

申雨苗, 王倩, 郭瑜, 等. 基于环糊精及其衍生物的递送体系在食品领域的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(24): 496–505.
doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022060180

SHEN Yumiao, WANG Qian, GUO Yu, et al. Recent Progress of Delivery Systems Based on Cyclodextrin and Its Derivatives in Food Industry[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(24): 496–505. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022060180

· 专题综述 ·

基于环糊精及其衍生物的递送体系在食品领域的研究进展

申雨苗, 王倩*, 郭瑜, 牛佳琪, 孙萌萌

(天津商业大学生物技术与食品科学学院, 天津 300134)

摘要: 利用环糊精及其衍生物无毒害、无气味等特性, 包埋水溶性差、且对光照、温度、pH 等敏感的活性成分, 起到提高水溶性、增强稳定性、掩蔽不良气味等作用, 并且可以达到靶向释放活性成分的目的。本文综述了近几年国内外关于环糊精包埋活性成分递送体系的研究, 首先介绍了几种基于环糊精及其衍生物的递送体系, 包括包合物、水凝胶和 Pickering 乳液, 其中重点讨论了包合物的常用制备方法, 即共沉淀法、超声法、研磨法、冷冻干燥法和喷雾干燥法的优缺点及适用范围; 然后总结了环糊精及其衍生物递送体系对食品领域中抗菌剂、抗氧化剂、以及维生素、蛋白质等活性成分的保护和递送; 最后, 对环糊精递送体系在食品领域的研究和应用进行展望, 为后续研究提供参考资料。

关键词: 环糊精及其衍生物, 包合物, 递送体系, 食品, 应用

中图分类号: TS201.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)24-0496-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022060180



本文网刊:

Recent Progress of Delivery Systems Based on Cyclodextrin and Its Derivatives in Food Industry

SHEN Yumiao, WANG Qian*, GUO Yu, NIU Jiaqi, SUN Mengmeng

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

Abstract: Taking advantages of nontoxicity and odorlessness, cyclodextrin and its derivatives can encapsulate some bioactive substances with poor water solubility and sensitivity to light, temperature, and pH, thus to enhance their aqueous solubility and stability, mask bad odor, and also targeted release them. This paper reviews recent researches on cyclodextrin-based delivery systems for carrying active substances. Firstly, several delivery systems based on cyclodextrin and its derivatives are introduced, including inclusion complexes, hydrogels, and Pickering emulsions. In this part, the advantages and drawbacks as well as the scope of applications of several common preparation methods of inclusion complex, i.e., coprecipitation method, ultrasonic method, grinding method, freeze-drying method and spray-drying method are detailed described and discussed. Then, the protection and delivery of cyclodextrin-based delivery systems to antibacterial agents, antioxidants, vitamins, proteins and other active ingredients in food industry are summarized. Finally, further research and application of cyclodextrin-based delivery systems in food industry are prospected, which would provide a theoretical basis for subsequent research.

Key words: cyclodextrin and its derivatives; inclusion complex; delivery system; food; application

环糊精(cyclodextrin, CD)是一类环状低聚糖, 由淀粉经过环糊精葡萄糖转移酶解而制得, 通常由

6~12 个吡喃葡萄糖单元以 α -(1,4) 糖苷键连接而成^[1], 分子结构呈现“截锥状”, 具有亲水表面和疏水

收稿日期: 2022-06-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2100200/2021YFD2100202); 天津商业大学市级大学生创新训练项目(202110069131)。

作者简介: 申雨苗(1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 环糊精递送载体, E-mail: shenaamiao@163.com。

* 通信作者: 王倩(1986-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 超分子化学, E-mail: qwang@tjcu.edu.cn。

内腔^[2-3],空腔直径由 CD 含有的葡萄糖单元数量决定。最常见的是 α -CD、 β -CD、 γ -CD, 分别含有 6、7、8 个葡萄糖单元^[4], 结构如图 1 所示。由于具有“内疏水、外亲水”的空腔结构, 环糊精能够作为主体选择性键合多种疏水性客体小分子化合物, 从而形成主-客体包合物, 目前已成功地应用于化学^[5]、医药^[6]、食品^[7]、生物^[8]等诸多领域。

在食品领域,很多功能性成分具有水溶性差、性质不稳定等缺陷,以至于应用受到限制^[9]。当环糊精与功能性成分形成包合物后,可显著改善其某些理化性质,例如水溶性提升、稳定性增强、生物利用度提高、不良风味减少等^[10-14]。另外,将不同官能团如甲基、羟丙基、羧甲基、磺丁基等引入环糊精,能形成稳定性更高、水溶性更好、分子识别能力更强的环糊精衍生物(cyclodextrin and its derivatives, CDs), 其物理化学及生物性质得到了改善,因此应用范围得到进一步拓展^[15-17]。

为了更深入、全面地了解环糊精,促进其在食品领域的发展,本文就近年来基于环糊精及其衍生物递送体系的构建方式以及其在食品领域的应用进行综述,为进一步拓展环糊精递送体系在食品行业的应用提供理论依据。

1 环糊精及其衍生物递送体系的构建方法

1.1 包合物

与客体分子形成包合物是环糊精最重要的性质之一。所谓“包合”就是主体与客体通过分子间相互作用完成彼此间的识别过程,最终使得客体分子部分或全部嵌入主体内部的现象。根据生物活性客体分

子结构、性质及应用等的差异,可以采取不同的方法制备环糊精包合物^[18]。

1.1.1 共沉淀法 共沉淀法是制备 CDs 包合物最常用的方法,又称为饱和水溶液法或重结晶法,是将 CDs 制备成饱和水溶液后,加入适量被包结物质,保持在一定温度下进行搅拌,使得被包结物质充分进入 CDs 空腔,然后将混合物冷藏得到沉淀,最后抽滤、洗涤、干燥,即得到 CDs 包合物^[19-20]。李进霞等^[21]利用加热回流共沉淀的方法,制备了芹菜素和 γ -CD 的包合物,增强了芹菜素的抗氧化活性。研究发现包合物最佳形成条件是在中性介质中芹菜素和 γ -CD 以 1:1 混合,该条件下形成的包合物对自由基 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼的清除活性更高。表 1 列举了一些共沉淀法制备环糊精/活性成分包合物的包埋效果及表征、分析方法。

1.1.2 超声法 在上述饱和水溶液法中,将客体分子物质加入 CDs 饱和水溶液后,若用超声波代替搅拌作用对客体进行包埋,则称之为超声波法^[26]。由于超声波在液体中传播时能够释放巨大能量,该方法往往制备时间短,但包埋效果较好。此外,超声波法易控制且操作简便。Sun 等^[27]利用超声波法快速制备了百里香酚和 2-羟丙基- β -环糊精的包合物,提高了百里香酚的水溶性和热稳定性,并对包合物的抗菌活性进行了评价,发现包合物对灰霉菌、指状青霉、交联孢霉的抗菌活性比纯百里香酚有明显的提高。Qiu 等^[28]利用种子介导成核方法和超声波辅助制备了环糊精金属有机骨架(cyclodextrin-metal-organic framework, CD-MOF),平均直径在 234~894 nm,具有较

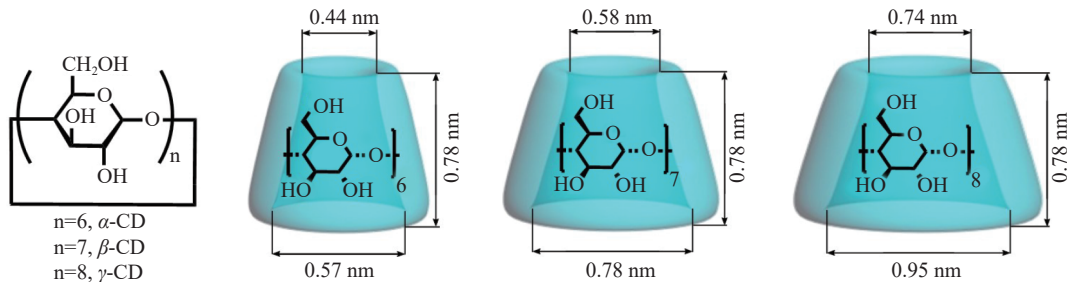


图 1 三种常见环糊精的空腔结构及内外径大小示意图

Fig.1 Schematic diagram of cavity structure and inner and outer diameters of α -, β -, and γ -CD

表 1 共沉淀法制备环糊精/活性成分包合物的包埋效果及表征、分析方法

Table 1 Embedding effect and characterization analysis method of cyclodextrin/active ingredient inclusion complex prepared by coprecipitation method

环糊精	活性成分	包埋效果	表征、分析方法	参考文献
β -环糊精	草果挥发油	包埋率为55.87%, 增强挥发油稳定性、溶解性	薄层色谱、紫外-可见吸收光谱、显微成像	[19]
	猕猴桃籽油	包埋率为74.52%	显微成像	[22]
羟丙基- β -环糊精	橙皮苷	溶解度由34.68 $\mu\text{g/mL}$ 增加到2049.50 $\mu\text{g/mL}$	紫外-可见吸收光谱、傅里叶变换红外光谱、扫描电子显微镜、差示扫描量热、X-射线衍射	[23]
	虫草素	溶解度从4.3 mg/mL 提高到170.5 mg/mL	紫外-可见吸收光谱、傅里叶变换红外光谱、扫描电子显微镜、差示扫描量热、X-射线衍射、热重分析、核磁共振	[24]
甲基- β -环糊精	虫草素	溶解度从4.3 mg/mL 提高到10.5 mg/mL	核磁共振、红外吸收光谱、扫描电子显微镜、X-射线衍射、热分析	[25]

高的结晶度和较好的热稳定性。利用 CD-MOF 负载水溶性极低的甘草酸(glycyrrhizic acid, GA), CD-MOF 对 GA 的结合量随超声时间延长而增加, 10 min 后可达到 10271 g/mg。李萍等^[29]利用超声波法制备八角茴香油- β -环糊精微胶囊, 将八角茴香油滴在 β -CD 溶液中, 超声处理后抽滤, 将滤饼干燥即得到包埋八角茴香油的微胶囊; 该微胶囊的包埋率和载药量分别为 94.21% 和 6.93%, 包埋率相较于饱和水溶液法提高了 7.80%, 载药量相差不大, 但超声波处理后的八角茴香油- β -CD 微胶囊热稳定性显著提高。

超声波辅助制备的包埋率较饱和水溶液法有所提高, 其中超声功率和时间是影响包埋率的重要因素。若将这种方法应用在实际食品保鲜等领域, 还需要详细探索超声条件。

1.1.3 研磨法 研磨法是取环糊精加入少量水研匀, 然后加入客体分子物质(或加入少量溶剂溶解的客体分子物质)充分混合研磨成糊状, 经干燥、洗涤即得包合物^[30]。该法操作简单, 制备时间短, 但包合率和包合收率较高。王艳艳等^[31]采用饱和溶液法、研磨法和超声法, 三种不同方法制备感冒清热挥发油和 β -CD 包合物。结果表明, 研磨法制备包合物的包合率最高, 达到 91.1%, 包合收率也可达到 73.3%。李翠红等^[32]研究了橐吾挥发油和 β -CD 包合物的制备, 对比超声法和研磨法两种制备方法, 由于橐吾挥发油在溶液中分散度低、易聚集等原因, 研磨法较超声法包合收率更高, 同时包结效果也更好。

在 Ozdemir 等^[33]的研究中, 对比了研磨和冷冻干燥两种方法制备得到的黑胡椒油树脂/ β -CD 包合物。研究发现, 冷冻干燥法包封率为 79.3%, 粒径为 607 nm; 而研磨法包封率达到 90.2%, 粒径为 393 nm, 造成这种现象的原因可能是研磨过程中提供的剪切力要高于冷冻干燥法。此外, 研究发现研磨形成的包合物能够更好地抑制革兰氏阳性菌的生长。

1.1.4 冷冻干燥法 冷冻干燥法是将主、客体混合溶液冻结后, 通过低温、真空条件下升华去除溶剂, 从而获得高质量均一的粉末状包合物产品。该方法处理温度较低, 因此更适用于热敏性包合物的制备。

Ahmed 等^[34]通过冷冻干燥法将挥发性强、稳定性差的肉桂精油(cinnamon essential oil, CEO)分别和两种不同环糊精制备包合物。实验表明, 加入 CEO 的包合物冷冻干燥后水分含量降低, 有很强的抗菌性和抗氧化性, 热稳定性也显著提高。

由于薄荷挥发油热稳定性差、易挥发, 石秀佳等^[35]比较了不同冻干制剂对薄荷挥发油冷冻干燥后保留率的影响, 发现利用环糊精包合后保留率可达到 86.36%, 并通过正交试验探究了最佳包合工艺条件, 显著提高了薄荷挥发油的稳定性, 可有效降低薄荷挥发油在实际生产和应用中的损失。于博等^[36]采用冷冻干燥法制备了 8-姜酚/麦芽糖基- β -环糊精包

合物, 紫外光谱、红外光谱等实验表明, 麦芽糖基- β -环糊精对 8-姜酚具有良好的包合能力, 使得 8-姜酚的热稳定性得到显著提升。

虽然冷冻干燥法有利于保护热敏性和易挥发物质的稳定性, 并且得到的产品质量也较高, 但在实际生产中对设备、成本的要求过高, 能耗大, 不适用于大规模生产^[37-38]。

1.1.5 喷雾干燥法 喷雾干燥法是将主、客体混合溶液在高温下迅速雾化、干燥成为粉末的方法, 已被广泛用于 CDs 包埋活性成分的生产中, 可以提高包封率及加工速率。Shi 等^[39]在 90 g 的水溶液中, 添加不同量的三丁酸甘油酯(tributyrin, Tb)和 γ -CD, 制备不同摩尔比的 Tb/CD 溶液, 混合均匀后静置, 再利用喷雾干燥机(喷嘴直径为 2 mm, 进出口温度分别为 160 °C 和 190 °C)得到了 Tb/CD 包合物粉末。李晨等^[40]采用喷雾干燥的方式制备得到淡黄色白藜芦醇/ β -CD 包合物粉末。

杨艳红等^[41]研究比较了研磨法、饱和水溶液法、冷冻干燥法、喷雾干燥法几种制备技术对山苍子油的 β -CD 微胶囊的制备效果, 发现喷雾干燥法包埋率高于其他几种方法, 且制得的微胶囊颗粒大小也更为均匀, 对山苍子油的保护效果最好。迟晓君等^[42]利用喷雾干燥法构建了 β -CD/阿拉伯胶(1:1)微胶囊用于负载蒲公英粉。通过体外模拟胃肠环境研究发现, 较单独的蒲公英粉, 胶囊负载的蒲公英粉在胃和肠中的稳定性分别提高 15.4% 和 15.8%, 并且释放率分别提高 47% 和 25.9%。该 β -CD/阿拉伯胶微胶囊有效改善了蒲公英粉在胃肠中的稳定性和生物利用度。

尽管喷雾干燥法包埋率较优, 但该方法操作较为复杂, 用到的设备仪器较多, 成本也更高。此外, 喷雾干燥是在高温下进行, 会导致热不稳定的芯材挥发或分解, 造成损失, 因此该方法更适用于对温度不敏感的成分。可以将高压均质与喷雾干燥相结合, 使芯材和壁材充分接触, 形成密闭性更好的包合物, 从而减少芯材的损失。

以上是环糊精包合物的常用制备方法。具体应选择何种方法, 应根据被包合物的性质及应用等来确定。一般来说, 共沉淀法适用范围最广, 包合率也较高, 是实验室最常用的包合物制备方法; 研磨法操作快速、简便, 被包合物的利用率较高, 尤其适用于易挥发、易升华的客体分子; 若包合物易溶于水, 不易析出结晶沉淀, 或在加热干燥时易分解、变色, 可选择冷冻干燥法; 而对于遇热性质较稳定的包合物, 则可选择喷雾干燥法。

1.2 水凝胶

水凝胶是三维的亲水或聚合网络, 能够吸收大量的水, 制备交联水凝胶的方法主要有两种: 化学方法(如自由基聚合或高能辐射)和物理方法(如结晶或

冻融循环)^[43]。环糊精构建的凝胶在化学^[44]、环境^[45]、药物^[46]等领域发挥着重要的作用,近年来也在功能性食品、食品包装、食品安全领域有了广泛的研究^[47]。

徐川辉等^[48]在碱性条件下制备了 β -CD改性的羧甲基纤维素水凝胶,用来封装对光、空气等条件敏感的香兰素,封装率可达95.8%,并且在中性条件下最大释放率可达93.9%。实验表明,该水凝胶具有优良的性能,拓展了香兰素作为防腐剂在食品中的应用。

Cui等^[49]将甲基- β -CD和冬香草精油(*Satureja montana* L. essential oil, SEO)形成的包合物与大豆可溶性多糖(soluble soybean polysaccharide, SSPS)水凝胶复合,制备了一种抗菌包装材料。该材料提高了SEO的稳定性和溶解性,且对肉制品具有良好的抑菌效果,能够显著降低肉制品的品质损失,可以作为一种安全有效的冷冻肉类保鲜包装材料。

1.3 Pickering 乳液

Pickering 乳液是以纳米固体颗粒为稳定剂的乳液体系,与传统液体乳液相比,Pickering 乳液避免了小分子表面活性剂的使用,具有稳定性好、制备方便等优点^[50-51],非常适合应用于食品领域^[52]。

Liu等^[53]利用 β -CD作为稳定剂、以葵花籽油作为分散相制备了水包油型高内相乳液(high internal phase emulsions, HIPEs),用以负载叶黄素。实验证明,紫外线照射12 h后HIPEs中叶黄素含量保持了原来的80%以上,60 h后也能保留60%,较在葵花籽油中30%的保留率大有提升。

Xi等^[54]利用 β -CD、十八烯基琥珀酸酐(octadecenyl succinic anhydride, ODSA)和维生素E(vitamin E, VE)进行组装得到具有pH响应性的ODS- β -CD-VE纳米粒子,利用该粒子作为乳化剂形成Pickering乳液,由于 V_E 有抗氧化作用,因此乳液中脂质氧化得到有效抑制。实验证明,乳液在 $\text{pH} \leq 4$ 时能够保持稳定,但中性条件下不稳定,通过这种方式,乳液中的脂质将不受胃液的影响,能顺利在肠道中被释放。

Niu等^[55]利用辛烯基琥珀酸酐(octenyl succinic anhydride, OSA)对 β -CD进行改性,制备了辛烯基琥珀酸环糊精酯(OCD)。考察了 β -CD和OCD对 β -胡萝卜素的包埋能力及包合物的乳化和抗氧化性能。研究发现与 β -CD相比,经OCD稳定的乳液具有较小的尺寸,且OCD/ β -胡萝卜素包合物可以提高乳液的物理稳定性和氧化稳定性,这对于食品工业具有重要意义。

Tian等^[56]分别制备了 β -CD稳定的Pickering乳液和肉桂醛精油/ β -CD复合物稳定的Pickering乳液,并将二者进行对比。研究结果表明,肉桂醛精油/ β -CD复合物稳定的Pickering乳液具有更小的液滴尺寸、更高的贮存稳定性以及更加优良的流变性能,这主要归因于肉桂醛精油对 β -CD晶体聚集的有效

抑制作用。该研究对功能性乳液的制备和应用具有重要意义。

2 环糊精及其衍生物递送体系的应用

CDs构建的递送体系可以保护活性成分,防止其分解而导致活性降低,多用于抗菌剂^[57]、抗氧化剂^[58]、以及维生素^[59-60]、蛋白质^[61]等营养成分的递送,起到改善成分的稳定性、水溶性,提高生物利用度,促进营养成分吸收,维持人体健康,提高免疫力等作用。

2.1 环糊精及其衍生物与抗菌剂的递送体系在食品中的应用

为了防止或延缓包装食品品质劣变,活性包装(将活性成分添加到食品包装中)已显示出较大的潜力。一些活性成分例如游霉素^[62-63]、丁香酚^[64]、肉桂提取物^[65]等对霉菌、大肠杆菌等腐败菌有良好的抑制作用,可作为食品添加剂。但这些物质普遍存在挥发性强、水溶性差、具有不良气味等问题,通过将活性成分与CDs构建包合物,能够实现提高水溶性、稳定性,掩蔽不良气味等效果,并能够通过缓慢释放从包合物转移到食品表面,从而达到延缓食品腐败变质、延长货架期的目的。

2.1.1 游霉素 游霉素也称纳他霉素,是多烯大环内酯类抗真菌剂,分子式为 $\text{C}_{33}\text{H}_{47}\text{NO}_{13}$,能够抑制酵母菌和霉菌,有低剂量、高效率等优良特点,但它微溶于水(30~50 mg/L),且对pH、光照等比较敏感,造成其生物利用度很低,影响其在工业中的应用^[66-67]。利用CDs对游霉素进行包合可以有效地改善其水溶性,提高其生物利用度,从而达到在食品中长期有效的抗菌效果。

李飞等^[68]利用羟丙基- β -环糊精和纳他霉素制备包合物,研究了包合物对酵母菌、黑曲霉等的抑菌效果。实验证明,形成包合物后可明显提高纳他霉素的水溶性和稳定性,且不影响其对真菌的抑菌效果。

Fang等^[69]通过将纳他霉素分子包封在甲基- β -CD中,使得纳他霉素的水溶性提高了13.7倍,同时改善了纳他霉素的pH稳定性,特别是在pH较低(1~3)的情况下,包合物能够有效延缓纳他霉素的降解。在实际果汁生产中,某些果汁处于低pH范围,如苹果汁的pH约为3~4,形成包合物可以提高纳他霉素在这些体系中的化学稳定性^[70]。

2.1.2 丁香酚 丁香酚(eugenol, EU)是天然植物精油,其挥发性成分主要有菇烯、菇类化合物和酚类物质^[71],分子式为 $\text{C}_{10}\text{H}_{12}\text{O}_2$ 。它具有抗菌、防腐、抗炎、抗病毒等作用,被用于食品、制药等行业,但存在光敏性和水溶性差的缺点。利用CDs形成包合物,可以增强其水溶性,提高其生物利用度^[72-73]。

Joardar等^[72]研究发现丁香酚与 α -CD和 β -CD均有主客体络合反应,与 β -CD结合亲和力较高,原因是 β -CD较大的疏水口能够更好地容纳丁香酚,因

此能够有效地增强丁香酚的水溶性。Bai 等^[74]制备了 β -CD 包埋 EU 的缓释生物防腐剂 (Eugenol/ β -cyclodextrin-g-acrylamide, EU/ β -CD-g-AM), 研究其对鱼肉的保鲜效果, 实验结果证明 EU/ β -CD-g-AM 能持续释放 EU, 从而有效抑制腐败菌生长, 与用蒸馏水处理的鱼肉样品相比能延长 6 d 储存期。

2.1.3 肉桂提取物 肉桂是樟科樟属肉桂干燥的树皮, 可以用于提取肉桂精油, 其中含肉桂醛等挥发性成分和多酚、黄酮类非挥发性成分^[65], 具有抗菌、抗氧化、杀虫等功能, 广泛用于食品、制药、活性包装等领域, 但其挥发性强、不稳定, 遇光、热和空气容易分解^[75-76]。

Hill 等^[76]采用冷冻干燥法分别制备了 β -CD 与肉桂树皮提取物、反式肉桂醛、丁香芽提取物、EU 几种抑菌剂的包合物, 分析了包合物的抑菌情况。研究发现, EU/ β -CD 包合物是一种选择性抑菌剂, 对大肠杆菌的生长有抑制作用, 但并不能抑制副伤寒沙门氏菌和金黄色葡萄球菌。而肉桂皮提取物/ β -CD 包合物和丁香芽提取物/ β -CD 包合物既能抑制革兰氏阳性菌也能抑制革兰氏阴性菌的生长, 并且由于 β -CD 的包埋作用, 两种提取物的水溶性还得到显著提高, 因此该类包合物在食品抗菌中具有潜在的应用。

Wang 等^[77]利用 κ -卡拉胶 (κ -Carrageenan, KC) 和肉桂精油/羟丙基- β -环糊精包合物 (CEO/HP- β -CD) 制备了一种新型抗菌凝胶。将凝胶添加到装有面包切片的聚乙烯袋中储存 6 d, 每隔一段时间对面包取样, 检测面包上微生物生长总数和霉菌数量, 并同市售酒精保鲜卡进行对比。结果表明, 含有 CEO/HP- β -CD 复合材料的 KC 凝胶有抑制霉菌生长的作用, 同时能够保留面包中的水份, 并且 CEO 的香气比酒精更易于让人接受, 但是由于凝胶中水份释放和双层包埋的缘故, CEO 的抑菌功效有所减弱, 造成凝胶的抗菌效果比市售保鲜卡的抗菌效果弱, 因此还需要调整 CEO/HP- β -CD 复合材料的浓度和凝胶形状来满足商业需求。

2.2 环糊精及其衍生物与抗氧化剂的递送体系在食品中的应用

具有抗氧化作用的保健食品近年来引起了人们的广泛关注。白藜芦醇^[40]、姜黄素^[78-80]、虾青素^[81]等物质具有良好的抗氧化作用, 然而它们水溶性差、化学性质不稳定, 这大大限制了其在食品领域的应用。一些研究人员将 CDs 与这类物质构建包合物, 来提升其水溶性和稳定性, 从而拓展其应用。

2.2.1 白藜芦醇 白藜芦醇又叫芪三酚, 是天然多酚类化合物, 广泛存在于葡萄、花生等农作物中, 化学式为 $C_{14}H_{12}O_3$, 具有抗癌、抗氧化、抗炎、抗衰老等生物活性, 但白藜芦醇具有水溶性差、化学性质不稳定和代谢速度快等缺点, 大大限制了其应用^[40, 82-84]。

Silva 等^[58]构建了 γ -CD 和白藜芦醇的包合物,

通过冷冻干燥获得固体, 并将其添加到新鲜的柠檬汁中。与游离的白藜芦醇添加到果汁中相比, 包合物的形成能够促进白藜芦醇在柠檬汁中的溶解, 并且能够保护其在柠檬汁中的抗氧化稳定性, 因此可以通过果汁提高白藜芦醇的摄入。

Duarte 等^[85]制备了甲基- β -CD 与白藜芦醇的包合物, 使白藜芦醇水溶性提高了 400 倍, 同时保留了白藜芦醇极强的抗氧化活性、抗菌活性以及抑制 Caco-2 细胞活性的能力。

利用 CDs 和白藜芦醇形成包合物, 可以有效地改善白藜芦醇水溶性差、见光易分解等缺点, 但不影响其抗氧化、抗癌、抗菌等优良性能, 极大地拓展了白藜芦醇在食品和医药领域的应用。

2.2.2 姜黄素 姜黄素具有抗氧化、抗炎等功效, 但其水溶性极差、见光易分解等性质, 限制了其在工业上大规模应用^[78-80]。Arya 等^[86]利用 β -CD 和姜黄素形成包合物, 将其水溶性提高了 206 倍。该研究还发现, 包合物中的姜黄素可持续体外释放 5 h, 在 β -CD 腔中未释放的姜黄素可得到保护, 释放的姜黄素才能与酶或受体相结合。Hedi 等^[87]利用环氧氯丙烷作为交联剂, 将 γ -CD 接枝到牛血清蛋白 (bovine serum protein, BSA) 上得到 γ -CD-BSA 纳米粒子, 并对姜黄素进行负载。实验证明, γ -CD-BSA 的 pH 稳定性和盐稳定性较 γ -CD 有所提高。体外释放研究发现姜黄素在 pH 为 1.2 盐酸中释放缓慢, 而在 pH 为 7.2 的中性环境中释放较快, 说明 γ -CD-BSA 纳米粒子能够在胃环境中保护姜黄素不释放, 而在肠道中将其释放出来发挥作用。

利用 CDs 对姜黄素进行包合, 不仅可以有效提高姜黄素的水溶性, 还能保护其不被胃酸环境破坏。

2.2.3 虾青素 虾青素是类胡萝卜素, 属于萜烯类不饱和化合物, 分为游离虾青素和虾青素酯 (astaxanthin ester, Asta-E) 两种, 是极好的活性氧清除剂, 具有抗氧化、提高机体免疫力的功效^[88], 但 Asta-E 无法在水中溶解, 且在光、热或氧气存在下极其不稳定^[81]。利用 CDs 对虾青素进行包埋, 能够有效地提高虾青素和虾青素酯的稳定性和水溶性, 可以解决其在食品中应用的局限性。

陆亚鹏等^[89]利用 HP- β -CD 与虾青素包合, 将虾青素溶解度由 0.21 mg/mL 提升到 3.74 mg/mL, 稳定性提高了约 20 倍。Qiao 等^[90]用 HP- β -CD 与 Asta-E 形成包合物, 研究结果表明形成包合物后 Asta-E 的热稳定性、溶解度、生物利用度和抗癌活性都有了明显提高。

2.3 环糊精及其衍生物与营养补充剂的递送体系在食品中的应用

补充人体所需氨基酸、维生素、矿物质等营养物质的产品称为营养补充剂, 目的是为了补充人体必需但所缺少或需求量增加的营养素^[91], 例如维生素^[59-60]、蛋白质^[61]等。将这类物质与 CDs 形成包合物能够

保护其不被胃酸分解,使其稳定地到达肠道发挥作用。

2.3.1 维生素 维生素 A(vitamin A, V_A)是指含有 β -白芷酮环的多烯基结构、具有视黄醇生物活性的一大类物质^[59],为人体维持正常代谢和机能所必需的脂溶性维生素。但 V_A 对光和热较为敏感,在水中溶解度和分散性差限制了应用^[92]。Xu等^[93]利用 V_A 和 V_A 酯分别与 β -CD进行包合,研究发现在加入 β -CD后, V_A 和 V_A 酯的热稳定性和水溶性增加了。相比于 V_A 酯, β -CD更适合与 V_A 形成包合物。

维生素 E(vitamin E, V_E)是指含有苯并二氢吡喃结构、具有 α -生育酚生物活性的一类物质,是自由基清除剂,在抗衰老、抗肿瘤等方面具有良好效果。但 V_E 属于脂溶性维生素,且对氧气敏感,因此在应用过程中如何提高其水溶性和稳定性是重点考虑的问题^[60]。Chen等^[94]利用 β -CD对 V_E 进行包合,通过包合 V_E 的稳定性和自由基清除能力均显著提高。Eid等^[95]利用化学交联剂制备了 β -CD和SSPS的水凝胶纳米复合材料用于 V_E 的控制递送。在大鼠体内的生物利用度和药代动力学研究证明,复合材料可以有效地提高 V_E 的生物利用度。由于SSPS是阴离子多糖,复合材料在胃中酸性条件(pH=1~3)下可以稳定存在,因此能够保护 V_E 免受恶劣条件和胃脂肪酶和蛋白酶的影响,且复合材料能够粘附在肠道壁上,可将 V_E 直接传递到肠道壁,有利于人体对 V_E 的吸收和利用。

2.3.2 蛋白质 乳铁蛋白的受体位于小肠刷状缘膜中,白蛋白受体位于小肠 Peyer's 斑块中的 M 细胞,放线菌素和溶菌酶能够改变肠道健康,特别是乳铁蛋白和白蛋白必须通过胃部到达肠道的受体细胞或作用部位才能发挥作用。基于此,Niu等^[61]开发了天然聚 ϵ -赖氨酸与 β -环糊精硫酸钠盐的静电纳米复合物,研究了该复合物对上述 4 种蛋白质的负载。研究表明,在胃蛋白酶模拟胃条件下,复合物能够保护乳铁蛋白和白蛋白不被酶水解。

在蜂王浆中蛋白质是含量最高的营养物质,包括多种蜂王浆主蛋白、活性酶以及多肽等,但蜂王浆蛋白的水溶性和稳定性较差,极大地限制了蜂王浆的应用^[96-97]。刘佳霖等^[98]研究了 β -CD包合蜂王浆的效果。实验证明, β -CD包合技术能够显著提高蜂王浆水溶性蛋白的稳定性及蜂王浆水溶性。

3 结论与展望

近年来在食品领域中,基于 CDs 无毒害、无气味、内疏水外亲水等特性,多采用制备包合物、水凝胶、Pickring 乳液等方法将环糊精用于水溶性及稳定性差的活性成分的负载,起到保护活性成分,降低其损失,使其更好地发挥抗氧化、抗菌、增强免疫等作用。虽然目前已经有较多 CDs 递送体系在食品领域的研究报道,但多停留在理论研究阶段,在食品行业中应用的还比较少。众所周知,食品是多元化的复杂

体系,想要递送体系发挥出理想的效果,还需考虑食品中其他组分、加工烹饪方法、储存条件等对递送体系的影响。未来探究 CDs 递送体系在食品加工过程、加工方式、储存条件、人体耐受等方面的性能或将成为下一个研究重点。因此,我们需要付出更多的努力才能够将实验创新成果应用到实际生产中。可预见的是,随着对递送体系的研究越来越深入,CDs 包埋活性物质在食品及包装中的应用将会越来越广泛,使活性成分能够有效并稳定地发挥其价值。

参考文献

- [1] MATENCIO A, NAVARRO-ORCAJADA S, GARCÍA-CARMONA F, et al. Applications of cyclodextrins in food science. A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 104: 132-143.
- [2] 周瑶,陈岗,詹永,等.艾叶挥发油-环糊精包合物研究概述[J].食品工业,2020,41(8):240-244. [ZHOU Y, CHEN G, ZHAN Y, et al. Summarization of study on folium artemisia argyi essential oil-cyclodextrin complexes[J]. The Food Industry, 2020, 41(8): 240-244.]
- [3] 沈海民,纪红兵,武宏科,等. β -环糊精的固载及其应用最新研究进展[J].有机化学,2014,34(8):1549-1572. [SHEN H M, JI H B, WU H K, et al. Recent advances in the immobilization of β -cyclodextrin and their application[J]. Chinese Journal of Organic Chemistry, 2014, 34(8): 1549-1572.]
- [4] KFOURY M, PIPKIN J D, ANTLE V, et al. Captisol: an efficient carrier and solubilizing agent for essential oils and their components[J]. Flavour and Fragrance Journal, 2017, 32(5): 340-346.
- [5] SONG L X, BAI L, XU X M, et al. Inclusion complexation, encapsulation interaction and inclusion number in cyclodextrin chemistry[J]. Coordination Chemistry Reviews, 2009, 253(9-10): 1276-1284.
- [6] VYAS A, SARAF S, SARAF S. Cyclodextrin based novel drug delivery systems[J]. Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry, 2008, 62(1): 23-42.
- [7] LIU Y, CHEN Y N, GAO X L, et al. Application of cyclodextrin in food industry[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(10): 2627-2640.
- [8] 王倩,柳志学,张瀛溟,等.氨基酸修饰 β -环糊精对胆酸分子键合的热力学性质及生物应用[J].中国科学:化学,2019,49(11):1343-1350. [WANG Q, LIU X Z, ZHANG Y M, et al. Thermodynamic properties and biological applications of amino acid-modified β -cyclodextrin on the binding of cholic acid molecules[J]. Scientia Sinica(Chimica), 2019, 49(11): 1343-1350.]
- [9] KANG Y, LEE Y, KIM Y J, et al. Characterization and storage stability of chlorophylls microencapsulated in different combination of gum Arabic and maltodextrin[J]. Food Chemistry, 2019, 272: 337-346.
- [10] TIAN B, LIU Y, LIU J. Smart stimuli-responsive drug delivery systems based on cyclodextrin: A review[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 251: 116871.
- [11] 谭啸,邱婷婷,李若男,等.壳聚糖纳米粒子的制备和在食品抑菌中的研究进展[J].食品科学,2020,41(23):347-353. [TAN X, QIU T T, LIU R N, et al. Recent progress in the preparation and

- application of chitosan nanoparticles as an antimicrobial in food[J]. *Food Science*, 2020, 41(23): 347–353.]
- [12] MENEZES P D P, ANDRADE T D A, FRANK L A, et al. Advances of nanosystems containing cyclodextrins and their applications in pharmaceuticals[J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2019, 559: 312–328.
- [13] SHELLEY H, BABU R J. Role of cyclodextrins in nanoparticle-based drug delivery systems[J]. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2018, 107(7): 1741–1753.
- [14] 刘佳鑫, 王思琪, 周悦, 等. 壳聚糖/ β -环糊精复合物的制备及应用[J]. *食品工业*, 2019, 40(12): 196–200. [LIU J X, WANG S Q, ZHOU Y, et al. Preparation and application of chitosan/ β -cyclodextrin complex[J]. *The Food Industry*, 2019, 40(12): 196–200.]
- [15] 卓敏, 严忠海, 张加慧. 环糊精及其衍生物在药学应用中的安全性综述[J]. *转化医学电子杂志*, 2017, 4(6): 77–83. [ZHUO M, YAN Z H, ZHANG J H. Review of safety assessment for cyclodextrin and its derivatives in drug administration[J]. *E-journal of Translational Medicine*, 2017, 4(6): 77–83.]
- [16] 许丹, 刘建英, 刘玉梅. β -环糊精及其衍生物增加客体分子水溶性的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(16): 404–411. [XU D, LIU J Y, LIU Y M. Research progress on increasing the water solubility of guest molecules based on β -cyclodextrin and its derivatives[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(16): 404–411.]
- [17] WANG Q. Industrial applications of cyclodextrins[M]. In: Liu Y, Chen Y, Zhang HY, et al. *Handbook of macrocyclic supramolecular assembly*. Springer Singapore, 2020: 1665–1697.
- [18] 宋乐新, 孟庆金, 游效曾. 环糊精和环糊精包合物[J]. *无机化学学报*, 1997(4): 14–20. [SONG L X, MENG Q J, YOU X Z. Cyclodextrins and cyclodextrin inclusion complexes[J]. *Chinese Journal of Inorganic Chemistry*, 1997(4): 14–20.]
- [19] 马小双, 张锐乖, 李文艳. 苹果挥发油 β -环糊精包合物的制备与评价[J]. *绿色科技*, 2019(22): 198–202. [MA X S, ZHANG R G, LI W Y. Preparation and evaluation of volatile oil and β -cyclodextrin inclusion complex from amomum tsaoko[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2019(22): 198–202.]
- [20] 黎汉清, 罗文翰, 肖更生, 等. 丁香精油微胶囊的制备及其对草莓保鲜效果的研究[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(21): 191–196. [LI H Q, LUO W H, XIAO G S, et al. Preparation of microcapsule of clove essential oil and preservation effect on strawberry[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(21): 191–196.]
- [21] 李进霞, 王佳, 康明丽, 等. 芹菜素 γ -环糊精包合物的表征和抗氧化活性研究[J]. *现代药物与临床*, 2020, 35(4): 647–651. [LI J X, WANG J, KANG M L, et al. Characterization and antioxidant activity of apigenin γ -cyclodextrin inclusion complex[J]. *Drugs & Clinic*, 2020, 35(4): 647–651.]
- [22] 王冰清, 陈加蓓, 胡叠, 等. 猕猴桃籽油微胶囊的制备及其品质研究[J]. *中国油脂*, 2019, 44(10): 18–22. [WANG B Q, CHEG B J, HU D, et al. Preparation of kiwi fruit seed oil microcapsule and its quality[J]. *China Oils and Fats*, 2019, 44(10): 18–22.]
- [23] 刘本国, 张瑞婷, 吴晓楠, 等. 橙皮苷/羟丙基- β -环糊精包合物的理化性质研究[J]. *现代食品科技*, 2013, 29(10): 2349–2352+2394. [LIU B G, ZHANG R T, WU X N, et al. Physicochemical properties of the complex of hesperidin and hydroxypropyl- β -cyclodextrin[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2013, 29(10): 2349–2352+2394.]
- [24] 赵芳, 赵雪秋, 常清, 等. 虫草素与羟丙基- β -环糊精的包合行为及性能研究[J]. *分析化学*, 2017, 45(10): 1547–1555. [ZHAO F, ZHAO X Q, CHANG Q, et al. Study on inclusion behavior and properties of cordycepin with hydroxypropyl- β -cyclodextrin[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2017, 45(10): 1547–1555.]
- [25] 保秋连, 夏大真, 杨俊丽, 等. 虫草素与二甲基- β -环糊精的包合行为研究[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2020, 42(5): 958–965. [BAO Q L, XIA S Z, YANG J L, et al. Study on inclusion behavior of cordycepin and dimethyl- β -cyclodextrin[J]. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition)*, 2020, 42(5): 958–965.]
- [26] 韩春然, 张静, 李煜. 超声波法制备丁香精油- β -环糊精微胶囊[J]. *食品科学*, 2013, 34(22): 97–100. [HAN C R, ZHANG J, LI Y. Ultrasonic preparation of β -cyclodextrin microcapsules of clove oil[J]. *Food Science*, 2013, 34(22): 97–100.]
- [27] SUN C, CAO J, WANG Y, et al. Ultrasound-mediated molecular self-assemble of thymol with 2-hydroxypropyl- β -cyclodextrin for fruit preservation[J]. *Food Chemistry*, 2021, 363: 130327.
- [28] QIU C, MCCLEMENTS D J, JIN Z, et al. Development of nanoscale bioactive delivery systems using sonication: Glycyrrhizic acid-loaded cyclodextrin metal-organic frameworks[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2019, 553: 549–556.
- [29] 李萍, 舒展, 申晚霞, 等. 超声波法制备八角茴香油- β -环糊精微胶囊及其表征分析[J]. *食品科学*, 2017, 38(4): 243–249. [LI P, SHU Z, SHEN X X, et al. Ultrasonic preparation and characterization of star anise oil- β -cyclodextrin microcapsule[J]. *Food Science*, 2017, 38(4): 243–249.]
- [30] 武俊杰, 宋铁珊, 陈志慧, 等. 环糊精包合技术研究进展[J]. *新疆师范大学学报(自然科学版)*, 2005(2): 51–54, 58. [WU J J, SONG T S, CHEN Z H, et al. Research progress of cyclodextrin inclusion technology[J]. *Journal of Xinjiang Normal University (Natural Sciences Edition)*, 2005(2): 51–54, 58.]
- [31] 王艳艳, 刘长河, 葛文静, 等. 感冒清热颗粒挥发油的 β -环糊精包合工艺比较及稳定性研究[J]. *上海医药*, 2020, 41(17): 65–70. [WANG Y Y, LIU C H, GE W J, et al. Comparative study on the process of including volatile oil from Ganmaoqingre granules with β -cyclodextrin and its stability[J]. *Shanghai Medical & Pharmaceutical Journal*, 2020, 41(17): 65–70.]
- [32] 李翠红, 裴妙荣, 王兵. 犍为筠姜挥发油提取及其 β -环糊精包合物制备工艺研究[J]. *山西中医药大学学报*, 2021, 22(4): 264–266. [LI C H, PEI M R, WANG B. Studies on preparation technology of β -cyclodextrin inclusion compound for volatile oil of Qianwei Rhizoma Zingiberis[J]. *Journal of Shanxi University of Chinese Medicine*, 2021, 22(4): 264–266.]
- [33] OZDEMIR N, POLA C C, TEIXEIRA B N, et al. Preparation of black pepper oleoresin inclusion complexes based on beta-cyclodextrin for antioxidant and antimicrobial delivery applications us-

- ing kneading and freeze drying methods: A comparative study[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 91: 439–445.
- [34] AHMED J, MULLA M Z, AL-ATTAR H, et al. Comparison of thermo-rheological, microstructural and antimicrobial properties of β - and γ -cyclodextrin inclusion complexes of cinnamon essential oil[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2022, 16(4): 3010–3022.
- [35] 石秀佳,程亚茹,樊焱婷,等. 基于环糊精包合技术提高冻干制剂中薄荷挥发油综合保留率研究[J]. *中国中药杂志*, 2021, 46(22): 5819–5824. [SHI X J, CHEN Y R, GONG Y T, et al. Improving comprehensive retention rate of peppermint oil in freeze-dried preparation based on cyclodextrin inclusion technology[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2021, 46(22): 5819–5824.]
- [36] 于博,吴进菊,李云捷,等. 8-姜酚与麦芽糖基- β -环糊精的包合研究[J]. *中国食品添加剂*, 2018(3): 61–67. [YU B, WU J J, LI Y J, et al. Study on inclusion of 8-gingerol and maltosyl- β -cyclodextrin[J]. *China Food Additives*, 2018(3): 61–67.]
- [37] 任广跃,李晖,段续,等. 常压冷冻干燥技术在食品中的应用研究[J]. *食品研究与开发*, 2013, 34(18): 119–122. [REN G Y, LI H, DUAN X, et al. Application of atmospheric freeze drying in food[J]. *Food Research and Development*, 2013, 34(18): 119–122.]
- [38] 邢云霞,冯云龙,董文舒. 浅谈真空冷冻干燥技术在食品加工中的应用与前景[J]. *食品安全导刊*, 2020(33): 177. [XING Y X, FENG Y L, DONG W S. Talking about the application and prospect of vacuum freeze-drying technology in food processing[J]. *China Food Safety Magazine*, 2020(33): 177.]
- [39] SHI X, MONACO M H, DONOVAN S M, et al. Encapsulation of tributyrin by gamma-cyclodextrin: Complexation, spray drying, and in vitro fermentation[J]. *Journal of Food Science*, 2020, 85(10): 2986–2993.
- [40] 李晨,张宽才,张懿玲,等. 白藜芦醇环糊精包合物制备与性能[J]. *江西科学*, 2020, 38(6): 839–842. [LI C, ZHANG K C, ZHANG Y L, et al. Preparation and properties of resveratrol cyclodextrin inclusion compound[J]. *Jiangxi Science*, 2020, 38(6): 839–842.]
- [41] 杨艳红,李湘洲,周军,等. 山苍子油微胶囊的制备技术比较及其释放动力学[J]. *中国粮油学报*, 2018, 33(7): 78–84. [YANG Y H, LI X Z, ZHOU J, et al. Preparation technology comparison and release kinetics of Litsea cubeba oil[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2018, 33(7): 78–84.]
- [42] 迟晓君,刘亚慧,张玉洁,等. 蒲公英微胶囊制备工艺优化及性质研究[J]. *中国果菜*, 2020, 40(11): 21–27. [CHI X J, LIU Y H, ZHANG Y J, et al. Study on preparation technology optimization and properties of dandelion microcapsule[J]. *China Fruit & Vegetable*, 2020, 40(11): 21–27.]
- [43] AHMED E M. Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review[J]. *Journal of Advanced Research*, 2015, 6(2): 105–121.
- [44] LIUBIMTSEV N, KÖSTERKE T, CHE Y, et al. Redox-sensitive ferrocene functionalised double cross-linked supramolecular hydrogels[J]. *Polymer Chemistry*, 2022, 13(3): 427–438.
- [45] QU J, MENG Q, LIN X, et al. Microwave-assisted synthesis of β -cyclodextrin functionalized celluloses for enhanced removal of Pb(II) from water: Adsorptive performance and mechanism exploration[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 752: 141854.
- [46] FANG G, WANG Q, YANG X, et al. γ -Cyclodextrin-based polypseudorotaxane hydrogels for ophthalmic delivery of flurbiprofen to treat anterior uveitis[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 277: 118889.
- [47] THIVYA P, AKALYA S, SINIJA V R. A comprehensive review on cellulose-based hydrogel and its potential application in the food industry[J]. *Applied Food Research*, 2022, 2(2): 100161.
- [48] 徐川辉,邹长军. 环糊精改性羧甲基纤维素水凝胶的制备、表征和封装/释放性能研究[J]. *化学通报*, 2018, 81(7): 630–635. [XU C H, ZOU C J. Study on preparation, characterization, and encapsulation/release properties of β -cd modified carboxymethyl cellulose hydrogel[J]. *Chemistry*, 2018, 81(7): 630–635.]
- [49] CUI H, WANG Y, LI C, et al. Antibacterial efficacy of *Satureja montana* L. essential oil encapsulated in methyl- β -cyclodextrin/soy soluble polysaccharide hydrogel and its assessment as meat preservative[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 152: 112427.
- [50] TAN Y, XU K, LIU C, et al. Fabrication of starch-based nanospheres to stabilize pickering emulsion[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2012, 88(4): 1358–1363.
- [51] YANG H Q, FU L M, WEI L J, et al. Compartmentalization of incompatible reagents within Pickering emulsion droplets for one-pot cascade reactions[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2015, 137(3): 1362–1371.
- [52] CHRISTINA L, STEPHAN D. Pickering emulsions in foods - opportunities and limitations.[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2017, 58(12): 1971–1985.
- [53] LIU Z, GENG S, JIANG Z, et al. Fabrication and characterization of food-grade Pickering high internal emulsions stabilized with β -cyclodextrin[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020: 134.
- [54] XI Y, ZOU Y, LUO Z, et al. pH-Responsive emulsions with β -cyclodextrin/vitamin E assembled shells for controlled delivery of polyunsaturated fatty acids[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(43): 11931–11941.
- [55] NIU H, CHEN W J, CHEN W X, et al. Preparation and characterization of a modified- β -cyclodextrin/ β -carotene inclusion complex and its application in pickering emulsions.[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(46): 12875–12884.
- [56] TIAN Y C, YUAN C, CUI B, et al. Pickering emulsions stabilized by β -cyclodextrin and cinnamaldehyde essential oil/ β -cyclodextrin composite: A comparison study[J]. *Food Chemistry*, 2022, 377: 131995.
- [57] 苏琼,任敏,王彦斌,等. β -环糊精主客体识别抗菌剂及抗菌性能研究进展[J/OL]. *天然产物研究与开发*: 1–15[2022-08-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1335.Q.20220728.1847.006.html>. [SU Q, REN M, WANG Y B, et al. Research progress on the host-guest recognition and antibacterial performance of β -cyclodextrin with antibacterial agents[J/OL]. *Natural Product Research and Development*: 1–15[2022-08-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1335.Q.20220728.1847.006.html>.]

- 1335.Q.20220728.1847.006.html.]
- [58] SILVA A F R, MONTEIRO M, RESENDE D, et al. Inclusion complex of resveratrol with γ -cyclodextrin as a functional ingredient for lemon juices[J]. *Foods*, 2021, 10(1): 16.
- [59] 李卫新, 王军波. 视黄酸对心脏发育影响的机制[J]. *中国生育健康杂志*, 2005(3): 182–185. [LI W X, WANG J B. Mechanisms of the effect of retinoic acid on cardiac development[J]. *Chinese Journal of Reproductive Health*, 2005(3): 182–185.]
- [60] 宋晓燕, 杨天奎. 天然维生素E的功能及应用[J]. *中国油脂*, 2000(6): 45–47. [SONG X Y, YANG TIAN K. Function and application of natural vitamin E[J]. *China Oils and Fats*, 2000(6): 45–47.]
- [61] NIU Z, THIELEN I, BARNETT A, et al. ϵ -Polylysine and β -cyclodextrin assembling as delivery systems for gastric protection of proteins and possibility to enhance intestinal permeation[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2019, 546: 312–323.
- [62] 芦国营, 张朝晖, 洪伟杰. 新型食品防腐剂纳他霉素的研究进展[J]. *中国食品添加剂*, 2005(2): 38–41. [LU G Y, ZHANG Z H, HONG W J. Advances in the research of a new food additive natamycin[J]. *Chinese Food Additives*, 2005(2): 38–41.]
- [63] 陈方圆, 戴久竣, 徐家延, 等. 纳他霉素抑菌机制及在食品保鲜中的应用研究进展[J]. *食品科技*, 2021, 46(9): 47–51. [CHEN F Y, DAI J J, XU J Y, et al. Research progress of antimicrobial mechanism of natamycin and its application in food preservation[J]. *Food Science and Technology*, 2021, 46(9): 47–51.]
- [64] 武延利. 丁香酚、肉桂醛和柠檬醛复配微囊剂对草莓灰霉的防控研究[D]. 天津: 天津农学院, 2017. [WU Y L. Study on the control of *Botrytis cinerea* with strawberry by microcapsule combined with *Eugenol*, *Cinnamaldehyde* and *Citral*[D]. Tianjin: Tianjin Agricultural University, 2017.]
- [65] 路露, 束成杰, 葛翎, 等. 肉桂精油和肉桂醛的抑菌、抗氧化和酪氨酸酶抑制活性研究[J]. *林产化学与工业*, 2022, 42(3): 105–110. [LU L, SHU C J, GE L, et al. The antibacterial activity, antioxidant and antityrosinase activities of cinnamon essential oil and cinnamaldehyde[J]. *Chemistry and Industry of Forest Products*, 2022, 42(3): 105–110.]
- [66] 孙成行, 张福娟, 王廷平. 纳他霉素的应用与检测方法研究进展[J]. *中国食品添加剂*, 2017(3): 178–182. [SUN C H, ZHANG F J, WANG Y P. Research progress of application and detection method of natamycin[J]. *China Food Additives*, 2017(3): 178–182.]
- [67] 王健. 纳他霉素-环糊精包合物的制备、机理和特性的研究[D]. 浙江工商大学, 2018. [WANG J. Preparation, characterization and mechanism of inclusion complex of natamycin and β -cyclodextrin derivatives[D]. Zhejiang Gongshang University, 2018.]
- [68] 李飞, 毛勇, 王燕, 等. 纳他霉素-羟丙基- β -环糊精包合物的制备及其抑菌性能研究[J]. *中国食品添加剂*, 2013(3): 127–131. [LI F, MAO Y, WANG Y, et al. Studies on preparation and bacteriostatic properties of inclusion complex of natamycin and hydroxypropyl- β -cyclodextrin[J]. *Chinese Food Additives*, 2013(3): 127–131.]
- [69] FANG S, PENG X, LIANG X, et al. Enhancing water solubility and stability of natamycin by molecular encapsulation in methyl- β -cyclodextrin and its mechanisms by molecular dynamics simulations[J]. *Food Biophysics*, 2020, 15(2): 188–195.
- [70] 李军, 田卫, 葛毅强, 等. 腐生酵母菌在鲜榨苹果汁中的生长速率预测模型[J]. *食品与发酵工业*, 2004(7): 6–11. [LI J, TIAN W, GE Y Q, et al. Prediction model of growth rate of saprophytic yeast in freshly squeezed apple juice[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2004(7): 6–11.]
- [71] 罗冬兰, 雷霖卿, 曹森, 等. 火龙果采后病原菌的分离鉴定及丁香酚抑菌研究[J]. *中国果树*, 2022(8): 23–27.2. [LUO D L, LEI J Q, CAO S, et al. Isolation and identification of postharvest pathogens of pitaya fruit and antifungal effect of eugenol[J]. *China Fruits*, 2022(8): 23–27.2.]
- [72] JOARDAR A, MEHER G, BAG B P, et al. Host-guest complexation of eugenol in cyclodextrins for enhancing bioavailability[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2020: 319.
- [73] ELENA A. Theoretical study of the β -cyclodextrin inclusion complex formation of eugenol in water[J]. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 2018, 23(4): 928.
- [74] BAI C, XU P, QI W, et al. Preparation and characterization of a sustained-release bio-preservative based on β -cyclodextrin encapsulated eugenol[J]. *Food Bioscience*, 2021, 42: 101192.
- [75] MATSHETSHE K I, PARANI S, MANKI S M, et al. Preparation, characterization and in vitro release study of beta-cyclodextrin/chitosan nanoparticles loaded *Cinnamomum zeylanicum* essential oil[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 118: 676–682.
- [76] HILL L E, GOMES C, TAYLOR T M. Characterization of beta-cyclodextrin inclusion complexes containing essential oils (trans-cinnamaldehyde, eugenol, cinnamon bark, and clove bud extracts) for antimicrobial delivery applications[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2013, 51(1): 86–93.
- [77] WANG Y, YUAN C, LIU Y, et al. Fabrication of kappa-carrageenan hydrogels with cinnamon essential oil/hydroxypropyl- β -cyclodextrin composite: Evaluation of physicochemical properties, release kinetics and antimicrobial activity[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 170: 593–601.
- [78] LÓPEZ-MALO D, VILLARÓN-CASARES C A, ALARCÓN-JIMÉNEZ J, et al. Curcumin as a therapeutic option in retinal diseases[J]. *Antioxidants*, 2020, 9(1): 48.
- [79] HOSSEIN B, FAEZEH G, E B G, et al. Effects of curcumin on mitochondria in neurodegenerative diseases[J]. *BioFactors (Oxford, England)*, 2020, 46(1): 5–20.
- [80] PRIYADARSINI K I. Photophysics, photochemistry and photobiology of curcumin: Studies from organic solutions, biomimetics and living cells[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 2009, 10(2): 81–95.
- [81] HUSSEIN G, SANKAWA U, GOTO H, et al. Astaxanthin, a carotenoid with potential in human health and nutrition[J]. *Journal of Natural Products*, 2006, 69(3): 443–449.
- [82] FRANCISOA A, MASTROMARINO P, MASCI A, et al. Chemistry, stability and bioavailability of resveratrol[J]. *Medicinal chemistry (Sharjah (United Arab Emirates))*, 2014, 10(3): 237–245.
- [83] SALES JM R A. Resveratrol in peanuts[J]. *Critical Reviews*

- in *Food Science and Nutrition*, 2014, 54(6): 734–770.
- [84] 李妍. 白藜芦醇的生物活性及在食品保健中的作用[J]. 现代食品, 2018(13): 50–52. [LI Y. Biological activity of resveratrol and its role in food health care[J]. *Modern Food*, 2018(13): 50–52.]
- [85] DUARTE A, MARTINHO A, LUIS A, et al. Resveratrol encapsulation with methyl-beta-cyclodextrin for antibacterial and antioxidant delivery applications[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 63(2): 1254–1260.
- [86] ARYA P, RAGHAV N. In-vitro studies of Curcumin- β -cyclodextrin inclusion complex as sustained release system[J]. *Journal of Molecular Structure*, 2021, 1228: 129774.
- [87] HEDI W, JINGBO L, YIDING Y, et al. γ -Cyclodextrin-BSA for nano-encapsulation of hydrophobic substance[J]. *Food Bioscience*, 2021, 41: 101009.
- [88] 侯会斌, 孙兆远, 贡汉坤, 等. 克氏原螯虾壳虾青素微胶囊制备工艺的优化[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(20): 74–79. [HOU H R, SUN Z Y, GONG H K, et al. Optimization of the *procam barus clarkia* shell astaxanthin microcapsules[J]. *Food Research and Development*, 2015, 36(20): 74–79.]
- [89] 陆亚鹏, 赵育. 虾青素-羟丙基- β -环糊精包合物的制备与稳定性[J]. 江苏大学学报(医学版), 2008, 18(6): 477–479, 483. [LU Y P, ZHAO Y. Preparation and stability of the inclusion complex of astaxanthin with hydroxypropyl- β -cyclodextrin[J]. *Journal of Jiangsu University (Medicine Edition)*, 2008, 18(6): 477–479, 483.]
- [90] QIAO X, YANG L, HU X, et al. Characterization and evaluation of inclusion complexes between astaxanthin esters with different molecular structures and hydroxypropyl- β -cyclodextrin[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 110: 106208.
- [91] 赵薇, 刘霞. 营养补充剂不是人人都要补[J]. 食品与健康, 2021(4): 18–19. [ZHAO W, LIU X. Nutritional supplements are not for everyone[J]. *Food and Health*, 2021(4): 18–19.]
- [92] WEISSE S, PERLY B, DALBIEZ J P, et al. New aqueous gel based on soluble cyclodextrin/vitamin a inclusion complex[J]. *Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry*, 2002, 44(1–4): 87–91.
- [93] XU X, PENG S, BAO G, et al. β -cyclodextrin inclusion complexes with vitamin A and its esters: A comparative experimental and molecular modeling study[J]. *Journal of Molecular Structure*, 2021, 1223: 129001.
- [94] CHEN W S, LIU D, ZHOU L L, et al. Antioxidant activity of vitamin E enhanced by cyclodextrin inclusion complex[J]. *British Food Journal*, 2021, 123(12): 3988–3998.
- [95] EID M, SOBHY R, ZHOU P, et al. β -cyclodextrin- soy soluble polysaccharide based core-shell bionanocomposites hydrogel for vitamin E swelling controlled delivery[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 104: 105751.
- [96] 张智武, 单斌, 彭文君, 等. 蜂王浆中水溶性蛋白质和活性肽的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2007(10): 32–36. [ZHANG Z W, SHAN B, PENG W J, et al. Advance in the research of royal jelly water soluble proteins and peptides[J]. *Food Research and Development*, 2007(10): 32–36.]
- [97] 孙平, 李虎臣, 颜慧, 等. 蜂王浆蛋白多肽及其生物活性研究进展[J]. 食品研究与开发, 2011, 32(8): 181–185. [SUN P, LI H C, YAN H, et al. Advance in the research of royal jelly proteins and peptides and the related biological functions[J]. *Food Research and Development*, 2011, 32(8): 181–185.]
- [98] 刘佳霖, 姬聪慧, 高丽娇, 等. β -环糊精包合蜂王浆的工艺优化及产物稳定性分析[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2018, 33(6): 1113–1119. [LIU J L, JI C H, GAO L J, et al. Process optimization of β -cyclodextrin inclusion complex of royal jelly and its stability investigation[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University(Natural Science)*, 2018, 33(6): 1113–1119.]