

杨书会, 王延圣, 王文亮, 等. 多糖乳液的制备、乳化特性的影响因素及其应用研究进展 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(14): 398-407. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080229

YANG Shuhui, WANG Yansheng, WANG Wenliang, et al. Research Progress in Preparation, Influencing Factors of Emulsifying Properties and Application of Polysaccharide Emulsion[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(14): 398-407. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080229

· 专题综述 ·

# 多糖乳液的制备、乳化特性的影响因素及其应用研究进展

杨书会<sup>1,2</sup>, 王延圣<sup>1</sup>, 王文亮<sup>1</sup>, 贾凤娟<sup>1</sup>, 李永生<sup>1</sup>, 侯福荣<sup>1,\*</sup>

(1. 山东省农业科学院农产品加工与营养研究所, 山东省农产品精深加工技术重点实验室,  
农业农村部新食品资源加工重点实验室, 山东济南 250100;  
2. 山东农业大学食品科学与工程学院, 山东泰安 271018)

**摘要:** 多糖作为一种天然高分子物质, 种类丰富且来源广泛, 具有良好的乳化、增稠等多种功能特性, 其制备的乳液在各加工领域以独特的优势展现出巨大的潜能, 具有广阔的应用前景。本文综述了多糖乳液的分类、形成机制以及多糖乳液的两种常用制备方法; 介绍了多糖的乳化机理及乳化特性, 包括多糖乳液的乳化活性和乳化稳定性、流变特性和稳定性, 并重点分析了影响多糖乳化特性的内部 (包括疏水基团的数量及分布、蛋白质残基、分子量等)、外部 (多糖浓度、pH、离子浓度等) 因素, 以实现通过调控多糖结构和环境因素改善多糖乳化性; 最后总结了目前多糖乳液在食品、化妆品、医药领域的应用和发展趋势, 旨在为拓宽多糖乳液应用领域提供理论依据和借鉴思路。

**关键词:** 多糖, 乳液, 乳化特性, 影响因素, 应用

中图分类号: TS201.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)14-0398-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080229



本文网刊:

## Research Progress in Preparation, Influencing Factors of Emulsifying Properties and Application of Polysaccharide Emulsion

YANG Shuhui<sup>1,2</sup>, WANG Yansheng<sup>1</sup>, WANG Wenliang<sup>1</sup>, JIA Fengjuan<sup>1</sup>, LI Yongsheng<sup>1</sup>, HOU Furong<sup>1,\*</sup>

(1. Institute of Agricultural Products Processing and Nutrition, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Agricultural Products Intensive Processing Technology of Shandong Province, Key Laboratory of Novel Food Resources Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Jinan 250100, China;  
2. College of Food Science and Engineerings, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China)

**Abstract:** Polysaccharides, as a kind of natural macromolecules, are rich in variety and sources. The excellent functional characteristics (such as emulsifying and thickening) has endowed the polysaccharide-stabilized emulsions with a broad application prospect in various processing fields with unique advantages. This paper reviews the classification formation mechanism of polysaccharide emulsion as well as two common preparation methods. The emulsifying mechanism of polysaccharides and the emulsifying property of polysaccharide emulsion are discussed, including emulsifying activity, emulsifying stability, rheological characteristics. In addition, the internal (including number and distribution of hydrophobic groups, protein residues, molecular weight and so on) and external (including polysaccharide concentration, pH, ionic concentration and so on) factors affecting the emulsifying characteristics are strengthened in order to improve the emulsifying properties of polysaccharides by regulating their structure and environmental factors. Finally, the application

收稿日期: 2023-08-22

基金项目: 山东省自然科学基金青年基金项目 (ZR2022QC239); 山东省自然科学基金面上项目 (ZR2022MC096); 山东省农业科学院农业科技创新工程 (CXGC2022E09, CXGC2022B07)。

作者简介: 杨书会 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬加工与贮藏, E-mail: jessicayang1998@163.com。

\* 通信作者: 侯福荣 (1991-), 女, 博士, 助理研究员, 研究方向: 多糖改性及其结构和功能评价, E-mail: houfurong2010@163.com。

and development trend of polysaccharide emulsion in food, cosmetics and medicine are summarized, aiming to provide theoretical basis and wide the application field of polysaccharide emulsion.

**Key words:** polysaccharides; emulsion; emulsifying properties; influence factor; application

多糖作为生物资源中最丰富的天然大分子之一,广泛存在于动物细胞膜、高等植物、细菌、真菌和海藻中,通常由至少十个单糖分子通过糖苷键连接在一起形成线性或支链分子,分子量从数千至数百万道尔顿<sup>[1-2]</sup>。多糖结构复杂,主链通常由单糖(包括半乳聚糖、葡聚糖、甘露聚糖等)或由两种或多种不同的单糖分子组成;支链是多糖形成立体网络结构的重要基础,通常每个单糖单元具有多个位点,能够形成一到多个糖苷键,通过多种多样连接方式形成各种线性和分支结构<sup>[3]</sup>。大部分天然多糖由于羟基、羧基等亲水基团的存在具有亲水性,但只有具有亲水性和疏水性结构特征的多糖才具有良好的乳化性,在保证其具有良好水溶性的前提下,疏水基团含量越高,多糖的乳化性也越好。某些天然来源的多糖,如阿拉伯胶、果胶、大豆可溶性多糖和羧甲基纤维素等,因其具有蛋白质、乙酰基和阿魏酸等疏水基团,使得它们成为构建食品乳液体系所需乳化剂的良好选择<sup>[4-6]</sup>。

乳化剂作为一类表面活性物质,具有亲水和疏水基团<sup>[7]</sup>,其发挥乳化作用的机理是一方面,它可以降低液滴的界面张力从而促进乳化过程中的液滴破裂<sup>[8]</sup>;另一方面,它可以增加连续相的粘度(甚至导致凝胶化),防止乳液液滴聚集。在保证其具有良好水溶性的前提下,疏水基团含量越高,多糖的乳化性也越好。某些天然来源的多糖,多糖作为乳化剂主要是由于:a. 增加乳液的粘度以防止液滴相分离;b. 促进油-水界面处亲水和疏水基团的吸附降低界面张力;c. 促进液滴表面发生空间/静电相互作用形成保护层<sup>[9]</sup>。天然多糖因具有增稠、胶凝、乳化等功能特性,现已广泛用于乳液的制备<sup>[10]</sup>。但目前关于多糖乳液的乳化机制仍未有统一定论,多糖的乳化特性及其影响因素也缺乏详细介绍,随着国内外关于多糖乳化性的研究日益增多,因此阐明多糖乳液的乳化机理、乳化特性及其影响因素是十分必要的。本文对多糖乳液的制备方法,多糖乳液的乳化机制、功能特性及影响多糖乳液乳化特性的内外部因素进行了综

述,并通过探讨多糖在不同乳液体系中的应用,旨在为开发天然多糖乳化剂、改善多糖乳化特性、拓宽其应用领域提供理论依据。

## 1 多糖乳液

乳液是由一种液体与另一种不相混溶的液体混合形成的分散体系,是近几十年来研究最多的体系之一,尤其是在食品、医药和化妆品领域<sup>[11]</sup>。作为一种多分散、热力学不稳定体系,乳化剂是维持乳液稳定性必不可少的一类物质。近年来,由于多糖广泛的可口性、安全性和低价性等优点,已将其作为稳定剂和乳化剂广泛用于乳液的制备过程中。

### 1.1 多糖乳液的分类

目前,多糖乳液在各个加工领域都有广泛的应用,按照其稳定机理主要分为水包油乳液、多重乳液、多层乳液、皮克林乳液和胶束<sup>[12]</sup>(如图 1)。

大部分多糖都具有高度亲水性,仅有少数多糖具有亲水亲油基团而具有乳化性,因此通常选择这类多糖作为乳化剂制备多糖乳液<sup>[13]</sup>。多糖溶于水形成多糖溶液,与油脂混合,在高速剪切力的作用下,油相和水相充分融合,多糖链在外部压力下发生不可逆的断裂,多糖链的降解有助于其在油-水界面的舒展,亲水基团暴露于水相,疏水基团朝向油相,因此所有或整个多糖分子都吸附在油-水界面<sup>[12,14]</sup>。当多糖浓度达到一定程度时,多糖分子包裹油相,生成不连续的乳滴或油滴,分散相为乳滴,连续相为多糖溶液,形成的乳液为水包油多糖乳液(如图 1A)<sup>[15]</sup>。多重多糖乳液(如图 1B)的分散相液滴中还包含着另外一种较小且互不相溶的液滴,是一种具有“两膜三相”结构的复杂非均相体系<sup>[12]</sup>,例如水包油包水乳液,由于液滴外层易被氧化会降解为单层乳液,可以使用生物聚合物纳米颗粒改善乳液的稳定性<sup>[16]</sup>。多层多糖乳液(如图 1C)是通过静电沉积过程产生的蛋白质-多糖乳液,其中分散在水性介质中的油滴被由表面活性剂或蛋白质和带电荷多糖组成的多层界面膜所包围<sup>[17]</sup>。多糖皮克林乳液(如图 1D)是微小的多糖固体

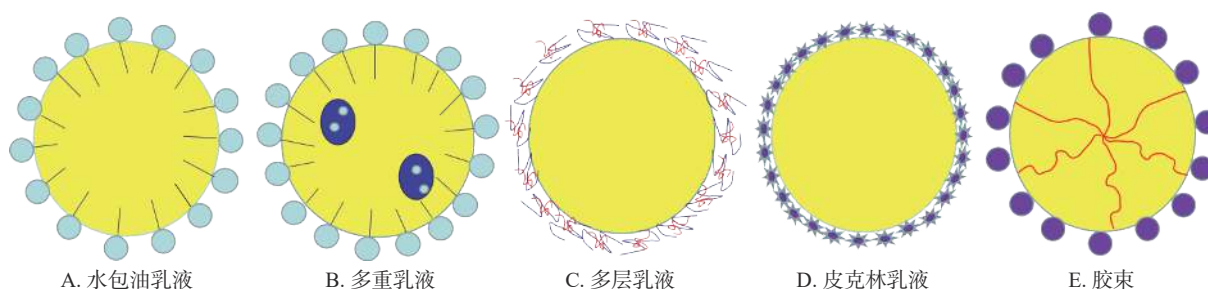


图 1 多糖稳定的不同类型乳液的示意图

Fig.1 Schematic diagram of different types of emulsions stabilized by polysaccharides

颗粒吸附在油-水界面上,这些颗粒在液滴表面进一步重排,形成单层或多层致密的固体界面膜,该膜可为乳液液滴提供强大的空间屏障和静电保护作用,并防止液滴聚集,确保皮克林乳液的长期稳定性<sup>[18]</sup>。多糖胶束(如图 1E)是两亲性的多糖在水相中特定温度下达到一定浓度时自发组成的纳米聚集体,其内壳表现疏水、外壳表现亲水特征<sup>[19]</sup>。

## 1.2 多糖乳液的制备

多糖乳液的主要制备方法为机械乳化,通常通过混合、剪切和均质等产生强烈的机械力破坏油相和水相。制备传统乳液的方法有干、湿胶法和机械法;制备纳米乳液主要分为高能乳化法和低能乳化法。常见的高能乳化法包括高压均质法、高速均质法、超声破碎法、微射流法等,其中均质法较常见;低能乳化有自发乳化、反相法、水凝胶法等<sup>[20]</sup>。此外,通常通过层层组装静电沉积技术制备多层乳液,如多糖和蛋白质发生静电沉积后制备多层乳液<sup>[17]</sup>;利用一次均质和二次均质两步乳化法制备(水包油包水或油包水包油)多重乳液<sup>[11]</sup>。目前常用的多糖乳液制备方法是均质法和超声波处理法<sup>[21]</sup>。

**1.2.1 均质法** 均质法制备多糖乳液主要是高压均质法和高速均质法<sup>[21]</sup>。高压均质法通常是利用高压均质机制备多糖乳液<sup>[22]</sup>。在较高的压力下,油相和水相通过均质阀极小的缝隙,并且在强湍流、碰撞和高速水力剪切等作用下,使原来颗粒粗大、粒径大小不均一的油相和水相变得均匀细微,这种方法需要很高的温度和能量。乳液粒径的大小与均质机的压力及循环次数有关,压力越高,循环次数越多,粒径就越小。通常,乳液经过数十次的均质乳化后,乳滴大小才开始稳定,制备的纳米乳液粒径极低( $\leq 1\text{ nm}$ )<sup>[20]</sup>。高速均质法是利用定子和转子之间的高速运动产生强大的剪切力,同时借助强大的空化作用使物料颗粒均质细化<sup>[23]</sup>。李松南<sup>[24]</sup>分别将天然淀粉和辛烯基琥珀酸淀粉作为皮克林乳液的乳化剂,利用高速剪切均质机以 20000 r/min 高速剪切 2 min 制得淀粉皮克林乳液。Lu 等<sup>[10]</sup>利用魔芋多糖、乳清蛋白、葵花油和  $\beta$ -胡萝卜素,先用高速分散机均质得到粗乳液,再用高压均质机在 50 MPa 压力下重复均质 3 次,最后制得载有  $\beta$ -胡萝卜素的魔芋多糖纳米乳液。均质法处理时间短,使用方便,在实验室和工业规模上都得到了广泛应用,但在均质过程中会导致颗粒乳化剂的变形甚至破坏,造成乳液稳定性变差。

**1.2.2 超声波乳化法** 目前,超声波处理法作为一种绿色技术已经普遍应用于各种物理和化学过程中(如:提取、分散、乳化、均质等)。超声波通过液体介质产生空化作用,局部产生的高能量和高速剪切力将油滴分散成均匀细小的颗粒,有助于形成均一稳定的乳液。超声还可以降低乳化过程中多糖的分子量和粘度,这些变化可以加速多糖分子在油-水界面的吸附作用,降低界面张力,从而通过空间排斥增加乳

液的稳定性<sup>[25-26]</sup>。现已有研究表明高功率超声波可以有效地促进乳化过程,如 Zhang 等<sup>[27]</sup>制备的壳聚糖油包水乳液,先利用机械搅拌得到粗乳液,再利用 950 W 的超声波功率处理获得了亚微米或纳米级乳液;李玉洁<sup>[21]</sup>利用高速均质机将椰子油和多糖溶液进行均匀混合,再利用超声波处理乳液,制得椰子油水包油微米乳液。超声乳化法具有能耗低,制备的乳液粒径小、乳液稳定性好等优点,但目前暂不能实现大批量生产,因为只有在超声发射器附近才能进行有效乳化。

**1.2.3 其他乳化方法** 除均质法和超声波乳化法外,膜乳化和微射流法也是常用的乳化技术<sup>[22]</sup>。膜乳化法中,乳液液滴主要是通过将分散相或预混合乳液通过微孔膜压制形成连续相而产生,分别称为直接膜乳化和预混合膜乳化。膜乳化法具有能耗低、液滴尺寸和液滴分布可控等诸多优点,但生产率相对较低,且该技术较为新颖,目前运用较少。微射流法是利用高压微射流均质机将不相溶的油相和水相通过微通道混合再进行均质,得到纳米乳液。微射流法已经在实验室规模上进行了广泛的研究,但由于大规模生产问题,还未在实际生产中应用。此外,除了这些高能乳化法,还有一些低能乳化法,如自发乳化法,相转变温度法,表面活性剂相乳化法等,利用系统积聚的能量产生超小液滴,虽然低能乳化法可以忽略设备的成本,但是却要用大量的表面活性剂同时也要受到油相类型的限制。

## 2 多糖的乳化机理及多糖乳液的功能特性

### 2.1 多糖的乳化机理

一般来说,可以作为乳化剂的多糖必须符合以下条件:a. 能在油水界面吸附;b. 可以阻止乳液液滴立即恢复聚集<sup>[28]</sup>。

多糖的表面活性是其制备乳液的基本条件,由亲水性单糖组成的多糖,由于表面活性低而不适合制备乳液;但也有部分多糖虽然疏水性较差,很难吸附在油水界面上,但它们可以包裹在液滴表面使其具有稳定乳液的功能。而许多天然或改性多糖都具有疏水基团附着在其亲水链上使其具有两亲性,这些疏水基团包括共价键或物理连接的酚基团、烃类或蛋白质等。例如,甜菜果胶具有酚基团(阿魏酸)和附着于多糖骨架的蛋白质部分,而变性淀粉具有共价连接到淀粉分子上的辛烯基琥珀酸基团<sup>[13,29-30]</sup>。乳化时疏水基团优先吸附至油-水界面,降低油-水界面张力,而亲水基团则吸附水分子在乳滴周围形成一层具有一定机械强度的水化膜,使乳液具有一定的乳化稳定性<sup>[15]</sup>。有些多糖具有与其共价键结合的多肽(糖蛋白)或脂质(糖脂),也会影响它们的乳化能力,疏水性多肽链或基团可以吸附在油滴表面,同时亲水性阴离子多糖链可以提供空间和静电斥力稳定乳液<sup>[12]</sup>。许多天然高分子多糖由于具有一定的分子极性,以范德华力的形式与油滴微表面结合,防止液滴聚合,从

而提高了乳化体系的乳化能力和稳定性,且多糖具有一定的黏度,有增稠或形成三维凝胶状液滴网络的能力,使得油滴分子之间的布朗运动变慢而阻碍自动聚合,可有效提高乳液的乳化性<sup>[31]</sup>。

2.2 多糖乳液的功能特性

2.2.1 多糖乳液的乳化活性和乳化稳定性 多糖乳化性能的评价指标主要由两部分组成: 乳化活性和乳化稳定性。乳化活性是指在多糖乳液中被连续相包裹的油相体积分数, 主要归因于多糖中的疏水基团, 如蛋白质部分<sup>[32]</sup>, 随着对多糖乳化机理的深入研究发现, 多糖的乳化活性并不完全取决于多糖中蛋白质的绝对含量, 而是取决于在油相中有效吸收的蛋白质的量<sup>[6]</sup>。乳化稳定性是指多糖乳液在一定时间的相对稳定性, 这归因于多糖链部分, 多糖链通过空间位阻和静电排斥限制油滴聚集和聚结, 有助于提高乳液的乳化稳定性<sup>[32]</sup>。此外, 有部分多糖能够形成牢固的凝胶网络状结构和保护层, 可以阻止乳液液滴的聚集, 因此, 乳液中的油滴大小能够在一段时间后保持不变<sup>[33]</sup>。Hou 等<sup>[34]</sup> 研究发现, 随着银耳多糖浓度的不断增加, 银耳多糖乳液的乳化活性和乳化稳定性均呈上升趋势, 且在银耳多糖浓度为 0.8% 时, 乳化性达到最大值, 乳化稳定性最好; 但随着银耳多糖浓度的进一步增加, 乳化性和乳化稳定性则呈缓慢下降趋势。李玉洁<sup>[21]</sup> 利用 270 W 超声制备的多糖乳液与 30 MPa 和 50 MPa 高压均质制备的乳液相比, 超声制备的乳液乳化活性与乳化稳定性相对较高, 乳液不易聚结, 货架期更长。

2.2.2 多糖乳液的流变特性 流变特性是物体在外力作用下的应变和应力之间的定量关系, 广泛用于表征乳液的特性。多糖乳液流变特性受多种因素影响, 不仅与多糖的分子量、分子结构、官能团种类、来源和提取方法有关, 还与环境因素有关, 包括多糖浓度、外界温度、酸碱度、金属离子浓度等<sup>[35]</sup>。多糖本身具有粘度, 因而其可以明显改变乳液的流变行为<sup>[36]</sup>。当多糖浓度不断增加时, 多糖分子之间的间距减小, 分子间相互作用增强, 多糖与水分子之间可以通过氢键形成凝胶状结构<sup>[21]</sup>, 使乳液的表观粘度随之升高, 乳液系统的流动减少, 从而使乳液更加稳定<sup>[37]</sup>。Wang 等<sup>[38]</sup> 分析了用不同分子量的银耳多糖

对其流变特性的影响, 结果表明, 分子量越大, 应对形变的应力越大, 多糖分子间缠结越紧密, 形变越小, 流体的拟塑性也越好。另外, Luo 等<sup>[39]</sup> 研究表明, 乳液的粘度随柑橘果胶浓度的增加而增加, 随着剪切速率的增加而降低, 且所有样品均表现为剪切稀化行为, 高浓度柑橘果胶形成了紧密的网络结构, 显著提高了乳液的稠度及稳定性。

2.2.3 多糖乳液的稳定性 乳液是热力学不稳定的胶体分散体, 随着时间的推移, 乳液会通过各种不稳定途径分解, 包括乳脂化、沉淀、絮凝、聚结和奥氏熟化<sup>[30]</sup>。多糖作为乳化剂在乳液中的作用主要是乳化和维持乳液稳定两方面。

多糖稳定乳液的机制主要是通过静电相互作用和空间相互作用。空间相互作用与乳液体系的界面性质密切相关<sup>[13]</sup>。在乳液形成过程中, 乳化剂吸附在液滴的油水界面上, 形成稳定的乳液, 不同类型的乳化剂会产生不同的界面层厚度, 对液滴之间的空间相互作用强度产生很大影响, 当乳化剂形成的界面层具有足够的厚度时, 乳液通过强大的空间排斥力而稳定。当液滴的界面强度较弱时, 静电相互作用将对乳液的稳定性起关键作用, 作用的强度与液滴的电荷密度和离子强度有关; 一旦静电相互作用减弱, 乳液可能变得不稳定, 聚结和絮凝是乳液失稳的主要机制<sup>[40]</sup>。

影响乳液稳定性的因素主要有粒径、多糖结构、乳液液滴分布和环境条件, 以及乳化剂浓度等。如粒径影响乳液液滴的聚集速度, 粒径越小, 聚集速度越慢, 乳液越稳定<sup>[11]</sup>。此外, 取代基也会影响多糖乳液的稳定性, 例如低浓度的高酰基结冷胶(0.05%~0.2%, w/w)能够稳定水包油乳液两个月, 而低酰基结冷胶不能形成稳定的乳液<sup>[41]</sup>。多糖还可以通过形成多糖-蛋白质双层界面改变乳液的界面、流变学或凝胶性质, 以提高乳液的稳定性<sup>[10,42-43]</sup>。

3 影响多糖乳化特性的因素

多糖的乳化性能受多种因素影响, 其中, 内部因素包括乙酰基和甲氧基等疏水基团、蛋白质残基、分子量等(如表 1 所示); 外部因素主要有多糖浓度、温度、pH、离子浓度等(如表 2 所示)。

表 1 多糖的内因素对乳化特性的影响

Table 1 Effects of internal factors on emulsifying properties of polysaccharides

| 分类      | 影响因素              | 影响途径                              | 乳化特性                                      | 参考文献                |
|---------|-------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------|---------------------|
| 多糖的内部因素 | 疏水基团的数量及分布        | 多糖链上的疏水基团可以作为锚, 吸附到油-水界面          | 多糖具有足够疏水基团, 在很大程度上可以决定其乳化性, 疏水基团增加, 乳化性增加 | [9,44-51]           |
|         | 有无共价或非共价键连接的蛋白质残基 | 疏水的蛋白质组分负责水-胶体乳化剂的表面活性, 在油-水界面充当锚 | 蛋白质片断可以提高乳化性                              | [4,52-56]           |
|         | 分子量               | 影响乳液的黏度、界面活性、亲疏水基团的数量             | 分子量增加, 空间位阻随之增加, 阻止液滴聚集、絮凝, 乳化性得到改善       | [13-14,48-49,57-59] |
|         | 电荷密度              | 影响乳滴之间的静电斥力和空间位阻                  | 电荷越多, 产生的空间位阻和斥力就越强, 乳化性越好                | [56,60]             |
|         | 结构                | 影响界面吸附率、吸附层厚度、油滴尺寸分布以及网络结构的致密性    | 例如: 与粒状OSA淀粉相比, 无定形OSA淀粉具有更好的乳化剂性能        | [3,12,50,58]        |

表 2 多糖的外部因素对乳化特性的影响

Table 2 Effects of external factors on emulsifying properties of polysaccharides

| 分类      | 影响因素    | 影响途径                            | 乳化特性                                             | 参考文献             |
|---------|---------|---------------------------------|--------------------------------------------------|------------------|
| 多糖的外部因素 | 多糖浓度    | 影响油-水相之间的界面张力                   | 多糖浓度饱和时,可有效降低油-水相的界面张力,乳化性增强                     | [13,44,61]       |
|         | pH      | 影响多糖的分子形态、电荷密度及液滴之间的相互作用        | pH在3~9乳化性相对稳定                                    | [13,25,28,44,62] |
|         | 离子类型和浓度 | 改变分子结构及分子之间的作用力和液滴间的静电斥力        | 离子浓度和类型可能会导致静电屏蔽、离子结合、多糖重排和多糖解吸,总之高浓度的离子会引起乳化性降低 | [28,61-64]       |
|         | 温度      | 影响多糖分子间的布朗运动                    | 通常高温会造成多糖乳化性降低                                   | [15,62-63]       |
|         | 油相体积    | 影响多糖在乳液中的吸附量                    | 降低多糖乳液的乳化稳定性                                     | [66]             |
|         | 乳化方式    | 可能会改变多糖的性质,例如,超声乳化过程中降低多糖分子量和粘度 | 降低界面张力,从而通过空间排斥增强乳液的稳定性                          | [21,25-26]       |

3.1 多糖结构对其乳化特性的影响

3.1.1 乙酰基和甲氧基等疏水基团的影响 许多天然多糖及其衍生物具有甲氧基、乙酰基等疏水基团,可以吸附在油滴表面,在很大程度上决定其乳化性质<sup>[9,44]</sup>。例如,多糖链上的乙酰基可以作为锚,吸附到油-水界面上,而碳水化合物部分则通过空间排斥有助于提高乳液稳定性,并通过形成水合层防止乳液液滴聚集<sup>[45]</sup>。据报道,甜菜果胶比柑橘果胶具有更好的表面活性,可能是由于乙酰基和蛋白质含量较高<sup>[46-47]</sup>。研究发现从云杉木屑中获得的云杉半乳糖甘露聚糖由于其较高的乙酰化度被认为是良好的天然乳化剂<sup>[48]</sup>。除乙酰化外,甲基酯化程度也对多糖的乳化能力具有一定的影响<sup>[49-50]</sup>,如刘敬然<sup>[51]</sup>的实验表明,超高甲氧基柑橘果胶(高甲酯基团含量约 91%)的表面活性优于原料柑橘果胶(高甲酯基团含量约 63%)和甜菜果胶(高甲酯基团含量约 56%)。

3.1.2 蛋白质残基的影响 在多糖的分离纯化过程中,很难完全去除以共价或非共价键结合的蛋白质,而这些少量蛋白质对多糖的乳化性能起着很大的作用<sup>[52]</sup>。疏水的蛋白质组分负责多糖乳化剂的表面活性,在油-水界面上充当锚,而亲水的多糖链形成亲水聚合物涂层,在长期存储期间提供有效的空间稳定性。如阿拉伯胶的蛋白质部分约占总糖含量的 2%,蛋白质与多糖通过共价键连接,形成阿拉伯半乳聚糖蛋白(AGP),AGP 具有盘绕结构,可在多个位置穿透油相,从而为界面提供完美的锚,其含量与阿拉伯胶的界面性质密切相关,较高的 AGP 含量在一定程度上表现出更好的乳化能力<sup>[48,53]</sup>。在另一项研究中发现,阿魏胶与阿拉伯胶单糖组成相似,但由于蛋白质含量较高,其乳化能力和乳液的稳定性远高于阿拉伯胶<sup>[54]</sup>。类似地,甜菜果胶、大豆可溶性多糖的乳化活性也与多糖连接的蛋白质部分有关<sup>[55]</sup>;另外还有部分结构特殊的多糖,如香豆胶,虽然不含结合蛋白,但仍然具有较好的乳化性能,这可能是由于其含有少量的游离蛋白<sup>[56]</sup>。

3.1.3 分子量的影响 一般认为,多糖表面活性与其粘度和分子量有关<sup>[13,57]</sup>,由于分子量影响多糖乳液的粘度,而乳化性随粘度的增加而改善,因此分子量是

影响多糖乳化性的重要因素之一,但目前分子量对多糖乳化特性的影响机制并不是很明确。油-水界面通常存在相对较高的界面张力,乳化剂通过在界面处吸附并屏蔽油水分子之间不利的相互作用来降低界面张力,多糖降低界面张力的能力在很大程度上取决于其分子特性,例如其分子量。随着多糖分子量增加,其空间位阻增加,从而阻止液滴的聚集,乳化性提高<sup>[49]</sup>。分子量的大小还决定着多糖分子的移动速度<sup>[58]</sup>,其分子量越低,吸附到油水界面的速度越快,乳化活力越高<sup>[48]</sup>。然而韩晴等<sup>[59]</sup>和谭诗敏<sup>[14]</sup>发现,高分子量的大豆种皮多糖和香水莲花多糖比低分子量的多糖表现出更优异的乳化活力与乳化稳定性能。一方面可能是由于多糖降解后,分子量变小,蛋白质含量也降低;另一方面,可能是由于高分子量多糖具有高支链结构,其支链与少量蛋白质共价结合,从而提高了多糖的乳化性能。

3.2 影响多糖乳化特性的外部因素

3.2.1 多糖浓度对多糖乳化稳定性的影响 多糖浓度对乳液的稳定性有较大的影响。通常,在多糖浓度过低的情况下,界面张力不会发生明显变化,在吸附时随着浓度的增加,界面张力急剧下降,当界面被多糖饱和时,界面张力达到相对恒定的水平<sup>[13]</sup>;当多糖浓度较低时,吸附在油滴表面的多糖无法完全覆盖油滴的表面,油滴聚集长大导致乳液易发生架桥和絮凝;在中等多糖浓度下,多糖分子完全覆盖液滴表面,由于强大的静电排斥和空间斥力,液滴变得稳定;而如果多糖浓度过高,未吸附的多糖分子会在液滴之间产生强大的渗透吸引力,扰乱表面活性成分在界面膜上的吸附和重排,导致乳液的耗散和絮凝<sup>[61]</sup>。赵玲玲<sup>[44]</sup>发现,随着多糖浓度的增加,并逐渐达到饱和时,可有效降低油相和水相之间的张力,多糖浓度继续增加,多糖分子间的相互作用力增强,油结合能力降低,导致乳化活力下降。因此可以得出,必须确保有足够的多糖分子覆盖液滴,且游离的多糖分子在连续相中几乎不存在,同时多糖浓度不可过高,才可使多糖乳液乳化效果较好。

3.2.2 温度对多糖乳化稳定性的影响 温度不仅会影响其在储存过程中液滴碰撞,增大乳液粒径,还会

对布朗运动产生影响,进而影响其液相分离速率。通常,高温对多糖乳液的稳定性会产生不利的影响。多糖乳液形成以后,液滴表面的多糖分子始终处于吸附和解吸附的动态平衡中,随着温度的升高,多糖分子的布朗运动和乳液的热运动增加,多糖分子在油滴表面的解吸作用增强,乳滴之间的碰撞和凝聚加快,使界面膜容易遭到破裂,发生絮凝,降低多糖的乳化作用。另外,在高温下,多糖黏度降低,液滴之间的碰撞和融合减小,乳液乳化稳定性降低<sup>[15,62]</sup>。但是不同的多糖,温度对其乳化性的影响也不同,例如:黄晓德等<sup>[63]</sup>发现,银耳多糖在 40~60 ℃ 下有较好的稳定性,超过 60 ℃ 时乳化稳定性会急剧下降,这可能是由于高温改变了银耳多糖的分子结构,造成分子聚合度降低,多糖粘度减小,难以形成和维持乳化体系。而杨雷等<sup>[62]</sup>则发现阿拉伯胶乳液的乳化稳定性在 30~70 ℃ 基本不变,在 80 ℃ 时粒径减小,说明在此温度下阿拉伯胶的乳化稳定性最高。

**3.2.3 pH 对多糖乳化稳定性的影响** 通常, pH 会影响乳液乳化活性和乳化稳定性<sup>[32]</sup>。由于阴离子基团(如羧基、硫酸盐或磷酸盐基团)的存在,大多数食品级两亲性多糖具有负电荷(如阿拉伯树胶、变性淀粉和甜菜果胶)<sup>[13]</sup>,当多糖发生乳化作用时,调节 pH 可以中和多糖自身的电荷或者改变其分子构象<sup>[44]</sup>,通过液滴之间的相互作用改变液滴的粒径大小、界面的聚集程度及乳液的粘度,从而影响多糖乳化稳定性<sup>[62]</sup>。Hou 等<sup>[28]</sup>发现,当苹果多糖乳液在 pH 为 2.0 和 4.0 时,吸附在乳滴表面的多糖分子很少解离,具有较为紧密的构象,这有利于防止乳液液滴聚结;当乳液 pH 为 6.0 和 8.0 时,乳液的粘度降低,多糖分子在高 pH 下具有更松散的构象;另外,在高 pH 下,多糖中的羧基更容易解离,导致分子内排斥增加,削弱液滴表面水化膜的强度。因此,在高 pH 下,乳液液滴变得不稳定,容易合并成较大的液滴。研究发现,多糖稳定的乳液在较宽的 pH 范围(3~9)内相对稳定<sup>[25]</sup>。

**3.2.4 离子浓度和类型对多糖乳化稳定性的影响** 多项研究表明,多糖的分子结构是其表现出良好乳化性能的重要因素之一,而分子结构通常在离子存在下发生变化<sup>[62]</sup>。连续相中的离子浓度对乳液的稳定性有很大影响,在不同的离子浓度下,多糖的聚集度导致乳液的粒径和微观结构发生变化,从而影响多糖的乳化稳定性<sup>[64]</sup>。Niu 等<sup>[65]</sup>实验中,随着 Na<sup>+</sup>浓度的升高,在油-水界面上吸附膜的界面张力减小,液滴变得不稳定,无法聚集形成乳液,这主要是由于 NaCl 的添加使油滴之间的静电排斥减少(即静电屏蔽效应)。此外,高浓度盐离子的存在可能会削弱液滴表面蛋白质和多糖分子之间的静电相互作用,导致一些多糖分子附着到多个液滴上并促进架桥絮凝。这种现象可能是多种作用的结果,包括静电屏蔽、离子结合、多糖重排和多糖解吸<sup>[61]</sup>。另外,Shao 等<sup>[64]</sup>

研究表明,连续相的离子强度对乳液稳定性有很大影响,随着离子强度的不同,乳化剂的聚集程度会导致乳液的粒径、微观结构和稳定性发生变化,不同的金属离子会导致乳液粒径发生明显的变化,而且多价金属离子对乳化稳定性的影响大于低价金属离子。例如, Hou 等<sup>[28]</sup>研究发现与 Na<sup>+</sup>相比, Ca<sup>2+</sup>会显著增加苹果多糖乳液的粘度。通常, Na<sup>+</sup>通过折叠侧链对多糖链具有更大的屏蔽作用,然而, Ca<sup>2+</sup>可通过与多糖链中游离的羧酸基团和葡萄糖醛酸基团特异性结合,促进多糖分子之间交联网络的形成,增加乳液粘度,从而提高乳液的乳化稳定性。

## 4 多糖乳液在各领域的应用

多糖由于其具有显著的增稠、乳化、胶凝等功能特性,其制备的乳液在食品、化妆品、医药等领域被广泛使用<sup>[67]</sup>。

### 4.1 多糖乳液在食品中的应用

天然多糖因其无嗅、无色、低能值和易消化等特性,将其作为乳化剂在食品加工中广泛使用,如蘸料、调味品、甜点等<sup>[68]</sup>,它主要通过增加连续相的粘度,改变质地属性和流动性,进而稳定乳液和悬浮液,提高产品的食用质量<sup>[69]</sup>。将食品级的天然高分子多糖(如果胶、壳聚糖和纤维素)作为乳化剂,构建绿色安全的高内相乳液(高浓度的水包油乳液),在食品加工领域引起了广泛的关注和应用,例如陈凯<sup>[69]</sup>利用玉米醇溶蛋白和果胶成功构建了稳定的高内相乳液,用来替代植物氢化油。此外,现已有不少的研究专家通过制备多重乳液、皮克林乳液和纳米乳液等新型乳液作为脂肪替代物来模拟脂肪的质地和口感,例如:沙拉酱、香肠、冰淇淋等,这种脂肪替代体系的设计不仅能够降低热量还能避免引起与脂肪相关的健康问题。例如, Park 等<sup>[70]</sup>利用多种改性的竹芋淀粉来代替蛋黄酱中 30% 和 50% 的脂肪,尽管结果显示淀粉蛋黄酱的屈服应力低于全脂蛋黄酱,但淀粉蛋黄酱的乳液稳定性更高,同时表现出较好的粘弹性。Kanal 等<sup>[71]</sup>选择海藻酸钠来作为脂肪替代品制备低脂切达奶酪,脂肪含量可减少高达 91%,并且研究结果表明,添加海藻酸钠的低脂奶酪显著改善了低脂奶酪的质地、微观结构和颜色。Yang 等<sup>[72]</sup>使用金针菇多糖与棕榈油制备的皮克林乳液作为脂肪替代品,来代替猪肉乳化香肠中的 5%、10%、15%、20%、25%、30% 和 37% 的脂肪,研究结果表明,当脂肪替代含量少于 20% 时,乳液可显著改变香肠的质地特征,提高香肠的弹性和粘性,并明显降低硬度和韧性,可作为一种脂肪替代品。Liu 等<sup>[73]</sup>比较了两种类型的多糖,柔性多糖(刺槐豆胶、瓜尔胶)和刚性多糖(黄原胶、卡拉胶),将其分别添加到冰淇淋里代替部分脂肪,研究结果显示,与刚性多糖相比柔性多糖剪切稀化程度较低,表现出更像液体的粘弹性行为,根据感官评价,在口感上含有柔性多糖的冰淇淋更接近全脂冰淇淋,而含有刚性多糖的冰淇淋更接近低脂冰淇淋。

淋,最终得出柔性多糖比刚性多糖更适合作为脂肪替代品来改善低脂冰淇淋的感官性能。此外,丁梦真<sup>[17]</sup>通过制备负载鱼油的明胶传统乳液、皮克林乳液以及多层乳液,发现可将其在饮品、软糖、奶酪中应用。

## 4.2 多糖乳液在化妆品中的应用

许多天然多糖具备补水、保湿、美白、抗氧化等优良的化妆品特性<sup>[14]</sup>。乳化剂是化妆品中不可或缺的添加剂,微量的有效成分通过乳化剂制备成乳液并将其包埋,不仅可以增强化妆品的使用效果,而且使化妆品在肤感和外观上都有很大的改变<sup>[74]</sup>。天然多糖添加到化妆品中,与常用的化妆品成分配合良好,刺激性、排他性较低,能保证对人体皮肤具有高度亲和性,使用安全、作用温和、效果明显、对皮肤无副作用。潘永宽<sup>[75]</sup>通过多次对家兔进行皮肤刺激性实验,连续施用 14 d 含质量分数 3% 荔枝核多糖产品,家兔皮肤均未出现红斑或肿胀现象,说明使用该浓度下的荔枝核多糖安全性良好,无刺激性。银耳多糖分子结构中含特有的葡甘聚糖,具有保湿与成膜的效果,根据曹铭等<sup>[76]</sup>对人体肌肤的实验研究,发现添加 0.1% 的银耳多糖即可修复皮肤屏障,同时为肌肤补充水分,因此,将银耳多糖作为乳化剂制成的乳液应用到防晒乳、面霜等化妆品中,不仅可以具有保湿功效还能修复皮肤。李松南<sup>[24]</sup>在防晒霜配方中使用改性淀粉基皮克林乳液进行光防护研究,结果表明,淀粉基皮克林乳液配方产品可以减少紫外线对皮肤的伤害。目前,已有很多国际大牌化妆品中将天然多糖作为乳化剂(如银耳多糖、阿拉伯胶、海藻酸钠等)添加到乳液面霜中。现在,越来越多的研究针对天然多糖的乳化特性进行了深入研究,同时,绿色自然的化妆品也越来越受到消费者的喜爱,在这种趋势下,天然多糖类化妆品必然会有强大的市场竞争力。

## 4.3 多糖乳液在医药中的应用

不同来源、不同结构特征的多糖具有不同的生物活性,如免疫活性、抗菌活性、抗炎活性和降血糖活性,为医药领域提供了丰富的资源<sup>[77]</sup>。多糖在医药中的应用主要分为两类,一是利用多糖的功能性质制备药物材料,例如,朱峻霄等<sup>[2]</sup>利用白及多糖与聚赖氨酸交联制备成水凝胶,通过人体实验发现该凝胶具有良好的抗炎活性及促进伤口愈合的功效;二是,利用多糖的生物活性制备药物,如茯苓多糖口服液用来治疗癌症、肝炎等多种疾病<sup>[78]</sup>。近年来,乳液体系因其可作为难溶性药物的递送体系且能够控制血液系统和胃肠道中生物活性分子的释放等特性,其应用已从食品、化妆品延伸到药物输送和医药制剂的各个领域<sup>[79]</sup>。例如,Shah 等<sup>[80]</sup>利用壳聚糖三磷酸纳米粒子制备的负载了姜黄素的稳定皮克林乳液,在无光照 24 h 后,仅约 14% 的姜黄素发生了降解。Ngwabebhoh 等<sup>[79]</sup>利用胺化纳米纤维素制备的负载了姜黄素和香豆素的皮克林纳米乳液可以实现姜黄

素和香豆素长时间的可持续释放,并且还发现,姜黄素和香豆素负载的皮克林乳液可以作为抗菌和抗癌靶点药物的有效递送体系。总的来说,目前用多糖制备的皮克林乳液已经在口服、注射、药物递送等方面展现了优良的应用潜力。

## 5 结论

多糖作为一种天然高分子聚合物,结构复杂,具有不同的乳化能力,因此,了解多糖乳液的形成机制对于在实际加工工业中选择合适有效的多糖乳化剂具有重要意义。本文综述了多糖乳液的制备方法、功能特性,以及影响多糖乳液乳化稳定性的内外部因素,并对其在食品等领域中的应用进行了深入的分析与探讨,以为多糖乳液拓宽应用领域提供理论依据。尽管目前多糖乳液已在食品、化妆品、医药等领域展现了巨大潜能,但还有很多空白与不足需要填补与完善,对多糖提高乳液稳定性机理的研究还不够深入。因此,在未来发展中还应该继续深入研究多糖的乳化机理,进一步提高多糖稳定乳液的机制;另外由于多糖是长链结构,在乳液中的构象较为复杂,给相关研究带来不便,今后应重视探索合适的方法来研究多糖在乳液中的构象,这也将有助于多糖提高乳液稳定性的能力。还应对现有制备多糖乳液方法进行改进优化、对新兴的制备方法进行探究、对影响多糖乳化特性的因素研究更加细化,进一步探索多糖乳液的应用领域,拓宽使用范围。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 参考文献

- [1] BILAL M, GUL I, BASHARAT A, et al. Polysaccharides-based bio-nanostructures and their potential food applications[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 176: 540–557.
- [2] 朱峻霄, 林亚蒙, 杨野, 等. 白及多糖在生物医药材料领域中的应用研究进展[J]. *中药材*, 2018, 41(4): 1011–1014. [ZHU J X, LIN Y M, YANG Y, etc. Research progress on the application of polysaccharides in the field of biopharmaceutical materials[J]. *Traditional Chinese Medicine*, 2018, 41(4): 1011–1014.]
- [3] 杨夏. 玉米须多糖的降血脂活性及纳米囊泡研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2018. [YANG X. Study on the hypolipidemic activity and nano-vesicles development of corn silk polysaccharides[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018.]
- [4] WANG J Q, CHEN S P, NIE S P, et al. Structural characterization and chain conformation of water-soluble  $\beta$ -glucan from wild cordyceps sinensis[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(45): 12520–12527.
- [5] 王善勇, 祁海松, 项舟洋. 两性海藻多糖在乳化和分散中应用的研究进展[J]. *生物质化学工程*, 2022, 56(1): 37–46. [WANG S Y, QI H S, XIANG Z Y. Research progress on the application of amphiphilic algal polysaccharides in emulsification and dispersion[J]. *Biomass Chemical Engineering*, 2022, 56(1): 37–46.]
- [6] AI C, ZHAO C G, GUO X M, et al. Physicochemical proper-

- ties of whey protein isolate and alkaline soluble polysaccharide from sugar beet pulp conjugates formed by Maillard reaction and genipin crosslinking reaction: A comparison study[J]. *Food Chemistry*, 2022, 14: 10038.
- [7] 李文强, 薛玉清, 张妍, 等. 不同食品乳化剂加工耐受性研究[J]. *中国食品添加剂*, 2022, 33(10): 181–187. [LI W Q, XUE Y Q, ZHANG Y, et al. Study on the processing tolerance of different food emulsifiers[J]. *China Food Additives*, 2022, 33(10): 181–187.]
- [8] BERTON-CARABIN C C, SAGIS L, SCHROËN K. Formation, structure, and functionality of interfacial layers in food emulsions[J]. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2018, 9(1): 551–587.
- [9] 唐凌云. 沙蒿多糖流变学特性及乳化性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014. [TANG L Y. Research of the rheological and emulsification properties of *artemisia sphaerocephala* krasch polysaccharide[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014.]
- [10] LU W, ZHENG B D, MIAO S. Improved emulsion stability and modified nutrient release by structuring O/W emulsions using konjac glucomannan[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 81: 120–128.
- [11] 史静兰. 青砖茶多糖化学组成及其乳化特性研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2021. [SHI J L. Study on the chemical composition and emulsifying properties of polysaccharides from *Chin-brick tea*[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2021.]
- [12] ZHANG R Y, BELWAL T, LI L. Recent advances in polysaccharides stabilized emulsions for encapsulation and delivery of bioactive food ingredients: A review[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 242: 116388.
- [13] MCCLEMENTS D J, JAFARI S M. Improving emulsion formation, stability and performance using mixed emulsifiers: A review[J]. *Advance in Colloid and Interface Science*, 2017, 251: 55–77.
- [14] 谭诗敏. 不同分子量香水莲花多糖的制备及其活性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021. [TAN S M. Study on preparation and activity of *Nymphaea hybrid* polysaccharides with different molecular weight[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.]
- [15] 李安琪, 杨曦, 张蕊, 等. 多糖的乳化特性及其在乳液食品品质属性调控方面的研究进展[J]. *食品科学*, 2020, 41(23): 322–328. [LI A Q, YANG X, ZHANG H, et al. A review of emulsifying properties of polysaccharides and their applications in enhancing textural attributes of emulsion-based foods[J]. *Food Science*, 2020, 41(23): 322–328.]
- [16] 陈松, 张国芳, 张彤, 等. 基于三种多糖与酪蛋白复配制备 W/O/W 型乳液及其包封红景天苷效果的研究[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(19): 137–145. [CHEN S, ZHANG G F, ZHANG T, et al. Study on the preparation of W/O/W emulsion based on three polysaccharides mixed with casein and its encapsulation effect of salidroside[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2022, 43(19): 137–145.]
- [17] 丁梦真. 明胶分子结构对鱼油乳液性质的影响研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2020. [DING M Z. Effect of gelatin molecular structure on the properties of fish oil emulsions[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2020.]
- [18] DENG W, LI Y B, WU L, et al. Pickering emulsions stabilized by polysaccharides particles and their applications: A review[J]. *Food Science and Technology*, 2022, 42: 24722.
- [19] 郑荣, 李珍, 闰洁, 等. 双亲性多糖胶束的制备及作为纳米药物载体应用研究进展[J]. *高分子通报*, 2021(12): 1–12. [ZHENG R, LI Z, MIN J, et al. Progress in preparation and application of amphiphilic polysaccharide micelles as nano-drug carriers[J]. *Polymer Bulletin*, 2021(12): 1–12.]
- [20] 陈爱辉, 王志高, 鞠兴荣, 等. 纳米乳的研究进展与潜在局限性[J]. *粮食科技与经济*, 2020, 45(3): 79–83. [CHEN W Y, WANG Z G, JU X R, et al. Research progress and potential limitations of nano-emulsion[J]. *Food Science and Technology and Economy*, 2020, 45(3): 79–83.]
- [21] 李玉洁. 超声波辅助多糖制备 O/W 椰子油乳液及其负载叶黄素的研究[D]. 海口: 海南大学, 2019. [LI Y J. Using polysaccharide with ultrasound treatment to prepare O/W coconut oil emulsions and its loading oil-soluble lutein[D]. Haikou: Hainan University, 2019.]
- [22] PANG B, LIU H, ZHANG K. Recent progress on Pickering emulsions stabilized by polysaccharides-based micro/nanoparticles[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2021, 296: 102522.
- [23] 杜艺轩. 基于阿拉伯胶和卵白蛋白 W/O/W 双重乳液的制备及其稳定性研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2022. [DU Y X. Preparation and characterization of W/O/W double emulsion stabilized by gum arabic and ovalbumin[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2022.]
- [24] 李松南. 淀粉基 Pickering 乳液稳定机理及在叶黄素递送中的应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020. [LI S N. Starch-based Pickering emulsion: Stabilizing mechanism and application in lutein delivery[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.]
- [25] TAHA A, AHMED E, ISMAIEL A, et al. Ultrasonic emulsification: An overview on the preparation of different emulsifiers-stabilized emulsions[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 105: 363–377.
- [26] RAMISETTY K A, PANDIT A B, GOGATE P R. Ultrasound assisted preparation of emulsion of coconut oil in water: Understanding the effect of operating parameters and comparison of reactor designs[J]. *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*, 2015, 88: 70–77.
- [27] ZHANG K M, MAO Z J, HUANG Y C, et al. Ultrasonic assisted water-in-oil emulsions encapsulating macro-molecular polysaccharide chitosan: Influence of molecular properties, emulsion viscosity and their stability[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, 64: 105018.
- [28] HOU Y J, GONG T, ZHANG J T, et al. Structural characterization and emulsifying properties of thinned-young apples polysaccharides[J]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2019, 516(4): 1175–1182.
- [29] YANG X, NISAR T, HOU Y JE, et al. Pomegranate peel pectin can be used as an effective emulsifier[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 85: 30–38.
- [30] MCCLEMENTS D J, GUMUS C E. Natural emulsifiers-bio-surfactants, phospholipids, biopolymers, and colloidal particles: molecular and physicochemical basis of functional performance[J]. *Colloid and Interface Science*, 2016, 234: 3–26.
- [31] 陈兴. 槲皮素-食品乳液体系的构建及其生物可利用性[D]. 南昌: 南昌大学, 2020. [CHEN X. Fabrication and bioavailability of quercetin-food emulsion systems[D]. Nanchang: Nanchang University, 2020.]
- [32] ZHANG J, ZHANG Y K, LIU Y, et al. Emulsifying properties of *tremella fuciformis*: A novel promising food emulsifier[J]. *International Journal of Food Engineering*, 2019, 15: 3–4.
- [33] 王春朋. 罗布麻茶多糖的乳化特性研究[D]. 武汉: 湖北工

- 业大学, 2021. [WANG C P. Emulsification properties for the *Apocynum venetum* L. tea polysaccharide conjugates[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2021. ]
- [ 34 ] HOU F R, YANG S H, MA X B, et al. Characterization of physicochemical properties of oil-in-water emulsions stabilized by *Tremella fuciformis* polysaccharides[J]. *Foods*, 2022, 11(19): 3020.
- [ 35 ] ZHU D Y, MA Y L, THAKUR K, et al. Effects of extraction methods on the rheological properties of polysaccharides from onion (*Allium cepa* L.)[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 112: 22–32.
- [ 36 ] XIONG W F, REN C, TIAN M, et al. Emulsion stability and dilatational viscoelasticity of ovalbumin/chitosan complexes at the oil-in-water interface[J]. *Food Chemistry*, 2018, 252: 181–188.
- [ 37 ] 郑环宇, 孔洋, 郑丽, 等. 大豆蛋白-多糖复合物结构与性能及其稳定性研究[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(6): 406–415. [ZHENG H Y, KONG Y, ZHENG L, et al. Effect of soybean protein-polysaccharides complexes on structure, properties and stability[J]. *Journal of Agricultural Machinery*, 2022, 53(6): 406–415. ]
- [ 38 ] WANG L, WU Q, ZHAO J Y, et al. Physicochemical and rheological properties of crude polysaccharides extracted from *Tremella fuciformis* with different methods[J]. *Cyta-Journal of Food*, 2021, 19(1): 247–256.
- [ 39 ] LUO S Z, HU X F, JIA Y J, et al. Camellia oil-based oleogels structuring with tea polyphenol-palmitate particles and citrus pectin by emulsion-templated method: preparation, characterization and potential application[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 95: 76–87.
- [ 40 ] TADROS T. Viscoelastic properties of sterically stabilised emulsions and their stability[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2015, 222: 692–708.
- [ 41 ] OZTURK B, MCCLEMENTS D J. Progress in natural emulsifiers for utilization in food emulsions[J]. *Current Opinion in Food Science*, 2016, 7: 1–6.
- [ 42 ] VILELA J A P, CUNHA R L D. Emulsions stabilized by high acyl gellan and KCl[J]. *Food Research International*, 2017, 91: 47–54.
- [ 43 ] QIN D K, YANG X J, GAO S R, et al. Influence of hydrocolloids (dietary fibers) on lipid digestion of protein-stabilized emulsions: comparison of neutral, anionic, and cationic polysaccharides[J]. *Journal of Food Science*, 2016, 81(7): C1636–C1645.
- [ 44 ] 赵玲玲. pH、Na<sup>+</sup>及萃取剂对大豆种皮多糖乳化性影响研究[D]. 锦州: 渤海大学, 2019. [ZHAO L L. Study on the effect of pH, Na<sup>+</sup> and extractant on emulsifying properties of soy hull polysaccharide[D]. Jinzhou: Bohai University, 2019. ]
- [ 45 ] FUNAMI T, ZHANG G Y, HIROE M, et al. Effects of the proteinaceous moiety on the emulsifying properties of sugar beet pectin[J]. *Food Hydrocolloids*, 2007, 21(8): 1319–1329.
- [ 46 ] LI J J, HU X Z, LI X P, et al. Effects of acetylation on the emulsifying properties of *Artemisia sphaerocephala* Krasch. polysaccharide[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2016, 144: 531–540.
- [ 47 ] ZHAO J J, WEI T, WEI Z H, et al. Influence of soybean soluble polysaccharides and beet pectin on the physicochemical properties of lactoferrin-coated orange oil emulsion[J]. *Food Hydrocolloids*, 2015, 44: 443–452.
- [ 48 ] SHAO P, FENG J R, SUN P L, et al. Recent advances in improving stability of food emulsion by plant polysaccharides[J]. *Food Research International*, 2020, 137: 109–376.
- [ 49 ] 张漫莉, 王强, 陈炳宇, 等. 多糖乳化性改善方法、构效关系及应用研究进展[J]. *食品科学*, 2021, 42(1): 279–284. [ZHANG M L, WANG Q, CHEN B Y, et al. Progress in methods for improving the emulsification properties of polysaccharides, structure-activity relationship and its application in foods[J]. *Food Science*, 2021, 42(1): 279–284. ]
- [ 50 ] KONTOGIORGOS V. Polysaccharides at fluid interfaces of food systems[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2019, 270: 28–37.
- [ 51 ] 刘敬然. 超高甲氧基果胶的界面性质及应用[D]. 无锡: 江南大学, 2020. [LIU J R. Interfacial properties of ultra-high methoxylated pectin and its application[D]. Wuxi: Jiangnan university, 2020. ]
- [ 52 ] GUO Q B, CUI S W, WANG Q, et al. Structure characterization of high molecular weight heteropolysaccharide isolated from *Artemisia sphaerocephala* Krasch seed[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2011, 86(2): 742–746.
- [ 53 ] TELIS V R N. O/W emulsions stabilized by interactions between proteins and polysaccharides[J]. *Encyclopedia of Food Chemistry*, 2019, 2: 494–498.
- [ 54 ] SAEIDY S, NASIRPOUR A, DJELVEH G, et al. Rheological and functional properties of asafoetida gum[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 118(Pt A): 1168–1173.
- [ 55 ] MAKOTO N, TAKAHIRO F, SAKIE N, et al. Comparison of sugar beet pectin, soybean soluble polysaccharide, and gum arabic as food emulsifiers. 1. Effect of concentration, pH, and salts on the emulsifying properties[J]. *Food Hydrocolloids*, 2007, 22(7): 1254–1267.
- [ 56 ] GARTI N, LESER M E. Emulsification properties of hydrocolloids[J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2001, 12(1): 123–135.
- [ 57 ] GUO H, LI H Y, LIU L, et al. Effects of sulfated modification on the physicochemical properties and biological activities of  $\beta$ -glucans from Qingke (Tibetan hulless barley)[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 141(C): 41–50.
- [ 58 ] 李艳霏. 楠竹半纤维素基乳化剂的特性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020. [LI Y F. Studies on characteristics of the Moso bamboo hemicelluloses-based emulsifier[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020. ]
- [ 59 ] 韩晴, 李军国, 杨莹, 等. 不同分子量大豆皮多糖的基本结构及功能性质研究[J]. *饲料工业*, 2019, 40(17): 35–41. [HAN Q, LI J G, YANG Y, et al. Characterization of functional properties and basic structure of polysaccharides extracted from soybean hull[J]. *Feed Industry*, 2019, 40(17): 35–41. ]
- [ 60 ] TANG Q L, HUANG G L. Improving method, properties and application of polysaccharide as emulsifier[J]. *Food Chemistry*, 2022, 376: 131937.
- [ 61 ] XU X F, LUO L P, LIU C M, et al. Utilization of anionic polysaccharides to improve the stability of rice glutelin emulsions: impact of polysaccharide type, pH, salt, and temperature[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 64: 112–122.
- [ 62 ] 杨雷, 仇丹, 周逸奎, 等. 阿拉伯胶的结构特征和乳化性能研究进展[J]. *食品工业科技*, 2013, 34(12): 353–356, 360. [YAN L, QIU D, ZHOU Y K, et al. Research progress in the structure and emulsifying properties of gum Arabic[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2013, 34(12): 353–356, 360. ]
- [ 63 ] 黄晓德, 钱骅, 赵伯涛, 等. 银耳粗多糖对桉叶油的乳化性研究[J]. *中国野生植物资源*, 2014, 33(1): 9–11. [HUANG X D, QIAN H, ZHAO B T, et al. Research on the emulsification and stability of *Tremella* polysaccharides on *Eucalyptus* oil[J]. *China Wild Plant Resources*, 2014, 33(1): 9–11. ]
- [ 64 ] SHAO P, MA H L, ZHU J Y, et al. Impact of ionic strength

- on physicochemical stability of O/W emulsions stabilized by *Uva fasciata* polysaccharide[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 69: 202–209.
- [ 65 ] NIU F G, ZHOU J Z, NIU D B, et al. Synergistic effects of ovalbumin/gum arabic complexes on the stability of emulsions exposed to environmental stress[J]. *Food Hydrocolloids*, 2015, 47: 14–20.
- [ 66 ] LI X M, XIE Q T, ZHU J, et al. Chitosan hydrochloride/carboxymethyl starch complex nanogels as novel Pickering stabilizers: Physical stability and rheological properties[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 93: 215–225.
- [ 67 ] LI X, LI K X, SHEN Y, et al. Influence of pure gum on the physicochemical properties of whey protein isolate stabilized oil-in-water emulsions[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2016, 504: 442–448.
- [ 68 ] XU X F, SUN Q J, MCCLEMENTS D J. Enhancing the formation and stability of emulsions using mixed natural emulsifiers: Hydrolyzed rice glutelin and quillaja saponin[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 89: 396–405.
- [ 69 ] 陈凯. 木质素基高内相乳液的构建及在药物负载和稳定中的应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2020: 4–16. [ CHEN K. Development of lignin-based high internal phase emulsion and applied in encapsulation and stabilization of drugs[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020: 4–16. ]
- [ 70 ] PARK J J, OLAWUYI I F, LEE W Y. Characteristics of low-fat mayonnaise using different modified arrowroot starches as fat replacer[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 153: 215–223.
- [ 71 ] KANAL S K B, BHANDARI B, PRAKASH S, et al. Modifying textural and microstructural properties of low fat Cheddar cheese using sodium alginate[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 83: 97–108.
- [ 72 ] YANG Y R, WANG W H, WU Z N, et al. O/W Pickering emulsions stabilized by *Flammulina velutipes* polysaccharide nanoparticles as a fat substitute: The effects of phase separation on emulsified sausage's techno-functional and sensory quality[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020, 100(1): 268–276.
- [ 73 ] LIU X Y, SALA G, SCHOLTEN E. Role of polysaccharide structure in the rheological, physical and sensory properties of low-fat ice cream[J]. *Current Research in Food Science*, 2023, 7: 100531.
- [ 74 ] 易雄健. 化妆品用天然乳化剂的筛选与性能评价[D]. 北京: 中国石油大学, 2020. [ YI X J. Screening and performance evaluation of natural emulsifiers for cosmetics[D]. Beijing: China Shiyu University, 2020. ]
- [ 75 ] 潘永宽, 金焰, 周恩旭, 等. 荔枝核多糖应用于功效化妆品的初步研究[J]. *香料香精化妆品*, 2021(5): 60–66. [ PAN Y K, JIN Y, ZHOU E X, et al. A preliminary study on the application of lychee seed polysaccharides in functional cosmetics[J]. *Flavour Fragrance Csmetics*, 2021(5): 60–66. ]
- [ 76 ] 曹铭, 费维成, 杨升平. 银耳多糖 WSK 在强化皮肤屏障中的应用研究[J]. *当代化工研究*, 2020(14): 106–108. [ CAO M, FEI W C, YANG S P. The study of WSK in enhancing skin barrier[J]. *Contemporary Chemical Research*, 2020(14): 106–108. ]
- [ 77 ] XIE J H, JIN M L, MORRIS G A, et al. Advances on bioactive polysaccharides from medicinal plants[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2016, 56: 60–84.
- [ 78 ] LI X, HE Y, ZENG P, et al. Molecular basis for *Poria cocos* mushroom polysaccharide used as an antitumour drug in China[J]. *Journal of Cellular and Molecular Medicine*, 2019, 23(1): 4–20.
- [ 79 ] NGWABEBHOH F A, ERDAGI S I, YILDIZ U. Pickering emulsions stabilized nanocellulosic-based nanoparticles for coumarin and curcumin nanoencapsulations; *In vitro* release, anti-cancer and antimicrobial activities[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 201: 317–328.
- [ 80 ] SHAH B R, LI Y, JIN W, et al. Preparation and optimization of pickering emulsion stabilized by chitosan-tripolyphosphate nanoparticles for curcumin encapsulation[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 52: 369–377.