

结冷胶改善薄荷醇水包油乳液的稳定性

魏玉磊¹ 官 玮¹ 王增瑜¹ 闫茗熠¹ 孙建宏¹ 邹立强²

(1. 山东中烟工业有限责任公司, 山东 济南 250000;

2. 南昌大学食品科学与资源挖掘全国重点实验室, 江西 南昌 330047)

摘要: [目的] 改善薄荷醇易挥发、水不溶的缺陷。[方法] 采用不同浓度的结冷胶(0~1%)和分离乳清蛋白制备包埋薄荷醇的水包油乳液, 考察结冷胶浓度对乳液微观结构、粒径电位、薄荷醇包封率和界面流变性质的影响, 分析结冷胶对薄荷醇水包油乳液的 pH 稳定性、离心稳定性和贮藏稳定性的改善作用。[结果] 结冷胶在乳液液滴表面吸附, 并在水相中形成三维网络, 导致乳液粒径增大与薄荷醇包封率提高。同时, 结冷胶导致乳液黏度提高和界面张力下降, 并呈现量效关系。稳定性分析显示, 添加 0.75% 结冷胶的乳液具有良好的乳液稳定性、最低的离心不稳定指数(趋近于 0)和最高的薄荷醇贮藏保留率[(92.8±0.34)%]。[结论] 结冷胶能够有效改善薄荷醇水包油乳液的稳定性。

关键词: 结冷胶; 薄荷醇; 水包油乳液; 稳定性

Improvement of stability of menthol-loaded oil-in-water emulsions with gellan gum

WEI Yulei¹ GONG Wei¹ WANG Zengyu¹ YAN Mingyi¹ SUN Jianhong¹ ZOU Liqiang²

(1. China Tobacco Shandong Industrial Co., Ltd., Jinan, Shandong 250000, China; 2. State Key Laboratory of Food Science and Resources, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330047, China)

Abstract: [Objective] To address the volatile and water-insoluble nature of menthol. [Methods] Various concentrations of gellan gum (ranging from 0% to 1% w/w) and whey protein isolate were adopted to formulate oil-in-water emulsions encapsulating menthol. The effects of gellan gum concentration on the emulsions' microstructure, particle size, zeta potential, menthol encapsulation efficiency, and interfacial rheological properties were examined. The enhancement effects of incorporating gellan gum on the pH stability, centrifugal stability, and storage stability of the menthol-loaded oil-in-water emulsions were elaborated. [Results] Gellan gum was adsorbed onto the emulsion droplet surfaces, forming a three-dimensional network within the aqueous phase and resulting in an increase in emulsion particle size and an improved menthol encapsulation efficiency. Furthermore, gellan gum led to an elevation in emulsion viscosity and a reduction in interfacial tension, demonstrating a dose-dependent relationship. Stability analysis indicated that the emulsion formulated with 0.75% w/w gellan gum exhibited superior stability, the lowest centrifugal instability index (approaching zero), and the highest menthol retention rate during storage [(92.8±0.34)%]. [Conclusion] Gellan gum can effectively enhance the stability of the menthol-loaded oil-in-water emulsions.

Keywords: gellan gum; menthol; oil-in-water emulsion; stability

L-薄荷醇, 又名薄荷脑, 是一种环状单萜醇, 具有愉悦的薄荷香味, 具有抗炎、抗真菌、镇痛等特性, 被广泛应用于饮料、口香糖、糖果等食品中^[1-2]。由于薄荷醇具有高挥发、水不溶的特性, 在加工贮藏过程中极易挥发损失^[3]。

Liu 等^[4]研究表明, 在 25℃、相对湿度 60% 和密封聚乙烯包装条件下贮藏 3 个月后, *L*-薄荷醇的保留率仅为 0.2%, 极大地限制了其在饮料等食品中的应用。

采用乳化包埋技术封装薄荷醇是防止其挥发损失的

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 32160563); 校企合作项目(编号: 2023370000340521, 2024370000340145)

通信作者: 孙建宏(1977—), 男, 山东中烟工业有限责任公司工程师, 硕士。E-mail: 22493445@qq.com

收稿日期: 2024-12-20 **改回日期:** 2025-08-05

引用格式: 魏玉磊, 官玮, 王增瑜, 等. 结冷胶改善薄荷醇水包油乳液的稳定性[J]. 食品与机械, 2025, 41(8): 32-38.

Citation: WEI Yulei, GONG Wei, WANG Zengyu, et al. Improvement of stability of menthol-loaded oil-in-water emulsions with gellan gum[J]. Food & Machinery, 2025, 41(8): 32-38.

有效手段^[5-6]。通过水包油纳米乳液将薄荷醇封装在内部油相,可以增强薄荷醇的稳定性、控释性和抗氧化性等性能,还能够改善薄荷醇水溶性低的缺点^[7]。作为常用的食品水包油乳液乳化剂,分离乳清蛋白(WPI)在乳液形成的过程中吸附在油水界面形成界面膜,通过其携带的静电斥力和空间位阻的作用稳定乳液^[8]。然而,蛋白质稳定的乳液系统在贮藏过程中仍存在聚集、絮凝等不稳定缺陷^[9]。Wang等^[10]采用大豆分离蛋白和大豆种皮多糖协同稳定水包油乳液,添加0.05%~0.15%大豆种皮多糖能够使乳液液滴的粒径更小,贮藏稳定性较单独由蛋白质稳定的乳液提高。目前,关于利用多糖强化蛋白质乳液以提高薄荷醇稳定性的研究尚未见报道。

试验拟采用分离乳清蛋白和结冷胶制备包埋薄荷醇的水包油乳液,通过控制体系中结冷胶浓度,分析乳液微观结构、粒径电位、薄荷醇包封率、界面流变学特性以及物理化学稳定性的变化规律,探究结冷胶对分离乳清蛋白乳液封装薄荷醇稳定性的作用规律,以期开发应用于饮料的高稳定薄荷醇乳液提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

分离乳清蛋白:食品级,含量>92%,丹麦阿拉食品原料有限公司;

L-薄荷醇:食品级,含量>99%,安徽爱迪香料有限公司;

低酰基结冷胶:食品级,帝斯曼有限公司;

中链甘油三酯(MCT):食品级,青岛海之源生命科技有限公司;

2-苯乙基丙酸酯、无水乙醇、盐酸、氢氧化钠:分析纯,上海麦克林生化有限公司;

尼罗红、异硫氰酸荧光素酯(FITC):分析纯,西格玛奥德里奇(上海)贸易有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

纳米粒子分析仪:Nano ZSP型,英国马尔文仪器有限公司;

稳定分析仪:LUMiSizer型,德国LUM GmbH有限公司;

气相色谱仪:Agilent/8890型,美国安捷伦科技有限公司;

激光共聚焦显微镜:OLYMPUS FV10i型,日本OLYMPUS公司;

扫描电子显微镜:ZEISS sigma 300型,德国蔡司公司;

流变仪:MCR302型,奥地利安东帕有限公司;

界面扩张流变测量仪:OCA11型,德国德飞仪器有限公司;

动态高压微射流:M-110EH30型,美国Microfluidic公司;

高速分散机:T18型,德国IKA公司。

1.2 方法

1.2.1 薄荷醇水包油乳液制备 根据Liu等^[11]的方法进行修改。将WPI粉末溶解于蒸馏水中,制备5%的WPI溶液。配制不同浓度的结冷胶溶液并分别与WPI溶液等质量混合,以含有2.5%的WPI以及0%,0.25%,0.50%,0.75%,1.00%结冷胶的混合溶液作为水相。将1 g薄荷醇晶体溶于5 g MCT作为油相。按油水质量比3:47将油相加入水相中,14 000 r/min分散2 min形成粗乳液。将粗乳液用微射流30 MPa处理一次,得到含有1%薄荷醇的水包油乳液。

1.2.2 微观结构分析 将油相和水相分别用0.01 g/mL尼罗红丙酮溶液和0.01 g/mL FITC水溶液染色(尼罗红、FITC发射波长分别为488,633 nm)。使用激光共聚焦显微镜(CLSM)观察乳液荧光图像。将冻干后的薄荷醇乳液样品掰出平整截面,并通过导电胶黏附在样品台上进行喷金处理,使用扫描电子显微镜(SEM)观察截面外观形态。

1.2.3 粒径和Zeta电位分析 根据刘冬雪等^[12]的方法,测量前将乳液样品使用去离子水稀释约100倍,避免多重散射。

1.2.4 薄荷醇包封率测定 以无水乙醇为溶剂,配制质量浓度为10 mg/mL的2-苯乙基丙酸酯内标萃取溶液。参照胡梓曼^[13]的方法并修改,取50 mL薄荷醇乳液,7 000 r/min离心10 min,取上清液5 mL,加入5 mL萃取液,过0.45 μm尼龙有机相滤膜,测得未包封的薄荷醇含量。取薄荷醇乳液50 mL,并加入50 mL萃取液,充分混匀,超声、涡旋振荡30 min,4 000 r/min离心10 min,上清液过0.45 μm尼龙有机相滤膜后,待GC进样分析,测得样品中的薄荷醇总含量。GC条件:载气为氦气(纯度≥99.999%),色谱柱为HP-5色谱柱(30 m×0.32 mm×0.25 μm),分流进样,分流比50:1,进样口温度250℃,初始温度160℃(保持2 min),升温程序以5℃/min速率由160℃升至200℃,FID检测器温度250℃,氢气流速40 mL/min,空气流速400 mL/min,尾吹气(氦气)流速1.2 mL/min,进样量1 μL。根据GC结果计算样品中薄荷醇含量,绘制标准曲线($R^2>0.999$),按式(1)计算薄荷醇包封率。

$$EE = \frac{m_1}{m_2} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

EE——乳液中薄荷醇包封率,%;

m_1 ——上清液中测得的薄荷醇含量,mg;

m_2 ——样品中薄荷醇总含量,mg。

1.2.5 流变特性分析 根据万俊等^[14]的方法。

1.2.6 油水界面张力测定 根据Feng等^[15]的方法进行修改。采用悬滴法测量界面张力,选用 500 μL 的微量注射针吸取一定体积含不同浓度的结冷胶水相,向装有含薄荷醇油相的透明玻璃皿中滴入合适体积的水相使其达到似掉非掉的状态,观察并记录界面张力的变化情况。

1.2.7 pH 稳定性测定 根据郝慧敏等^[16]的方法并修改。使用 2 mol/L 的 HCl 或 NaOH 调节乳液 pH 值,记录不同 pH 值(3,5,7)对乳液外观形态、粒径和电位的影响。

1.2.8 离心稳定性测定 根据 Li 等^[17]的方法并修改。将样品置于直径为 2 mm 的样品管中,4 000 r/min 离心 1 h,记录样品透射率变化情况和外观形态。

1.2.9 贮藏稳定性测定 参照 Wang 等^[18]的方法,按式(2)计算薄荷醇的贮藏保留率。

$$RR = \frac{m_1}{m_2} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

RR——薄荷醇的贮藏保留率,%;

m_1 ——样品中贮藏期间的薄荷醇含量,mg;

m_2 ——样品中初始薄荷醇含量,mg。

1.3 数据处理

所有试验均重复 3 次,结果以平均值 $\pm$ 标准差表示。使用 SPSS 26.0 软件进行显著性差异分析(显著水平 $P < 0.05$),采用 Origin 2022 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 微观结构

采用 CLSM 观察乳液的微观结构,被尼罗红染色的油相呈绿色荧光,被 FITC 染色的结冷胶呈红色荧光。由图 1(a)可知,油相以乳滴形式分散在水相中,说明 WPI 稳定的水包油乳液形成。随着结冷胶的加入,乳滴表面出现红色荧光,说明结冷胶在乳滴表面吸附。背景未出现结冷胶的红色荧光,可能是荧光对比度导致的背景偏暗而未能显示,因此采用 SEM 观察结冷胶对乳液水相结构的影响。由图 1(b)可知,当乳液中未添加或添加低浓度(0.25%)结冷胶时,截面呈互不相连的多层分布。随着结冷胶浓度的提高,截面层间出现交联。当结冷胶浓度为 0.75%,1.00% 时,冻干截面显示出多孔的网络结构,说明水相分布的结冷胶形成多糖网络,网络随结冷胶浓度的提高而更加密集。

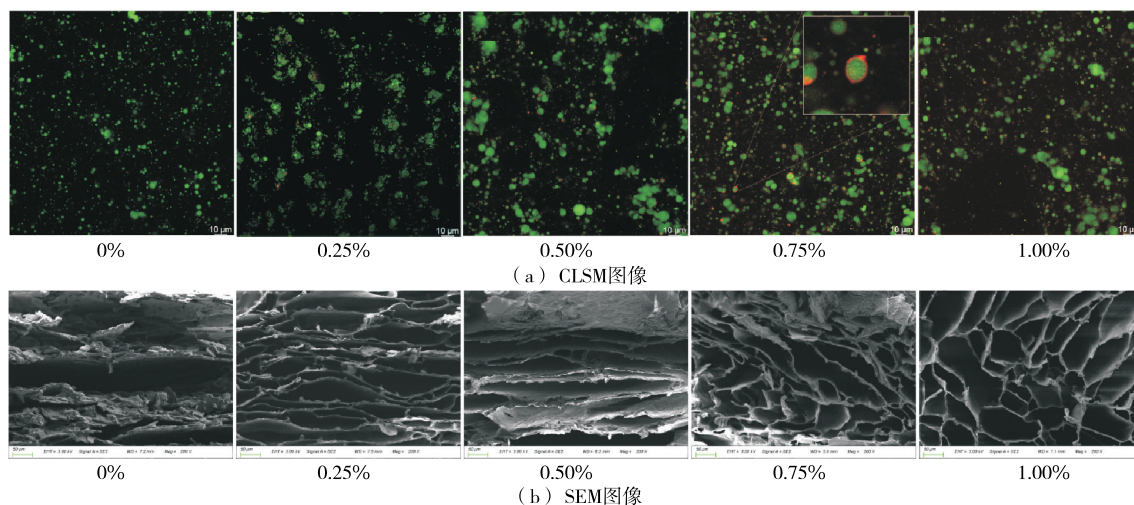


图 1 不同结冷胶浓度的薄荷醇乳液的 CLSM 图像与冻干乳液截面 SEM 图像

Figure 1 CLSM images of menthol emulsions with varying gellan gum concentrations and cross-sectional SEM images of freeze-dried emulsions ($\times 200$)

2.2 粒径、电位与包封率

由图 2(a)可知,随着结冷胶浓度的增加,乳液粒径从 (338.00 ± 26.72) nm 逐渐增大至 (665.00 ± 22.15) nm, PDI 值均 < 0.3 ,可能是多糖在液滴颗粒表面的静电吸附导致粒径增大^[19],与 CLSM 观察乳液的微观结构相对应,结冷胶包覆在 WPI 外侧使得粒径变大。随着结冷胶浓度的增加,乳液的 Zeta 电位绝对值先减小后增大,可能是结冷胶的酸性 pH 导致蛋白质的电位值降低,而随着结冷胶浓度

的提高,结冷胶自身的负电荷密度升高导致电位值升高。

由图 2(b)可知,随着结冷胶浓度的增加,薄荷醇的包封率逐渐上升,总体包封率均达到 80% 以上,其中结冷胶浓度为 0.75%,1.00% 时的包封率分别达到 $(92.35 \pm 2.25)\%$ 和 $(92.18 \pm 1.01)\%$,具有较高的包封率水平。Luz 等^[20]使用辛烯基琥珀酸酐改性淀粉稳定的乳液相较于其他的表面活性剂,有效将牛至油的包封率提高到 $(97.12 \pm 0.01)\%$,说明多糖的加入能够有效提高挥发性精油的包

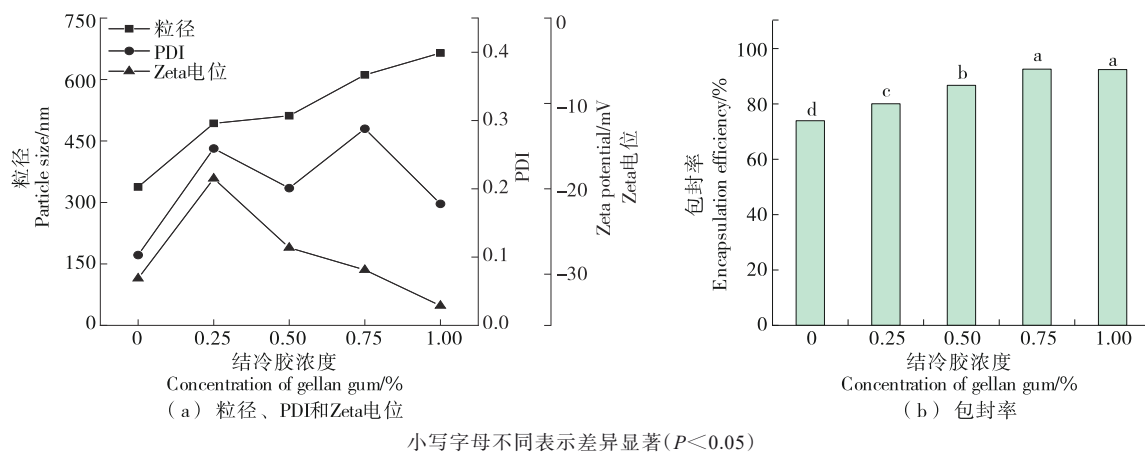


图2 不同结冷胶浓度的薄荷醇乳液粒径、PDI、Zeta 电位及薄荷醇封装率

Figure 2 Particle size, polydispersity index (PDI), Zeta potential, and menthol encapsulation efficiency of menthol emulsions with varying concentrations of gellan gum

封装率。在乳液中添加结冷胶能够有效提高薄荷醇的封装率,防止乳液制备过程中的薄荷醇挥发损失。

2.3 流变与界面张力

由图3(a)可知,随着剪切速率的提高,乳液黏度下降,出现剪切稀化行为。相同剪切速率下,乳液黏度与结冷胶浓度成正比,这与随结冷胶浓度提高而趋于密集的

多糖网络所导致的更大剪切阻力相关^[21]。

由图3(b)可知,添加结冷胶可显著降低油水界面的界面张力,且随着结冷胶浓度的提高,界面张力降低更明显,与 Alizadeh 等^[22]的结论类似。吸附在液滴界面的多糖和蛋白质共同作用,降低了体系的自由能,从而降低了界面张力并延迟了相分离速度,能够维持乳液稳定。

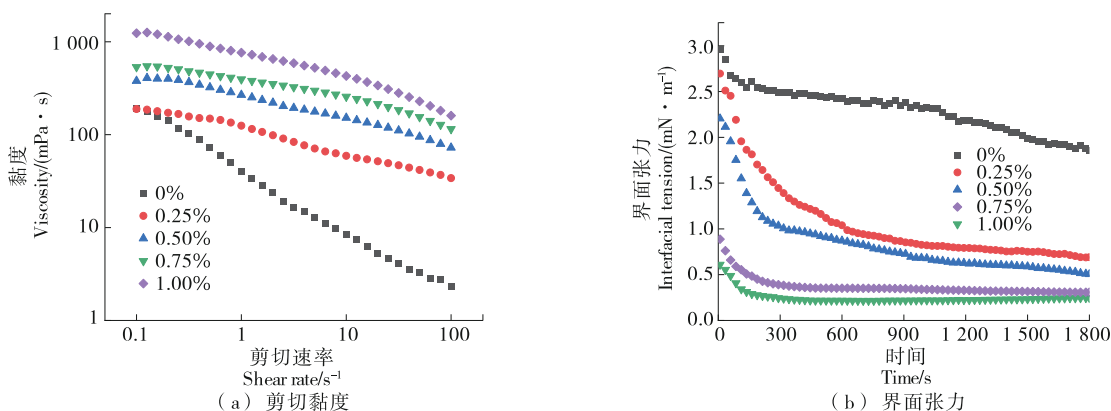


图3 不同浓度结冷胶的薄荷醇乳液的剪切黏度及界面张力

Figure 3 Shear viscosity and interfacial tension of menthol emulsions with various concentrations of gellan gum

2.4 pH 稳定性

由图4(a)可知,当pH为3时,0%结冷胶的乳液出现絮凝分层,这与接近等电点条件下蛋白质乳液电位值偏低有关;而1.00%结冷胶的乳液凝固,可能与结冷胶羧基质子化导致的静电排斥力降低有关。除上述二者外,所有乳液外观均一。由图4(b)和图4(c)可知,当pH为3时,乳液的粒径随结冷胶浓度的增加而降低,这与结冷胶附着增大了乳液电位值从而避免了乳液絮凝有关。当pH为5,7时,乳液粒径随着结冷胶浓度的增加而增大,这与乳液的共聚焦图像对应,结冷胶在乳液表面吸附增大了

液滴粒径。同时,在所选测试pH范围内,结冷胶浓度均与电位值呈正相关,因此提高结冷胶浓度能够有效提高乳滴间的静电斥力,避免液滴聚集,有效提高乳液的稳定性^[23],与 Qiu 等^[24]的结论相似。

2.5 离心稳定性

由图5可知,单独蛋白质稳定的乳液在离心过程中乳液明显上浮,底部透光率明显升高,不稳定指数为0.216±0.019。添加少量结冷胶(0.25%和0.50%)的乳液底部透光程度降低,乳液上浮现象略有改善。随着结冷胶浓度提高至0.75%,乳液上浮明显改善,离心前后透光曲线无

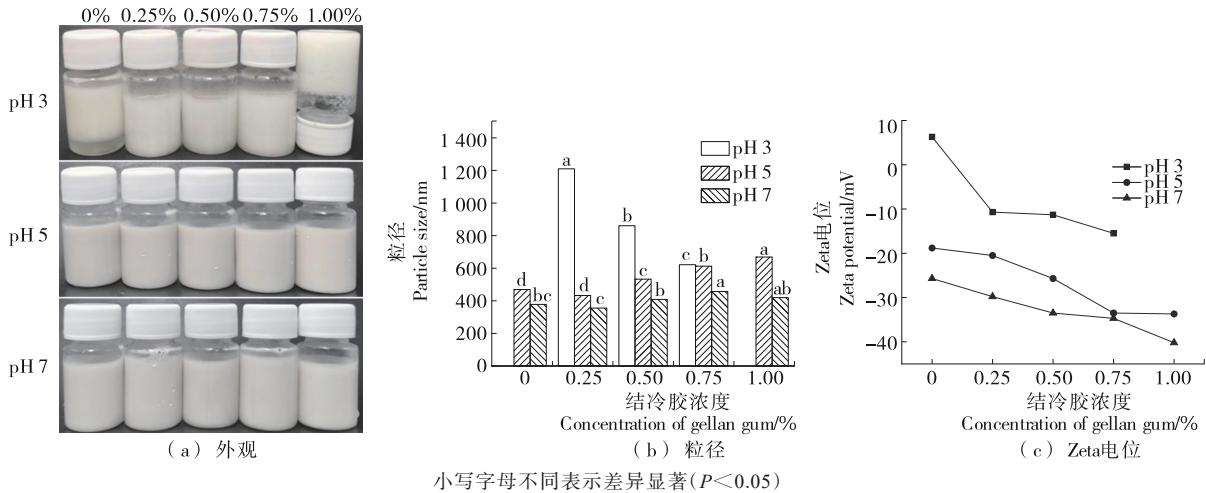


图4 薄荷醇乳液在不同 pH 条件下的外观、粒径和 Zeta 电位

Figure 4 Appearance, particle size, and Zeta potential of menthol emulsions under different pH conditions

明显变化,不稳定指数趋近于 0,说明结冷胶通过形成一个三维网络来限制液滴的运动,有助于提高乳液的稳定性^[25]。进一步提高结冷胶浓度,乳液的离心稳定性反而下降,可能是由于多糖浓度的增加,超过了临界浓度,多糖分子间的相互作用力增加,乳化能力下降使乳液液滴聚集。

2.6 贮藏稳定性

由图 6(a)可知,新制备的乳液外观均一,而在贮藏终点,结冷胶浓度为 0% 和 1.00% 的乳液出现分层现象,表明结冷胶在一定浓度范围内能够稳定乳液体系,而未添加结冷胶和添加过量的结冷胶均会对乳液的稳定性产生影响,破坏乳液的体系稳定。这种现象可能是单独由蛋

白质稳定的乳液容易絮凝上浮,而结冷胶形成的三维网络结构对乳液液滴形成空间位阻,从而提高了稳定性。多糖浓度过高,超过了临界多糖浓度导致絮凝,乳液液滴被迫聚集在一起出现相分离现象^[26]。

由图 6(b)可知,添加 0% 结冷胶的乳液中薄荷醇含量在贮藏初期快速下降,最终保留率为 $(65.50 \pm 1.33)\%$,说明单纯的蛋白质无法阻止薄荷醇挥发。添加结冷胶的乳液在整个贮藏期间的薄荷醇保留率均大于单纯蛋白稳定的乳液,其中结冷胶浓度为 0.75% 的薄荷醇乳液在贮藏结束后保留率高达 $(92.80 \pm 0.34)\%$,远远高于未添加多糖的,说明结冷胶通过在乳滴表面附着和在水相形成三维网络,限制了乳液液滴的布朗运动,能够有效阻止薄荷醇

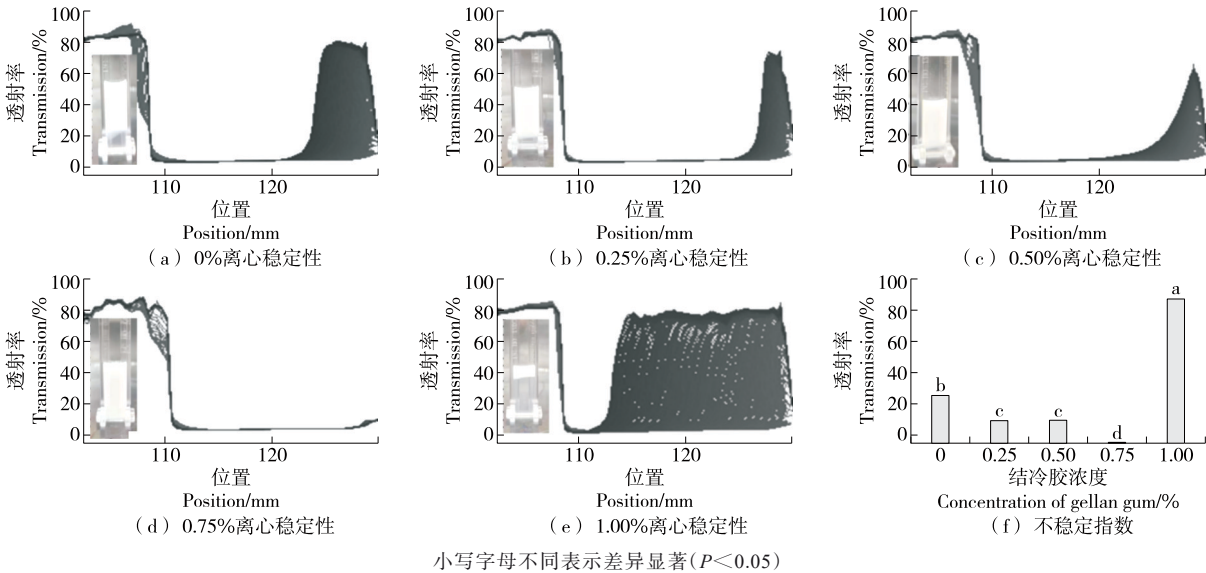


图5 不同结冷胶浓度薄荷醇乳液的离心稳定性谱图及不稳定指数

Figure 5 Centrifugal stability profiles and instability index of menthol emulsions with various concentrations of gellan gum

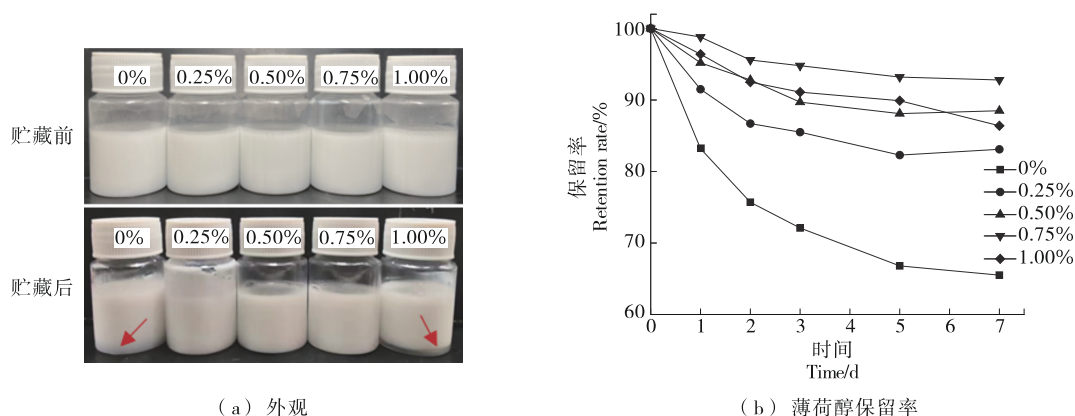


图6 不同结冷胶浓度薄荷醇乳液在贮藏前后的外观及薄荷醇保留率变化

Figure 6 Appearance and menthol retention rate changes of menthol emulsions with various concentrations of gellan gum before and after storage

的损失^[27]。结冷胶浓度为1.00%的乳液在贮藏期间保留率下降,是由于乳液不稳定导致包封薄荷醇释放,与离心稳定性结果相一致。

3 结论

采用分离乳清蛋白和结冷胶协同稳定薄荷醇乳液,分析了结冷胶浓度对乳液稳定性的影响。结果表明,随着结冷胶浓度的增加,结冷胶在液滴表面附着,同时在水相形成三维网络,提高了乳液粒径和薄荷醇包封率,增大了乳液黏度,降低了油水界面张力。稳定性分析显示,添加0.25%,0.50%,0.75%结冷胶的乳液在所选pH范围内具有良好稳定性。添加0.75%结冷胶的乳液具有最佳的离心稳定性和薄荷醇保留率。该研究虽明确了薄荷醇负载乳液制备的相关表征分析,但仅基于模拟体系,未拓展至真实饮料中应用。饮料体系中的基质成分对薄荷醇乳液稳定性及薄荷醇保留率的影响尚未验证,且未系统探究饮料中pH、离子强度对二者的作用规律与机制。后续需构建乳液和真实饮料复合体系,分析基质相互作用,揭示pH、离子强度的影响机制,筛选环境耐受性乳化体系,推动其在饮料行业的工业化应用。

参考文献

- [1] KAMATOU G P P, VERMAAK I, VILJOEN A M, et al. Menthol: a simple monoterpene with remarkable biological properties[J]. *Phytochemistry*, 2013, 96: 15-25.
- [2] 郭明遗, 邓艳, 杜前红, 等. 青李薄荷酒发酵工艺优化及风味成分分析[J]. *食品与机械*, 2023, 39(6): 201-209.
- GUO M Y, DENG Y, DU Q H, et al. Fermentation process optimization and flavor composition analysis of plum peppermint wine[J]. *Food & Machinery*, 2023, 39(6): 201-209.
- [3] 魏玉磊, 郭鹏, 高云, 等. 油凝胶改善二氧化硅颗粒薄荷醇的吸附性能[J]. *食品与机械*, 2024, 40(9): 44-49.
- WEI Y L, GUO P, GAO Y, et al. Study on improving menthol

adsorption performance of silica particles by olege[J]. *Food & Machinery*, 2024, 40(9): 44-49.

- [4] LIU L Y, ZHANG Z Y, CHENG Y Z, et al. Stabilizing L-menthol by cocrystallization: supramolecular cavities succeeded in retaining the volatile flavor[J]. *Crystal Growth & Design*, 2022, 22(12): 7 285-7 297.
- [5] CHENG H, KHAN M A, XIE Z F, et al. A peppermint oil emulsion stabilized by resveratrol-zein-pectin complex particles: enhancing the chemical stability and antimicrobial activity in combination with the synergistic effect[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 103: 105675.
- [6] 黄佳琳, 白卫东, 刘功良, 等. 植物精油的化学组成、功效及递送体系研究进展[J]. *食品与机械*, 2025, 41(4): 197-205.
- HUANG J L, BAI W D, LIU G L, et al. Progress in chemical composition, efficacy, and delivery systems of plant essential oils[J]. *Food & Machinery*, 2025, 41(4): 197-205.
- [7] 葛玉曼, 寻崇荣, 车佳玲, 等. 薄荷油纳米乳液的制备及其性质分析[J]. *食品科学*, 2019, 40(10): 29-35.
- QI Y M, XUN C R, CHE J L, et al. Preparation and properties of peppermint oil nanoemulsions[J]. *Food Science*, 2019, 40(10): 29-35.
- [8] MONAHAN F J, MCCLEMENTS D J, KINSELLA J E. Polymerization of whey proteins in whey protein-stabilized emulsions[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1993, 41(11): 1 826-1 829.
- [9] DICKINSON E. Strategies to control and inhibit the flocculation of protein-stabilized oil-in-water emulsions[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 96: 209-223.
- [10] WANG S N, YANG J J, SHAO G Q, et al. Soy protein isolated-soy hull polysaccharides stabilized O/W emulsion: effect of polysaccharides concentration on the storage stability and interfacial rheological properties[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 101: 105490.
- [11] LIU W, GAO H X, MCCLEMENTS D J, et al. Stability,

- rheology, and β -carotene bioaccessibility of high internal phase emulsion gels[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 88: 210-217.
- [12] 刘冬雪, 肖茜, 刘成国, 等. 基于熊果酸的 W/O/W 型 Pickering 乳液制备方法[J]. *食品与机械*, 2023, 39(2): 176-181.
- LIU D X, XIAO Q, LIU C G, et al. Preparation of W/O/W Pickering emulsion based on ursolic acid[J]. *Food & Machinery*, 2023, 39(2): 176-181.
- [13] 胡梓曼. 环糊精基金属有机框架封装薄荷醇及其控释特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021: 21-22.
- HU X M. Preparation of cyclodextrin based metal-organic frameworks and its encapsulation of menthol and controlled release[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021: 21-22.
- [14] 万俊, 张孝芹, 邓博文, 等. 糖基化结合单宁酸改性对熔球态蛋清蛋白乳化特性的影响[J]. *食品与机械*, 2024, 40(11): 12-18.
- WAN J, ZHANG X Q, DENG B W, et al. Effects of glycosylation combined with tannic acid modification on the emulsification properties of molten globule egg white protein [J]. *Food & Machinery*, 2024, 40(11): 12-18.
- [15] FENG X, DAI H J, YU Y, et al. Adjusting the interfacial property and emulsifying property of cellulose nanofibrils by ultrasonic treatment combined with gelatin addition[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 133: 107905.
- [16] 郝慧敏, 靳学远, 纵伟. 栀子油/米糠蛋白纳米乳液的高压微射流制备工艺优化及稳定性研究[J]. *食品科技*, 2024, 49(2): 242-249.
- HAO H M, JIN X Y, ZONG W. Preparation and stability study of nanoemulsion of gardenia oil/rice bran protein by high-pressure microfluidization process[J]. *Food Science and Technology*, 2024, 49(2): 242-249.
- [17] LI X, WANG X, XU D X, et al. Influence of calcium-induced droplet heteroaggregation on the physicochemical properties of oppositely charged lactoferrin coated lutein droplets and whey protein isolate-coated DHA droplets[J]. *Food & Function*, 2017, 8(8): 2748-2759.
- [18] WANG C, FU Y X, CAO Y, et al. Enhancement of lycopene bioaccessibility in tomatoes using excipient emulsions: effect of dark tea polysaccharides[J]. *Food Research International*, 2023, 163: 1-7.
- [19] UNAL S, DOGAN O, AKTAS Y. Orally administered docetaxel-loaded chitosan-decorated cationic PLGA nanoparticles for intestinal tumors: formulation, comprehensive in vitro characterization, and release kinetics [J]. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 2022, 13: 1393-1407.
- [20] LUZ E, CLAUDIA O, ALFREDO A, et al. Polysaccharide-based multilayer nano-emulsions loaded with oregano oil: production, characterization, and in vitro digestion assessment [J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(4): 878.
- [21] 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.
- [22] ALIZADEH L, ABDOLMALEKI K, NAYEBZADEH K, et al. Characterization of sodium caseinate/hydroxypropyl methylcellulose concentrated emulsions: effect of mixing ratio, concentration and wax addition[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 128: 796-803.
- [23] 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.
- YANG S H, WANG D S, WANG W L, 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.
- [24] QIU C Y, ZHAO M M, MCCLEMENTS D J. Improving the stability of wheat protein-stabilized emulsions: effect of pectin and xanthan gum addition[J]. *Food Hydrocolloids*, 2015, 43: 377-387.
- [25] LI J J, HU X Z, YAN X M, et al. Effects of hydrolysis by xylanase on the emulsifying properties of *Artemisia sphaerocephala* Krasch. polysaccharide[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 76: 158-163.
- [26] 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.
- [27] BAI L, HUAN S Q, LI Z G, 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.