

付聪,董鸿春,刘玥婷,等.番茄红素的微胶囊化、稳定性及生物利用率的研究进展[J].食品工业科技,2022,43(11):391-397. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021050175

FU Cong, DONG Hongchun, LIU Yueting, et al. Research Progress on Microencapsulation, Stability and Bioavailability of Lycopene[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(11): 391-397. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021050175

· 专题综述 ·

番茄红素的微胶囊化、稳定性及生物利用率的研究进展

付 聪¹,董鸿春¹,刘玥婷²,王晓真¹,任丹丹^{1,*},何云海¹,汪秋宽¹

(1.大连海洋大学食品科学与工程学院,辽宁省水产品加工及综合利用重点实验室,
国家海藻加工技术研发分中心,辽宁大连 116023;
2.大连海关技术中心,辽宁大连 116000)

摘 要:番茄红素是一种很不稳定的脂溶性色素,在加工和储存过程中容易氧化或异构化。近年来人们已经应用微胶囊化来改善番茄红素的不稳定性。微胶囊化的番茄红素能减少与外界接触,免受外界因素的不利影响,增加番茄红素的储存稳定性,提高其在肠道中的生物利用率。本文对番茄红素微胶囊的制备、储存稳定性及生物利用率进行了综述,以期为番茄红素微胶囊技术的应用提供参考。

关键词:番茄红素,微胶囊化,稳定性,生物利用率

中图分类号:TS201

文献标识码:A

文章编号:1002-0306(2022)11-0391-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021050175

本文网刊:



Research Progress on Microencapsulation, Stability and Bioavailability of Lycopene

FU Cong¹, DONG Hongchun¹, LIU Yueting², WANG Xiaozhen¹, REN Dandan^{1,*},
HE Yunhai¹, WANG Qiukuan¹

(1.College of Food Science and Engineering, Dalian Ocean University, Key Laboratory of Aquatic Product Processing and Utilization of Liaoning Province, Nation Research and Development Branch
Center for Seaweed Processing, Dalian 116023, China;
2.Dalian Customs, Dalian 116000, China)

Abstract: Lycopene is a very unstable fat-soluble pigment and is easily oxidized or isomerized during processing and storage. In recent years, microencapsulation has been used to improve the instability of lycopene. The microencapsulated lycopene can reduce the contact with the outside world, avoiding the adverse effects of the external environment, increasing the storage stability of lycopene, and improve its bioavailability in the intestine. The preparation, storage stability and bioavailability of lycopene microcapsules are reviewed in this paper, in order to provide a reference for the application of lycopene microcapsule technology.

Key words: lycopene; microencapsulation; stability; bioavailability

番茄红素属于类胡萝卜素的一种,是人类饮食中主要的类胡萝卜素之一。番茄、杏子、番石榴、西瓜、木瓜和粉红葡萄柚等蔬菜水果中番茄红素含量

较高,呈现鲜艳的红色^[1]。番茄红素含有 13 个双键,其中有 11 个共轭双键,这一结构使番茄红素能较好地清除活性氧,猝灭单线态氧^[2]。番茄红素是最有效

收稿日期:2021-05-21

基金项目:辽宁省教育厅科学研究项目(JL201909);财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系资助。

作者简介:付聪(1997-),女,硕士研究生,研究方向:食品加工与安全,E-mail:fc17804236743@163.com。

* 通信作者:任丹丹(1980-),女,博士,教授,研究方向:海洋生物资源利用,E-mail:rdd80@163.com。

的抗氧化剂类胡萝卜素之一。有研究表明,番茄红素具有多种生理活性。日常生活中的番茄红素摄入量或血清中番茄红素的含量与前列腺癌、中风、心血管疾病、代谢综合征等病症呈负相关^[3-5]。许多流行病学研究表明,番茄红素有体外抗氧化能力(如单线态氧猝灭、过氧化氢自由基清除)^[6-7],较高的血浆番茄红素浓度可以降低女性罹患心血管疾病的风险^[8]。但是由于番茄红素的结构中有大量的共轭双键,加工和储藏过程中,在氧、光、温度以及化学因素等的作用下,游离的番茄红素很容易被氧化或者异构化^[9]。

近年来,微胶囊技术逐渐发展,可以保护生物活性化合物免受外界不利条件的影响^[10]。微胶囊是将微小的颗粒或液滴包裹在涂层中,或嵌入均匀或非均匀的基质中,使微胶囊具有许多有用的特性。微胶囊技术还能提高其稳定性,减少损失。对番茄红素的包封方法很多,包括喷雾干燥、冷冻干燥法、凝聚法、包埋络合法、离子凝胶法等^[11-12]。包封的壁材种类包括糖类、蛋白质、蛋白质和糖类复配使用等^[13]。对番茄红素、 β -胡萝卜素等类胡萝卜素,微胶囊技术能很好地解决其稳定性差等问题,并提高其生物利用度,因此,微胶囊技术在类胡萝卜素制剂领域已得到了广泛应用。

本文对番茄红素微胶囊的制备方法、稳定性及生物利用率进行了综述,以期对番茄红素微胶囊的进一步研究与应用提供理论依据。

1 番茄红素微胶囊的制备方法

番茄红素微胶囊的制备需首先对番茄红素进行包封,其方法包括喷雾干燥法、凝聚法、冷冻干燥法、包埋络合法和离子凝胶法等^[11-12]。

1.1 喷雾干燥法

喷雾干燥技术在食品工业中有着广泛的应用,常用于酶、香料、抗氧化剂、防腐剂和生物活性物质的封装^[14-15]。对于喷雾干燥功能成分,首先将生物活性化合物分散在封装基质的溶液中,然后快速蒸发形成封装生物活性化合物的外壳,封装壁材的不同对喷雾干燥的效果有一定的影响。

喷雾干燥法常用的壁材有麦芽糊精、 β -环糊精及大豆多糖^[16]。Athanasia等^[17]以麦芽糊精为壁材,采用喷雾干燥法制备番茄红素微胶囊。结果表明当番茄红素与麦芽糊精的配比为1:3.3,进料温度52℃,进风温度147℃时,微胶囊包封率可达93%。与麦芽糊精相比,环糊精具有疏水中心,能够和类胡萝卜素类色素的物化性质相互作用,从而形成稳定的包合物。Itaciara等^[18]以 β -环糊精为壁材喷雾干燥法制备番茄红素微胶囊。结果表明,当芯壁比为1:4时微胶囊包封率可达94%~96%。除麦芽糊精及 β -环糊精等喷雾干燥常用的壁材外,大豆多糖也可用于番茄红素微胶囊的制备。邱伟芬等^[19]证明了以水溶性大豆多糖为壁材喷雾干燥法制备番茄红素微胶囊的可行性并对其制作工艺进行了优化。将壁材质量浓度

设置为0.28 g/mL,芯材:壁材为1:7,乳化剂质量分数2%,进风口温度160℃,出风口温度88℃,所得微胶囊包封率可达91.8%。也有研究采用两种或两种以上等多种壁材联合使用制备番茄红素微胶囊。Shu等^[20]以明胶和蔗糖为壁材喷雾干燥法制备番茄红素微胶囊,研究其工艺参数对微胶囊制备的影响,当明胶与蔗糖比为3:7,芯和壁材料比为1:4,进料温度为55℃,入口温度为190℃,均质压力为40 MPa时,所得微胶囊中番茄红素的纯度不低于52%。舒铂等^[21]采用上述同等条件对番茄红素提纯物进行微胶囊化,所得微胶囊的包封率达到44.33%。

喷雾干燥法成本低、设备方便、操作简单^[22]。喷雾干燥产生的颗粒是基于基质的,即核心被困在聚合基质的连续网络中,其主要优点是易于重构,对于液体和糊状食品或瞬时粉末的应用十分重要。喷雾干燥法与其他制备方法相比其优势在于可进行大批量或小批量连续生产^[23]。采用喷雾干燥法制得的产品具有良好的分散性和溶解性。但喷雾塔内的温度较高及微胶囊暴露于空气中易使活性物质失活,这一缺点可在低温条件下避免。

1.2 凝聚法

凝聚微胶囊化是从初始溶液中分离一种或多种水胶体,然后在相同的反应介质中悬浮或乳化的活性成分周围沉积新形成的凝聚相来完成的。凝聚法制备的微胶囊不溶于水,具有优良的控释性和耐热性。

凝聚法中常用的是复合凝聚法,复合凝聚法是将原料进行复合后,通过调节pH或降低体系温度使其沉降进而得到微胶囊^[24-25]。Dima等^[26]采用复合凝聚法以分离乳清蛋白和阿拉伯树胶为壁材将番茄皮中的番茄红素微胶囊化,为促进凝聚将反应混合物进行冷冻干燥后收集粉末。得到的粉末细小,颜色为橙色,包封率达到(83.6%±0.20%)。Rocha等^[27]也采用复合凝聚法对番茄红素进行微胶囊化,所得微胶囊的包封率大于93.08%。另外,壁材在不同pH条件下凝聚效果也有所差异。Silva等^[28]以明胶和果胶为壁材,对不同pH3.0~pH4.5条件下明胶和果胶之间相互作用进行分析。发现在最终pH为3.0时复合凝聚的效果最佳,产品包封率达到89.50%。

凝聚法是很具有前景的包封技术之一,承载能力较强(99%以上),并且容易通过机械应力、温度或pH的变化来控制释放内容物^[28]。此法要求包封时使用的温度温和,可以减少番茄红素在制备时的氧化降解。凝聚工艺与其他技术相比成本高且复杂,但该技术适合疏水化合物番茄红素作为核心材料的包封^[29]。

1.3 冷冻干燥法

冷冻干燥是在低于环境温度下进行的,没有空气防止产品因氧化或化学改性而恶化。可以最大限度地减少喷雾干燥时由于干燥温度过高而导致的产物分解或结构、质地、外观和风味变化所造成的

损害^[30-31]。

庞志花等^[32]以核桃分离蛋白为壁材冷冻干燥法制备番茄红素微胶囊粉末。在芯壁比 1:2,单甘脂添加量 0.5% 基础上,均质剪切速率为 9000 r/min、包埋温度 50 ℃、包埋时间 50 min 时包埋产率最高达到 80.60%。多种壁材联合使用可使番茄红素微胶囊包封率得到较大提高。龙海涛等^[33]以酯化微孔淀粉、麦芽糊精、明胶、蔗糖及 V_C 等多种原料作为复合壁材冷冻干燥法制备番茄红素微胶囊。在芯材和壁材质量比为 10:90,壁材质量比为 1:0.67:0.56:0.22:0.44,温度 50 ℃ 的条件下进行包封,此时微胶囊的包封率高达 91.78%。但是,冷冻干燥法制备过程中可能造成番茄红素的损失。Chiu 等^[34]以明胶和聚 γ -谷氨酸为壁材,与番茄汁废料中提取的番茄红素制成乳状液,冷冻干燥法将其制成番茄红素微胶囊。微胶囊中番茄红素含量达到 76.5%,结果表明,番茄红素在干燥过程中损失了 23.5%,这应该是由氧化降解造成的。

制备微胶囊的方法主要包括喷雾干燥、冷冻干燥、凝聚法等,其中冷冻干燥在食品及医药领域应用广泛,主要用于热敏性物质的干燥^[35-36]。番茄红素微胶囊大多采用喷雾干燥法,而采用冷冻干燥方法制备番茄红素微胶囊鲜有报道。

1.4 其他

除喷雾干燥法、凝聚法、冷冻干燥法等常用的制备番茄红素微胶囊的方法,还可用包埋络合法、离子凝胶法等制备番茄红素微胶囊。离子凝胶法是制备稳定的富含番茄红素微胶囊的理想选择,其封装常用的聚合物为海藻酸盐和果胶^[36]。Sampaio 等^[37]以海藻酸钠和果胶为聚合物的离子凝胶包封番茄红素,在不同的热处理(60 和 90 ℃)和 pH(2、5 和 8)条件下,对冷冻干燥前后的番茄红素微胶囊进行了表征,结果对番茄红素均表现出较高的保护效果,在对不同温度下的贮藏稳定性进行评价时,海藻酸盐和果胶生产的微胶囊在冷藏 8 周后,番茄红素保存率分别为 29% 和 21%,而微胶囊经冷冻干燥后在 25 ℃ 以上的保存率达到 80% 以上。包埋络合法又被称为分子包埋法,采用具有特殊分子结构的聚合物为壁材,常见的壁材有 β -环糊精及其衍生物。靳学远等^[38]采用 β -环糊精为壁材制备番茄红素包合物,结果表明番茄红素与 β -环糊精物质的量的比为 1:150 时,番茄红素的包合率达到最大为 73.6%,包含的番茄红素在 60 d 内保留率达到 92.2%。孙新虎等^[39]也进行了相同类型的实验,结果表明,包埋后可明显提高番茄红素的水溶性,改善它的稳定性。

2 番茄红素微胶囊常用的壁材

2.1 碳水化合物类

碳水化合物类的壁材能够形成非晶态玻璃状固体,为输送系统的壁材料提供结构支撑,被广泛用于食品成分的封装壁材料,是封装材料的首选^[40]。

碳水化合物类壁材即为糖类壁材,常见用于包封的壁材主要有环糊精、糊精、阿拉伯胶、海藻糖等。Patricia 等^[41]研究了 α 、 β 和 λ -环糊精对番茄中全反式番茄红素包封的稳定性,根据番茄红素与环糊精不同的摩尔比及环糊精的种类,进行优化。结果表明 β -环糊精包封对番茄红素稳定性最佳,当环糊精与番茄红素的摩尔比为 1:0.0026 时络合率最高。环糊精是淀粉降解产生的环寡糖,是一种可行的包封技术。 β -环糊精易溶于水,在水溶液中既可以与亲水物质相结合也可以与疏水物质相结合,不易吸收空气中的水分且化学性质稳定,更适用于番茄红素的包封^[42-43]。

除使用单一壁材外,多种碳水化合物联合使用可使其产率得到提高。Tatiana 等^[44]以海藻酸盐、海藻糖和半乳甘露聚糖为壁材制成番茄红素微胶囊。并对番茄红素保留量、异构化稳定性和释放程度进行了分析,结果表明添加海藻糖能更好地保留番茄红素,使异构化变化最小。孙传庆等^[45]以阿拉伯胶和糊精为壁材对番茄红素微胶囊化。结果表明,当阿拉伯胶:糊精为 1:1,番茄红素含量为 20%,芯材和壁材的适宜比例为 1:6,高压均质可有效地提高天然番茄红素的微胶囊化效率和微胶囊化产率。阿拉伯胶和糊精对提取物都起积极作用,阿拉伯胶具有一系列有利的特性,如成膜能力、水溶性、低粘度、良好的挥发性成分保留能力和乳化能力^[46]。经酸或酶水解淀粉后得到小分子物质称作糊精,能提高微胶囊在水中的溶解度,允许低粘度高固比但成膜能力差且容易干燥,两者协同作用提高微胶囊的包封率。

碳水化合物类壁材水溶性较强、成本低、种类多,但由于其无表面活性,因此,乳化能力差。碳水化合物应与其他具有良好乳化能力的成分结合使用,如阿拉伯树胶和乳清蛋白,或者可以用疏水性基团进行化学修饰。

2.2 蛋白质与碳水化合物的复配

蛋白质及分离物如乳清蛋白、大豆蛋白、酪蛋白、明胶等均有着优良的乳化特性。蛋白质类物质具有较强的自身结合能力,有利于疏水活性成分的溶解及成膜,因此常被用作基质材料^[41-42]。但是这类物质成本高,在冷水中溶解性差。由于碳水化合物表面活性差且无乳化能力,因此,微囊化时常将蛋白质或含蛋白质的胶与碳水化合物联合使用,也可利用美拉德反应使蛋白和碳水化合物形成缀合物后包封,其中蛋白质主要起乳化和成膜的作用^[12]。

侯圆圆等^[47]在大豆分离蛋白接枝产物对番茄红素的包埋作用的实验中,对比研究了大豆分离蛋白与魔芋胶、卡拉胶和阿拉伯胶的接枝产物对番茄红素包埋的影响。研究结果表明大豆分离蛋白与阿拉伯胶接枝产物作为壁材制备的番茄红素微胶囊包埋效果最佳,其产率和效率分别达到 74.27% 和 71.60%。Jia 等^[2]采用美拉德反应制备的分离乳清蛋白-低聚

木糖缀合物微胶囊化番茄红素。利用低聚糖进行美拉德反应来改善蛋白质功能特性,糖基化的乳清分离蛋白显著提高了番茄红素微胶囊的乳化性能,且对番茄红素的保护作用优于单独使用乳清蛋白分离物。大豆或乳清蛋白与蔗糖的复配使用在喷雾干燥微胶囊中较为常见。王世宽等^[48]以大豆分离蛋白和蔗糖为壁材制备番茄红素微胶囊,壁材采用大豆分离蛋白和蔗糖(比例为 4:6),番茄红素含量 40%,制备得到的微胶囊效率可达 90% 以上。查恩辉等^[49]以明胶和蔗糖为壁材包封番茄红素,明胶和蔗糖为壁材以质量比 3:7 混合,加入 0.4% 的蔗糖酯,原料固形物的含量为 40%,得到微胶囊的效率和产率最高,可达 91.26% 和 89.35%。

蛋白质和碳水化合物类物质的复配作为番茄红素微胶囊化的壁材,既能降低成本,也能弥补蛋白质溶解能力差及碳水化合物类物质乳化能力差等问题。蛋白质与碳水化合物类物质协同作用对微胶囊的物理特性有很大帮助,很大程度上能够提高番茄红素微胶囊的稳定性。

3 微胶囊化番茄红素的稳定性

番茄红素属于类胡萝卜素,由于类胡萝卜素的不饱和程度高,在加工和储存过程中容易发生异构化和氧化,其主要原因是酶或非酶氧化,因而限制了其在食品工业中的应用。番茄红素微胶囊可改善番茄红素的稳定性并增加其溶解度,这对于番茄红素在食品和制药行业中的应用具有重大意义。Aguiar 等^[50]等对番茄红素微胶囊稳定性研究试验也表明,微胶囊化番茄红素的稳定性优于其游离状态,并且番茄红素制成微胶囊后能够均匀地释放色素和着色。

番茄红素微胶囊的储存稳定性受胶囊壁材料、储存温度及包被次数等影响,其稳定性程度可用微胶囊中番茄红素的保留率体现。微胶囊化可防止番茄红素的降解、避免氧介导的自氧化反应,从而提高番茄红素的稳定性^[50]。微胶囊壁材的不同对番茄红素微胶囊的储存稳定性影响显著。左爱仁等^[51]以明胶和蔗糖等多种配方作为壁材,喷雾干燥制备番茄红素微胶囊并研究了在微胶囊制备过程中添加抗氧化剂对番茄红素保留率的影响。结果表明添加色拉油和乙酸乙酯等抗氧化剂后番茄红素微胶囊在室温条件自然光照射下其保留率在第一个月高达 100%。保存至 3 周后其保留率仍在 70% 以上。林蔚婷等^[52]将乳清分离蛋白与低聚木糖经美拉德反应后,利用其产物作为壁材,通过均质和喷雾干燥法制成番茄红素微胶囊。结果表明最佳条件下所得的微胶囊产品在避光条件下室温储存 24 d,番茄红素的保留率可达到 47.91%,而在 4 ℃ 下避光储存 24 d,其保留率高达 78.25%。而游离的番茄红素在上述条件下损失严重,这表明微胶囊在很大程度上可保护番茄红素免受外界不利环境的影响,提高番茄红素的稳定性。

微胶囊的储藏温度会对番茄红素的保留率产生

影响。Jia 等^[2]认为微胶囊中番茄红素的降解反应随储存温度的升高而增强。结果表明微胶囊在 4 ℃ 贮藏 36 d,番茄红素的保留率为 79%,而在 25 和 40 ℃ 贮藏 36 d,番茄红素保存率分别为 46% 和 40%。Aguiar 等^[50]对三种番茄红素微胶囊温度稳定性进行了评价,微胶囊中番茄红素的含量分别是 5%、10%、15%。结果表明芯材数量越少性能越好。当番茄红素含量为 5% 时,在 10 和 25 ℃ 温度下保留率分别为 82.53%、67.11%。Rocha 等^[27]也进行了同等类型的实验,结果均表明随微胶囊储存温度的上升,微胶囊中番茄红素的保留率降低,但均高于游离番茄红素。

另外,包被次数对番茄红素微胶囊稳定性的影响也很大。范少丽等^[53]测定一次包被和双包被番茄红素微胶囊的稳定性。稳定性实验结果表明,番茄红素经过微胶囊化其稳定性大幅增加,储藏 90 d 后,一次包被微胶囊番茄红素的保留率保持在 78.6%,而双包被微胶囊的番茄红素保留率达到 92.60%。对番茄红素的微胶囊化可以很好地防止番茄红素的降解,减少氧对其的破坏。

4 微胶囊化番茄红素的生物利用率

药物制剂在正常生理作用下经体液循环达到作用部位的比例称为生物利用率。番茄红素制成微胶囊后其生物利用率得到较大提高。影响番茄红素微胶囊生物利用率的因素主要涉及包封方法与壁材选择。

4.1 包封方法

番茄红素微胶囊包封方法的不同对其肠道释放率有一定的影响。龙海涛等^[33]对以酯化微孔淀粉、麦芽糊精、明胶、蔗糖及 V_C 为复合壁材制备的番茄红素微胶囊进行了体外缓释实验。结果表明,番茄红素微胶囊在胃肠道中的释放率肠液明显高于胃液。同样缓释 14 h,胃液中冷冻微胶囊的累计缓释率为 38%,而在肠液中冷冻微胶囊的累计缓释率高达 82%,说明番茄红素微胶囊主要在肠道中释放。除上述一次包被技术外,双包被技术的使用使微胶囊在肠道内的缓释率更高。敬思群等^[54-55]在对双包被微胶囊技术对番茄红素生物利用率的影响研究中,通过模拟胃肠的体外环境实验,对番茄红素软胶囊,番茄红素油树脂,一次包被和双包被番茄红素微胶囊的体外释放效果进行比较。人工肠液中双包被番茄红素微胶囊有很好的缓释性,释放速率高,达到 92%,能够较好地提高番茄红素的生物利用率。番茄红素的微胶囊化可以很好地保护其在胃内的释放,使其在肠道中有很高的释放速率,提高其在人体内的生物利用率。

4.2 包封壁材

壁材的选择也是影响微胶囊化番茄红素生物利用率的重要因素。以蛋白质类物质作为壁材对番茄红素微胶囊化能够有效提高其在肠道内的吸收及在体内的生物利用率。Xue 等^[56]以玉米蛋白粉为原料制备的玉米醇溶蛋白包封番茄油树脂。利用蛋白质对胃内 pH 的中和作用对番茄红素形成一定的保护。

研究结果表明,玉米蛋白粉首次进入缓冲溶液时,颗粒形成聚集体,2 h 后,番茄红素的释放量不到 30%。玉米醇溶蛋白颗粒会保护大部分番茄红素不在胃内释放,随后在大肠和小肠中释放出来,从而提高其在人体的生物利用率。除玉米蛋白粉外,以糖基化的乳清分离蛋白(whey protein isolate, WPI)为壁材制成的番茄红素微胶囊也能提高其生物利用率。龙海涛等^[57]对以淀粉基复配壁材制备的番茄红素微胶囊进行了模拟释放实验,结果表明制备的番茄红素微胶囊模拟肠液中释放符合 Higuchi 扩散模型,属于骨架溶蚀机理。Jia 等^[2]对以分离乳清蛋白-低聚木糖缀合物为壁材制备的番茄红素微胶囊生物利用度进行评价时得出,游离番茄红素的生物利用度为(16%±3%),而微胶囊的生物利用度为(60%±4%),高于番茄红素的生物利用度(42%±3%),这可能是因为番茄红素微胶囊化后其溶解度增加。壁材中分离乳清蛋白经过糖基化,制成的微胶囊在模拟胃消化过程中比乳清分离蛋白为壁材的微胶囊更稳定。这与 Feng 等^[58]通过美拉德反应制备的卵清蛋白-右旋糖酐纳米凝胶来提高姜黄素的生物可及性的研究结果一致。

5 微胶囊化番茄红素的应用与展望

当前番茄红素微胶囊化技术在食品生产中应用广泛,也可应用于医药领域。在食品领域,番茄红素微胶囊应用于蛋糕加工,与游离的番茄红素相比,微胶囊能够均匀地释放色素并着色^[50]。微胶囊化番茄红素还可应用于食品挤压着色研究中,番茄红素微胶囊用于米粉的挤压,在挤出的所有条件下,微囊化番茄红素在挤出物中的颜色保留都比游离番茄红素更好,与游离番茄红素相比,微囊化番茄红素在 96 h 内的储存稳定性提高了两倍。在葵花籽油和豆奶为基础的调味料配方中添加番茄红素微胶囊粉末,可提高调味品的抗氧化活性^[26]。Sampaio 等^[37]采用离子凝胶法封装番茄红素浓缩物,可获得食品中天然添加剂的稳定颗粒。在医药领域,番茄红素微胶囊粉末可用于抑制淀粉消化酶来防止血糖水平过度升高,有效预防糖尿病,尤其是非胰岛素依赖型 II。微胶囊粉末对 α -淀粉酶的抑制作用较 α -葡萄糖苷酶低。因此,与 α -葡萄糖苷酶相比,该粉末对 α -淀粉酶更有效^[26]。

目前,基于微胶囊化技术能保护番茄红素等不稳定物质、提高其抗氧化活性并提高机体对其的生物利用率,随着人们对其研究的进一步深入,番茄红素微胶囊将应用于保健食品或医药等更多领域,具有良好的发展前景。

参考文献

[1] CLINTON S K. Lycopene: Chemistry, biology, and implications for human health and disease[J]. *Nutrition Reviews*, 1998, 56(1): 35–51.

[2] JIA C S, CAO D D, JI S P, et al. Whey protein isolate conjugated with xylo-oligosaccharides via maillard reaction: Characterization, antioxidant capacity, and application for lycopene microencap-

sulation[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 118: 108837.

[3] LI N, WU X, ZHUANG W, et al. Tomato and lycopene and multiple health outcomes: Umbrella review[J]. *Food Chemistry*, 2020, 343(3): 128396.

[4] CATHERINE C, JOE L, JOHN W. Can lycopene impact the androgen axis in prostate cancer: A systematic review of cell culture and animal studies[J]. *Nutrients*, 2019, 11(3): 633.

[5] BEYNON R, RICHMOND R C, FERREIRA D S, et al. Investigating the effects of lycopene and green tea on the metabolome of men at risk of prostate cancer: The ProDiet randomised controlled trial[J]. *International Journal of Cancer*, 2019, 144(8): 1918–1928.

[6] ZHAN J D, YAN Z J, KONG X J, et al. Lycopene inhibits IL-1 β -induced inflammation in mouse chondrocytes and mediates murine osteoarthritis[J]. *Journal of Cellular and Molecular Medicine*, 2021, 52(9): e8525.

[7] FAROUK S M, GAD F A, ALMEER R, et al. Exploring the possible neuroprotective and antioxidant potency of lycopene against acrylamide-induced neurotoxicity in rats' brain[J]. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2021, 138: 111458.

[8] SESSO D, BURING E, NORKUS P, et al. Plasma lycopene, other carotenoids, and retinol and the risk of cardiovascular disease in women[J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 2004, 79(1): 47–53.

[9] LIANG X P, YAN J, GUO S Q, et al. Enhancing lycopene stability and bioaccessibility in homogenized tomato pulp using emulsion design principles[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, 67: 102525.

[10] 卢艳艳, 李迎秋. 微胶囊技术的研究进展及在食品行业中的应用[J]. *中国调味品*, 2021, 46(3): 171–174. [LU Y H, LI Y Q. Research progress of microcapsule technology and its application in food industry[J]. *China Condiment*, 2021, 46(3): 171–174.]

[11] ANDRÉ L R, DAVY W, SÉRGIO M, et al. Microencapsulation by spray drying of a lycopene-rich tomato concentrate: Characterization and stability[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 91: 286–292.

[12] MADENE A, JACQUOT M, SCHER J, et al. Flavour encapsulation and controlled release—A review[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2006, 41(1): 1–21.

[13] 耿凤, 邵萌, 魏健, 等. 微胶囊技术在保护天然活性成分中的应用研究进展[J]. *食品与药品*, 2020, 22(3): 250–255. [GENG F, SHAO M, WEI J, et al. Progress in application of microcapsule technology in protection of natural active ingredients[J]. *Food and Drug*, 2020, 22(3): 250–255.]

[14] NIZORI A, BUI L T T, JIE F, et al. Spray-drying microencapsulation of ascorbic acid: Impact of varying loading content on physicochemical properties of microencapsulated powders[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020, 100(11): 4165–4171.

[15] HU Q, LI X, CHEN F, et al. Microencapsulation of an essential oil (cinnamon oil) by spray drying: Effects of wall materials and storage conditions on microcapsule properties[J]. *Journal of Food*

Processing and Preservation, 2020, 44: e14805.

[16] LEMMENS L, COLLE I, BUGGENHOUT S V, et al. Comparative study on lipid digestion and carotenoid bioaccessibility of emulsions, nanoemulsions and vegetable-based in situ emulsions[J].

Food Hydrocolloids, 2019, 87: 119–128.

[17] ATHANASIA M, KONSTANTINOS G. A new technique for spray-dried encapsulation of lycopene[J]. *Drying Technology*, 2012, 30(6): 641–652.

[18] ITACIARA L N, ADRIANA Z M. Encapsulation of lycopene using spray-drying and molecular inclusion processes[J]. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 2007, 50(5): 893–900.

[19] 邱伟芬, 李敏, 汪海峰, 等. 正交试验优化番茄红素微胶囊化工艺[J]. *食品科学*, 2012, 33(10): 45–50. [QIU W F, LI M, WANG H F, et al. Optimization of lycopene microencapsulation by orthogonal array design[J]. *Food Science*, 2012, 33(10): 45–50.]

[20] SHU B, YU W L, ZHAO Y P, et al. Study on microencapsulation of lycopene by spray-drying[J]. *Journal of Food Engineering*, 2005, 76(4): 664–669.

[21] 舒铂, 赵亚平, 于文利. 以明胶和蔗糖为复合壁材的番茄红素微胶囊化研究[J]. *食品工业科技*, 2004(9): 52–54. [SHU B, ZHAO Y P, YU W L. Study on the microencapsulation of lycopene with gelatin and sucrose[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2004(9): 52–54.]

[22] ATA C, YL B, SJL A, et al. Spray drying of whey protein stabilized nanoemulsions containing different wall materials-malto-dextrin or trehalose[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 136: 110344.

[23] LI K, PAN B, MA L, et al. Effect of dextrose equivalent on maltodextrin/whey protein spray-dried powder microcapsules and dynamic release of loaded flavor during storage and powder rehydration[J]. *Foods*, 2020, 9: 1878.

[24] FRAJ J, PETROVI L, EKI L, et al. Encapsulation and release of vitamin C in double W/O/W emulsions followed by complex coacervation in gelatin-sodium caseinate system[J]. *Journal of Food Engineering*, 2020, 292: 110353.

[25] SANTOS M B, CARVALHO C, GARCIA-ROJAS E E. Microencapsulation of vitamin D3 by complex coacervation using carboxymethyl tara gum (*Caesalpinia spinosa*) and gelatin A[J]. *Food Chemistry*, 2020, 343: 128529.

[26] DIMA I G, APRODU I, CRCIUMARU A, et al. Microencapsulation of lycopene from tomatoes peels by complex coacervation and freeze-drying: Evidences on phytochemical profile, stability and food applications[J]. *Journal of Food Engineering*, 2021, 288: 110166.

[27] ROCHA-SELMÍ G A, FAVARO-TRINDADE C S, GROSSO C R F. Morphology, stability, and application of lycopene microcapsules produced by complex coacervation[J]. *Journal of Chemistry*, 2013, 2013: 1–7.

[28] SILVA D F, FAVARO-TRINDADE C S, ROCHA G A, et al. Microencapsulation of lycopene by gelatin-pectin complex coacervation[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2012, 36(2): 185–190.

[29] MENDANHA D V, ORTIZ S, FAVARO-TRINDADE C S, et al. Microencapsulation of casein hydrolysate by complex coacervation with SPI/pectin[J]. *Food Research International*, 2009, 42(8): 1099–1104.

[30] JAMDAR F, MORTAZAVI S A, ASL M, et al. Physico-chemical properties and enzymatic activity of wheat germ extract microencapsulated with spray and freeze drying[J]. *Food Science & Nutrition*, 2021, 9(2): 1192–1201.

[31] WU G, HUI X, STIPKOVITS L, et al. Whey protein-black-currant concentrate particles obtained by spray-drying and freeze-drying for delivering structural and health benefits of cookies[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2021, 68: 102606.

[32] 庞志花, 郭倩, 徐若琳, 等. 核桃分离蛋白的制备及其包埋番茄红素的工艺[J]. *食品工业*, 2019, 40(5): 29–33. [PANG Z H, GUO Q, X R L, et al. The extraction of walnut protein isolate and its encapsulation of lycopene[J]. *The Food Industry*, 2019, 40(5): 29–33.]

[33] 龙海涛, 毕阳, 张慧秀, 等. 冷冻干燥制备番茄红素微胶囊及其缓释性能研究[J]. *食品与发酵工业*, 2016, 42(12): 125–131.

[LONG H T, BI Y, ZHANG H X, et al. Microcapsulation of lycopene by freeze-drying method and its slow-release performance[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2016, 42(12): 125–131.]

[34] CHIU Y T, CHIU C P, CHIEN J T, et al. Encapsulation of lycopene extract from tomato pulp waste with gelatin and poly (gamma-glutamic acid) as carrier[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007, 55(13): 5123–5130.

[35] JAKUBOWSKA E, LULEK J. The application of freeze-drying as a production method of drug nanocrystals and solid dispersions-A review[J]. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 2021, 62: 102357.

[36] LIU B, ZHOU X. Freeze-drying of proteins[J]. *Methods in Molecular Biology*, 2021, 2180: 683–702.

[37] GLAS A, SP B, APOR B, et al. Encapsulation of a lycopene-rich watermelon concentrate in alginate and pectin beads: Characterization and stability[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 116: 108589.

[38] 靳学远, 刘红, 秦霞. 番茄红素 β -环糊精包合物的超声制备及稳定性研究[J]. *食品科学*, 2011, 32(2): 36–38. [JIN X Y, LIU H, QIN X. Ultrasonic-assisted preparation and stability evaluation of lycopene β -cyclodextrin inclusion complexes[J]. *Food Science*, 2011, 32(2): 36–38.]

[39] 孙新虎, 李伟, 丁霄霖. 番茄红素 β -环糊精包合物的制备[J]. *中国食品添加剂*, 2002(5): 39–40. [SUN X H, LI W, DING X L. Preparation of inclusion compound of β -cyclodextrin with lycopene[J]. *China Food Additives*, 2002(5): 39–40.]

[40] AUGUSTIN M, HEMAR Y. Nano- and micro-structured assemblies for encapsulation of food ingredients[J]. *Chemical Society Reviews*, 2009, 38(4): 902–912.

[41] GRACIA P B, MARÍA LUISA R C, MARÍA DEL M C, et al. Stabilization of all-trans-lycopene from tomato by encapsulation using cyclodextrins[J]. *Food Chemistry*, 2007, 105(4): 1335–1341.

[42] PINHO E, GROOTVELD M, SOARES G, et al. Cyclodextrins as encapsulation agents for plant bioactive compounds[J]. *Car-*

bohydrate Polymers, 2014, 101: 121–135.

[43] CHEW S C, TAN C P, NYAM K L. Microencapsulation of refined kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) seed oil by spray drying using β -cyclodextrin/gum arabic/sodium caseinate[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 237: 78–85.

[44] CALVO T, BUSCH V M, SANTAGAPITA P R. Stability and release of an encapsulated solvent-free lycopene extract in alginate-based beads[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2017, 77: 406–412.

[45] 孙传庆, 胡小明, 朱金玲, 等. 番茄红素的微胶囊化研究和稳定性实验[J]. *食品科技*, 2007(2): 166–170. [SUN C Q, HU X M, ZHU J L, et al. Study on microencapsulation technology of natural lycopene and its stability[J]. *Food Science and Technology*, 2007(2): 166–170.]

[46] ANDREEA B, BA CRISTINA, ESTEVINHO B N, et al. Microencapsulation of curcumin by a spray-drying technique using gum arabic as encapsulating agent and release studies[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2018, 11(10): 1795–1806.

[47] 侯园园, 刘锐, 张民, 等. 糖接枝蛋白对番茄红素微胶囊包埋影响的研究[J]. *食品科技*, 2014, 39(9): 252–255. [HOU Y Y, LIU R, ZHANG M, et al. Impact of saccharide grafted protein on lycopene microcapsules[J]. *Food Science and Technology*, 2014, 39(9): 252–255.]

[48] 王世宽, 郭春晓. 番茄红素树脂的制备及微胶囊化[J]. *食品工业*, 2006(3): 5–8. [WANG S K, GUO C X. Study of lycopene oleoresin preparation and its microencapsulation process[J]. *The Food Industry*, 2006(3): 5–8.]

[49] 查恩辉, 王玉田, 李娜, 等. 番茄红素的提取及其微胶囊化的研究[J]. *中国调味品*, 2008(3): 45–47. [ZHA E H, WANG Y T, LI N, et al. Study on technique of lycopene extraction and microencapsulation[J]. *China Condiment*, 2008(3): 45–47.]

[50] ROCHA G A, CS FÁVARO-TRINDADE, GROSSO C. Microencapsulation of lycopene by spray drying: Characterization, stability and application of microcapsules[J]. *Food and Bioprocess Processing*, 2011, 90(1): 37–42.

[51] 左爱仁, 范青生, 刘燕, 等. 番茄红素微胶囊化的研究[J]. *食品科学*, 2004, 25(4): 35–39. [ZUO A R, FAN Q S, LIU Y, et al. Microencapsulation of lycopene[J]. *Food Science*, 2004, 25(4): 35–39.]

[52] 林蔚婷, 贾承胜, 夏书芹, 等. 抗氧化型壁材包埋番茄红素微胶囊的研究[J]. *食品与生物技术学报*, 2018, 37(1): 50–57. [LIN W T, JIA C S, XIA S Q, et al. Study on lycopene microcapsule prepared by antioxidation wall materials[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2018, 37(1): 50–57.]

[53] 范少丽, 敬思群, 纵伟. 双包被番茄红素微胶囊特性分析[J]. *中国调味品*, 2015, 40(6): 37–42. [FAN S L, JING S Q, ZONG W. Analysis of characteristics of lycopene microcapsules[J]. *China Condiment*, 2015, 40(6): 37–42.]

[54] 敬思群, 顾学建, 张永学, 等. 双包被微胶囊技术对番茄红素生物利用度的影响[J]. *中国调味品*, 2015, 40(12): 69–72. [JING S Q, GU X J, ZHANG Y X, et al. The influence of double coating microencapsulation technology on the lycopene bioavailability[J]. *China Condiment*, 2015, 40(12): 69–72.]

[55] 敬思群. 超高压及双包被技术在番茄红素微胶囊中的应用[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2017. [JING S Q. Application of ultra high pressure and double coating technology in lycopene microcapsule[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2017.]

[56] XUE Feng, LI Chen, LIU Yanlong, et al. Encapsulation of tomato oleoresin with zein prepared from corn gluten meal[J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 119(3): 439–445.

[57] 龙海涛, 唐中玉, 杨晰, 等. 不同淀粉复配壁材制备番茄红素微胶囊及缓释性能[J]. *包装与食品机械*, 2020, 38(6): 10–16. [LONG H T, TANG Z Y, YANG X, et al. Microencapsulation of lycopene with different starch composite wall materials and its sustained-release performance[J]. *Packaging and Food Machinery*, 2020, 38(6): 10–16.]

[58] FENG J, WU S, WANG H, et al. Improved bioavailability of curcumin in ovalbumin-dextran nanogels prepared by Maillard reaction[J]. *Journal of Functional Foods*, 2016, 27: 55–68.