

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2019.02.041

食品纳米乳液的研究进展

Research advance on food nano-emulsion delivery system

李季楠 吴艳 胡浩 吴雪娇

LI Ji-nan WU Yan HU Hao WU Xue-jiao

(上海交通大学农业与生物学院, 上海 200240)

(School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

摘要: 纳米乳液载体体系能够改善活性成分的稳定性、溶解性和生物利用度, 在食品领域受到广泛关注。文章主要对食品纳米乳液制备过程中芯材、油相和乳化剂的选择, 及其对乳液体系理化性质的影响, 以及制备方法、理化性质评价和应用前景等进行了综述。

关键词: 纳米乳液; 芯材; 乳化剂; 油相; 应用

Abstract: Nano-emulsion is a kind of delivery system for functional ingredients, which can enhance the stability, solubility, and bioavailability of bioactive compounds. Several macromolecules such as polysaccharides and proteins can be used as emulsifiers to prepare nano-emulsion with high safety, which have great application potential in food industry. In this paper, the selection of core materials, oil phases and emulsifiers, and their effects on the characteristics of nano-emulsion were summarized, and the preparation methods, physicochemical properties and application prospect of nano-emulsion were also discussed.

Keywords: nano-emulsion; core material; wall material; oil phase; application

食品中常见的功能活性成分一般稳定性、水溶性和生物利用度较差, 易受环境因素和胃肠道消化的影响, 在应用时面临着保持活性、增加稳定性、改善溶解性、提高分散性和生物利用度等问题。常用的解决方法是构建一种载体体系, 如微胶囊、水凝胶、乳液和脂质体等^[1], 减少外界因素的影响。将纳米技术应用于食品工业能够丰富产品种类, 改善感官性状和加工性能, 为食品领域的生产加工和新产品开发提供方向^[2], 在功能因子载体方面, 出现了纳米乳液、纳米凝胶、纳米微胶囊、纳米脂质体、纳米晶体、脂质纳米粒等方式^[3]。

纳米乳液多指平均粒径为 50~200 nm 的乳液体系, 部分文献定义平均粒径为 50~500 nm^{[4]181-182}, 一般由油相、水相和乳化剂组成, 某些情况下还需要加入助乳化剂、增稠剂和抗氧化剂等调节乳液的稳定性^[5]。食品工业常见的纳米乳液为水包油型, 能够改善多种脂溶性活性成分在水相食品中的溶解性和分散性。

纳米乳液的优势包括: ① 粒径小具有较高的动力学稳定性, 失稳速率较慢; ② 乳滴粒径小于入射光波长, 散射光较弱, 在合适的粒径及油水相组成时, 能够获得具有一定光学透性的产品; ③ 乳化后界面面积增大, 利于消化液作用, 改善功能活性成分的生物利用度^[3]。

常见的生物大分子(蛋白质、多糖等)具有一定的乳化活性可用作乳化剂制备纳米乳液, 利用可食性成分制备纳米乳液能增加消费者的接受性; 此外, 现已有较多利用纳米乳液包埋维生素以及功能性油脂等成分的研究^[5], 纳米乳液在食品工业具有广泛的应用前景。本文主要对近年来食品纳米乳液载体体系的组成、构建和应用概况进行了综述。

1 油相组成

纳米乳液的油相可以是单纯的芯材或功能活性成分的油溶液。纳米乳液包埋较多的功能活性成分时油相的添加量能够保持在较低水平, 满足消费者限制脂肪摄入的需要。

1.1 油相选择

某些功能活性成分如类胡萝卜素是长链疏水分子, 在构建纳米乳液体系时需要先溶解在油或其他基质中。常用的油相有中链甘油三酯(MCT)和长链甘油三酯(LCT), 以及风味油和香精油等^[5], 不同油相的分子量、极性、黏度、密度、脂肪酸链长和水溶性等性质, 均会影响乳液的粒径、稳定性和芯材的消化特性及生物利用度。

1.1.1 油相理化性质

(1) 溶解能力: 功能活性成分在油相中的溶解度限制了乳液体系的芯材载量, 且可影响生物利用度^[6], 故选择

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(编号: 2017YFD0400205)

作者简介: 李季楠, 女, 上海交通大学在读硕士研究生。

通信作者: 吴艳 (1977—), 女, 上海交通大学教授, 博士。

E-mail: wuy@sztu.edu.cn

收稿日期: 2018-09-03

油相时首先要考虑芯材的溶解性,溶解性大小与功能活性成分和脂肪酸链的相互作用有关, Ma 等^[7]分别以 MCT、菜籽油、亚麻籽油为油相制备姜黄素乳液,其中姜黄素在 MCT 中溶解度最大,因为每单位质量 MCT 含有更多极性基团,有助于分子间产生偶极-偶极相互作用增加姜黄素的溶解度。

(2) 油相黏度:一般油相黏度较水相大,黏度增大时一方面影响乳化剂分子在界面的迁移,另一方面油滴在均质设备内的变形时间随分散相黏度的增大而增加,影响乳滴破碎的速率和有效性; Qian 等^[8]通过改变十八烷与玉米油的比例和甘油与水的比例分别调节油水相黏度,制备纳米乳液,发现分散相黏度增大时,粒径有所增加,且在油水相黏度比减小时能获得更小的粒径。一般 MCT 和香精油的黏度较小在选择油相时可加以考虑。

(3) 界面特性:油相的界面特性影响乳化过程中油滴的分散和界面的流动性,一般界面张力减小能获得较小粒径的乳液^[9], MCT 的界面张力和黏度均小于长链甘油三酯; Walker 等^[10]利用 MCT 和鱼油分别做油相制备纳米乳液,发现利用 MCT 做油相制得的乳滴粒径较小,且增加 MCT 和鱼油混合油相中 MCT 的比例,粒径稍有减小。

(4) 水溶性:油相的相对水溶性会影响乳液的稳定性,油相的溶解性相对较大时,如短链甘油三酯(SCT)或某些香精油,形成的小油滴扩散速率较快易于进入水相,发生奥氏熟化造成乳液失稳^[11]; Guerra-Rosas 等^[12]分析了果胶稳定的香精油纳米乳液的储存稳定性,发现牛至油和百里香精油纳米乳液在储存期间发生奥氏熟化,粒径增加到 1 000 nm 以上。一般同时添加低水溶性的油相如 LCT 能够改善乳液抵抗奥氏熟化的稳定性^[13]。Sang 等^[14]以变性淀粉为乳化剂构建甜橙油纳米乳液,发现向油相中添加酯胶能够抑制奥氏熟化,同时酯胶还可作为增重剂抑制乳液的重力分离,改善体系的物理稳定性。

1.1.2 油相对消化特性的影响 油相分子量和溶解性能能够影响功能活性成分的消化,胶束化是脂溶性成分被吸收利用的前提,油脂被消化酶作用后形成游离脂肪酸,与胆汁盐和磷脂共同形成混合胶束,不同油相形成胶束的能力存在差异。Qian 等^[15]分别以玉米油、MCT 和甜橙油为油相制备 β -胡萝卜素纳米乳液,分析油相类型对生物利用度的影响,其中甜橙油是非消化油脂,消化后仅形成少量胶束,故此时 β -胡萝卜素的生物利用度几乎为零,玉米油中 β -胡萝卜素的生物利用度最高,因为 LCFA 形成的胶束具有更大的疏水核心,能更好地增溶线性 β -胡萝卜素。Salvatrújillo 等^[16]分析油相中 MCT 与 LCT 比例对纳米乳液中 β -胡萝卜素生物利用度的影响,发现增加油相中 LCT 的比例能提高 β -胡萝卜素的生物利用度; Ahmed 等^[17]分别以 LCT、MCT、SCT 为油相制备姜黄素纳米乳液,发现消化后姜黄素的生物利用度大小为 MCT > LCT > SCT,因为

SCFA 难以形成胶束相,而 MCFA 和 LCFA 均能够形成胶束增溶和转运姜黄素。

1.1.3 油相对化学稳定性的影响 油相组成还能够影响乳液的抗氧化稳定性,如 MCT 主要由饱和的中链脂肪酸甘油三酯组成,故具有较小的促氧化活性,某些香精油含有丰富的烯萜类成分,能够在一定程度上改善乳液的抗氧化稳定性。Sharif 等^[18]比较了亚麻籽油和 MCT 为油相制备的纳米乳液的氧化稳定性,发现 MCT 为油相制得的纳米乳液氧化稳定性较高。Walker 等^[10]以吐温-80 为乳化剂分析载油类型对鱼油纳米乳液稳定性的影响,发现油相组成为 80% 鱼油和 20% 柠檬精油或百里香精油时制得的乳液在 42 d 储存期间粒径没有显著变化,且其中抗氧化成分显著改善了乳液的氧化稳定性。

1.2 芯材

水包油纳米乳液体系可载运多种脂溶性成分^[1]。食品工业中常见的功能活性成分如表 1 所示,在制备乳液时,需要考虑芯材的溶解性、极性、黏度、密度和表面张力等性质。有文献^[19]表明油相中芯材的溶解量能够改变油相黏度等性质,影响乳化剂的界面行为和乳液稳定性; Nash 等^[20]以大豆卵磷脂为乳化剂构建香芹酚纳米乳液,发现因香芹酚的高极性和低表面张力特性,较大芯材浓度可加速乳滴絮凝和奥氏熟化; Beicht 等^[21]构建叶黄素多层乳液,发现增加油相中叶黄素浓度至 20% 以上,乳液粒径容易增大,储存 7 d 后发生乳析。此外乳液体系可同时包埋 2 种芯材,但芯材之间可能存在竞争抑制,如 Tys-sandier 等^[22]发现乳液中叶黄素的存在可能抑制其中 β -胡萝卜素的消化吸收, β -胡萝卜素极性较强多存在于油滴核心,而叶黄素则倾向存在于油滴表面故更易转运至胶束相。

2 水相组成

纳米乳液的水相主要由乳化剂和助乳化剂组成,可添加流变调节剂、抗氧化剂、金属离子螯合剂和防腐剂等

表 1 芯材的种类

Table 1 The types of core materials

种类	芯材
类胡萝卜素	叶黄素 ^[21] 、岩藻黄质 ^[23] 、番茄红素 ^[24] 、虾青素 ^[25] 、 β -胡萝卜素 ^[16]
维生素	V _A ^[26] 、V _D ^[27] 、V _E ^[28] 等
功能性油脂	鱼油 ^[10] 、丁香油 ^[29] 、DHA 藻油 ^[30] 、共轭亚油酸 ^[31] 等
香精油	柠檬烯 ^[32] 、甜橙油 ^[14] 、薄荷精油 ^[33] 、百里香精油 ^[12] 等
植物提取物	茶多酚 ^[34] 、百里酚 ^[35] 、香芹酚 ^[20] 、白藜芦醇 ^[36] 、槲皮素 ^[37] 、姜黄素 ^[17] 等

成分改善产品品质。乳化剂吸附在油水界面上降低表面张力,减少乳滴破碎所需能量,增加乳滴对絮凝合并的抵抗,维持乳液体系稳定。

食品领域常用的乳化剂如表2所示,蛋白质或多糖等生物大分子如乳清蛋白、酪蛋白酸钠、阿拉伯胶等,分子结构上具有亲疏水片段,故具有优良的乳化性,同时具有较高的安全性和生物相容性,已成功利用这类生物大分子构建了纳米乳液^[38];不同构象、电荷特性和分子量的乳化剂稳定乳液的机理不同,常见的机制有:①生物大分子吸附在油水界面,依靠分子相互作用形成具有一定强度的层结构,改善乳滴对破碎的抵抗能力;②界面上的生物大分子可产生静电斥力或空间位阻,减缓乳滴絮凝合并的趋势;③生物大分子形成界面屏障,减少芯材与水相中促氧化成分的接触;④某些乳化剂本身具有抗氧化或者螯合金属离子的能力,能改善乳液体系的化学稳定性。故选择乳化剂时要充分考虑其不同介质条件下的溶解性、电荷密度、分子构象、乳化活力以及包埋能力等。

表2 乳化剂的种类

Table 2 The types of common wall materials

种类	壁材
蛋白质类	乳清分离蛋白 ^[39] 、酪蛋白酸钠 ^[29] 、乳铁蛋白 ^[40] 、大豆分离蛋白 ^[41] 、豌豆蛋白 ^[42] 等
多糖类	果胶 ^[12] 、阿拉伯胶 ^[43] 、结冷胶 ^[32] 、印度树胶 ^[44] 等
脂类	卵磷脂 ^[45] 、大豆磷脂 ^[20] 等
其他	皂苷 ^[46] 、甜菜提取物 ^[47] 等

2.1 蛋白质

蛋白质一般具有优良的乳化活性,乳化过程中蛋白质分子重新取向并在油水界面上吸附,形成界面层减缓乳滴的合并聚结,伸展的蛋白链和带电氨基酸产生空间位阻和静电斥力,改善乳液的储存稳定性;不同构象、链长和界面特性的蛋白质可形成不同形态的界面层^[48]。目前常用的有动物蛋白和植物蛋白。

2.1.1 动物蛋白质 食品领域应用最广泛的动物蛋白即牛奶蛋白,可溶形式的牛奶蛋白具有良好的乳化特性、较高营养价值和良好的感官品质,常用的牛奶蛋白有:酪蛋白、乳清蛋白和乳铁蛋白等。

(1) 酪蛋白酸钠:酪蛋白酸钠(SC)具有良好的水溶性和乳化性,在食品工业中常用作乳化剂。酪蛋白酸钠能够快速吸附在油水界面,产生空间位阻和静电斥力^[48],且酪蛋白酸钠中含有较多的抗氧化氨基酸(Tyr、Pro或Met),故具有一定的抗氧化活性。Davidov-Pardo等^[49]以酪蛋白酸钠为乳化剂构建了平均粒径232 nm的叶黄素纳米乳液,在热处理和储存期间均保持物理稳定。Yerramilli等^[50]以不同浓度的酪蛋白酸钠为乳化剂构建纳米乳液,经过6个月储存粒径均未显著改变。此外酪蛋白

在200~300 nm处对紫外有较明显的吸收,故能够减少紫外照射对芯材的影响;如Semo等^[51]发现酪蛋白胶束能够减少紫外照射诱导的维生素D₂降解。

(2) 乳铁蛋白:乳铁蛋白是一种金属螯合蛋白,具有优良的乳化性和一定的抗菌、抗病毒及抗氧化活性。Pinheiro等^[40]利用乳铁蛋白,构建了平均粒径(149.3±4.9) nm的姜黄素纳米乳液;Mao等^[52]利用乳铁蛋白成功构建体积平均粒径(d_{43})为208 nm的 β -胡萝卜素纳米乳液,且该乳液体系在pH 2~9、0~300 mmol/L NaCl以及30~90 °C热处理条件下均保持稳定,此外乳铁蛋白能够螯合Fe²⁺等过渡金属离子,显著减缓储存过程中 β -胡萝卜素的降解。乳铁蛋白稳定的乳液在二价离子存在时比较稳定,McCarthy等^[53]比较了乳铁蛋白和 β -酪蛋白稳定乳液对CaCl₂的敏感性,发现30 mmol/L CaCl₂加入会显著减小 β -酪蛋白稳定乳液的电位值,导致乳滴絮凝,但未对乳铁蛋白稳定乳液的电位和粒径造成显著影响,且将 β -酪蛋白和乳铁蛋白共同乳化制备纳米乳液,能减少Ca²⁺加入导致的 β -酪蛋白聚集。

(3) 乳清蛋白:乳清蛋白主要由 β -乳球蛋白组成,因其球形构象,吸附速率较小,且球蛋白吸附在油水界面上会部分展开,暴露出非极性基团和巯基,可通过疏水相互作用或二硫键的形成促进乳滴絮凝。Pool等^[37]以1% β -乳球蛋白为乳化剂,MCT为油相,高压均质制备平均粒径<200 nm的槲皮素纳米乳液,乳液具有一定的物理稳定性,同时槲皮素的生物利用度也有所提高。此外乳清蛋白具有抗氧化活性,Elias等^[54]研究表明连续相中的 β -乳球蛋白能减缓O/W乳液体系的氧化,且蛋白经水解后抗氧化活性有所提高。Cheng等^[55]分别以 β -乳球蛋白和吐温-20为乳化剂构建了 β -胡萝卜素纳米乳液,发现 β -乳球蛋白能改善 β -胡萝卜素的化学稳定性。

对某些蛋白质进行高压处理、热处理或部分水解,能够改善其构象、界面特性和吸附速率,部分水解形成短肽或使肽链展开从而更易吸附于界面上,并提高溶解性增加吸附量形成更厚的界面层;或暴露出更多抗氧化氨基酸增加乳液的抗氧化特性^[56]。

2.1.2 植物蛋白 日前,关于植物蛋白特别是豆类蛋白的应用逐渐增多,如大豆、豌豆和扁豆等,是很有潜力的动物蛋白替代物;Ho等^[24]利用豌豆蛋白构建了表面积平均粒径($d_{3,2}$)在0.13~0.29 nm的纳米乳液体系,且在14 d储存期间粒径没有显著变化;Benjamin等^[42]比较了豆类蛋白(大豆、豌豆和羽扇豆)与牛奶蛋白的乳化特性,发现利用豆类蛋白得到的乳液粒径与 β -乳球蛋白相似, $d_{3,2}$ <0.4 μ m且在50 d储存期间保持稳定。

相比较于动物蛋白,植物蛋白尺寸较大,且多呈球形,疏水基团埋在分子结构内部,一般需要改性展开蛋白结构改善乳化特性。Primozic等^[57]利用高压均质对扁豆分离蛋白物理改性并构建纳米乳液,发现高压均质显著

减小了蛋白粒子的尺寸和表面疏水性,且以改性蛋白制备的乳液粒径 $<0.2\ \mu\text{m}$,物理稳定性有所改善,但长期储存后仍存在蛋白和油滴聚结。Yerramilli 等^[58]利用豌豆蛋白(PPI)部分取代酪蛋白酸钠制备纳米乳液,发现两者 1:1 混合乳化改善了纳米乳液的稳定性,均质过程中酪蛋白酸钠与豌豆蛋白亚单位通过疏水相互作用形成 SC-PPI,避免了酪蛋白酸钠制备的纳米乳液储存期间发生耗尽絮凝,同时 SC-PPI 的形成改善了豌豆蛋白的溶解性,减少豌豆蛋白聚结导致的失稳。

2.2 其他

2.2.1 皂苷 皂苷是一种植物次级代谢产物,具有一定的乳化性,在较少用量时可稳定纳米乳液,且受环境因素影响较小;Yang 等^[46]利用皂树皂苷(Q-Naturale)作乳化剂,经高压微射流,成功制备了平均粒径 $<200\ \text{nm}$ 的纳米乳液,该乳液在 $5\ ^\circ\text{C}$ 储存 1 个月后粒径没有显著变化,且在热处理($30\sim 90\ ^\circ\text{C}$)、盐离子浓度($\leq 300\ \text{mmol/L NaCl}$)和 pH 3~8 等条件下均保持一定的稳定性。

2.2.2 多糖 某些多糖如阿拉伯胶、印度树胶等携带少部分疏水蛋白基团,故具有一定的乳化活性,多糖在应用时一般受环境因素影响较小,但所得乳滴粒径较大;Shamsara 等^[59]以杏胶—苹果胶混合作乳化剂制备葵花籽油纳米乳液,在杏胶和苹果胶质量比为 21:4 时制得乳液平均粒径在 $600\sim 700\ \text{nm}$,储存 10 d 后粒径和电位变化较小,具有抵抗乳析的稳定性。

2.2.3 共轭反应产物 蛋白和多糖的美拉德反应产物作乳化剂,蛋白部分可快速吸附于油滴表面,多糖部分则能够提供空间位阻防止乳滴聚结,Gumus 等^[60]以酪蛋白酸钠—葡聚糖的美拉德反应产物经高压均质构建叶黄素纳米乳液,与酪蛋白酸钠稳定乳液相比,该乳液在不同 pH 下均保持稳定,且生物利用度无显著差异。Regan 等^[61]以酪蛋白酸钠—麦芽糊精的美拉德反应产物构建乳液体系,改善了其储存、热处理和冻融稳定性。此外,Gu 等^[62]以儿茶素—蛋清蛋白共轭产物作乳化剂构建纳米乳液载体 β 胡萝卜素,与蛋清蛋白稳定乳液相比,因该共轭物可产生较强的空间位阻,且具有更强的抗氧化活力,故乳液的理化稳定性得到显著改善。

乳化过程中向油水相同时加入乳化剂能够更有效地降低表面张力;Guan 等^[63]向油相中添加磷脂,水相中添加乳清分离蛋白作乳化剂共同乳化构建纳米乳液,经 $12\ 000\ \text{r/min}$ 高速剪切得粒径 $<200\ \text{nm}$ 的稳定乳液,而未添加磷脂的乳液平均粒径 $>700\ \text{nm}$ 。Xue 等^[45]利用卵磷脂和酪蛋白酸钠共同乳化,经高速剪切制得粒径 $<100\ \text{nm}$ 透明度较高的百里香精油纳米乳液,且酪蛋白酸钠和卵磷脂共同吸附在界面上,2 种成分组成的界面提供更有效的静电斥力和空间位阻,改善乳液抵抗絮凝、聚结和奥氏熟化的稳定性。

3 构建方法

常见的纳米乳液制备方法有高能乳化和低能乳化 2 种。

(1) 高能乳化法依靠设备产生高速剪切、撞击等破坏力,打破油水相界面,在短时间内使得大液滴分散破碎和细微化,界面面积增加同时乳化剂及时吸附到新形成的界面上稳定乳液。一般首先制备粗乳液,再进一步乳化破碎得到纳米乳液,在乳液黏度较大时高能乳化方法的应用受到一定的限制,且成本较高^[64]。

常见的高能乳化法包括:高压均质、高压微射流、超声乳化、膜乳化和微通道乳化等。高压均质和微射流均质是利用特定设备产生剪切、撞击、空化、湍流和涡旋等作用,使液滴高度破碎^[65],是制备纳米乳液常用的方法。因设备构造不同,微射流均质不需多次通过均质设备,节省时间和成本,快速连续的制备纳米乳液;而高压均质效率较低,产生的机械能多以热的形式耗散,故需要循环多次才能改善粒径分布^[64],且在粒径减小后乳滴变形破碎需要克服更大的 Laplace 压力,粒径难以进一步减小,而高压均质结合溶剂蒸发能够制得粒径更小、透明度较高的纳米乳液^[66]。超声乳化是利用超声波产生强烈的机械振动和空化作用打破油水相界面,可实现分子级的混合,所得乳液的粒径更小,粒径分布更均一,通常需要超声探头,故一般适合实验室内少量样品的制备^[67]。

膜乳化原理是连续相在膜表面流动,分散相或粗乳液在压力作用下经过微孔膜膜孔,在界面张力或剪切力作用下,分散相脱落后被流动连续相收集,O/W 乳液的制备一般需要亲水膜,设计不同的构造,控制两相的流动行为和膜的振动,如增加旋转或错流施加额外的离心力或体系扰动,使得液滴更易从膜上脱离,得到较小粒径的乳液^[68];膜乳化一般受到膜性质(孔径、材料和显微形态等)、膜类型(管式膜、平板膜等)、乳化剂类型、两相黏度、跨膜压力和连续相流速等因素的影响^[69]。该法操作简单,能耗较低,表面活性剂用量少,液滴粒径均匀可控,能够在较低的剪切作用下得到乳液产品,适合多种类型乳液的制备。微通道乳化与膜乳化类似,是将分散相在压力作用下进入硅板或玻璃板间的阵列式微通道,从而获得尺度均匀的乳液^[69]。

(2) 低能乳化方法依赖体系内部化学能驱动乳液形成,根据乳化剂分子的自发曲率是否发生变化可分为自乳化和相转变乳化(相转变温度法、相转变组合法和相转变点法)^[70],自乳化法是在不断搅拌下将油相(其中溶解有乳化剂)慢速加入到水相中,依靠乳化剂分子或溶剂分子从油相快速扩散至连续相,使得界面面积和界面扰动增加,形成微小乳滴,未涉及表面活性剂自发曲率的变化。相转变乳化是由于体系温度(加热或冷却)或体系组成(离子强度、pH 或油水相体积比)变化使得非离子表面

活性剂的自发曲率和溶解性发生变化,从而自发形成纳米乳液^[70]。低能乳化能够更有效地形成粒径较小的乳滴,对设备和能量要求较小,仅需要可控的混合,但所需表面活性剂的量较大,可能带来安全性和异味问题,且可用的油相和表面活性剂类型有限^[71],多为低黏度的油相和小分子表面活性剂,此外因低能乳化是在体系内部热力学驱动下进行的,易受外界温度、压力、浓度和搅拌等热力学参数的影响,多用于医药领域制备微乳载运药物,目前食品纳米乳液的制备方法以高能法为主。

4 理化性质评价

(1) 纳米乳液的常见理化性质:粒径分布、显微结构、感官性状(外观、色泽、黏度等)、理化稳定性、消化特性、流变特性、安全性以及界面张力等。

(2) 粒径和粒径分布:乳液的粒径多以平均粒径和分散指数(PDI)表示,一般 $PDI < 0.2$ 则认为粒径分布较窄,乳滴粒径影响纳米乳液的稳定性、外观及消化特性,纳米乳液粒径的分析常用静态光散射(SLS)和动态光散射(DLS)2种方法,依据某固定角度或多个分散角度下,乳滴对激光束的散射,结合方程计算粒径,DLS测量范围一般为 $3 \sim 5 \mu\text{m}$;而SLS测量范围一般为 $0.1 \sim 1\ 000.0 \mu\text{m}$ ^{[4]198-199}。此外,利用显微观察的方式,如光学显微镜、激光扫描共聚焦显微镜、原子力显微镜、透射电镜等,能够直观地获得粒径分布、粒子显微形态的相关信息。

(3) Zeta-电位:静电斥力是维持乳液稳定的主要机制,依据乳滴在施加电场下移动的速率和方向来确定携带的电位值,电位值一般与乳化剂类型、pH和离子强度有关,一般认为乳滴净电位值 $> 30 \text{ mV}$ 时能够提供足够的静电斥力稳定乳液^[72],故依据电位值可以初步分析乳液的稳定性。

(4) 稳定性:稳定性是评价纳米乳液的重要指标,纳米乳液因粒径较小,布朗运动明显且空间位阻的稳定作用更加显著,故具有一定的动力学稳定性^[73],但纳米乳液是热力学不稳定体系,乳滴之间存在合并聚结的趋势,常见失稳机制有沉降、絮凝、聚结、奥氏熟化和乳析等^[13],常用的物理稳定性评价方法有离心法、直接储存观察以及全能稳定分析仪等,其中稳定分析仪是利用高速离心模拟重力场,加速乳液的分层,记录透射光强度相对于时间和位置的变化情况,进而反映乳滴的迁移过程,常用来初步快速地评价乳液稳定性^[74]。

(5) 消化特性:生物利用度是评价功能食品的重要指标,常利用体外消化模型评价纳米乳液的消化特性(释放、稳定性和生物利用度等);脂溶性成分的胶束化是被吸收利用的前提,故一般以胶束化程度反映活性成分的生物可利用度。 $B = F_B \times F_A \times F_M$ 常用来计算生物利用度(F_B :生物可利用度即模拟消化后从基质中释放并转移

至胶束相的活性成分所占的比例; F_A :转运被小肠上皮细胞吸收并进入门静脉的活性成分所占比例; F_M :到达体循环未被代谢的活性成分所占的比例^[75]。如前所述纳米乳液体系的组成(乳化剂、油相类型)和粒径等均会影响活性成分的生物利用度。

5 应用

5.1 类胡萝卜素纳米乳液

常见的类胡萝卜素如 β -胡萝卜素、叶黄素和虾青素等,一般具有抗氧化、预防动脉粥样硬化等慢性疾病,以及改善眼部健康等生理功能;但类胡萝卜素水溶性和稳定性差且生物利用度较低,构建类胡萝卜素纳米乳液能在一定程度上克服上述问题。Zhang等^[76]以酪蛋白酸钠为乳化剂通过高压均质制备 β -胡萝卜素纳米乳液,乳液在碱性pH、 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 热处理和 $100 \sim 500 \text{ mmol/L NaCl}$ 条件下均保持一定的稳定性。Salvia-Trujillo等^[77]以吐温-80为乳化剂制备番茄红素纳米乳液,与番茄汁相比,乳液体系有利于番茄红素向胶束相转移,生物利用度有所提高,而番茄汁中番茄红素以晶体形式存在于有色体中,在消化道内难以完全释放,生物利用度较低。

5.2 香精油纳米乳液

香精油一般具有抗氧化、抑菌、消炎等活性,但一般水溶性差、易挥发、易氧化。研究表明乳液体系中油滴粒径减小,可增大抗菌成分的局部浓度及与细胞的接触机会,改善其抗菌活性和持久性^[78]。Hamid等^[79]以改性淀粉作乳化剂,以不同比例的丁香油和菜籽油经高压均质制备纳米乳液,并分析纳米乳液对大肠杆菌等菌株的抗菌活性,发现因纳米乳液Zeta-电位为负,能够促进抗菌成分与细胞内组分的接触,延长对革兰氏阳性菌株的抗菌活力。Ghosh等^[80]利用吐温-20和吐温-80作乳化剂,以芝麻油为油相,超声乳化构建的丁香酚纳米乳液,发现纳米乳液对金黄色葡萄球菌具有杀菌活性,将其添加到橙汁中显著减少了原生微生物数量。

5.3 功能性油脂纳米乳液

DHA藻油等油脂,富含多不饱和脂肪酸,具有预防心血管疾病等慢性疾病的性质,但不饱和度较高,极易氧化酸败,构建功能油脂纳米乳液可改善氧化稳定性和生物利用度;Karthik等^[81]利用吐温-40、酪蛋白酸钠和大豆磷脂作乳化剂构建了 ω -3脂肪酸DHA纳米乳液,发现乳化后油脂在消化过程中脂肪酸释放量增加。Lane等^[30]以大豆磷脂为乳化剂通过超声乳化法制备平均粒径 258 nm 的 ω -3藻油纳米乳液,分别将该乳液和藻油添加到草莓酸奶中,发现纳米乳液体系改善了DHA的吸收速率、吸收量和生物利用度。

5.4 可食性涂膜

利用纳米乳液制备可食性涂膜能改善涂膜的阻隔性、机械性能和功能特性,更有效地延长食品的货架

期^[82], Salvia-Trujillo 等^[83]利用香茅精油纳米乳液和普通乳液分别对鲜切苹果进行涂膜,发现纳米乳液涂膜能更快更有效地使大肠杆菌失活。Radi 等^[84]利用吐温-80 为乳化剂超声乳化构建橙皮油纳米乳液,并对橘子进行涂膜,发现其具有更好的抗细菌和抗真菌活力,显著减少储存期间的 V_C 损失,且不会对感官性状造成不良影响。Zambrano-Zaragoza 等^[85]利用 V_E 纳米乳液、普通乳液和 α -生育酚溶液分别对鲜切苹果进行浸渍涂膜,发现纳米乳液涂膜后鲜切苹果的呼吸速率显著减小,且 21 d 储存期间多酚氧化酶活性减小了 65%,减缓了苹果褐变的速率。

6 结语

食品纳米乳液作为一种功能活性成分载体体系,可以包埋多种脂溶性物质,显著提高芯材的溶解性、稳定性和生物利用度,多种蛋白质、多糖、磷脂和皂苷均可以制备安全性较高的纳米乳液,控制乳液体系中油相和水相的组成、乳化剂类型和乳化条件可改善纳米乳液的性质,获得理想的产品,在食品领域具有广阔的应用前景,如功能食品研发、提高功能活性成分的生物利用度、改善产品品质等。然而纳米乳液的热力学不稳定性是限制其应用的原因之一,目前纳米乳液的工业化应用,还受限于生产成本和稳定性等多个方面。需要进一步研究改善纳米乳液储存期间的理化稳定性,开发适合制备纳米乳液的安全的低成本原料,分析影响乳液体系中功能活性成分生物利用度的因素;此外还需要具体确定产品的应用方式、货架期、安全性和感官品质等方面的相关内容。

参考文献

- [1] ONWULATA C I. Encapsulation of new active ingredients[J]. Annual Review of Food Science & Technology, 2012, 3(1): 183-202.
- [2] NEETHIRAJAN S, JAYAS D S. Nanotechnology for the food and bioprocessing industries [J]. Food & Bioprocess Technology, 2011, 4(1): 39-47.
- [3] BOREL T, SABLIOV C M. Nanodelivery of bioactive components for food applications: types of delivery systems, properties, and their effect on ADME profiles and toxicity of nanoparticles[J]. Annu Rev Food Sci Technol, 2014, 5(5): 197-213.
- [4] ROOHINEJAD S, GREINER R, OEY I, et al. Emulsion-based Systems for Delivery of Food Active Compounds: Formation, Application, Health and Safety[M]. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2018.
- [5] SSLVIATRUIJILLO L, SOLIVAFORTUNY R C, ROJAS-GRAU M A, et al. Edible Nanoemulsions as Carriers of Active Ingredients: A Review[J]. Annual Review of Food Science & Technology, 2017, 8(1): 439-466.
- [6] PORTER C J, KAUKONEN AMBOYD B J, EDWARDS G A, et al. Susceptibility to lipase-mediated digestion reduces the oral bioavailability of danazol after administration as a medium-chain lipid-based microemulsion formulation [J]. Pharm Res, 2004, 21(8): 1 405-1 412.
- [7] MA Pei-hua, ZENG Qing-han, TAI Ke-dong, et al. Preparation of curcumin-loaded emulsion using high pressure homogenization: Impact of oil phase and concentration on physicochemical stability[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 84(1): 34-46.
- [8] CHEN Qian, MCCLEMENTS D J. Formation of nanoemulsions stabilized by model food-grade emulsifiers using high-pressure homogenization: Factors affecting particle size[J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(5): 1 000-1 008.
- [9] SONG Dao-yun, ZHANG Wu, GUPTA R K, et al. Role of operating conditions in determining droplet size and viscosity of tackifier emulsions formed via phase inversion[J]. Aiche Journal, 2015, 57(1): 96-106.
- [10] WALKER R M, GUMUS C E, DECKER E A, et al. Improvements in the formation and stability of fish oil-in-water nanoemulsions using carrier oils: MCT, thyme oil, & lemon oil[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 211: 60-68.
- [11] KARTHIK P, EZHILARASI P N, ANANDHARMAKRISHNAN C. Challenges associated in stability of food grade nanoemulsions[J]. C R C Critical Reviews in Food Technology, 2017, 57(7): 1 435-1 450.
- [12] GUERRA-ROSAS M I, MORALES-CASTRO J, OCHOA-MARTÍNEZ L A, et al. Long-term stability of food-grade nanoemulsions from high methoxyl pectin containing essential oils[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 52: 438-446.
- [13] MCCLEMENTS D J. Nanoemulsions versus microemulsions: terminology, differences, and similarities [J]. Soft Matter, 2011, 8(6): 1 719-1 729.
- [14] SANG S L, BAIK M Y, DECKER E A, et al. Stabilization of orange oil-in-water emulsions: A new role for ester gum as an Ostwald ripening inhibitor [J]. Food Chemistry, 2011, 128(4): 1 023-1 028.
- [15] CHEN Qian, DECKER E A, HANG Xiao, et al. Nanoemulsion delivery systems: Influence of carrier oil on β -carotene bioaccessibility[J]. Food Chemistry, 2012, 135(3): 1 440-1 447.
- [16] SALVIATRUIJILLO L, CHEN Qian, MARTÍNBELLOSO O, et al. Modulating β -carotene bioaccessibility by controlling oil composition and concentration in edible nanoemulsions [J]. Food Chemistry, 2013, 139(1/2/3/4): 878-884.
- [17] AHMED K, LI Yan, 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.
- [18] SHARIF H R, GOFF H D, MAJEED H, et al. Physico-

- chemical stability of β -carotene and α -tocopherol enriched nanoemulsions; Influence of carrier oil, emulsifier and antioxidant[J]. *Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects*, 2017, 529: 550-559.
- [19] OSTERTAG F, WEISS J, MCCLEMENTS D J. Low-energy formation of edible nanoemulsions; Factors influencing droplet size produced by emulsion phase inversion[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2012, 388(1): 95-102.
- [20] NASH J J, ERK K A. Stability and interfacial viscoelasticity of oil-water nanoemulsions stabilized by soy lecithin and tween 20 for the encapsulation of bioactive carvacrol[J]. *Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects*, 2016, 517: 1-11.
- [21] BEICHT J, ZEEB B, GIBIS M, et al. Influence of layer thickness and composition of cross-linked multilayered oil-in-water emulsions on the release behavior of lutein[J]. *Food & Function*, 2013, 4(10): 1 457-1 467.
- [22] TYSSANDIER V, LYAN B, BOREL P. Main factors governing the transfer of carotenoids from emulsion lipid droplets to micelles[J]. *BBA-Molecular and Cell Biology of Lipids*, 2001, 1 533(3): 285-292.
- [23] SALVIA-TRUJILLO L, SUN Quan-cai, UM B H, et al. In vitro and in vivo study of fucoxanthin bioavailability from nanoemulsion-based delivery systems: Impact of lipid carrier type[J]. *Journal of Functional Foods*, 2015, 17: 293-304.
- [24] HO K K H Y, SCHROËN K, MARTÍN-GONZÁLEZ M F, et al. Physicochemical stability of lycopene-loaded emulsions stabilized by plant or dairy proteins[J]. *Food Structure*, 2016, 12: 34-42.
- [25] KIM D M, HYUN S S, YUN P, et al. Identification of an emulsifier and conditions for preparing stable nanoemulsions containing the antioxidant astaxanthin [J]. *International Journal of Cosmetic Science*, 2012, 34(1): 64-73.
- [26] GONÇALVES A, ESTEVINHO B N, ROCHA F. Microencapsulation of vitamin A: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2016, 51: 76-87.
- [27] OZTURK B, ARGIN S, OZILGEN M, et al. Nanoemulsion delivery systems for oil-soluble vitamins: Influence of carrier oil type on lipid digestion and vitamin D3 bioaccessibility[J]. *Food Chemistry*, 2015, 187: 499-506.
- [28] OZTURK B, ARGIN S, OZILGEN M, et al. Formation and stabilization of nanoemulsion-based vitamin E delivery systems using natural biopolymers; Whey protein isolate and gum arabic[J]. *Food Chemistry*, 2015, 188: 256-263.
- [29] SHARMA M, MANN B, SHARMA R, et al. Sodium caseinate stabilized clove oil nanoemulsion; Physicochemical properties[J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 212: 38-46.
- [30] LANE K E, LI Wei-li, SMITH C, et al. The bioavailability of an omega-3-rich algal oil is improved by nanoemulsion technology using yogurt as a food vehicle[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2014, 49(5): 1 264-1 271.
- [31] KIM D, PARK J H, KWEON D J, et al. Bioavailability of nanoemulsified conjugated linoleic acid for an antiobesity effect[J]. *Int J Nanomedicine*, 2013, 8(1): 451-459.
- [32] EVAGELIOU V, SALIARI D. Limonene encapsulation in freeze dried gellan systems [J]. *Food Chemistry*, 2017, 223: 72-75.
- [33] LIANG Rong, XU Shi-qi, SHOEMAKER C F, et al. Physical and Antimicrobial Properties of Peppermint Oil Nanoemulsions[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60(30): 7 548-7 555.
- [34] GADKARI P V, SHASHIDHAR M G, BALARAMAN M. Delivery of green tea catechins through Oil-in-Water (O/W) nanoemulsion and assessment of storage stability[J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 199: 65-76.
- [35] MA Qiu-min, DAVIDSON P M, ZHONG Qi-xin. Nanoemulsions of thymol and eugenol co-emulsified by lauric arginate and lecithin[J]. *Food Chemistry*, 2016, 206: 167-173.
- [36] SESSA M, BALESTRIERI M L, FERRARI G, et al. Bioavailability of encapsulated resveratrol into nanoemulsion-based delivery systems[J]. *Food Chemistry*, 2014, 147: 42-50.
- [37] POOL H, MENDOZA S, HANG Xiao, et al. Encapsulation and release of hydrophobic bioactive components in nanoemulsion-based delivery systems: impact of physical form on quercetin bioaccessibility[J]. *Food & Function*, 2013, 4(1): 162-174.
- [38] MCCLEMENTS D J, BAI Long, CHUNG C. Recent Advances in the Utilization of Natural Emulsifiers to Form and Stabilize Emulsions[J]. *Annu Rev Food Sci Technol*, 2017, 8: 205-236.
- [39] LI Ming, MA Ying, CUI Jie. Whey-protein-stabilized nanoemulsions as a potential delivery system for water-insoluble curcumin[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2014, 59(1): 49-58.
- [40] PINHEIRO A C, COIMBRA M A, VICENTE A A. In vitro behaviour of curcumin nanoemulsions stabilized by biopolymer emulsifiers; Effect of interfacial composition[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 52: 460-467.
- [41] HU Min, MCCLEMENTS D J, DECKER E A. Lipid oxidation in corn oil-in-water emulsions stabilized by casein, whey protein isolate, and soy protein isolate[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2003, 51(6): 1 696-1 700.
- [42] BENJAMIN O, SILCOCK P, BEAUCHAMP J, et al. Emulsifying properties of legume proteins compared to β -lactoglobulin and Tween 20 and the volatile release from oil-in-water emulsions[J]. *Journal of Food Science*, 2015, 79(10): E2014-E2022.
- [43] BAI Long, HUAN Si-qi, LI Zhi-guo, et al. Comparison of emulsifying properties of food-grade polysaccharides in oil-in-water emulsions: Gum arabic, beet pectin, and corn

- fiber gum[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 66: 144-153.
- [44] YAO Xiao-lin, ZHANG Wei-qi, NIE Ke, et al. Effect of Gum Arabic, Gum Ghatti and Sugar Beet Pectin as Interfacial Layer on Lipid Digestibility in Oil-in-Water Emulsions[J]. *Food Biophysics*, 2016, 11(3): 292-301.
- [45] XUE Jia, ZHONG Qi-xin. Thyme oil nanoemulsions co-emulsified by sodium caseinate and lecithin[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2014, 62(40): 9 900-9 907.
- [46] YANG Ying, LESER M E, SHER A A, et al. Formation and stability of emulsions using a natural small molecule surfactant: Quillaja saponin (Q-Naturale®) [J]. *Food Hydrocolloids*, 2013, 30(2): 589-596.
- [47] RALLA T, SALMINEN H, EDELMANN M, et al. Stability of Emulsions Using a New Natural Emulsifier: Sugar Beet Extract (*Beta vulgaris* L.)[J]. *Food Biophysics*, 2017, 12(3): 269-278.
- [48] DICKINSON E. Milk protein interfacial layers and the relationship to emulsion stability and rheology[J]. *Colloids & Surfaces B Biointerfaces*, 2001, 20(3): 197-210.
- [49] DAVIDOV-PARDO G, GUMUS C E, MCCLEMENTS D J. Lutein-enriched emulsion-based delivery systems: Influence of pH and temperature on physical and chemical stability[J]. *Food Chemistry*, 2016, 196: 821-827.
- [50] YERRAMILI M, GHOSH S. Long-term stability of sodium caseinate-stabilized nanoemulsions[J]. *Journal of Food Science & Technology*, 2017, 54(1): 1-11.
- [51] SEMO E, KESSELMAN E, DANINO D, et al. Casein micelle as a natural nano-capsular vehicle for nutraceuticals[J]. *Food Hydrocolloids*, 2007, 21(5): 936-942.
- [52] MAO Ying-yi, DUBOT M, HANG Xiao, et al. Interfacial engineering using mixed protein systems: emulsion-based delivery systems for encapsulation and stabilization of β -carotene[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2013, 61(21): 5 163-5 169.
- [53] MCCARTHY N A, KELLY A L, O'MAHONY J A, et al. Sensitivity of emulsions stabilised by bovine β -casein and lactoferrin to heat and CaCl_2 [J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 35: 420-428.
- [54] ELIAS R J, BRIDGEWATER J D, VACHET R W, et al. Antioxidant mechanisms of enzymatic hydrolysates of beta-lactoglobulin in food lipid dispersions[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2006, 54(25): 9 565-9 572.
- [55] CHEN Qian, DECKER E A, HANG Xiao, et al. Physical and chemical stability of β -carotene-enriched nanoemulsions: Influence of pH, ionic strength, temperature, and emulsifier type[J]. *Food Chemistry*, 2012, 132(3): 1 221-1 229.
- [56] TAMM F, HÄRTER C, BRODKORB A, et al. Functional and antioxidant properties of whey protein hydrolysate/pectin complexes in emulsions and spray-dried microcapsules[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016, 73: 524-527.
- [57] PRIMOZIC M, DUCHEK A, NICKERSON M, et al. Formation, stability and in vitro digestibility of nanoemulsions stabilized by high-pressure homogenized lentil proteins isolate[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 77: 126-141.
- [58] YERRAMILI M, LONGMORE N, GHOSH S. Improved stabilization of nanoemulsions by partial replacement of sodium caseinate with pea protein isolate[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 64: 99-111.
- [59] SHAMSARA O, JAFARI S M, MUHIDINOV Z K. Fabrication, characterization and stability of oil in water nano-emulsions produced by apricot gum-pectin complexes[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2017, 103: 1 285-1 293.
- [60] GUMUS C E, DAVIDOV-PARDO G, MCCLEMENTS D J. Lutein-enriched emulsion-based delivery systems: Impact of Maillard conjugation on physicochemical stability and gastrointestinal fate [J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 60: 38-49.
- [61] JONATHAN O R, DANIELM M. Heat stability and freeze-thaw stability of oil-in-water emulsions stabilised by sodium caseinate-maltodextrin conjugates[J]. *Food Chemistry*, 2010, 119(1): 182-190.
- [62] GU Lu-ping, SU Yu-jie, ZHANG Meng-qi, et al. Protection of β -carotene from chemical degradation in emulsion-based delivery systems using antioxidant interfacial complexes: Catechin-egg white protein conjugates[J]. *Food Research International*, 2017, 96: 84-93.
- [63] GUAN Yong-guang, WU Jin-e, ZHONG Qi-xin. Eugenol improves physical and chemical stabilities of nanoemulsions loaded with β -carotene [J]. *Food Chemistry*, 2016, 194: 787-796.
- [64] LEE L, NORTON I T. Comparing droplet breakup for a high-pressure valve homogeniser and a Microfluidizer for the potential production of food-grade nanoemulsions [J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 114(2): 158-163.
- [65] LIEDTKE S, WISSING S, MÜLLER R H, et al. Influence of high pressure homogenisation equipment on nanodispersions characteristics[J]. *Int J Pharm*, 2000, 196(2): 183-185.
- [66] HD S, MA C, BWS S, et al. Nanoemulsions of β -carotene using a high-energy emulsification-evaporation technique [J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 102(2): 130-135.
- [67] KENTISH S, WOOSTER T J, ASHOKKUMAR M, et al. The use of ultrasonics for nanoemulsion preparation[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2008, 9(2): 170-175.
- [68] VLADISAVLJEVIC G T. Recent advances in the production of controllable multiple emulsions using microfabricated devices[J]. *Particuology*, 2016, 24(1): 1-17.
- [69] VLADISAVLJEVIC G T, KOBAYASHI I, NAKAJIMA

- M. Production of uniform droplets using membrane, micro-channel and microfluidic emulsification devices [J]. *Microfluidics & Nanofluidics*, 2012, 13(1): 151-178.
- [70] SOLANS C, SOLÉ I. Nano-emulsions: Formation by low-energy methods[J]. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2012, 17(5): 246-254.
- [71] YANG Ying, MARSHALLBRETON C, LESER M E, et al. Fabrication of ultrafine edible emulsions: Comparison of high-energy and low-energy homogenization methods[J]. *Food Hydrocolloids*, 2012, 29(2): 398-406.
- [72] MISHRA P R, AL S L, MÜLLER R H, et al. Production and characterization of Hesperetin nanosuspensions for dermal delivery[J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2009, 371(1/2): 182-189.
- [73] GUPTA A, ERAL H B, HATTON T A, et al. Nanoemulsions: formation, properties and applications[J]. *Soft Matter*, 2016, 12(11): 2 826-2 841.
- [74] BADOLATO G G, AGUILAR F, SCHUCHMANN H P, et al. Evaluation of long term stability of model emulsions by multisample analytical centrifugation [C]// AUERNHAMMER G K, BUTT HJ, VOLLMER D. *Surface and Interfacial Forces-From Fundamentals to Applications*. Berlin: [s.n.], 2008: 66-73.
- [75] YAO Ming-fei, XIAO Hang, MCCLEMENTS D J. Delivery of Lipophilic bioactives: assembly, disassembly, and reassembly of lipid nanoparticles[J]. *Annual Review of Food Science & Technology*, 2014, 5(1): 53-81.
- [76] ZHANG Yi-xin, HE Sheng-hua, LI Yue-ming, et al. The physical stability and digestibility of β -carotene in oil-in-water sodium caseinate nanoemulsion[J]. *Journal of Food Measurement & Characterization*, 2016, 11(2): 864-871.
- [77] SALVIA-TRUJILLO L, MCCLEMENTS D J. Enhancement of lycopene bioaccessibility from tomato juice using excipient emulsions: Influence of lipid droplet size[J]. *Food Chemistry*, 2016, 210: 295-304.
- [78] DONSI F, ANNUNZIATA M, SESSA M, et al. Nanoencapsulation of essential oils to enhance their antimicrobial activity in foods[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2011, 44(9): 1 908-1 914.
- [79] MAJEED H, FEI Liu, HATEGEKIMANA J, et al. Bactericidal action mechanism of negatively charged food grade clove oil nanoemulsions[J]. *Food Chemistry*, 2015, 197(Pt A): 75-83.
- [80] GHOSH V, MUKHERJEE A, CHANDRASEKARAN N. Eugenol-loaded antimicrobial nanoemulsion preserves fruit juice against, microbial spoilage[J]. *Colloids Surf B Biointerfaces*, 2014, 114(1): 392-397.
- [81] KARTHIK P, ANANDHARAMAKRISHNAN C. Enhancing omega-3 fatty acids nanoemulsion stability and in-vitro digestibility through emulsifiers[J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 187: 92-105.
- [82] GALUS S, KADZINSKA J. Food applications of emulsion-based edible films and coatings[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2015, 45(2): 273-283.
- [83] SALVIA-TRUJILLO L, ROJAS-GRAU M A, SOLIVA-FORTUNY R, et al. Use of antimicrobial nanoemulsions as edible coatings: Impact on safety and quality attributes of fresh-cut Fuji apples[J]. *Postharvest Biology & Technology*, 2015, 105: 8-16.
- [84] RADI M, AKHAVAN-DARABI S, AKHAVAN H R, et al. The use of orange peel essential oil microemulsion and nanoemulsion in pectin-based coating to extend the shelf life of fresh-cut orange[J]. *Journal of Food Processing & Preservation*, 2017, 42(2): e13441.
- [85] ZAMBRANO-ZARAGOZA M L, GUTIÉRREZ-CORTEZ E, REAL A D, et al. Fresh-cut Red Delicious apples coating using tocopherol/mucilage nanoemulsion: Effect of coating on polyphenol oxidase and pectin methylesterase activities[J]. *Food Research International*, 2014, 62(8): 974-983.

(上接第 216 页)

- [31] 李晓川, 翟毓秀, 王联珠. 建立健全我国水产品可追溯体系的若干问题[J]. *农产品质量与安全*, 2006(4): 14-17.
- [32] 陈雷雷, 金淑芳, 李俊. 基于 RFID 的水产食品可追溯体系研究[J]. *农业科学研究*, 2009, 30(1): 51-54, 70.
- [33] 颜波, 石平, 黄广文. 基于 RFID 和 EPC 物联网的水产品供应链可追溯平台开发[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(15): 172-183.
- [34] 颜波, 石平. 基于物联网的水产养殖智能化监控系统[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(1): 259-265.
- [35] 夏俊, 凌培亮, 虞丽娟, 等. 水产品全产业链物联网追溯体系研究与实践[J]. *上海海洋大学学报*, 2015, 24(2): 303-313.
- [36] 李琳, 范体军. 基于 RFID 技术应用的鲜活农产品供应链决策研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2014, 34(4): 836-844.
- [37] 李彪, 蒋平安, 宁松瑞, 等. 基于 RFID 和二维码技术的新疆哈密瓜溯源系统[J]. *农机化研究*, 2014(8): 196-201.
- [38] 沈敏燕. 果蔬类农产品冷链物流信息溯源研究[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2017.
- [39] 蒲皎月, 张海辉. 基于 RFID 技术的中小型企业蔬菜溯源系统设计[J]. *农机化研究*, 2015(4): 207-210.
- [40] 刘世明, 陈建宏, 张宗平, 等. 基于 RFID 的供港蔬菜安全监管溯源系统[J]. *计算机系统应用*, 2014, 23(2): 42-47.
- [41] 江进. 基于 RFID 的茶叶产品质量安全溯源体系研究[J]. *现代计算机*, 2017(13): 59-62.
- [42] 何飞, 马纪丰, 梁浩, 等. 基于 RFID 技术的酒类溯源防伪系统研究与应用[J]. *现代电子技术*, 2015, 38(8): 99-102.
- [43] 刘鹤. 基于无线射频识别技术的冷冻冷藏食品物流仓储管理理系统[J]. *食品与机械*, 2016, 32(1): 121-124.