppressing I $\kappa$ B kinase-dependent NF- $\kappa$ B activation [J]. Molecules and Cells, 2003, 16(1): 97-105.
- [55] KOHANDEL Z, FARKHONDEH T, ASCHNER M, et al. Anti-inflammatory action of astaxanthin and its use in the treatment of various diseases [J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2022, 145: 112179.
- [56] ABDOUH M, CHEN Y X, GOYENECHE A, et al. Blue light-induced mitochondrial oxidative damage underlay retinal pigment epithelial cell apoptosis [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2024, 25(23): 12619.
- [57] ZHAO Z C, ZHOU Y, TAN G, et al. Research progress about the effect and prevention of blue light on eyes [J]. International Journal of Ophthalmology, 2018, 11(12): 1999-2003.
- [58] LIN C W, YANG C M, YANG C H. Protective effect of astaxanthin on blue light light-emitting diode-induced retinal cell damage via free radical scavenging and activation of PI3K/Akt/Nrf2 pathway in 661W cell model [J]. Marine Drugs, 2020, 18(8): 387.
- [59] D'ANGELO A, VITIELLO L, GAGLIARDI V, et al. The role of oral supplementation for the management of age-related macular degeneration: a narrative review [J]. Journal of Personalized Medicine, 2024, 14(6): 653.
- [60] IZUMI-NAGAI K, NAGAI N, OHGAMI K, et al. Inhibition of choroidal neovascularization with an anti-inflammatory carotenoid astaxanthin [J]. Investigative Ophthalmology & Visual Science, 2008, 49(4): 1679-1685.
- [61] CHANG W W, LV X Y, ZHU J F, et al. Multifunctional nanotherapeutics with long-acting release against macular

- degeneration by minimally invasive administration [J]. *Acs Nano*, 2024, 18(30): 19649-19662.
- [62] HOU C T, XIAO J, WANG Y H, et al. Astaxanthin activated the SLC7A11/GPX4 pathway to inhibit ferroptosis and enhance autophagy, ameliorating dry eye disease [J]. *Frontiers in Pharmacology*, 2024, 15: 1407659.
- [63] LIU Z Y, LI Y Q, BAO J Y, et al. Astaxanthin ameliorates benzalkonium chloride-induced dry eye disease through suppressing inflammation and oxidative stress via Keap1-Nrf2/HO-1 signaling pathways [J]. *Animal Models and Experimental Medicine*, 2025, 8(6): 1056-1079.
- [64] TIAN L, WEN Y, LI S Y, et al. Benefits and safety of astaxanthin in the treatment of mild-to-moderate dry eye disease [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 8: 796951.
- [65] YU Z Q, RUAN G C, BAI X Y, et al. Growing burden of inflammatory bowel disease in China: Findings from the Global Burden of Disease Study 2021 and predictions to 2035 [J]. *Chinese Medical Journal*, 2024, 137(23): 2851-2859.
- [66] YANG J F, SHANG N, LI Z Q, et al. Oral lactoferrin-responsive formulation anchoring around inflammatory bowel region for IBD therapy [J]. *Advanced Healthcare Materials*, 2025, 14(4): e2402731.
- [67] ZHANG X D, ZHAO X, TIE S S, et al. A smart cauliflower-like carrier for astaxanthin delivery to relieve colon inflammation [J]. *Journal of Controlled Release*, 2022, 342: 372-387.
- [68] ZHANG X D, ZHAO X, HUA Z, et al. ROS-triggered self-disintegrating and pH-responsive astaxanthin nanoparticles for regulating the intestinal barrier and colitis [J]. *Biomaterials*, 2023, 292: 121937.
- [69] ZHANG C X, XU Y X, WU S, et al. Fabrication of astaxanthin-enriched colon-targeted alginate microspheres and its beneficial effect on dextran sulfate sodium-induced ulcerative colitis in mice [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 205: 396-409.
- [70] 李玲燕,李明,杨辉,等.基于网络药理学技术研究虾青素逆转2型糖尿病小鼠胰岛素抵抗的分子机制[J].*食品科学*,2025,46(12): 213-219.
- [71] FEN Z G, NI Y H, WAN C Y, et al. Anti-diabetic effects of astaxanthin on an STZ-induced diabetic model in rats [J]. *Endocrine Journal*, 2021, 68(4): 451-459.
- [72] GAUR S, GAUR S, MISHRA R, et al. Astaxanthin reduces oxidative stress and alleviates diabetic neuropathy in STZ-induced diabetic mice [J]. *International Journal of Diabetes in Developing Countries*, 2023, 43(1): 134-144.
- [73] HU X J, LV J, ZHAO Y Y, et al. Important regulatory role of mitophagy in diabetic microvascular complications [J]. *Journal of Translational Medicine*, 2025, 23(1): 269.
- [74] EL-NASR N, HUSSEIN Y A, ABD EL-BASET M, et al. Astaxanthin mitigates diabetic cardiomyopathy and nephropathy in HF/HFr/STZ diabetic rats via modulating NOX4, fractalkine, Nrf2, and AP-1 pathways [J]. *Scientific Reports*, 2025, 15(1): 20199.
- [75] SALEH S A, HANNA G S, EL-NABY S H, et al. Astaxanthin attenuates DNA fragmentation and cognitive decline in type 2 diabetic rats [J]. *Scientific Reports*, 2025, 15(1): 20122.
- [76] FANG J, BAI W X, YANG L A. Astaxanthin inhibits oxidative stress and apoptosis in diabetic retinopathy [J]. *Acta Histochemica*, 2023, 125(6): 152069.
- [77] COPAT C, FAVARA C, TOMASELLO M F, et al. Astaxanthin in cancer therapy and prevention (Review) [J]. *Biomedical Reports*, 2025, 22(4): 66.
- [78] HWANG E J, JEONG Y I, LEE K J, et al. Anticancer Activity of Astaxanthin-Incorporated Chitosan Nanoparticles [J]. *Molecules*, 2024, 29(2): 529.
- [79] GHOLAMI H, ABBASALIPOURKABIR R, ZIAMAJIDI N, et al. The effect of beta-lactoglobulin nanocapsules containing astaxanthin and 5-fluorouracil on the antioxidant enzymes activity of superoxide dismutase, catalase and glutathione peroxidase in HCT116 colorectal cancer cell line [J]. *Current Drug Therapy*, 2023, 18(5): 407-414.
- [80] REN P F, YUE H, TANG Q J, et al. Astaxanthin exerts an adjunctive anti-cancer effect through the modulation of gut microbiota and mucosal immunity [J]. *International Immunopharmacology*, 2024, 128: 111553.
- [81] KOWSHIK J, NIVETHA R, RANJANI S, et al. Astaxanthin inhibits hallmarks of cancer by targeting the PI3K/NF- $\kappa$ B/STAT3 signalling axis in oral squamous cell carcinoma models [J]. *Iubmb Life*, 2019, 71(10): 1595-1610.
- [82] XU Y, JIANG C. Astaxanthin suppresses the malignant behaviors of nasopharyngeal carcinoma cells by blocking PI3K/AKT and NF- $\kappa$ B pathways via miR-29a-3p [J]. *Genes and Environment*, 2024, 46(1): 10.
- [83] SUN S Q, DU F X, ZHANG L H, et al. Prevention of STAT3-related pathway in SK-N-SH cells by natural product astaxanthin [J]. *Bmc Complementary Medicine and Therapies*, 2023, 23(1): 430.
- [84] KOMATSU T, SASAKI S, MANABE Y, et al. Preventive effect of dietary astaxanthin on UVA-induced skin photoaging in hairless mice [J]. *Plos One*, 2017, 12(2): e0171178.
- [85] LI X, MATSUMOTO T, TAKUWA M, et al. Protective effects of astaxanthin supplementation against ultraviolet-induced photoaging in hairless mice [J]. *Biomedicines*, 2020, 8(2): 18.
- [86] HONDA M, NISHIDA Y. *In vitro* evaluation of skin-related physicochemical properties and biological activities of astaxanthin isomers [J]. *Acs Omega*, 2023, 8(22): 19311-19319.
- [87] HONDA M, KAGEYAMA H, ZHANG Y, et al. Oral supplementation with z-isomer-rich astaxanthin inhibits ultraviolet light-induced skin damage in guinea pigs [J]. *Marine Drugs*, 2022, 20(7): 414.
- [88] CHALYK N E, KLOCHKOV V A, BANDALETOVA T Y, et al. Continuous astaxanthin intake reduces oxidative stress and reverses age-related morphological changes of residual skin surface components in middle-aged volunteers [J]. *Nutrition Research*, 2017, 48: 40-48.
- [89] YOSHIHISA Y, ANDOH T, MATSUNAGA K, et al. Efficacy of astaxanthin for the treatment of atopic dermatitis in a murine model [J]. *Plos One*, 2016, 11(3): e0152288.



- [90] LEE Y S, JEON S H, HAM H J, et al. Improved anti-inflammatory effects of liposomal astaxanthin on a phthalic anhydride-induced atopic dermatitis model [J]. *Frontiers in Immunology*, 2020, 11: 565285.
- [91] 杨岳,肖瑶,赵楠,等.巨噬细胞对作用在动脉粥样硬化进展中的作用[J/OL].*生理科学进展*,1-15[2025-10-27].
- [92] 阿布都扎依尔·买买提,马吾浪·乌布利艾拉,阿衣吐拉.虾青素对颈动脉粥样硬化大鼠脂代谢和氧化应激及炎症反应的影响与作用机制[J].*中华老年心脑血管病杂志*,2023,25(8):866-869.
- [93] ZHANG Z X, QIU Y M, LI W Z, et al. Astaxanthin alleviates foam cell formation and promotes cholesterol efflux in Ox-LDL-Induced RAW264.7 cells via CircTPP2/miR-3073b-5p/ABCA1 pathway [J]. *Molecules*, 2023, 28(4): 1701.
- [94] LIU A Y, LI R Z, ZAABOUL F, et al. Proteomic analysis reveals the mechanisms of the astaxanthin suppressed foam cell formation [J]. *Life Sciences*, 2023, 325: 121774.
- [95] 刘爱阳.虾青素肠道靶向递送体系的构建及缓解动脉粥样硬化的作用研究[D].无锡:江南大学,2024.
- [96] JIN M Y, CHEN X, ZHENG L Z Y, et al. Astaxanthin-loaded polylactic acid-glycolic acid nanoparticles alleviates atherosclerosis by suppressing macrophage ferroptosis via the NRF2/ SLC7A11/GPX4 pathway [J]. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 2025, 765: 110316.
- [97] ZHONG H X, DONG J Y, ZHU L Y, et al. Non-alcoholic fatty liver disease: pathogenesis and models [J]. *American Journal of Translational Research*, 2024, 16(2): 387-399.
- [98] YANG M, KIMCHI E T, STAVELEY-O'CARROLL K F, et al. Astaxanthin prevents diet-induced NASH progression by shaping intrahepatic immunity [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2021, 22(20): 11037.
- [99] 车彤彤.肝实质细胞和线粒体双靶向虾青素载运体系的构建及对非酒精性脂肪肝的干预作用研究[D].大连:大连工业大学, 2023.
- [100] 郝薛字,孙晓玲,于洪梅,等.载虾青素的亚麻籽副产物蛋白/果胶乳液对非酒精性脂肪肝的干预作用[J].*食品工业科技*,2025, 46(23):31-38.
- [101] HOSSAIN A, BRENNAN M A, MASON S L, et al. The effect of astaxanthin-rich microalgae “haematococcus pluvialis” and wholemeal flours incorporation in improving the physical and functional properties of cookies [J]. *Foods*, 2017, 6(8): 57.
- [102] AL-TARIFI B Y, MAHMOOD A, ASSAW S, et al. Application of Astaxanthin and its Lipid Stability in Bakery Product [J]. *Current Research in Nutrition and Food Science*, 2020, 8(3): 962-974.
- [103] 郑秀梅,施城宇,蒋耀,等.虾青素在营养强化鸡蛋中的检测方法 & 生物利用度[J].*华侨大学学报(自然科学版)*,2026,47(3):324-334.
- [104] 张馨月,闫倩楠,杨泽豪,等.虾青素鸡蛋的营养活性及风味研究[J].*轻工学报*,2025,40(1):41-48.
- [105] YU A C, LONG C, SHENG X H, et al. High dietary astaxanthin supplementation alters egg yolk nutritional composition in hens [J]. *Poultry Science*, 2025, 104(9): 105393.
- [106] ANARJAN N, TAN C P. Chemical stability of astaxanthin nanodispersions in orange juice and skimmed milk as model food systems [J]. *Food Chemistry*, 2013, 139(1-4): 527-531.
- [107] HABTEGEBRIEL H, VALDRAMIDIS V. Astaxanthin extract from the biomass of *Haematococcus pluvialis*: Incorporation and stability in different model food systems [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2025, 2025(1): 2025.
- [108] LI Z W, ZHANG T H, ZHOU R H, et al. Effects of pasteurization on set yogurt fortified with astaxanthin-rich yolk: Evaluation of physicochemical properties, stability, and biological activity [J]. *Journal of Dairy Science*, 2025, 108(4): 3499-3514.
- [109] ZHANG L J, ZAKY A A, ZHOU C F, et al. High internal phase Pickering emulsion stabilized by sea bass protein microgel particles: Food 3D printing application [J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 131: 107744.
- [110] ZHANG X D, YANGYANG, JIAO M, et al. Astaxanthin-loaded high internal phase Pickering emulsion prepared using water-soluble protein complex from Antarctic krill: Construction and primary application in 3D printing [J]. *Food Research International*, 2025, 217: 116773.
- [111] WANG H T, SUN Y D, ZHANG P J, et al. Tailoring the properties of bigels by beeswax content for 3D food printing, astaxanthin delivery, and freshness sensing [J]. *Food Hydrocolloids*, 2026, 170: 111703.