

姜黄素的乳化和包埋及其应用研究进展

张梦飞, 曾庆哈, 张亮, 高彦祥*

(中国农业大学 食品科学与营养工程学院, 北京 100083)

摘要:姜黄素是从姜科、天南星科中的一些植物的根茎中提取的一种化学成分,是植物界很稀少的具有二酮的色素。姜黄素作为我国允许使用的一种天然着色剂,具有一系列生物药理活性,但是其理化稳定性差、生物利用度低,往往需很大用量才能达到作用剂量,将其乳化包埋后不仅可以解决其溶解性的问题,还可以提高其生物利用率,应用前景十分广阔。该文通过总结国内外大量文献,阐述姜黄素的基本性质及其乳状液的基本性质和乳化包埋的方法,同时介绍姜黄素的创新应用,并对其发展前景作出展望。

关键词:姜黄素;天然产物;乳化;包埋;应用研究

Advances in Emulsification and Encapsulation of Curcumin and Its Application

ZHANG Meng-fei, ZENG Qing-han, ZHANG Liang, GAO Yan-xiang*

(College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Curcumin is a chemical ingredient extracted from the roots of some plants in the Curcumin and Tiannan Stars, and is a pigment with diketones that is rare in the plant world. Curcumin, as a natural colorant allowed in China, has a series of biopharmacological activities. However, its physical and chemical stability is poor, low bioavailability, often need a large amount to reach the effect dose, but after burying it emulsified can not only solve its solubility problem, but also improve its biological utilization rate, the application prospects are very broad. By summarizing a large number of literatures at home and abroad, this paper expounded the basic properties of curcumin and its emulsion and emulsification methods, and also introduced the innovative application of curcumin and gave a prospect for its development prospects.

Key words: curcumin; natural products; emulsification; encapsulation; applied research

引文格式:

张梦飞, 曾庆哈, 张亮, 等. 姜黄素的乳化和包埋及其应用研究进展[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(14): 202-208

ZHANG Mengfei, ZENG Qinghan, ZHANG Liang, et al. Advances in Emulsification and Encapsulation of Curcumin and Its Application[J]. Food Research and Development, 2020, 41(14): 202-208

姜黄素(curcumin)是从姜科姜黄属植物姜黄、郁金、莪术的干燥根茎中提取的一种天然有效成分,药理作用广泛,毒性低,耐受性好^[1]。姜黄素最早是在1870年从姜黄 *Curcuma longa* L. 中首次分离出来一种低相对分子质量的多酚类化合物,1910年阐明了其双

阿魏酰甲烷的化学结构^[2]。

姜黄素是我国食品添加剂标准中允许使用的一种天然色素^[3],其染色力大于其他天然色素和合成柠檬黄等。姜黄素还具有很多生理作用,如抗氧化、降脂、抗动脉粥样硬化^[4]、抗炎^[5]、抗衰老^[6]、抗肿瘤^[7]等一系列生物药理活性,对人体的毒副作用很小,应用前景十分广阔。但由于其理化稳定性差、体内生物利用度低,往往需很大用量才能达到作用剂量(当口服达到10 g~12 g时才能在少数人体内检测到微量姜黄素),大大限制了姜黄素在功能保健食品和医药领域的推广。将姜

基金项目:国家自然科学基金面上项目(31871842)

作者简介:张梦飞(1995—),男(汉),硕士,研究方向:功能配料与食品添加剂。

*通信作者:高彦祥(1961—),男(汉),教授,研究方向:功能因子稳态化技术。

黄素乳化包埋后,可以在一定程度上解决其水溶性差、不稳定等应用方面的问题。本文主要阐述姜黄素的性质、乳液和包合物的制备及其稳定性的研究进展和发展前景。

1 姜黄素的结构与功能

姜黄素的分子式为 $C_{21}H_{20}O_6$, 分子量 368.39, 熔点 $180\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 183\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。姜黄素为橙黄色结晶粉末, 味稍苦, 不溶于水和乙醚, 溶于乙醇、丙二醇, 易溶于冰醋酸和碱溶液。姜黄素在碱性条件下呈红褐色, 在酸性条件下

呈浅黄色, 着色力较强, 对蛋白质着色较好, 对光的敏感性特别强, 须避光存储, 其最大吸收峰在 425 nm 波长的附近^[8]。姜黄素类的主要成分有姜黄素(curcumin), 占比为 $60\%\sim 70\%$ 、去甲氧基姜黄素(demethoxycurcumin), 占比为 $20\%\sim 27\%$ 以及去二甲氧基姜黄素(bis-demethoxycurcumin), 占比为 $10\%\sim 15\%$, 3 种分子结构式如图 1 所示^[9]。其中姜黄素(3-甲氧基-4-羟基-苯基-1,6-庚二烯-3,5-二酮)是最主要的活性成分, 属于 β 二酮功能基团的多酚化合物^[10]。

姜黄素对还原剂的稳定性较强, 着色性强, 一经

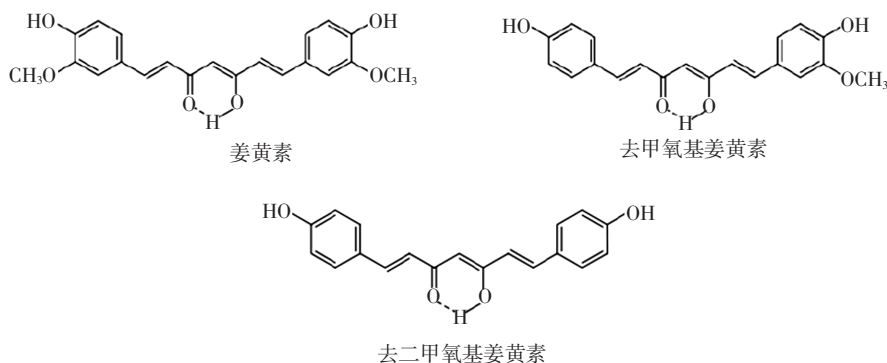


图 1 3 种姜黄素的分子结构式

Fig.1 Molecular structures of three types of curcumin

着色后就不易退色, 但对光、热敏感, 易与铁离子形成螯合物。 Zn^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、蔗糖、麦芽糖对姜黄素有色增色作用, 酒石酸、柠檬酸、苯甲酸钠、 Cu^{2+} 对姜黄素有色褪色作用, 而 K^{+} 、 Na^{+} 、 Mg^{2+} 、维生素 C 对姜黄素无明显影响^[11]。由于姜黄素分子两端具有两个羟基, 在碱性条件下发生电子云偏离的共轭效应, 所以当 pH 值大于 8 时, 姜黄素会由黄变红。现代化学利用此性能将其作为酸碱指示剂。

姜黄素是一种橙黄色醇溶性化合物, 除了是世界通用型着色剂外还具有很多营养价值^[12]。由于姜黄素结构中存在多对碳碳双键结构, 导致其化学性质十分不稳定, 易在光照和加热条件下发生氧化降解。同时不饱和结构使其具有较强的抗氧化活性和自由基清除能力, 因而具有一定的生理活性, 能有效捕获和清除体内的活性氧自由基。大多数研究表明姜黄素能够减轻氧化应激反应, 这是由于姜黄素通过抑制甲醛和蛋白质的碳基来抑制脂质和蛋白质的氧化, 而且姜黄素还刺激了各种抗氧化酶的活性, 这其中包括超氧化物歧化酶和多种氧化催化酶^[13]。姜黄素的诸多生理功能如姜黄素和白蛋白结合后具有抗癌和免疫调节功能^[14]、减少紫外线引起的人类角蛋白细胞和人类表皮癌细胞的凋亡变化从而起到防晒作用^[15-16]、降低特定

癌症的发生几率^[17]等, 都与其抗氧化特性有着密不可分的关系。近些年的一些研究表明, 姜黄素甚至对重度抑郁症患者具有抗抑郁的作用^[18-19]。

因为姜黄素的稳定性较差以及溶解的局限性, 所以可以利用变性淀粉、环糊精、阿拉伯胶、壳聚糖等多种食品胶体, 玉米醇溶蛋白、小麦醇溶蛋白、大豆蛋白水解物、蛋清粉等多种蛋白多肽类化合物将其进行包埋, 也可利用表面活性剂将其制备成液晶体系, 还可将其制备成纳米乳液, 减少其在制备和贮藏过程中的降解和损失, 提高其水溶性和生物利用率, 增加其应用开发价值。

2 姜黄素乳状液

2.1 食品乳状液的性质

乳状液是一种液体以液珠形式分散在与它不相混溶的另一种液体中而形成的分散体系。乳状液一般不透明, 呈乳白色^[20]。乳状液按水相和油相的空间位置可分水包油和油包水两种类型。其中将水相作为外相、油相作为内相的乳状液称为水包油型乳状液(O/W型), 反之则称为油包水型乳状液(W/O型)^[21], 根据分类, 几种重要的食品乳状液列于表 1^[22]。

乳状液按照粒径的大小, 又可分为传统乳液和纳

表 1 食品乳状液的类型

Table 1 Types of food emulsions

类型	低内相比 (>30 %)	中内相比 (30 %~70 %)	高内相比 (>77 %)
水包油型	牛奶	重奶油	蛋黄酱
	奶油	液体起酥乳状液	色拉调品
	充气冰淇淋	肉类乳状液	
	固体的蛋糕(糊状)	(腊肉、香肠)	
	咖啡增白剂(液体)		
	代用奶制品		
	奶酪、涂抹食品		
油包水型	固体洋葱等浸渍品		
	奶油		
	人造奶油		

米乳液,传统乳状液液滴的平均粒径在 100 nm~100 μm 之间,这种乳状液是热力学不稳定体系。这是由于油水界面存在着较大的表面张力,同时因液滴粒径与光波长相似,所以光散射作用较强,乳状液一般不透明^[23]。纳米乳液可以看成是传统乳液里包含的小液滴,平均粒径在 10 nm~100 nm 之间^[24]。乳状液的鉴别方法也很简单,常用的一种方法是稀释法,即用水去冲稀乳状液,如果能够混溶则其连续相必定是水相,因而是水包油型乳状液,如不能,则是油包水型乳状液。另一种方法是染色法,即乳化前在油相中加入少量染料,乳化后在显微镜下观察,液珠带色是水包油型乳状液,连续相带色则是油包水型乳状液。同理,也可把

染料溶于水相来进行观察^[25]。

乳状液通常是热力学不稳定体系,会随着贮存时间的延长而发生不稳定现象,见图 2^[26]。如重力分离、絮凝、聚结、奥斯瓦尔德熟化等^[27-28]。

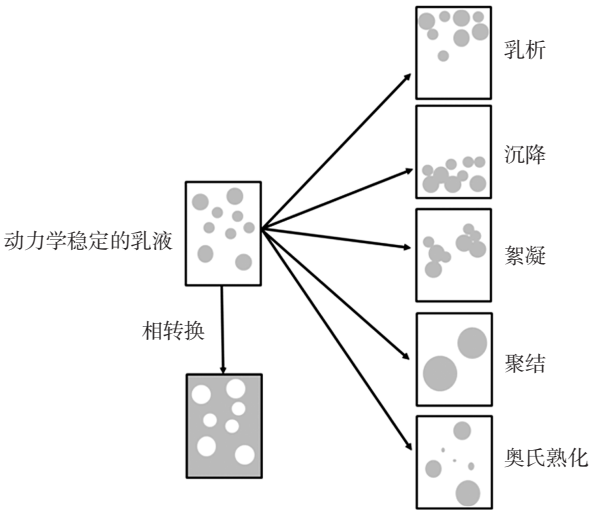


图 2 乳状液失稳过程示意图

Fig.2 Diagram of the destabilization process of emulsion

2.2 食品乳状液的制备方法

对于一般的食品级乳状液,制备过程通常是将乳化对象配成油相,将乳化剂溶于水成为水相,然后将油相倾入水相中并进行各种处理,包括简单热处理、超声乳化、均质和超高压均质、纳米研磨等^[29],具体原理与优缺点如表 2 所示。

表 2 食品乳状液的制备方法

Table 2 Preparation methods of food emulsion

乳化方法	乳化原理	仪器设备	优点	缺点	参考文献
相转变温度法	利用乳化过程中发生相变所释放的化学能量	磁力搅拌器,恒温水浴锅等	操作简单快速,过程温和,适合理论研究	乳液稳定性差,技术局限性较大,不适合工业化生产	[30]
超声乳化法	利用超声的空化效应将物料破碎、混合、乳化	超声乳化器	设备简单,投资小;过程温和,对样品破坏少	乳化效率低;乳状液粒大,稳定性差;技术放大困难	[31]
均质法	通过均质将物料在挤压、强冲击与失压膨胀的三重作用下细化,从而使物料能更均匀地相互混合	高压均质机	乳化效率高,可连续制备;乳状液粒径均一,稳定性好	设备精密,制造困难,成本较高;难以生产粒径更小的乳液	[32]
超高压均质法	利用流体高速流过交互容腔所产生的高剪切、高碰撞和空穴效应将物料分散	微射流仪,超高压均质机等	压力范围广,生产能力大;乳化效率高;乳状液粒径小,分布均匀,稳定性高	一次性投入大,耗件多,需要经常维护;样品黏度不宜过高,一般要经过初乳化	[33]
研磨法	利用研磨罐和研磨球的运动速度之差所产生的强摩擦力和撞击力将物料粉碎	球磨机,纳米砂磨机	对原料要求低,生产能力大,能实现大规模生产,乳状液粒径小,分布均匀,稳定性高	能耗高,设备精密,制造困难,成本较高	[34]

乳状液广泛应用于食品、饮料、医药和化妆品等行业,用于包埋、保护和传递功能成分,例如醇溶性色素、维生素、防腐剂和多种功能因子。在食品工业中,食品级乳状液越来越多地引起人们的关注,许多

原本应用受限的食品配料及功能成分以乳状液为载体添加到食品(保健品)中,可以在不影响食品体系稳定性的前提下提升食品品质和生物利用率^[35]。作为醇溶性物质,姜黄素在水性体系中很难溶解,可以利用

剪切均质、纳米研磨、喷雾干燥等多种乳化包埋技术将其制成水包油型乳状液或微胶囊,改变其溶解性,从而提高其利用的广度和深度。

3 姜黄素乳状液和包合物的制备

3.1 姜黄素纳米乳状液的制备

曾庆晗等^[36]以中链甘油三酯(medium chain triglycerides, MCT)为油相,卵磷脂为乳化剂,采用高压均质技术制备出含不同油相浓度的姜黄素纳米乳液,并于4、25、55℃条件下贮藏30 d,研究不同油相浓度对姜黄素纳米乳液稳定性的影响。研究发现,油相浓度的提高可使姜黄素纳米乳液中姜黄素包埋率、平均粒径和Zeta电位增大,但同时也降低了乳液的离心稳定性和热稳定性。具体来说,当油相浓度较低(5%、10%)时,姜黄素纳米乳液具有较高的稳定性,姜黄素保留率分别达到48.50%和48.99%,与此同时,乳液的粒径分别增加了0.79%和15.78%;且4℃贮藏时,其理化稳定性表现最好,30 d后姜黄素损失率仅为14.98%。姚艳玉等^[37]在此基础上以吐温-80作为乳化剂,继续探究不同油相(芥花籽油、亚麻籽油和中链甘油三酯)对高压均质法制备的姜黄素纳米乳液物化特性和贮藏稳定性的影响。试验结果与之前的研究相吻合。研究发现与芥花籽油和亚麻籽油相比,以中链甘油三酯为油相制备的姜黄素纳米乳液具有更小的平均粒径、更高的包埋量(2.44 mg/mL)和离心稳定性,但热稳定性略差。在贮藏试验中,以中链甘油三酯为油相制备的姜黄素纳米乳液理化稳定性良好,姜黄素含量和平均粒径变化不大。通过研究得出中链甘油三酯可作为良好的油相来制备理化稳定性良好的水包油型姜黄素纳米乳液,为拓展姜黄素在食品产业中的应用提供理论指导。伍敏晖等^[38]通过高压微射流均质建立了4种(蛋白质类、多糖类、小分子合成乳化剂、磷脂类)稳定的姜黄素乳液运载体系。以粒径为考察指标,采用Lumisizer稳定性分析仪研究不同均质压力、均质次数、乳化剂浓度对姜黄素乳液稳定性的影响。结果发现,4种乳化剂中吐温-80对乳液的粒径影响最大,乳清蛋白次之,然后为卵磷脂和阿拉伯胶。当制备稳定的姜黄素乳液体系时,吐温-80、乳清蛋白、卵磷脂和阿拉伯胶所需的均质压力分别为40、60、40 MPa和20 MPa;均质次数分别为6、4、4次和2次;质量分数分别为2%、2%、4%和4%。国外科研人员Kharat等^[39]同样借助高压微射流仪制备了负载姜黄素的水包油型纳米乳液,进而探究了抗氧化剂的类型(阿拉伯胶、皂苷、吐温-80、酪蛋白酸钠)和用量对纳米乳液的

制备以及稳定性的影响。结果发现,加入阿拉伯胶的纳米乳液相对于皂苷和吐温-80以及酪蛋白酸钠的表面载量下降最快,也就是说,想要制备稳定的乳液,需要使用大量的阿拉伯胶。经贮藏试验可知,高pH值(7.0)以及高温(55℃)条件会加速姜黄素的降解,而且在加入皂苷的乳液中,姜黄素的含量下降的最快,这很可能是由于其具有促进过氧化反应的能力,同时使用过量的乳化剂并不能显著降低姜黄素的降解。

3.2 姜黄素环糊精包合物的制备

利用蛋白质或多糖等生物高聚物对姜黄素进行包埋是近年来的研究热点,主要是因为利用食品级生物聚合物可以得到商业价值更加广泛的商品,并且生物聚合物可以改善姜黄素的多种性能。

环糊精(cyclodextrin, CD)是一种水溶性、非还原性、不易被酸水解的白色晶体,无毒,可食用,具有多孔性,它是通过催化酶从玉米或土豆等含淀粉的原料中提取的寡糖物,具有纯植物性,不会引起过敏反应,无E编码。常见的环糊精是由6个、7个或8个葡萄糖单元以1,4-糖苷键结合而成的 α -CD、 β -CD以及 γ -CD 3种^[40]。环糊精分子的独特之处在于它的环状三维结构:环糊精分子结构内部能够形成一个憎水性空腔,可吸收大小和形状与其兼容的亲脂性分子作为“客体”,其亲水性表面则能够确保分子在水基系统中的耐受性。而验证环糊精包合物是否形成的方法也有很多种,如紫外、圆二色谱、红外、X-射线衍射、差示扫描量热等。随着计算机技术的高速发展,分子模拟的方法也被更加频繁地使用^[41]。在食品工业中,环糊精能够为稳定水包油型乳液提供一种新的纯植物性的选择。

由于姜黄素的疏水性极强,因此吸收率低,而且生物利用率极低。若是提高姜黄素的剂量,不仅会导致生产成本的增加,而且生物利用率的问题并不能得到很好的解决。德国瓦克公司率先研发出一款 γ -环糊精和姜黄素的包合物CAVACURMIN[®],不仅姜黄素含量高(>15%)、自由流动性能好、颗粒尺寸较小且均一,而且能够在水中很好的分散。经动物实验与人体体外体内实验表明,该产品的水溶性、生物利用率及抗氧化性能都得到了很大的提升^[42]。

国内的一些科研人员也对姜黄素环糊精包合物进行了一些研究,如李艺等^[43]采用研磨法制备了姜黄素的环糊精分子包合物(cyclodextrin inclusion complex of curcumin, CCIC),并采用显微观察法、差示量热扫描法和红外光谱法来验证包合物的形成。同时以溶解度为评价指标,通过三因素三水平正交设计探究投料比、研磨时间、研磨温度这3种对包合物制备影响较大

的因素,以此来优化 CCIC 的制备工艺。试验发现在最优工艺条件下,即:当包合投料比(摩尔比)为 1:1,研磨温度为 40 ℃,包合时间为 1.5 h 时,姜黄素溶解度较

游离药物提高了 3.82×10^4 倍。罗见春等^[44]同样采用研磨法制备出了 (curcumin hydroxypropyl- β -cyclodextrin, CurcHD), 结构如图 3 所示。

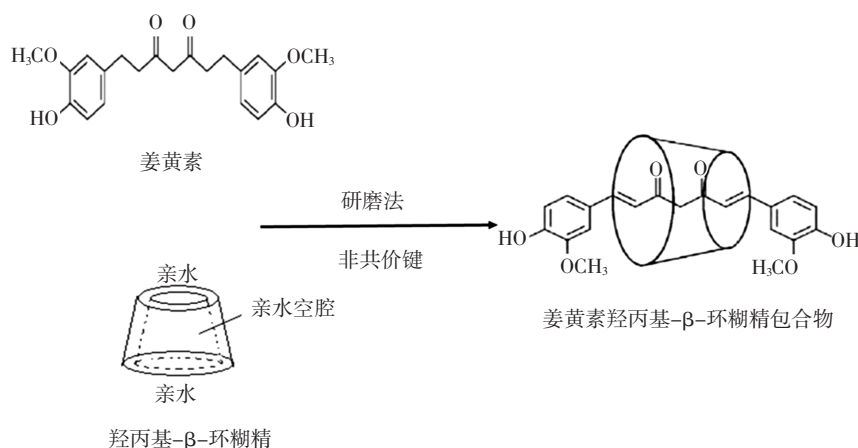


图 3 姜黄素环糊精包合物示意图

Fig.3 Diagram of curcumin cyclodextrin encapsulation

试验采用紫外可见分光光度法测定姜黄素羟丙基- β -环糊精包合物及姜黄素在大鼠体内各肠段(十二指肠、空肠、回肠及结肠)的吸收速率常数(K_a)和有效渗透率(Papp)。结果发现,姜黄素羟丙基- β -环糊精包合物在水中的溶解度是姜黄素的 33.68 倍,并且姜黄素羟丙基- β -环糊精包合物在大鼠各肠段的吸收较姜黄素明显提高。超临界 CO_2 法(supercritical carbon dioxide, SC- CO_2)是近年来新兴的一种制备包合物的方法^[45]。张志云等^[46]等采用超临界 CO_2 制备出了姜黄素羟丙基- β -环糊精包合物。试验人员采用单因素法和 Box-Behnken 响应面设计法并以溶解度为评价指标优化包合物的制备工艺,得到了高溶解度的姜黄素环糊精包合物。结果表明,包合物的最佳制备工艺为包合温度 57 ℃,包合时间 2 h,压力 24 MPa,药物与羟丙基- β -环糊精摩尔比 0.96:1。所得包合物中姜黄素溶解度为 34.24 $\mu\text{g/mL}$,约是姜黄素粉末的 400 倍。正是由于环糊精具有“内疏水、外亲水”的特殊立体环状结构;当环糊精通过非共价键形式将难溶性药物姜黄素包合进其疏水空腔后,不仅能提高姜黄素的水溶性,还能改善姜黄素见光易分解的缺陷。

国际上对姜黄素包合物的研究还有很多,如相关文献^[47]所报道的分别采用共沉淀、冻干和溶剂蒸发法与将姜黄素与 β -环糊精复合。通过傅里叶红外光谱法和傅里叶拉曼光谱法观察到姜黄素芳香环的峰移来验证共沉淀法对包合物的构建。此外,借助光声光谱和 X 射线衍射,发现了与芳香环相关的能带的消失也能够证明包合物的形成。Popat 等^[48]等则采用一

种新颖的、可伸缩的喷雾干燥器制备出了高水溶性(3 mg/mL)的姜黄素- γ -环糊精空心球体。然后再将这种空心球体包埋在表面带有正电荷的生物可降解的壳聚糖中,形成纳米颗粒。然后再对这种纳米颗粒采用透射电镜、扫描电镜、载药量和体外释放度等进行表征。在细胞试验后发现,CUR-CD-CS 纳米粒子表现出优异的体外释放性能和较高的细胞毒性,细胞凋亡死亡率接近 100%。这就表明环糊精不仅提高了姜黄素的溶解度,而且还提高了细胞的吸收率。这一研究结果给后续研究者提供了新的思路,也就是说设计出合理可生物降解的天然生物材料作为下一代疏水性药物姜黄素输送的纳米载体具有巨大潜力。

4 姜黄素的创新应用

随着姜黄市场的增长,各大品牌商也在加紧市场的布局,推出越来越多样化的产品,远超出了标准胶囊补充剂的范畴,以满足消费者的不同层次需求。目前国内外已开发出多款水溶性和油溶性姜黄色素产品,通过复配生产出多种色调的姜黄素,已广泛应用于面食、饮料、果酒、糖果、糕点、罐头、果汁及烹饪菜肴^[9,49],作为复合调味品应用于鸡精复合调味料、膨化调味料、方便面及面膨化制品、方便食品调味料、火锅调味酱、膏状香精香料、调味酱菜、牛肉干制品等。

张保军等^[50]将姜黄素添加在方便面中,不仅可以发挥姜黄素的生理功能,对人体有益,而且添加了姜黄素的方便面饼色泽自然鲜亮,能够增强人们的食欲,更重要的是姜黄素在天然色素中价格是最低廉

的,因此能够进一步压缩成本,提高市场竞争力,具有广阔的推广前景。英国某乳制品公司在2019年推出了一种不含乳糖、芒果和姜黄口味的希腊式酸奶^[51]。

由于姜黄具有显著的抗炎功效,因此长期以来是酮类减肥者自制食谱中的主要原料。目前,各大品牌都推出了添加了姜黄的生酮汤。2019年3月,市场上出现一款全新的骨汤:主要成分是柠檬、姜黄和MCT油骨汤(草饲黄油和椰子油)。同时姜黄已经渗透到日益增长的饮料市场。2018年8月,国外某饮料公司创新性地推出一款芒果荔枝汁,该果汁含有200 mg姜黄素。同时该产品还含有胡椒碱,以提高姜黄素的生物利用度。姜黄素产品正在增长和多样化^[52]。预期,随着科研和技术开发的不断深入,姜黄素产品将具有广阔的发展前景。

5 结语

姜黄素是一种多酚类天然化合物,其生物活性成分已被证明具有广泛的功能。除了用作食品添加剂(如着色剂和抗氧化剂),它还用于治疗多种疾病。近年来,利用乳液包埋、保护和载运脂溶性功能成分(如油溶性风味物质、维生素、防腐剂、营养成分以及药物)在食品、饮料和制药行业引起了越来越多的关注。随着纳米技术的发展,姜黄素纳米级颗粒的研究逐渐深入,并且通过不同材料的包埋使姜黄素粒径更小更均匀,稳定性更高,不断优化其性能。此外,为了降低生产成本,设计出更加经济的方法来制造纳米级姜黄素颗粒是工业化生产所必须面对的问题。另外,为了使姜黄素应用于预防和治疗各种疾病的纳米级药物和食品中的纳米级添加剂中,仍然迫切需要研究和评价姜黄素应用的毒理学安全性。

参考文献:

- [1] 狄建彬,顾振纶,赵笑东,等.姜黄素的抗氧化和抗炎作用研究进展[J].中草药,2010,41(5): 854-857
- [2] 余美荣,蒋福升,丁志山.姜黄素的研究进展[J].中草药,2009,40(5): 828-831
- [3] 中华人民共和国国家和计划生育委员会.食品安全国家标准 食品添加剂 姜黄素:GB 1886.76-2015[S].北京:中国标准出版社.2015
- [4] Ganjali S, Blesso C N, Banach M, et al. Effects of curcumin on HDL functionality[J]. Pharmacological Research, 2017, 119: 208-218
- [5] Fadus M C, Lau C, Bikhchandani J, et al. Curcumin: An age-old anti-inflammatory and anti-neoplastic agent[J]. Journal of traditional and complementary medicine, 2017, 7(3): 339-346
- [6] Lima C F, Pereira-Wilson C, Rattan S I S. Curcumin induces heme oxygenase-1 in normal human skin fibroblasts through redox signaling: Relevance for anti-aging intervention[J]. Molecular nutrition & food research, 2011, 55(3): 430-442
- [7] Goel A, Kunnumakkara A B, Aggarwal B B. Curcumin as "Curcumin": from kitchen to clinic[J]. Biochemical pharmacology, 2008, 75(4): 787-809
- [8] 周明,李泽阳,王欢.姜黄素的理化性质、提取技术与营养保健作用[J].饲料与畜牧,2013(6): 5-7
- [9] 袁鹏,陈莹,肖发,等.姜黄素的生物活性及在食品中的应用[J].食品工业科技,2012,33(14): 371-375
- [10] 齐莉莉,王进波.单体姜黄素稳定性的研究[J].食品工业科技, 2007(1): 181-182
- [11] 樊书旗,张保军,李春林.天然姜黄素及其在果蔬饮料中的应用[J].中国食品添加剂,2002(5): 57-59,78
- [12] 韩婷,宓鹤鸣.姜黄的化学成分及药理活性研究进展[J].解放军药学报,2001(2): 95-97
- [13] Abrahams S, Haylett W L, Johnson G, et al. Antioxidant Effects of Curcumin in Models of Neurodegeneration, Ageing, Oxidative and NITROSATIVE Stress: A Review[J]. Neuroscience, 2019(406): 1-21
- [14] AAravind S R, Krishnan L K. Curcumin-albumin conjugates as an effective anti-cancer agent with immunomodulatory properties [J]. International immunopharmacology, 2016, 34: 78-85
- [15] Rabinovich L, Kazlouskaya V. Herbal sun protection agents: Human studies[J]. Clinics in dermatology, 2018, 36(3): 369-375
- [16] Grumezescu A. Surface Chemistry of Nanobiomaterials[M]. Amsterdam:Elsevier, 2016: 359-392
- [17] Rodrigues F C, Anilkumar N V, Thakur G. Developments in the Anticancer Activity of Structurally Modified Curcumin: An Up-to-Date Review[J]. European journal of medicinal chemistry, 2019,177: 76-104
- [18] Lopresti A L, Maes M, Maker G L, et al. Curcumin for the treatment of major depression: a randomised, double-blind, placebo controlled study[J]. Journal of affective disorders, 2014, 167: 368-375
- [19] Lopresti A L, Drummond P D. Efficacy of curcumin, and a saffron/curcumin combination for the treatment of major depression: A randomised, double-blind, placebo-controlled study[J]. Journal of affective disorders, 2017, 207: 188-196
- [20] 许朵霞,曹雁平,韩富.食品乳状液稳定性检测方法研究进展[J].食品工业科技,2014,35(21): 365-370
- [21] Berton-Carabin C, Schroën K. Towards new food emulsions: Designing the interface and beyond[J]. Current Opinion in Food Science, 2019(27): 74-81
- [22] 焦学瞬.天然食品乳化剂和乳状液:组成、性质、制备、加工与应用[M].北京:科学出版社,1999: 66-69
- [23] G Mason, J N Wilking, K Meleson, et al. Nanoemulsions: Formation, structure, and physical properties[J]. Journal of Physics Condensed Matter, 2006, 18(41): 635
- [24] Tados T, Izquierdo P, Esquena J, et al. Formation and stability of nano-emulsions[J]. Advances in colloid and interface science, 2004, 108: 303-318

- [25] 赵国玺. 表面活性剂物理化学[M]. 北京:北京大学出版社, 1984: 102-104
- [26] 肖进新. 表面活性剂应用原理[M]. 北京:化学工业出版社, 2015: 90-93
- [27] Eva Blomberg, Evgeni Poptoshev, Per Claesson. Surface Forces and Emulsion Stability[M]// Johan Sjöglom. Encyclopedic Handbook of Emulsion Technology. New York:Marcel Dekker, Inc,2001: 33-34
- [28] McClements D J. Food emulsions: principles, practices, and techniques[M]. Melbourne:CRC press, 2015: 34-38
- [29] 杨雷,仇丹,王佐杨,等.食品级水包油型乳液的研究进展[J].宁波工程学院学报,2013,25(1): 43-48
- [30] Solans C, Solé I. Nano-emulsions: formation by low-energy methods[J]. Current opinion in colloid & interface science, 2012, 17(5): 246-254
- [31] Gheisari S M M M, Gavagsaz-Ghoachani R, Malaki M, et al. Ultrasonic nano-emulsification-A review[J]. Ultrasonics sonochemistry, 2018,52: 88-105
- [32] Piorkowski D T, McClements D J. Beverage emulsions: Recent developments in formulation, production, and applications [J]. Food Hydrocolloids, 2014, 42: 5-41
- [33] Chen C C, Wagner G. Vitamin E nanoparticle for beverage applications[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2004, 82(11): 1432-1437
- [34] 章文晋, 文雁君, 李林正, 等. 一种姜黄素制剂的制备方法: CN102283373A[P].2011-12-21
- [35] 毛立科,许洪高,高彦祥.高压均质技术与食品乳液[J].食品与机械,2007(5): 146-149
- [36] 曾庆哈,马培华,邵克东,等.油相浓度对姜黄素纳米乳液稳定性的影响[J].食品工业科技,2017,38(22): 17-21
- [37] 姚艳玉,马培华,曾庆哈,等.油相种类对姜黄素纳米乳液稳定性的影响[J].食品科技,2017,42(9): 238-242
- [38] 伍敏晖,王磊,何梅.高压微射流均质对姜黄素纳米乳液稳定性的影响[J].中国食品学报,2018,18(5): 51-57
- [39] Kharat M, Zhang C, McClements D J. Stability of curcumin in oil-in-water emulsions: Impact of emulsifier type and concentration on chemical degradation[J]. Food research international, 2018, 111: 178-186
- [40] 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, 13(4): 368-374
- [41] 曹新志,金征宇.环糊精包合物的制备方法[J].食品工业科技, 2003(10): 158-160
- [42] Purpura M, Lowery R P, Wilson J M, et al. Analysis of different innovative formulations of curcumin for improved relative oral bioavailability in human subjects[J]. European journal of nutrition, 2018, 57(3): 929-938
- [43] 李艺,梅虎,赵春景,等.姜黄素环糊精分子包合物的构建和优化[J].食品与生物技术学报,2017,36(11): 1197-1202
- [44] 罗见春,郭琦,张敏,等.单向灌注法研究姜黄素羟丙基- β -环糊精包合物的大鼠在体肠吸收[J].中国组织工程研究, 2019, 23(6): 957-962
- [45] Bounaceur A, Rodier E, Fages J. Maturation of a ketoprofen/ β -cyclodextrin mixture with supercritical carbon dioxide[J]. The Journal of supercritical fluids, 2007, 41(3): 429-439
- [46] 张志云,张维,王立红,等.采用超临界 CO_2 制备姜黄素羟丙基- β -环糊精包合物[J].中国医药工业杂志,2014,45(12): 1147-1150
- [47] Mangolim C S, Moriaki C, Nogueira A C, et al. Curcumin - β -cyclodextrin inclusion complex: stability, solubility, characterisation by FT-IR, FT-Raman, X-ray diffraction and photoacoustic spectroscopy, and food application[J]. Food chemistry, 2014, 153: 361-370
- [48] Popat A, Karmakar S, Jambhrunkar S, et al. Curcumin-cyclodextrin encapsulated chitosan nanoconjugates with enhanced solubility and cell cytotoxicity[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2014, 117: 520-527
- [49] 牛生洋,郝峰鸽,许秋亚.姜黄素的提取及应用研究进展[J].河南科技学院学报(自然科学版),2008,36(4): 58-61
- [50] 张保军,张卫.姜黄素的生理功能及其在方便食品中的应用[J].中国食品添加剂,2001(4): 37-38,26
- [51] Convenience Store website.Tims Dairy launches London-themed yogurts[EB/OL].[2019-3-22].<https://www.kurokin.uk/work/tims-dairy>
- [52] Zyn website.Zyn voted product of the year 2019 [EB/OL].[2019-2-9].<https://www.24-7pressrelease.com/press-release/460390/zyn-voted-product-of-the-year-2019>

收稿日期:2019-07-18