

酚类物质运载体系研究进展

王 珺, 杨 颖, 刘红芝, 石爱民, 刘 丽, 胡 晖, 王 强*

(中国农业科学院农产品加工研究所, 农业部农产品加工综合性重点实验室, 北京 100193)

摘要: 酚类化合物是一类广泛存在于植物体内且含有多个酚羟基的次生代谢产物, 具有抗氧化、清除自由基、降血脂等多种生理活性。然而酚类物质存在难溶于水、见光易分解等问题, 限制了其在食品行业的广泛应用。运载体系是一项常用的保护生物活性组分的技术, 选择合适的运载体系对酚类物质进行包载, 能够降低生物活性组分的降解速率, 提高其在人体中的生物利用率。本文对现已存在的各类酚类物质运载体系及其制备方法进行综述, 并对目前酚类物质运载体系研究中存在的问题和将来研究的重点进行总结和展望。

关键词: 酚类物质; 包埋; 运载体系; 生物利用率

Progress in Research on Phenolic Compound Delivery System

WANG Jun, YANG Ying, LIU Hongzhi, SHI Aimin, LIU Li, HU Hui, WANG Qiang*

(Key Laboratory of Agro-Products Processing, Ministry of Agriculture, Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract: Phenolic compounds are a group of secondary metabolites ubiquitously found in plants that contain multiple phenolic hydroxyl groups. Phenolic compounds have been proved to have a variety of biological activities. However, since phenolic compounds are insoluble in water and susceptible to photodegradation, their applications in the food industry are greatly limited. The delivery system is a technology commonly used for protecting bioactives and choosing the appropriate delivery systems can effectively reduce the degradation rate of phenolic compounds and improve their bioavailability. This article reviews current delivery systems to encapsulate phenolic compounds and their preparation methods. Problems existing in this field of research are discussed. Lastly, we conclude with some perspectives on future research priorities.

Key words: phenolic compounds; encapsulation; delivery systems; bioavailability

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201715043

中图分类号: TS201.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2017) 15-0271-06

引文格式:

王珺, 杨颖, 刘红芝, 等. 酚类物质运载体系研究进展[J]. 食品科学, 2017, 38(15): 271-276. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201715043. <http://www.spkx.net.cn>

WANG Jun, YANG Ying, LIU Hongzhi, et al. Progress in research on phenolic compound delivery system[J]. Food Science, 2017, 38(15): 271-276. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-201715043. <http://www.spkx.net.cn>

酚类物质是一类广泛存在于植物体内的次级代谢产物, 主要来源于植物体内的莽草酸途径和苯丙氨酸代谢途径, 蔬菜、水果、谷物中含量丰富, 是人们从饮食中获取的数量最多的抗氧化物质。天然酚类化合物在植物体内的存在形式极其复杂, 有的可以与单糖或多糖结合成苷, 还有的以甲酯或酯等衍生物的形式存在。整个植物界中, 目前所知道的酚类化合物的结构超过8 000种^[1], 主要包括肉桂酸类、黄酮类、异黄酮类、黄酮醇类、黄酮醇类、花青素类、缩合单宁等, 如表1所示。酚类物

质的保健作用一直受到人们的广泛关注, 是天然产物研究的热点之一。

酚类物质具有多种生理活性, 花青素、黄酮醇和黄烷-3-醇等酚类物质可以清除活性氧自由基, 起到抗氧化的作用^[9]。柚皮素和根皮苷对伤寒沙门氏菌黏着效果有较强的抑制作用, 而芦丁和根皮苷能够增强益生菌鼠李糖乳酸杆菌GG (*Lactobacillus rhamnosus* GG, LGG) 的活性^[10]。摄入富含多酚的食物可以通过NO-cGMP通路及抑制血管紧张素转换酶 (angiotensin converting enzyme,

收稿日期: 2016-06-29

基金项目: “十三五”国家重点研发计划重点专项 (2016YFD0400205);

中国农业科学院科技创新工程项目 (CAAS-ASTIP-201X-IAPPST)

作者简介: 王珺 (1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为粮油加工与副产物综合利用。E-mail: 18201135265@163.com

*通信作者: 王强 (1965—), 男, 研究员, 博士, 研究方向为粮油加工与副产物综合利用。E-mail: wangqiang06@caas.cn

表 1 常见多酚分子结构、生物活性及其常用运载体系

Table 1 Molecular structures and bioactivities of main phenolic compounds and their common delivery systems

常见多酚化合物种类	代表物质	分子式	结构式	主要来源	物理性质	生物活性	常用的运载体系	参考文献
肉桂酸类	阿魏酸	C ₁₀ H ₁₀ O ₄		水果、燕麦	对氧和pH值敏感，大部分对光敏感、溶于水	具有抗肿瘤、抗氧化、抑制肿瘤血管形成、诱导肿瘤细胞凋亡等多种功能	脂质体、乳液、纳米颗粒、壳聚糖微球	Harwansh等 ^[2]
黄酮类	芹菜素	C ₁₅ H ₁₀ O ₅		芹菜	易氧化、对pH值敏感、苷配基微溶性，但苷类溶于水，是一种天然色素	具有抑制致癌物质的致癌活性、作为治疗HIV和其他病毒感染的抗病毒药物、MAP激酶的抑制剂、治疗各种炎症、抗氧化剂、镇静、安神、降压等多种功能	—	Lu Wei等 ^[3]
异黄酮类	没食子酸	C ₇ H ₆ O ₅		茶、草莓	对温度、氧、pH值和光敏感、易溶于水	具有抗癌、抗心血管疾病、抗骨质疏松、抗菌消炎、抗溶血、抗机体功能衰老等多种功能	—	李斌 ^[4]
黄烷酮类	橙皮素	C ₁₆ H ₁₄ O ₆		橙皮	对光和pH值敏感、易氧化、苷配基不溶性，但苷类溶于水	具有抗氧化、抗炎、降血脂、抗肿瘤等多种功能	脂质体、乳液、纳米颗粒	Tsai等 ^[5]
黄酮醇类	槲皮素	C ₁₅ H ₁₀ O ₇		针叶樱桃、茶叶	易氧化、对光和pH值敏感、苦涩味、大豆味、不溶于水	具有降血压、降血脂、增加毛细血管抵抗力、减少毛细血管脆性等多种功能	乳液、脂质体、微球、壳聚糖微球	Park等 ^[6]
花青素类	花青素	C ₁₅ H ₁₁ O ₆		葡萄皮、蓝莓、草莓	对温度、氧、pH值和光敏感、溶于水，是一种天然色素	具有抗氧化、保护视力、预防心血管疾病、抗衰老等多种功能	脂质体、乳液、纳米颗粒	Niu Wenhui等 ^[7]
缩合单宁	原花青素	C ₃₀ H ₂₆ O ₁₂		葡萄籽、浆果	对高温和氧敏感、苦涩味、溶于水	具有改善血液循环、治疗糖尿病性视网膜病、减缓心血管发炎、抗氧化等多种功能	乳液、脂质体	邹立强 ^[8]

注：—文献未报道。

ACE)的产生而促进血管舒张,保护和改善内皮功能,从而显著降低患高血压和心血管疾病的风险^[11]。此外,酚类物质还可以调节不同酶的复制、转录和翻译过程,参与多个通路转导信号,从而抑制肿瘤细胞的增殖,对人类健康有促进作用。

然而,酚类物质的有效性取决于其中活性结构的稳定性和生物利用率。大多数酚类物质难溶于水、可溶于有机溶剂,对光和热敏感,易发生降解,口感较差,体内代谢快,胃肠道稳定性差,口服生物利用率低,这些因素限制了其在食品行业的应用。因此,通过构建运载体系对酚类物质进行包埋,不仅可以增加酚类物质进入外相的阻力,抑制光线、氧气等物质进入内相,降低酚类物质在加工和贮藏运输过程的降解速率,还可以控制酚类物质在体内的定点释放,提高其生物利用率。此外,利用同一运载体系同时运载酚类物质及其他营养成分,组分间能够起到相互辅助增强的作用。本文对几种常用的酚类物质运载体系的结构与性质、制备方法及其应用做了全面的综述,旨在根据酚类物质的结构特性选择不同的运载体系提供理论依据,为实现基本化营养奠定基础,从而推动全民营养健康的实现。

1 酚类物质运载体系制备方法

通常制备运载体系的方法可以归为两种,一种是低能乳化法,另一种是高能乳化法。以下对已有的制备运载体系常用的一些方法进行总结,如表2所示。

表 2 制备乳液常用的一些方法

Table 2 Commonly used methods for preparing emulsions

类别	方法	参考文献
低能乳化法	相转变温度法	Klassen等 ^[12]
	有机溶剂蒸发法	许朵霞等 ^[13]
	乳液转变点法	买尔哈巴·塔西帕拉提等 ^[14]
	微乳液稀释法	潘红 ^[15]
	自乳化法	Komaiko等 ^[16]
高能乳化法	超声乳化法	Chen Hong等 ^[17]
	定转子乳化法	许朵霞等 ^[18]
	微通道乳化法	Zhang Yanru等 ^[19]
	膜乳化法	Eisinaite等 ^[20]
	高压均质乳化法	Lu Wei等 ^[3]
	高压微射流乳化法	买尔哈巴·塔西帕拉提等 ^[14]

1.1 低能乳化法

低能乳化法主要是基于乳化作用过程中曲率和相转变的原理,通过一个简单的混合过程或改变系统条

件(如温度、成分)自发地形成乳液。常用的有自乳化法、相转变法等。

自乳化法是将有机相(油相和表面活性剂)加入水相中,在一定环境温度及温和搅拌的情况下自发形成水包油乳剂的方法。利用自乳化法制备乳液的过程中需要考虑的因素主要有油相和水相的组成、油相和水相的比例、表面活性剂的种类、环境条件(pH值、温度、离子强度)、操作条件(搅拌速率、添加顺序)等。Davidov-Pardo等^[21]以吐温-80作为表面活性剂,以溶解有白藜芦醇的葡萄籽油和橘皮油混合油作为油相,将油相和表面活性剂混合均匀后加入到水相中,用磁力搅拌器轻微搅拌10 min后得到含有白藜芦醇的乳液。同时对白藜芦醇运载乳液和白藜芦醇二甲基亚砷溶液进行紫外光照处理后发现乳液中白藜芦醇的保留率是80%,远大于在二甲基亚砷溶液中的保留率50%,显示乳液对白藜芦醇很好的保护作用,减少了其在紫外光照下的降解率。

相转变温度法是利用不同温度条件下某些非离子型表面活性剂亲水性和疏水性转变的特性来制备乳液。在水-油-非离子表面活性剂三元体系中,表面活性剂的自发曲率是温度的函数。对于某一特定的非离子表面活性剂-油-水体系,存在着一个较窄的温度范围。在该温度条件下,非离子表面活性剂的亲水性基团高度水合,从而易溶于水相中;当温度升高时,亲水性基团逐渐脱水,使得非离子表面活性剂的水溶性降低。随着温度继续升高,表面活性剂更易溶于油相而非水相,体系由油包水(O/W)型乳液转变为水包油(W/O)型乳液,发生转相。Dario等^[22]用辛酸/癸酸甘油三酯为油相、十六烷基三甲基氯化铵为表面活性剂,利用相转变温度法制备了运载槲皮素的纳米乳液,首先将油相、水相和表面活性剂混合物加热到80.0℃,随后立即冷却直到温度降到(25.0±2.0)℃,整个过程一直保持低速搅拌。在乳液制备的过程中,体系的浊度随着温度的降低先上升后下降之后保持稳定。当温度在80.0℃时,乳液液滴粒径较小,体系浊度较低,状态比较稳定;温度下降到55.0℃时,乳液液滴粒径较大,体系浊度最大,状态非常不稳定;随着温度继续下降,乳液浊度也开始下降,随后基本保持不变。整个过程中,乳液由W/O体系逐渐转变成O/W体系。

低能乳化法的优点是在制备过程中通常需要用磁力搅拌器对乳液进行轻微搅拌,不需要高压均质、超声等比较剧烈的操作,因此耗能少,但是低能乳化法也存在一些不足,如利用低能乳化法通常需要添加大量的乳化剂,且对乳化剂的要求比较高,通常O/W型乳液使用的乳化剂亲水亲油平衡值偏大、W/O型乳液使用的乳化剂亲水亲油平衡值偏小才会有较好的乳化效果。由于乳化剂存在食用安全性的问题,导致可选乳化剂的范围很

窄,目前自乳化的方法仅在实验室研究阶段,并不适合大规模的工业化生产。

1.2 高能乳化法

高能乳化法的基本原理是用输入高能量的机械装置破坏结合的油相和水相,从而形成小的液滴。常用的方法有高压微射流乳化法、高压均质乳化法、超声乳化法等。

高压均质法是利用高压均质设备产生的高强度破坏力将较大的液滴打破成较小的液滴而形成的乳液。Donsi等^[23]以花生油作为油相,以大豆卵磷脂、糖酯等作为乳化剂采用高压均质法制备运载白藜芦醇的O/W乳液。同时对白藜芦醇运载乳液和白藜芦醇乙醇溶液光照处理2 h后发现乙醇溶液中的白藜芦醇大多由反式结构转变为顺式结构,而包埋于乳液中的白藜芦醇可以有效地保持其反式结构。文献报道白藜芦醇反式异构体的生理活性高于顺式异构体,乳液体系的存在可以减少白藜芦醇在光照条件下的降解速率,使白藜芦醇可以保持在具有较高生理活性的反式结构^[24]。

高压微射流法是利用高压泵使乳液穿过不同的狭窄通道后在汇合处发生强烈的撞击而形成的乳液。Ahmed等^[25]用不同链长的脂肪酸酯为油相,以 β -乳球蛋白为乳化剂构建姜黄素纳米乳液,发现以长链甘油三酯(long-chain triglycerides, LCT)、中链甘油三酯(medium-chain triglycerides, MCT)、短链甘油三酯(short-chain triglycerides, SCT)为油相制备的姜黄素纳米乳液其粒径分别是(181±9)、(174±2)、(1 981±1 061) nm,在室温条件下放置4 h后没有出现分层现象。

使用高能乳化法的优点是制备的乳液粒径更小更加稳定,且不需要添加大量的表面活性剂,安全性好。但是,高能乳化法也存在一定的缺陷,如高能法制备纳米乳液所需设备较为昂贵、耗能较多、生产成本过高等。

2 不同结构的酚类物质运载体系

根据目前已有文献发现,酚类物质运载体系主要包括:传统状乳液、纳米乳液、多重乳液、脂质体、纳米颗粒等。本文主要针对常用的运载体系进行介绍。

2.1 传统乳液

通常来说,乳液包含油、水两相,一相以液滴的形式分散在另一相中,分散的一相称为外相或连续相,被分散的一相称为内相或分散相。乳液粒径大小与油相组成、浓度及表面活性剂浓度等因素有关。

Ru Qiaomei等^[26]利用 ι -卡拉胶和 β -乳球蛋白通过高压均质法制备包埋表没食子儿茶素没食子酸酯(epigallocatechin gallate, EGCG)的O/W乳液,通过对比游离EGCG和EGCG乳液体系的体外抗癌活性,发现游离的EGCG质量浓度在50 μ g/mL才能抑制癌细胞的增殖,

而乳液中的EGCG质量浓度在25 $\mu\text{g/mL}$ 时就可以抑制癌细胞的增殖。这一结果表明乳液运载体系可显著提高EGCG的生物利用率。EGCG在碱性环境下很容易因氧化而发生降解,与游离EGCG相比,乳液运载体系可以控制EGCG的释放,且在碱性环境下乳液运载体系中的EGCG也有较好的稳定性和渗透性。

传统乳液的优点是制备过程中乳化剂使用量较少,可以应用一些大分子的纯天然乳化剂(蛋白质、多糖等)替代人工合成乳化剂。并且传统乳液光散射效应强,可以应用于果粒橙等浊度较高的饮料产品中。然而传统乳液仍然存在一定的缺点,如传统乳液属于热力学不稳定体系,因此在贮藏过程中常出现絮凝、聚结及奥氏熟化等问题,影响了食品品质。

2.2 纳米乳液

纳米乳液乳化的基本原理与传统乳液相似,区别在于粒径更小(50~200 nm),在整个制备过程中需要外加能量将大液滴破碎成小液滴。纳米乳液制备过程中发生的变化有:大液滴的破碎分裂、液滴之间的碰撞、表面活性剂的吸附。

Mariarenata等^[27]以花生油为油相、吐温20为表面活性剂,加入亲脂性的大豆卵磷脂和亲水性的糖酯制备了不同粒径大小的白藜芦醇运载乳液,通过对比不同粒径大小的白藜芦醇运载乳液,发现白藜芦醇纳米运载乳液比白藜芦醇微米运载乳液更易通过细胞膜被人体吸收利用。因此,可以制备纳米级乳液运载体系运载白藜芦醇,以提高白藜芦醇的生物利用率。Sari等^[28]以MCT-60为油相,以吐温-80为表面活性剂,加入乳清分离蛋白,构建了姜黄素纳米运载乳液,通过体外模拟消化环境研究姜黄素纳米乳液体外释药的特性,结果显示胃蛋白酶不能引起纳米乳液中姜黄素的释放,而胰蛋白酶可以促进纳米乳液中姜黄素的释放。这样可以减少白藜芦醇在胃中的降解,提高白藜芦醇的生物利用率。

纳米乳液的优点是粒径小、分散均匀,具有较高的动力学稳定性,能够在长时间内不发生明显的絮凝和聚结,可以应用于制作维他命水等澄清透明的饮料。但是纳米乳液也存在一定缺陷,如在制备过程中纳米乳液经过了高压均质、高压微射流等操作,体系中的敏感化合物结构易发生变化,进而导致其生物活性功能下降。

2.3 多重乳液

多重乳液又称为“乳液中的乳液”,即是一种乳液的分散相液滴中又包含另外一种更小的液滴,根据被包埋物质的亲水亲油性,主要包括W/O/W和O/W/O两种类型,若被包埋物质是亲水的,一般选择W/O/W型乳液(图1);反之,若被包埋物质是亲油性的,则一般使用O/W/O型乳液。

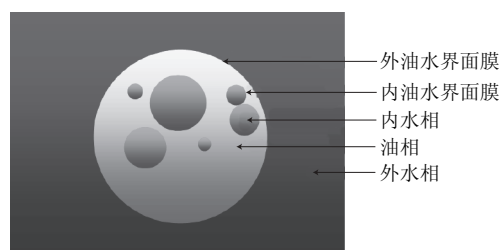


图1 W/O/W型乳液结构

Fig. 1 W/O/W emulsion structure

Hemar等^[29]以菜籽油为油相、以聚甘油聚蓖麻酸酯为表面活性剂,加入乳化剂乳清蛋白,构建了运载白藜芦醇的W/O/W型乳液,将此乳液贮存于23 $^{\circ}\text{C}$ 条件下2周后发现乳液液滴粒径大小基本不变,释放的白藜芦醇不到运载白藜芦醇总量的10%,显示该体系良好的稳定性,在食品应用方面有很大的潜力;Frank等^[30]以菜籽油为油相、以聚甘油聚蓖麻酸酯为表面活性剂,构建了运载花青素的W/O/W型乳液,发现花青素可稳定存在于多层乳液中,并且可以在胃肠环境条件下实现缓慢释放,使得在光、热、酸性等条件下比较敏感的花青素可以保持其活性,将该研究应用于食品工业可以减少在食品加工过程中花青素的损失,并且可以使产品色泽保持稳定;Aditya等^[31]以大豆油、橄榄油等作为油相,以聚甘油聚蓖麻酸酯为表面活性剂,构建了运载儿茶素的W/O/W型乳液,在23 $^{\circ}\text{C}$ 和4 $^{\circ}\text{C}$ 贮存15 d后,发现相比于游离的儿茶素,其稳定性分别增加20%和40%。儿茶素属于茶多酚的一种,具有很强的抗氧化能力,在食品工业上具有广阔的应用前景,然而茶多酚在光、热等条件下易发生降解的特性限制了其在食品行业的发展,可以利用多层乳液包埋儿茶素,增大对儿茶素的保护,使其更好地应用于食品行业。

多重乳液的优点是具有双油-水界面膜,与单层乳液相比可以延长被乳化组分的释放时间,对酚类物质具有更好的保护效果,可以应用于饮料工业。但是多重乳液也存在一些不足,如制备工艺比较复杂、体系的稳定性较差。因此,需加强对多重乳液的研究,构建更稳定的多重乳液体系。

2.4 脂质体

脂质体是由磷脂和胆固醇组成的一种双分子层结构的药物载体,这种微粒具有类细胞结构,属于靶向给药体系的一种新剂型。目前已有文献报道,酚类物质脂质体的制备工艺主要包括被动载药法(注入法、反相蒸发法、薄膜分散法、超声分散法、复乳法、冷冻干燥法、冻融法、超临界法等)和主动载药法(pH值梯度法、硫酸铵梯度法、醋酸钙梯度法等)^[32-37]。

Kristl等^[38]用磷酸鲸蜡脂、大豆卵磷脂和胆固醇为原料,采用超声法制备了白藜芦醇纳米脂质体。发现用超声法制备白藜芦醇纳米脂质体工艺操作简单,且粒径分布范围窄,体系比较稳定。但是超声法所需的能量较

大,且超声时间过长会导致脂质体的结构破坏。赵吴君等^[39]以白藜芦醇、鲸蜡硬脂醇聚醚-25、单硬脂酸甘油酯、辛酸/癸酸甘油三酯为原料,用高压均质法制备了白藜芦醇纳米脂质体,将其与白藜芦醇纳米乳、白藜芦醇固体脂质纳米粒进行比较,发现白藜芦醇纳米脂质体的包封率最高,稳定性最佳。

脂质体作为酚类物质的运载体系具有许多优点,它不仅可以将酚类物质包埋在微粒中,解决酚类物质难溶于水的问题,还能与细胞膜融合,提高酚类物质的生物利用率。目前,脂质体主要作为营养新剂型和微型酶反应器应用于营养品和乳品行业中,起到保护敏感成分、改良风味和其他特性改良的作用。然而目前该体系还存在一定的问题,如脂质体在贮存过程中的不稳定性容易导致沉淀,使得其在食品工业的应用有所限制。

2.5 纳米颗粒

固体脂质纳米颗粒是在室温条件下由脂质形成的胶体载体,可运载酚类等难溶于水、见光易分解的化合物,还可以控制酚类物质在胃肠道中的靶向释放,起到保护酚类物质的作用。

EGCG是绿茶中最有效的抗氧化多酚,具有多种生理活性,但是EGCG的稳定性较差,易发生降解。Shpigelman等^[40]用热处理的 β -乳球蛋白通过自组装技术制备了运载EGCG的纳米颗粒,通过与游离EGCG对比,发现包埋在纳米颗粒中的EGCG在体内的降解率下降了33倍,证明了纳米颗粒对EGCG具有良好的保护作用。

纳米颗粒的优点是粒径小,且外部有壁材的保护,使其渗透性和保留时间延长,可以有效地提高被包埋物质的体内生物利用率。目前纳米颗粒在食品行业中的应用比较少见,主要是应用于医药行业。纳米颗粒粒径较小,易穿过人体的生物屏障,若不能及时利用可能会在体内蓄积而导致相应的生物安全性问题。

3 存在的问题

基于以上酚类物质运载体系的特性,针对食品加工的具体要求,选用适宜的运载体系,可以有效提升酚类物质的稳定性、体内生物利用率并实现酚类物质的靶向释放、转运,但目前研究中仍存在以下问题:

目前食品领域酚类物质运载体系仍不能实现酚类物质在体内的靶向释放和转运,使得酚类物质不能在特定的位点进行释放和靶向吸收,导致酚类物质的体内生物利用率一直保持在较低水平。

对不同结构酚类物质运载体系的选择现在仍处于半经验状态,无法实现针对特定结构、特性的酚类物质,结合所应用的食物体系快速筛选相应的合适运载体系对其进行包载的理性化选择。

部分酚类物质具有双亲性,若贮藏过程中温度、湿度、光照等条件发生变化,酚类物质很容易发生结晶析出现象,导致食品体系中酚类物质的稳定性及含量下降,进而影响食品品质。

低能乳化法制备的酚类物质运载体系虽能有效提升酚类物质的体内生物利用率,但是制备过程需大量表面活性剂,因食品安全原因,乳化剂可选范围较窄,限制了低能乳化法的应用。

4 结语

针对目前酚类物质运载体系中存在的问题,今后的研究重点应侧重于以下几方面:1)结合纳米包埋技术和多重乳液制备技术,有效地实现酚类物质消化道内的靶向释放及体内靶向组织的定点释放,提高酚类物质的生物利用率;2)进一步深入对不同类型酚类物质的分子结构、理化特性和不同结构类型酚类运载体系结构特性的研究,将两者结合,为实现酚类物质运载体系的理化特性选择提供理论依据;W/O/W型乳液具有双油-水界面膜,能够有效阻止酚类物质进入外相,故利用多重乳液运载酚类物质,可在一定程度上解决贮藏过程中酚类物质结晶析出的问题,延长食品的贮藏期;3)大力开发天然、低成本、安全、无毒的表面活性剂(蛋白、多糖)用于制备酚类物质运载体系,其构建的酚类物质运载体系能够用于生产更为安全、优质的产品。4)酚类物质运载体系在功能食品领域中的应用取得了一些进展,但是在缓释和控释技术方面才刚刚起步。随着人们对酚类物质运载体系研究和认识的不断增强,特别是新的壁材、新的制备技术和新的生产设备的不断开发,酚类物质运载体系及其控制释放的理论机制的相关研究必将推动医药和食品行业相关产业的发展。

参考文献:

- [1] 李宁. 超声辅助提取青莢叶多酚工艺及抗氧化活性的研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2014: 4.
- [2] HARWANSH R K, MUKHERJEE P K, BAHADUR S, et al. Enhanced permeability of ferulic acid loaded nanoemulsion based gel through skin against UVA mediated oxidative stress[J]. Life Sciences, 2015, 141: 202-211. DOI:10.1016/j.lfs.2015.10.001.
- [3] LU Wei, KELLY A L, MIAO Song. Emulsion-based encapsulation and delivery systems for polyphenols[J]. Trends in Food Science & Technology, 2016, 47: 1-9. DOI:10.1016/j.tifs.2015.10.015.
- [4] 李斌. 葡萄籽中原花青素的稳定性研究[J]. 食品研究与开发, 2007, 28(10): 71-73. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2007.10.022.
- [5] TSAI Y H, LEE K F, HUANG Y B, et al. *In vitro* permeation and *in vivo* whitening effect of topical hesperetin microemulsion delivery system[J]. International Journal of Pharmaceutics, 2010, 388(1): 257-262. DOI:10.1016/j.ijpharm.2009.12.051.

- [6] PARK S N, MIN H L, SU J K, et al. Preparation of quercetin and rutin-loaded ceramide liposomes and drug-releasing effect in liposome-in-hydrogel complex system[J]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2013, 435(3): 361-366. DOI:10.1016/j.bbrc.2013.04.093.
- [7] NIU Wenhui, FENG Suolan, ZHOU Xiyun, et al. Preparation of black rice bran anthocyanin liposomes by reverse-phase evaporation combining with pH gradient[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2015, 36(16): 238-242.
- [8] 邹立强. 多酚脂质体的物化稳定性及生理活性研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2015: 3-5.
- [9] BHULLAR K S, RUPASINGHE H P V. Antioxidant and cytoprotective properties of partridgeberry polyphenols[J]. *Food Chemistry*, 2015, 168: 595-605. DOI:10.1016/j.foodchem.2014.07.103.
- [10] 王雪飞, 张华. 多酚类物质生理功能的研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2012, 33(2): 211-214. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2012.02.062.
- [11] HÜGEL H M, JACKSON N, MAY B, et al. Polyphenol protection and treatment of hypertension[J]. *Phytomedicine*, 2016, 23(2): 220-231. DOI:10.1016/j.phymed.2015.12.012.
- [12] KLASSEN P L, GEORGE Z, WARWICK J, et al. PIT tuning effects of hydrophobic co-surfactants and drugs[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2014, 455: 1-10. DOI:10.1016/j.colsurfa.2014.04.024.
- [13] 许朵霞, 曹雁平, 齐雅萌, 等. 食品功能因子输送体系的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(11): 368-371.
- [14] 买尔哈巴·塔西帕拉提, 阙斐, 张辉. 可食用纳米乳液的研究进展[J]. *中国食品学报*, 2014, 14(1): 213-223.
- [15] 潘红. 低能法制备油包水纳米乳液及其性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2014: 10-34.
- [16] KOMAIKO J, MCCLEMENTS D J. Low-energy formation of edible nanoemulsions by spontaneous emulsification: factors influencing particle size[J]. *Journal of Food Engineering*, 2015, 146: 122-128. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2014.09.003.
- [17] CHEN Hong, WU Xinlei, WANG Dawei. Optimization of ultrasonic emulsification of phytosterol by response surface methodology and its emulsion stability[J]. *Food Science*, 2016, 37(6): 20-25. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2014.09.003.
- [18] 许朵霞, 侯占群. 食品乳状液及乳化新技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014: 38-39.
- [19] ZHANG Yanru, KOBAYASHI I, NEVES M A, et al. Effects of surface treatment and storage conditions of silicon microchannel emulsification plates on their surface hydrophilicity and preparation of soybean oil-in-water emulsion droplets[J]. *Journal of Food Engineering*, 2015, 167: 106-113. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2015.05.026.
- [20] EISINAITE V, JURAITE D, SCHROËN K, et al. Preparation of stable food-grade double emulsions with a hybrid premix membrane emulsification system[J]. *Food Chemistry*, 2016, 206: 59-66.
- [21] DAVIDOV-PARDO G, MCCLEMENTS D J. Nutraceutical delivery systems: Resveratrol encapsulation in grape seed oil nanoemulsions formed by spontaneous emulsification[J]. *Food Chemistry*, 2015, 167: 205-212. DOI:10.1016/j.foodchem.2014.06.082.
- [22] DARIO M F, SANTOS M S C S, VIANA A S, et al. A high loaded cationic nanoemulsion for quercetin delivery obtained by sub-PIT method[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2016, 489: 256-264. DOI:10.1016/j.colsurfa.2015.10.031.
- [23] DONSI F, SESSA M, MEDIOUNI H, et al. Encapsulation of bioactive compounds in nanoemulsion-based delivery systems[J]. *Procedia Food Science*, 2011, 1: 1666-1671. DOI:10.1016/j.profoo.2011.09.246.
- [24] ANISIMOVA N Y, KISELEVSKY M V, SOSNOV A V, et al. *Trans-, cis-, and dihydro-resveratrol: a comparative study*[J]. *Chemistry Central Journal*, 2011, 5(1): 20644-20660. DOI:10.1186/1752-153X-5-88.
- [25] AHMED K, LI Y, MCCLEMENTS D J, et al. Nanoemulsion- and emulsion-based delivery systems for curcumin: encapsulation and release properties[J]. *Food Chemistry*, 2012, 132(2): 799-807. DOI:10.1016/j.foodchem.2011.11.039.
- [26] RU Qiaomei, YU Hailong, HUANG Qingrong. Encapsulation of epigallocatechin-3-gallate (EGCG) using oil-in-water (O/W) submicrometer emulsions stabilized by *ι*-carrageenan and β -lactoglobulin[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(19): 10373-10381. DOI:10.1021/jf101798m.
- [27] MARIARENATA S, MARIA LUISA B, GIOVANNA F, et al. Bioavailability of encapsulated resveratrol into nanoemulsion-based delivery systems[J]. *Food Chemistry*, 2014, 147(6): 42-50. DOI:10.1016/j.foodchem.2013.09.088.
- [28] SARI T P, MANN B, KUMAR R, et al. Preparation and characterization of nanoemulsion encapsulating curcumin[J]. *Food Hydrocolloids*, 2015, 43: 540-546. DOI:10.1016/j.foodhyd.2014.07.011.
- [29] HEMAR Y, LI J C, OLIVER C M, et al. Encapsulation of resveratrol using water-in-oil-in-water double emulsions[J]. *Food Biophysics*, 2010, 5(2): 120-127. DOI:10.1007/s11483-010-9152-5.
- [30] FRANK K, WALZ E, GRÄF V, et al. Stability of anthocyanin-rich W/O/W-emulsions designed for intestinal release in gastrointestinal environment[J]. *Journal of Food Science*, 2012, 77(12): 50-57. DOI:10.1111/j.1750-3841.2012.02982.x.
- [31] ADITYA N P, ADITYA S, YANG H J, et al. Curcumin and catechin co-loaded water-in-oil-in-water emulsion and its beverage application[J]. *Journal of Functional Foods*, 2015, 15: 35-43. DOI:10.1016/j.jff.2015.03.013.
- [32] 高媛媛, 张维农. 脂质体的制备与检测方法研究进展[J]. *武汉工业学院学报*, 2010, 29(3): 44-52. DOI:10.3969/j.issn.1009-4881.2010.03.011.
- [33] 左勇亮, 肖人钟, 王蓉蓉. 主动靶向脂质体研究进展[J]. *中国现代应用药学*, 2013, 30(10): 1151-1156.
- [34] ABOLFAZL A, ROGAIE R S, SOODABEH D, et al. Liposome: classification, preparation, and applications[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2013, 8(1): 102. DOI:10.1186/1556-276X-8-102.
- [35] DUA J S, RANA A C, BHANDARI A K. Liposome: Methods of preparation and applications[J]. *International Journal of Pharmaceutical Studies and Research*, 2012, 3(2): 14-20.
- [36] PATIL Y P, JADHAV S. Novel methods for liposome preparation[J]. *Chemistry & Physics of Lipids*, 2014, 177(1): 8. DOI:10.1016/j.chemphyslip.2013.10.011.
- [37] 王琳. 脂质体制备方法的研究进展[J]. *西北药学杂志*, 2010, 25(5): 53-54. DOI:10.3969/j.issn.1004-2407.2010.05.042.
- [38] KRISTL J, TESKAČ K, CADDEO C, et al. Improvements of cellular stress response on resveratrol in liposomes[J]. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 2009, 73(2): 253-259. DOI:10.1016/j.ejpb.2009.06.006.
- [39] 赵吴君, 夏强. 白藜芦醇纳米载体的制备与表征[J]. *纳米科技*, 2012, 9(1): 38-41.
- [40] SHPIGELMAN A, ISRAELI G, LIVNEY Y D. Thermally-induced protein-polyphenol co-assemblies: beta lactoglobulin-based nanocomplexes as protective nanovehicles for EGCG[J]. *Food Hydrocolloids*, 2010, 24(8): 735-743. DOI:10.1016/j.foodhyd.2010.03.015.