

稳定剂对冰淇淋抗融性影响的研究进展

周悦, 刘立增, 刘爱国, 许颖, 金华进, 康景然, 徐军

Research Progress of Effect of Stabilizer on Melting Resistance of Ice Cream

ZHOU Yue, LIU Lizeng, LIU Aiguo, XU Ying, JIN Huajin, KANG Jingran, and XU Jun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022090159>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同类型稳定剂和乳化剂对冰淇淋品质特性的影响

Effect of Different Types of Stabilizers and Emulsifiers on the Quality and Characteristics of Ice Cream

食品工业科技. 2021, 42(8): 75-80 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020070130>

双蛋白对冰淇淋品质的影响

Effect of the Dual Protein on the Quality of Ice Cream

食品工业科技. 2020, 41(17): 8-12 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.17.002>

微胶囊技术在益生菌CICC 6075冰淇淋中的应用

Application of Microencapsulation Technology in Ice Cream with Probiotic CICC 6075

食品工业科技. 2020, 41(21): 67-74 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019120324>

基于不同稳定剂纳米金冷融指示剂的制备及稳定性研究

Preparation and Stability of Nano-gold Cold Melt Indicators Based on Different Stabilizers

食品工业科技. 2020, 41(17): 77-83 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.17.013>

不同稳定剂对凝固型牦牛酸奶在冷藏后熟过程中品质及风味的影响

Effect of different stabilizers on the quality and flavors of set-style yak yoghurt during post-fermentation storage

食品工业科技. 2018, 39(4): 188-196 <https://doi.org/>

四种稳定剂对霞多丽葡萄酒稳定性的影响研究

Study on the Influence of Four Kinds of Stabilizers on Stability of Chardonnay Wine

食品工业科技. 2020, 41(5): 40-44, 51 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.05.007>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

周悦, 刘立增, 刘爱国, 等. 稳定剂对冰淇淋抗融性影响的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(13): 440-449. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022090159

ZHOU Yue, LIU Lizeng, LIU Aiguo, et al. Research Progress of Effect of Stabilizer on Melting Resistance of Ice Cream[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(13): 440-449. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022090159

· 专题综述 ·

稳定剂对冰淇淋抗融性影响的研究进展

周悦¹, 刘立增^{1*}, 刘爱国¹, 许颖², 金华进², 康景然², 徐军²

(1. 天津商业大学生物技术与食品科学学院, 天津 300134;

2. 伊利伊诺科技(上海)有限责任公司, 上海 200245)

摘要: 抗融性是检验冰淇淋品质的一项重要指标。在运输、储存、销售过程中, 由于环境温度的波动, 抗融性差的冰淇淋不可避免的会产生变形, 进而影响消费者的体验、产品的销售甚至品牌的口碑。而稳定剂对冰淇淋的抗融性至关重要。本文综述了稳定剂对冰淇淋抗融性的影响机制, 并详细介绍了不同阴离子型、非离子型稳定剂的特性及其对冰淇淋抗融性的作用机理, 主要包括形成凝胶、抑制冰晶生长以及增强冰淇淋浆料黏度等方面。进一步为文创、结构复杂冰淇淋的研发及流通提供理论指导。

关键词: 冰淇淋, 抗融性, 阴离子型稳定剂, 非离子型稳定剂, 结构

中图分类号: TS277

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)13-0440-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022090159

本文网刊:



Research Progress of Effect of Stabilizer on Melting Resistance of Ice Cream

ZHOU Yue¹, LIU Lizeng^{1*}, LIU Aiguo¹, XU Ying², JIN Huajin², KANG Jingran², XU Jun²

(1. College of Biotechnology and Food Science, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China;

2. Yili YINUO Technology (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 200245, China)

Abstract: The resistance to melting is an important indicator of the quality of ice cream. During transport, storage and distribution, poorly melting resistance ice cream will inevitably become deformed due to fluctuations in ambient temperature, which in turn will affect the consumer experience, product sales and even the brand's reputation. Stabilisers are crucial to the melting resistance of ice cream. This paper reviews the mechanisms of stabilisers on ice cream melting resistance, the properties of different anionic/non-ionic stabilisers and their mechanism of action on ice cream resistance, mainly in terms of gel formation, inhibition of ice crystal growth and enhancement of ice cream serum phase viscosity. Further, it provides theoretical guidance for the development of cultural and creative ice cream, ice cream with complex structure and ice cream circulation.

Key words: ice cream; melting resistance; anionic stabilizers; non-ionic stabilizers; structure

目前, 我国是世界上最大的冰淇淋和冷冻甜点消费市场, 2021 年召开的第 18 届中国冷冻饮品发展高峰论坛暨行业年会报告上指出, 2020 年中国冰淇淋行业市场规模已增长到 1470 亿元, 稳居全球第一。有专家预测, 2023 年全球的冰淇淋市场规模预计增长到 970 亿美元^[1]。随着人们对冰淇淋期望值的增加, 对冰淇淋外形的要求也越来越高。因购买的便利

条件与疫情等原因, 消费者从网上购买冰淇淋成为时尚。但是, 由于一些快递公司没有冷冻储运设备或对冷链物流的管理缺乏经验以及“送货上门”过程难以保证冰淇淋需求的低温环境等因素, 冰淇淋在储运、交付等过程中不可避免地受到温度波动, 产生冰淇淋融化、变形等现象, 进而影响消费者的体验、产品的销售甚至品牌的口碑。

收稿日期: 2022-09-15

作者简介: 周悦 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与贮藏, E-mail: jojo980310@163.com。

* 通信作者: 刘立增 (1973-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品加工与贮藏, E-mail: liulizeng@126.com。

国内外学者的研究发现,冰淇淋的融化过程可分为三个阶段:起始融化阶段、快速融化阶段和稳定阶段。在起始融化阶段,热量由冰淇淋周围的暖空气传递到冰淇淋中,冰晶开始融化成水并进入到未冻结的乳清相中,从而降低其黏度。随着乳清相黏度的降低和流动性的增加,冰淇淋融化达到第二阶段,即快速融化阶段。在此阶段,冰淇淋在重力的作用下开始滴落乳清并逐步塌陷,达到最大融化速率。此时,冰淇淋的塌陷速度和程度取决于气泡和脂肪球凝结形成的网络结构^[2-3]。如果气泡周围形成该结构,其会随着乳清排出产生空隙,支撑力降低而塌陷并堵塞乳清滴落通道。因此,融化速度逐渐减慢,并进入稳定阶段。如果没有该网络结构或形成的结构松散,冰淇淋就会完全滴落^[4]。网络结构、冰晶和气泡的大小以及冰淇淋浆料的黏度高低都会影响冰淇淋的抗融性^[5]。而冰淇淋所使用的稳定剂种类和添加量对这些因素至关重要。目前,鲜有从结构角度论述稳定剂对冰淇淋抗融性的影响,本文综述了其影响机制,为研究具有优良抗融性的冰淇淋提供理论基础,对适应网络销售、防止冰淇淋变形、“融而不化”等现象的发生具有重要指导作用。

1 稳定剂对冰淇淋抗融性的影响机理

稳定剂是一类复合多糖,它可以使冰淇淋浆料中的部分游离水变成束缚水,增加浆料的黏度,抑制冰晶生长,部分稳定剂也可以形成低温凝胶,增强冰淇淋的抗融性。当冰淇淋中的冰晶融化成水时,水会稀释乳清相,而被稀释的乳清相在重力的作用下滴落。在冰淇淋浆料中加入稳定剂,它能够结合浆料中的水份,提高乳清相的黏度,使乳清相黏稠,引流过程减慢,乳清从冰淇淋内部扩散到表面需要的时间延长,从而降低冰淇淋的融化速度^[6-7]。Aloglu 等^[8]和 Muse 等^[2]研究发现,冰淇淋的抗融性与冰淇淋浆料的黏度之间存在正相关。稳定剂可以抑制冰淇淋中冰晶的生长,从而形成小冰晶。Muse 等^[2]发现当部分冰晶融化时,大量小冰晶的存在,使乳清的流动路径更加曲折,这意味着乳清必须绕过这些冰晶形成的障碍物,向下流动的时间延长,降低了冰淇淋的融化速

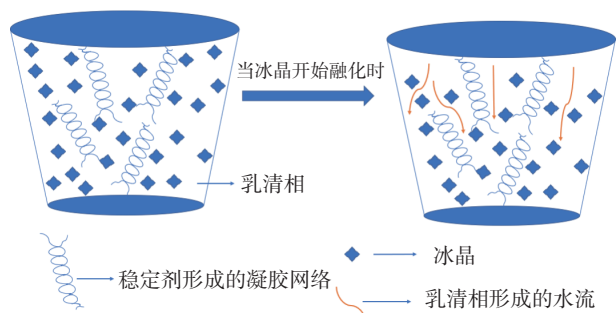


图1 稳定剂凝胶网络和冰晶阻挡乳清向下流动的作用机理

Fig.1 Diagram of the mechanism of action of stabiliser gel network and ice crystal blocking whey downward flow

注:此图为无外包装的冰淇淋剖面图。

度。此外,由稳定剂形成的凝胶网络结构会造成空间位阻,阻挡冰淇淋中乳清的向下流动,增强冰淇淋的抗融性。稳定剂增强冰淇淋抗融性的机理如图1所示。冰淇淋中常用的稳定剂可分为阴离子型稳定剂和非离子型稳定剂。

2 阴离子型稳定剂对冰淇淋抗融性的影响

阴离子型稳定剂是指在水溶液中电离出带负电荷的稳定剂。冰淇淋中常用的阴离子型稳定剂有黄原胶、卡拉胶、亚麻籽胶、CMC、结冷胶、微晶纤维素和奇亚籽胶。

2.1 黄原胶 (Xanthan gum)

黄原胶的分子结构如图2所示,其主链是线性连接的 β -1,4-D-葡萄糖,在C-3处有一个三糖侧链,由 β -1,4-D-甘露糖和 β -1,2-D-葡萄糖醛酸以1:2的比例交替连接,形成一种阴离子型多糖^[9]。黄原胶相对分子质量一般约为 $2 \times 10^6 \sim 2 \times 10^7$ Da^[10]。此外,黄原胶约50%的末端甘露糖残基被丙酮酸化,而黄原胶分子的丙酮酸含量会影响其在水溶液中的构象,能够使其从刚性有序状态转变为更灵活、无序状态,使其具有较高的黏度和热稳定性^[11-12]。黄原胶水溶液黏度较大,是一种典型的非牛顿流体,即黄原胶水溶液的黏度随着剪切速率的增大而减小。

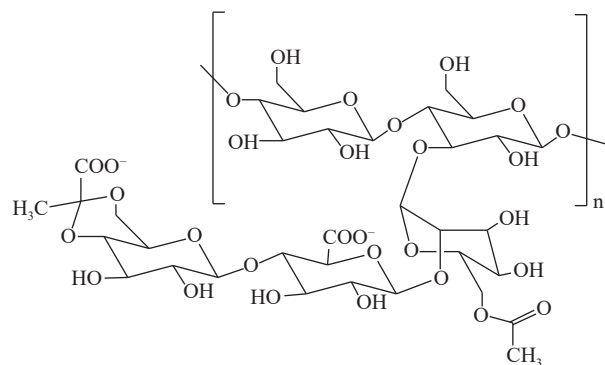


图2 黄原胶的结构示意图

Fig.2 Structure diagram of xanthan gum

黄原胶应用于冰淇淋的时间比较早,在1990年,黄原胶已被应用于我国冰淇淋的生产。研究证明,相较于其它稳定剂,黄原胶的抗融性比较差^[13]。这可能是黄原胶在溶液中通过氢键和聚合物缠结形成分子间聚集体。在冰淇淋老化时,其主链和侧链之间相互缠绕并结合在一起,形成了更灵活、无序的网状结构,从而产生了高黏度^[10]。而这种高黏度干扰了冰淇淋在凝冻过程中通过搅拌吸收空气和形成气泡的能力。而空气传热慢,气泡的存在会使冰淇淋传热速率降低,从而融化的更慢。这也与张欣等^[14]的研究一致,他们发现向冰淇淋中添加0.3%的黄原胶、CMC、海藻酸钠、刺槐豆胶,其中添加黄原胶的样品黏度最大、膨胀率最低、抗融性也最差。这表明,黏度对冰淇淋抗融性的影响存在着一个范围,该范围内黏度越高,对冰淇淋的抗融性积极影响越强,超出该范围的则会产生不太理想的抗融性。此外,黄原胶中丙酮酸的含

量对冰淇淋抗融性也存在着一一定的影响。郑梅霞等^[15]将丙酮酸含量较多的 FJAT-10151-DTJZ 黄原胶和市售黄原胶分别添加到酸奶冰淇淋中进行对比, 结果发现添加 FJAT-10151-DTJZ 的冰淇淋有更好的抗融性。

虽然黄原胶抗融性差, 但其黏度高、结合水能力强, 使冰淇淋口感细腻、有弹性并且具有很强的耐酸碱盐能力, 价格低廉, 而且黄原胶能和其它多糖发生协同增效作用, 如黄原胶与半乳甘露聚糖(如刺槐豆胶、瓜尔胶等)的组合可以使混合物具有理想的弹性/搅打性能。例如 Wang 等^[16]发现黄原胶与刺槐豆胶在黏度上有协同增效作用, 并且能形成热可逆凝胶。因此, 研发对抗融性要求高的冰淇淋不添加黄原胶或者可以使用低剂量的黄原胶与其他稳定剂联用, 以及可以考虑对黄原胶进行改性来增强冰淇淋的抗融性。

2.2 卡拉胶 (Carrageenan)

卡拉胶是一种阴离子型多糖, 它是由 3,6-脱水-D-半乳糖残基和 D-半乳糖组成^[17], 其相对分子质量一般为 $10^5 \sim 10^6$ Da, 其半乳糖残基上含有硫酸酯基 ($\text{O}-\text{SO}_3^-$), 根据硫酸酯基含量和位置的不同将卡拉胶分为 κ 型、 ι 型和 λ 型等^[18], 其结构如图 3~图 5 所示。

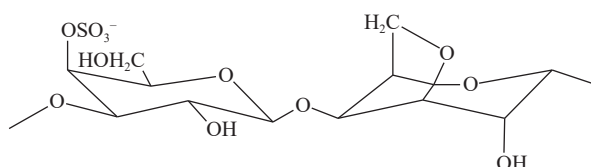


图 3 κ -卡拉胶的结构

Fig.3 Structure diagram of κ -carrageenan

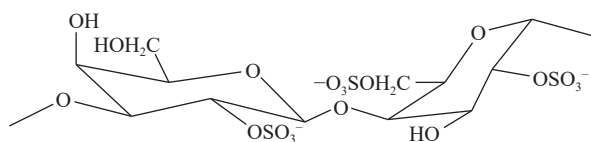


图 4 λ -卡拉胶的结构

Fig.4 Structure diagram of λ -carrageenan

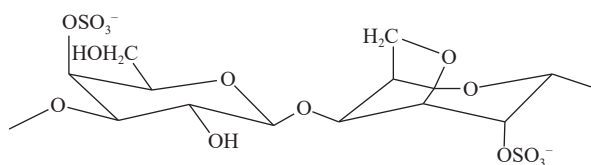


图 5 ι -卡拉胶的结构

Fig.5 Structure diagram of ι -carrageenan

卡拉胶是冰淇淋中最常用的稳定剂。研究表明, 卡拉胶尤其是 κ -卡拉胶的硫酸酯基团带负电, 可以和冰淇淋中的酪蛋白胶束发生静电反应, 使酪蛋白胶束的稳定层被破坏。在加热条件下, 卡拉胶变成无规则的卷曲状, 进入酪蛋白胶束中。在冷却过程中, 卡拉胶分子 D-半乳糖中的 O-2 和 O-6 通过氢键形成双螺旋结构, 与酪蛋白胶束中的 α_s -酪蛋白和 β -酪蛋白交联形成三维网络结构^[17, 19-20], 增加了冰淇淋组织抵御塌陷的能力。另外, 和其它形成凝胶网络结构

的稳定剂一样, 降低冰淇淋中水的流动性, 延长乳清扩散时间, 进而增强冰淇淋的抗融性。秦晨旭等^[21]研究发现, 在相同的添加量下, 添加了卡拉胶的冰淇淋抗融性明显好于瓜尔胶和刺槐豆胶。孙梦雅等^[22]研究同样表明, 与瓜尔胶和明胶相比, 添加卡拉胶可明显延长冰淇淋融化滴落第一滴的时间。Chan 等^[23]发现在冰淇淋中添加 κ -卡拉胶和牛奶分离蛋白的混合物可以增强持水能力并且表现出更大的抗融性。此外, 研究表明, 在冰淇淋中加入 κ -卡拉胶可以抑制多糖和酪蛋白之间的相分离, 这与它可以和酪蛋白形成网络结构的特性密切相关^[5, 24]。也就是说, 卡拉胶可以与酪蛋白形成网络结构, 增强冰淇淋的抗融性, 并且可以抑制多糖和酪蛋白之间存在的相分离。因此, 要研发对抗融性要求比较高的冰淇淋添加卡拉胶尤其是 κ -卡拉胶是一种很好的选择。

2.3 亚麻籽胶 (Flaxseed gum)

亚麻籽胶是一种阴离子型多糖, 主要由含有 L-鼠李糖、L-岩藻糖、L-半乳糖和 D-半乳糖醛酸的酸性果胶状组分和含有 L-阿拉伯糖、D-木糖和 D-半乳糖的中性阿拉伯木聚糖组分组成^[25]。亚麻籽胶的分子量为 $1.6 \times 10^6 \sim 1 \times 10^7$ Da。它是一种亲水胶体, 其黏度相对较低, 浓度为 0.3% 时, 亚麻籽胶的黏度仅为瓜尔胶和刺槐豆胶的一半左右^[26]。研究表明, 在相同浓度下, 高中性多糖含量的亚麻籽胶溶液表现出剪切稀化和弱凝胶特性, 而高酸性多糖含量的亚麻籽胶溶液显示出典型的牛顿流体行为^[26-27]。虽然亚麻籽胶常被应用在食品中作为增稠剂, 但目前国内外将其应用在冰淇淋中的研究比较少。但有研究表明, 亚麻籽胶和乳清蛋白之间存在着协同效应, 可以使其溶液的黏度增加, 并且亚麻籽胶和乳清蛋白在低温下通过共价键使大部分蛋白质交联(半胱氨酸-硫醇-二硫化物桥联), 小部分通过非共价聚合物相互作用(即氢键和疏水作用)形成了水凝胶^[28-29]。亚麻籽胶的这些特性很适合应用于冰淇淋中来增强其抗融性。焦宇知^[30]与胡国华等^[31]的研究都表明, 亚麻籽胶可以增强冰淇淋的抗融性。目前, 因黏弹性高的冰淇淋为市场畅销产品, 而黏度相对较低的亚麻籽胶在冰淇淋中应用较少。在研发抗融性好、具清爽口感的冰淇淋时, 借助其与乳清蛋白之间的协同作用和低温下形成凝胶的特点, 可适量添加亚麻籽胶。

2.4 羧甲基纤维素钠 (Sodium carboxymethyl cellulose, CMC-Na)

羧甲基纤维素是通过 Williamson 醚反应(碱化/丝光化和醚化反应)合成的一种阴离子型多糖, 应用于食品中的 CMC 通常指的是它的钠盐, 即羧甲基纤维素钠, 其分子结构如图 6 所示。CMC 的分子量从几千到百万不等。CMC 具有很好的水溶性, 并且长期储存也具有稳定的保水性。

与其它稳定剂相比, CMC 增强冰淇淋抗融性的能力也很突出。张欣等^[14]研究发现, 与海藻酸钠、刺

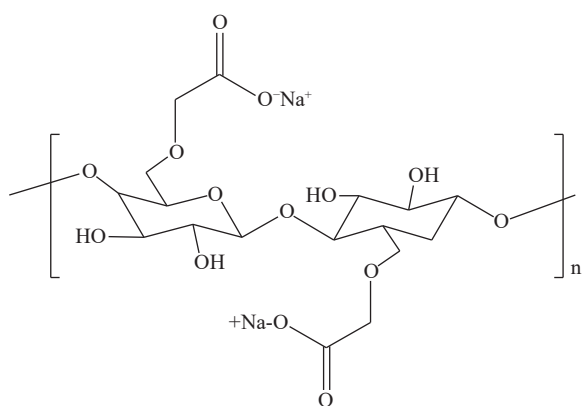


图 6 CMC 的结构

Fig.6 Structure diagram of CMC

槐豆胶和黄原胶相比,CMC 对大豆冰淇淋成品融化率的影响最大。付爽等^[32]的研究也同样表明,与瓜尔胶和琼脂相比,添加 CMC 的冰淇淋抗融性更好。Sebayang 等^[33]研究发现,CMC 可以增加呈酸性的冰淇淋的膨胀率并影响其抗融性。这可能是因为 CMC 分子上的负电荷可以和带正电荷的酪蛋白胶束建立静电相互作用,形成凝胶网络结构^[34-35],从而提高了冰淇淋的稳定性,减慢了冰淇淋的融化速度。Cheng 等^[36]的研究也发现,CMC 阴离子基团与蛋白质表面带正电区域存在相互吸引作用,会形成三维网络结构,并且这种网络结构可以有效地抑制冰淇淋混合物模型(椰子油+脱脂奶粉+稳定剂乳液)的相分离,增强其稳定性。此外,研究表明 CMC 还可以通过抑制在冷冻、储存期间冰晶的生长,来增强冰淇淋的抗热震性和冻融稳定性^[11]。在冰淇淋配方设计时,可以考虑添加 CMC 和半乳甘露聚糖类稳定剂的复配来抑制半乳甘露聚糖类稳定剂在冰淇淋中存在的相分离。

2.5 结冷胶 (Gellan gum)

结冷胶是一种阴离子型多糖,其主链是由(1-3)- β -D-葡萄糖、(1-4)- β -D-葡萄糖、(1-4)- β -D-葡萄糖醛酸、(1-4)- α -L-鼠李糖四糖重复单位组成的一个线性结构,结冷胶的分子量高达 $0.5 \sim 1 \times 10^6$ Da^[37]。根据酰基含量高低,结冷胶可分为高酰基结冷胶(HA)和低酰基结冷胶(LA),高酰基结冷胶每单位有 1 个甘油酰基和 0.5 个乙酰基,将高酰基结冷胶酰基脱除,可得到低酰基结冷胶^[38]。HA 结冷胶形成的凝胶柔软、有弹性且不易碎,保水能力弱,而 LA 结冷胶会形成坚硬、非弹性且易碎的凝胶,保水能力强^[39]。加热时,结冷胶分子在水溶液中呈无序的单链线圈,在随后的冷却过程中转变为有序的双螺旋构象,然后通过弱相互作用(如氢键和范德华力)在螺旋之间进行关联,导致分子缔合,从而形成热可逆的弱凝胶^[40]。Carolina 等^[41]研究发现具有线圈结构的结冷胶和乳清蛋白之间可以形成静电复合物,减弱料液的不相容和相分离。结冷胶的这些特性使它很适合添加到冰淇淋中改善冰淇淋的品质,尤其是抗融性。虽然结冷

胶易与 Ca^{2+} 结合,但和水中钙镁盐体系不同。在加热过程中,乳中剩余的游离钙也会与乳蛋白质结合,含乳浆料中的钙盐不会干扰结冷胶的水合作用^[11]。在冰淇淋中还可以添加柠檬酸钠、磷酸氢二钠等整合剂,或者使用钙敏感性更低的高酰基结冷胶来解决这个问题。因此,可以考虑添加结冷胶尤其是高酰基结冷胶作为稳定剂研发抗融性好的冰淇淋。

2.6 微晶纤维素 (Microcrystalline cellulose, MCC)

微晶纤维素是一种纤维素衍生物,是由(1 $\rightarrow$ 4)连接的 β -D-葡萄糖基单元组成的直链式多糖,是一种阴离子型生物聚合物^[42]。研究发现阴离子的 MCC 分子可以吸附在蛋白质阳离子部分的表面,两种聚合物之间的界面存在缔合静电作用,形成了凝胶网络,可以提高产品抗冻融循环的稳定性^[43]。MCC 经过高速剪切分散和均质后,可以均匀分散在水中,与水通过氢键作用形成三维网络结构^[44]。MCC 能形成网格完整、格与格之间密接的精细网络,该网络中的水被紧密包裹,不易流动,赋予 MCC 具有更强的吸水能力,使冰淇淋中可移动和形成冰晶的水含量下降,进而可以抑制冰晶的生长,减慢融化的速度,改善膨胀率,并增加硬度^[12]。此外,充分水合的 MCC 在冰淇淋浆料中具有独特的稳定性,通过乳蛋白和 MCC 之间的静电相互作用,可以防止冰淇淋中的乳清分离^[11]。它的这些特性有利于保持冰淇淋的组织稳定和形体完整,提高冰淇淋的抗融化能力。研究发现,将 0.4% 的 MCC 添加到冰淇淋中,浆料可形成凝胶,并保持冰淇淋内部的空气-脂肪-水三相体系,从而提高冰淇淋的抗热震性,保持冰淇淋的原始结构^[45]。陈珍珠^[46]的研究也表明随着 MCC 添加量的增加,冰淇淋的抗融性和保型性逐渐增强,尤其当 MCC 含量大于 0.35% 时,冰淇淋的融化速度明显低于对照组。因此,可以添加 MCC 到冰淇淋中以增强产品的抗融性。

2.7 奇亚籽胶 (Chia seed gum)

奇亚籽胶,也叫奇亚籽多糖,是一种阴离子型杂多糖,由 β -1,4-D-木糖、 α -1,4-D-葡萄糖苷和 β -1,4-D-木糖单位组成^[47]。研究表明,奇亚籽胶具有较高的吸水能力,当它溶解在水中时,由于其含有丰富的游离羟基,可以与水分子结合形成凝胶^[48]。此外,由于奇亚籽胶带负电,它还可以和带正电的酪蛋白胶束表面之间发生静电相互作用,形成凝胶网络,增加溶液的黏度^[49]。刘婷婷等^[50]的研究也表明了这一点,他们发现奇亚籽胶可以在冰淇淋中形成三维网状结构,并且由于其良好的保水、保油性,可以束缚水分子和溶质分子,减弱物质间的相互作用,降低冰晶融化后水的流动来增强冰淇淋的抗融性。Reihaneh 等^[51]也发现与瓜尔胶相比,添加了奇亚籽胶的冰淇淋抗融性更强,并且抗融性随着奇亚籽含量的增加而增强。这与 Bruno 等^[52]的研究结果一致,他发现与含有 1% 奇亚籽黏液的冰淇淋相比,含有 2% 黏液的样品抗融性更好。Bayram^[53]研究发现与其它样品对比,奇亚籽

胶含量高的冰淇淋完全融化的时间最长。综上所述,奇亚籽胶很适合添加到冰淇淋中来增强冰淇淋的抗融性。不过 Giovanni 等^[54]发现奇亚籽胶在老化过程中会发生多糖链的解离,也就是说老化会破坏奇亚籽胶凝胶网络的稳定性,使其黏度降低。因此,在冰淇淋中使用奇亚籽胶来增强产品的抗融性时需要考虑老化时间的长短。

3 非离子型稳定剂对冰淇淋抗融性的影响

非离子型稳定剂指的是一种在水溶液中不会电离出离子的稳定剂。冰淇淋中常用的非离子型稳定剂有罗望子胶、刺槐豆胶、瓜尔胶、刺云实胶、阿拉伯胶等。

3.1 罗望子胶 (Tamarind seed gum)

罗望子胶的分子结构如图 7 所示,主链由 β -1,4-D-葡萄糖构成,侧链由 α -1,4-D-木糖和 β -1,6-D-半乳糖- α -1,2-D-木糖组成^[55],它的特性介于含半乳甘露聚糖的单链多糖和含螺旋状多糖的稳定剂功能之间^[56]。罗望子胶的相对分子量约为 $2.5\sim 6.5\times 10^5$ Da。由于罗望子胶无电荷的特点,其溶液的黏度在 pH2~8 范围内能保持稳定^[57]。

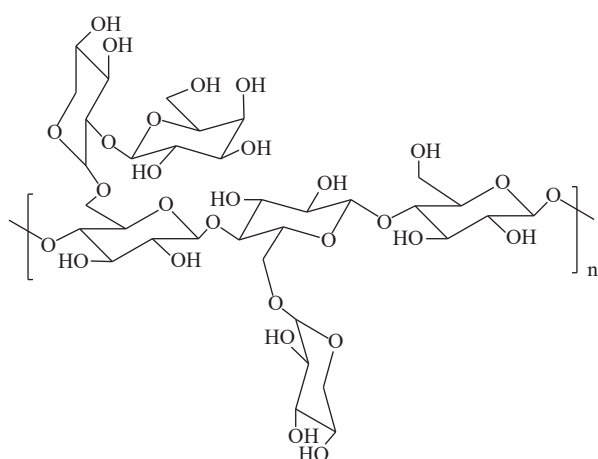


图 7 罗望子胶的结构图

Fig.7 Structure diagram of tamarind seed gum

虽然罗望子胶已被用作冷冻产品的稳定剂,但迄今为止,将罗望子胶应用在冰淇淋中的研究较少。研究表明,罗望子胶在蔗糖的存在下可以通过氢键结合形成凝胶,在冷冻和解冻时保持食物组织结构的完

整性,并且在冻融过程中凝胶强度会变得更高、更富弹性^[11, 58]。此外,罗望子胶可以抑制冰淇淋中冰晶的生长。罗望子胶具有非常多的支链结构,它在冰淇淋浆料中可以使大量的水分子与氢键连接形成三维网络结构,阻碍了水分子向冰晶的转移扩散,抑制了冰晶的生长,使冰淇淋具有良好的保形性和抗融化能力^[59-60]。罗望子胶和其它多糖也存在着协同作用,它可以和其它多糖通过分子间结合形成更强的凝胶,增强冰淇淋的抗融性。例如,卡拉胶和罗望子胶可以形成更厚、更致密的凝胶网络^[57]。刘爱国等^[61]发现罗望子胶与黄原胶、罗望子胶与 CMC、罗望子胶与魔芋精粉分别在 3:7、1:2、1:9 的比例下,具有黏度协同作用。Sun 等^[62]发现含有刺槐豆胶和罗望子胶两种稳定剂和含有其中一种稳定剂的冰淇淋相比,抗融性和保型性更加明显。

3.2 刺槐豆胶 (Locust bean gum)

刺槐豆胶是一种半乳甘露聚糖,如图 8 所示,它以 β -(1,4)连接的 D-甘露糖为主链,部分甘露糖上连接着 α -1,6-D-半乳糖侧链^[63]。刺槐豆胶的分子量约为 $2\sim 3\times 10^6$ Da,其水溶液为非牛顿流体。刺槐豆胶在正常条件下不会形成凝胶,但研究表明,温度在零下时,刺槐豆胶可以通过 D-甘露糖主链上无半乳糖部分的区域以氢键结合的形式形成弱凝胶^[26, 64]。此外,刺槐豆胶在高浓度蔗糖溶液中也能形成凝胶^[65]。并且刺槐豆胶在冷冻过程中形成的凝胶状网络在随后的温度波动、冰晶再结晶过程中不断强化,使升温过程中冰晶周围的未冷冻溶液被截留于网络孔隙内。在随后的降温过程中,截留在孔隙中的水会冻结在孔隙中现有的冰晶上,而不是通过未冻结相迁移形成更大的冰晶^[66]。由上可知,刺槐豆胶能抑制大冰晶的生长,防止因大冰晶的存在而加速冰淇淋的崩塌和融化。

综上所述,刺槐豆胶的这些特性说明了它是生产抗融性佳的冰淇淋的良好选择。研究表明,刺槐豆胶在无脂膨化冷冻饮品中具有很强的冻融稳定性^[27]。Marcia 等^[67]也发现,刺槐豆胶的存在可以降低羊奶冰淇淋的融化率。Amin 等^[68]发现刺槐豆胶作为增稠剂的存在显著提高了乳状液的抗凝结稳定性,但他们也发现了刺槐豆胶会导致酪蛋白乳液絮凝。这与

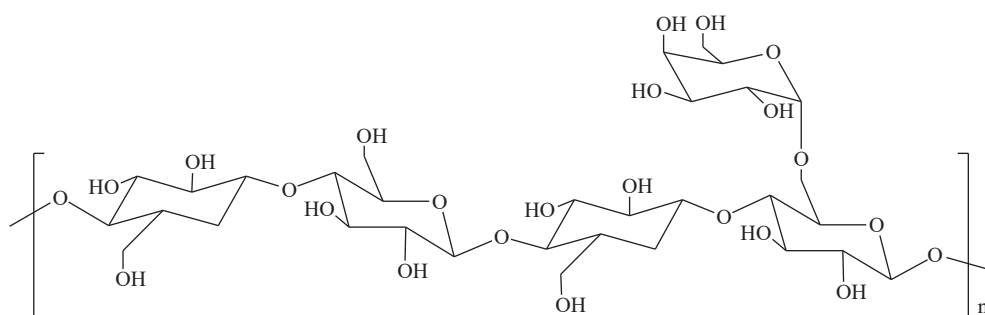


图 8 刺槐豆胶的结构图

Fig.8 Structure diagram of locust bean gum

Schorsch 等^[69]的理论一致,他认为刺槐豆胶和牛奶蛋白溶液不相容,导致相分离。因此,刺槐豆胶在冰淇淋中最好与其他胶体联合使用,例如卡拉胶与刺槐豆胶结合使用,通过卡拉胶与酪蛋白胶束尤其是 κ -卡拉胶和 κ -酪蛋白的相互作用,使酪蛋白胶束在溶液中与刺槐豆胶更相容^[65-66]。Anna 等^[70]发现刺槐豆胶、瓜尔胶和 ι -卡拉胶混合物作为稳定剂的冰淇淋的融化时间最短。

3.3 瓜尔胶 (Guar gum)

瓜尔胶是一种半乳甘露聚糖,其分子结构和刺槐豆胶相似,如图 9 所示,它以线性 β -1,4-键甘露糖单元为主链和 α -1,6-键半乳糖单元(2:1)作为侧链连接^[71]。它的分子量在 $1 \times 10^6 \sim 2 \times 10^6$ Da 之间。因为水分子与瓜尔胶的半乳糖单元相互作用,形成分子间链缠结,使得其黏度较高^[72]。瓜尔胶的分子结构的特点是线性并形成螺旋结构,加热冷却后会生成坚硬而松脆的凝胶^[73]。

在冰淇淋中添加瓜尔胶可以防止冰晶生长,增强冰淇淋的稳定性。瓜尔胶具有支链结构,不能和相邻的瓜尔胶大分子之间形成氢键,导致它的水合作用时间短,因此,适用于采用高温短时杀菌的冰淇淋生产。瓜尔胶和刺槐豆胶结构相似,特性也相似,但瓜尔胶的水合时间更短,很适用于连续式凝冻方式的冰淇淋配料中作为替代刺槐豆胶的稳定剂。Cheng 等^[36]研究发现用瓜尔胶制备的冰淇淋混合模型(椰子油+脱脂奶粉+稳定剂乳液)存在着相分离,并且瓜尔胶的分子量越高,越容易引起相分离^[74]。孙梦雅等^[22]的研究表明,与卡拉胶和明胶相比,添加了瓜尔胶的冰淇淋抗融性最差。Fateme 等^[75]也发现,向低脂

冰淇淋中添加相同含量的罗望子胶、瓜尔胶及其混合物,添加瓜尔胶的冰淇淋抗融性最差。这是因为瓜尔胶分子中的半乳甘露聚糖与酪蛋白不相容,存在着相分离的问题,造成抗融性较差。为了防止上述现象的发生,瓜尔胶通常与其他稳定剂(如刺槐豆胶、卡拉胶、黄原胶等)复配使用^[76]。例如 Anna 等^[70]的研究就发现瓜尔胶、刺槐豆胶和 ι -卡拉胶混合物作为稳定剂的冰淇淋的融化时间最短。综上所述,瓜尔胶水合时间短,可以抑制冰晶生长,但它存在着相分离和抗融性差等问题。因此,若研发对抗融性要求较高的冰淇淋时建议不单独使用瓜尔胶,应使用瓜尔胶与其它胶体复配来增强冰淇淋的抗融性。

3.4 刺云实胶 (Tara gum)

刺云实胶也叫塔拉胶,是一种半乳甘露聚糖。其分子结构如图 10 所示,是由 β -1,4-D-甘露糖的主链与 α -D-半乳糖通过 α -(1,6)键连接,其半乳糖/甘露糖比率为 1:3^[77],分子量约为 1×10^6 Da。刺云实胶在结构和功能特性方面与瓜尔胶和刺槐豆胶相似。刺云实胶中甘露糖与半乳糖的比例为 3:1,而瓜尔胶和刺槐豆胶中的甘露糖与半乳糖的比例分别为 2:1 和 4:1。

刺槐豆胶在冰淇淋应用中具有许多优势,但近年来,由于需求快速增长,刺槐豆胶的价格大幅上涨。而塔拉树生长周期短,胶体价格较低,因此,刺云实胶可作为刺槐豆胶的替代品^[78]。而且刺云实胶有良好的稳定性,很适合应用于冰淇淋的生产。刺云实胶的多糖链可以通过相互缠绕形成网络,并且这种网络结构随着其浓度的增加而增强。由半乳甘露聚糖形成的刺云实胶,每个分子中都含有大量羟基。因

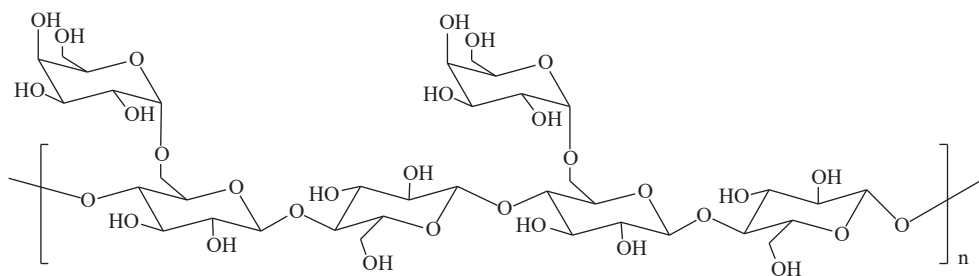


图 9 瓜尔胶的结构图

Fig.9 Structure diagram of guar gum

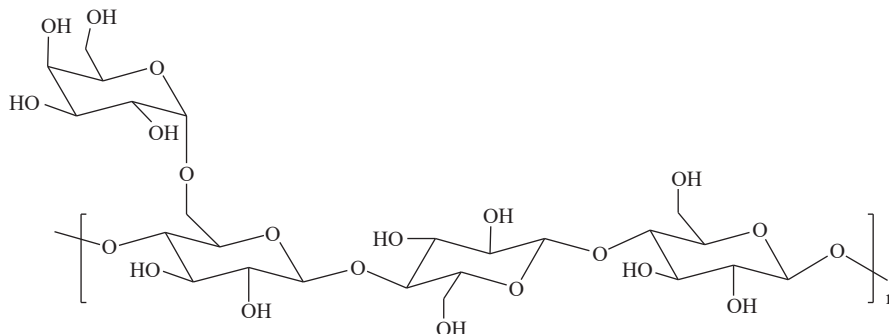


图 10 刺云实胶的结构图

Fig.10 Structure diagram of tara gum

此,在更高浓度的刺云实胶溶液中,由于氢键数量的增加,可以形成更缠绕的网络^[73]。Eliana等^[79]发现将刺云实胶加入到豌豆蛋白和食用油构成的乳状液中可以形成高黏度的弱凝胶,形成更多的束缚水并保持乳状液结构的稳定。Luis等^[80]发现与CMC为稳定剂的冰淇淋相比,添加刺云实胶的冰淇淋融化程度明显下降。此外,由于刺云实胶在酸性条件下具有阴离子性质,因此,可以吸附在带正电荷的酪蛋白胶束上,形成强化的酪蛋白凝胶网络,增强了凝胶硬度和黏度^[81]。但刺云实胶形成的凝胶存在着硬度大、弹性小等缺点,可以考虑将刺云实胶与其他胶体复配来解决。与刺槐豆胶类似,刺云实胶与许多胶体之间都存在着协同增效作用,如可与琼脂或黄原胶共同使用,以提高凝胶强度,并降低其脱水倾向。如Wu等^[82]研究发现刺云实胶的平滑区域与k-卡拉胶的螺旋结构之间相互缠绕,形成凝胶协同效应。刺云实胶与刺槐豆胶结构相似,但价格较低,并且能增强冰淇淋的抗融性。因此,既要保持冰淇淋抗融性能又需控制成本时,可考虑用刺云实胶替代部分刺槐豆胶。

3.5 阿拉伯胶 (Arabic gum)

阿拉伯胶的主链由1,3-连接的 β -D-半乳糖单元组成,侧链由二至五个1,3-连接的 β -D-半乳糖单元组成,通过1,6-连接到主链^[83]。阿拉伯胶的分子量在 $2.5 \times 10^5 \sim 1 \times 10^6$ Da。与其它胶体不同的是,阿拉伯胶在很高的浓度下黏度也很低^[84]。阿拉伯胶吸水性好,它可以通过水合作用形成大量的束缚水来抑制冰晶的排列,减少大冰晶的生成,增强冰淇淋的抗融性^[83]。Sun等^[85]研究表明,在羧基酰胺区域,阿拉伯胶的羧基和乳清蛋白的氨基之间可以发生静电相互作用提高乳液的稳定性,他们还发现阿拉伯胶和乳清蛋白原之间可以形成凝胶网络结构。由于阿拉伯胶分子中含有极性的丝氨酸、组氨酸,这两种极性蛋白质形成的糖肽链有助于冰淇淋结构的稳定。糖肽链中的多糖结构易溶于由非脂乳固体形成的亲水相中,其肽链结构乳化由乳脂肪形成的疏水相。正因为糖肽链与配料中的蛋白质、乳糖、水、脂肪等分子间的这种相互作用,能形成更强的网络结构,增强冰淇淋浆料的黏度和稠度,减弱冰淇淋的融化趋势^[86]。Rahil等^[87]研究发现,阿拉伯胶含量对酸奶冰淇淋的保型性有显著作用。因阿拉伯胶的黏度低,乳化效果好,与乳容易形成网络结构,其适合于生产入口即化、清爽型、全乳质的冰淇淋。

4 总结

综上所述,虽然目前国内外对冰淇淋相关的研究很多,并且把冰淇淋的抗融性作为一个检验指标,但冰淇淋中稳定剂对抗融性作用的准确机理尚不清楚,而且冰淇淋的抗融性不能归因于一个特定的因素,而是由多种因素相互作用的结果。就已有的研究发现,稳定剂主要通过三个方面来提高冰淇淋的抗融性,一是通过增加浆料的黏度以延长乳清相从冰淇淋

向下流动的时间,进而减缓冰淇淋的融化速度;二是凝胶状网络形成空间位阻,降低水的流动性,增加冰淇淋的抗融性。其中,阴离子型稳定剂主要和乳中蛋白质通过静电作用形成凝胶网络,而非离子型稳定剂则是通过氢键形成凝胶网络;三是抑制大冰晶的生成来增强冰淇淋的抗融性。这些研究更多的是在探究如何延长水从冰淇淋内层扩散到外层的时间,而没有更深层次的去研究如何使冰淇淋中的冰晶更不易融化,如研究不同稳定剂对冰淇淋的导热系数、玻璃化转变温度等热物性方面的作用。由于单一的稳定剂只具有特定的作用,甚至还有一些稳定剂和冰淇淋中的乳蛋白不相容,发生相分离,导致蛋白质和稳定剂的功能发生改变而影响冰淇淋的抗融性。因此,要获得抗融性良好的冰淇淋,就要对稳定剂的复配进行研究。充分利用各自的优点,弥补稳定剂单一使用存在的不足,使稳定剂之间以及稳定剂与冰淇淋成分之间形成协同增效作用。

参考文献

- [1] Allied Market Research. Ice cream market by product type: Global opportunity analysis and industry forecast 2017–2023 [J/OL]. 2020, Retrieved from <https://www.alliedmarketresearch.com/ice-cream-market>.
- [2] MUSE M R, HARTEL R W. Ice cream structural elements that affect melting rate and hardness[J]. *Journal of Dairy Science*, 2004, 87(1): 1–10.
- [3] WUB Q, FREIRE D O, HARTEL R W. The effect of overrun, fat destabilization, and ice cream mix viscosity on entire meltdown behavior[J]. *Journal of Food Science*, 2019, 84(9): 2562–2571.
- [4] WARREN M M, HARTEL R W. Effects of emulsifier, overrun and dasher speed on ice cream microstructure and melting properties[J]. *Journal of Food Science*, 2018, 83(3): 639–647.
- [5] BAHAMPARVAR M, TEHRANI, M M. Application and functions of stabilizers in ice cream[J]. *Food Reviews International*, 2011, 27(4): 389–407.
- [6] MARSHALL R T, GOFF H D, HARTEL R W. Ice cream [M]. Canada: Springer, 2012: 316–317.
- [7] MOHAMMAD Y, SEID M J. Recent advances in application of different hydrocolloids in dairy products to improve their techno-functional properties[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 88: 468–483.
- [8] ALOGLU H S, OZCAN Y, KARASU S, et al. Influence of transglutaminase treatment on the physicochemical, rheological, and melting properties of ice cream prepared from goat milk[J]. *Miljevarstvo*, 2018, 68(2): 126–138.
- [9] ZHAO Q Z, ZHAO M M, YANG B, et al. Effect of xanthan gum on the physical properties and textural characteristics of whipped cream[J]. *Food Chemistry*, 2009, 116(3): 624–628.
- [10] 张雪梅, 严海源, 张忠亮, 等. 黄原胶的生产及应用进展[J]. *轻工科技*, 2022, 38(3): 15–19. [ZHANG Xuemei, YAN Haiyuan, ZHANG Zhongliang, et al. Production and application progress of xanthan gum[J]. *Light Industry Science and Technology*, 2022, 38(3): 15–19.]
- [11] GRAHAM S. Handbook of hydrocolloids [M]. Britain: Woodhead Publishing, 2021: 317–885.
- [12] JAMES N B. Carbohydrate chemistry for food scientists (Thi-

- rd Edition)[M]. Woodhead Publishing and AACC, 2019: 223–269.
- [13] 陈魏勇. 冰棒、冰淇淋添加剂复配研究与应用[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2008. [CHEN Weiyong. Studies and applications of the mixed emulsifying stabilizer in ice cream and sorbe[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2008.]
- [14] 张欣, 解双瑜, 孙波. 多糖稳定剂在大豆冰淇淋中的应用[J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(5): 142–149. [ZHANG Xin, XIE Shuangyu, SUN Bo. Application of polysaccharide stabilizer in soybean ice cream[J]. *Food Research and Development*, 2022, 43(5): 142–149.]
- [15] 郑梅霞, 朱育菁, 刘波, 等. 黄原胶 FJAT-10151-DTJZ 提高酸奶冰淇淋的抗融性[J]. *福建农业学报*, 2018, 33(10): 1113–1118. [ZHENG Meixia, ZHU Yujing, LIU Bo, et al. Improvements on melt-resistance and sensory quality of yogurt ice cream by using xanthan gum, FJAT-10151-DTJZ[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 33(10): 1113–1118.]
- [16] WANG F, WANG Y J, SUN Z. Conformational role of xanthan in its interaction with locust bean gum[J]. *Journal of Food Science*, 2002, 67(7): 2609–2614.
- [17] 郑瑞峰, 王晓娟, 吴秋艳, 等. 卡拉胶凝胶保水机理及其应用研究[J]. *食品安全导刊*, 2022(8): 186–188. [ZHENG Ruifeng, WANG Xiaojuan, WU Qiuyan, et al. Study on water retention mechanism of carrageenan gel and its application[J]. *China Food Safety Magazine*, 2022(8): 186–188.]
- [18] 董晓, 吕广, 王姣姣. 卡拉胶与酪蛋白作用机理的研究与评价方法的建立[J]. *中国食品添加剂*, 2020, 31(10): 69–76. [DONG Xiao, LÜ Guang, WANG Jiaojiao. Research of carrageenan-casein interaction mechanism and establishment of carrageenan evaluation method[J]. *China Food Additives*, 2020, 31(10): 69–76.]
- [19] ANNA K D, AGNIESZKA J D, ANNA K, et al. The impact of ι - and κ -carrageenan addition on freezing process and ice crystals structure of strawberry sorbet frozen by various methods[J]. *Journal of Food Science*, 2019, 85(1): 50–56.
- [20] 胡颖娜. 酪蛋白与卡拉胶凝胶作用机理的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2015. [HU Yingna. Research on the gelling mechanisms of casein and carrageenan[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2015.]
- [21] 秦晨旭, 张慙, 徐保国, 等. 苹果冰淇淋抗融性配方的研究[J]. *食品与生物技术学报*, 2017, 36(8): 807–813. [QIN Chenxu, ZHANG Min, XU Baoguo, et al. Study on melting-resistance formula of apple ice cream[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2017, 36(8): 807–813.]
- [22] 孙梦雅, 刘珊, 顾文娟, 等. 不同类型稳定剂和乳化剂对冰淇淋品质特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(8): 75–80. [SUN Mengya, LIU Shan, GU Wenjuan, et al. Effect of different types of stabilizers and emulsifiers on the quality and characteristics of ice cream[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(8): 75–80.]
- [23] CHAN W S, NAM S O. Functional application of Maillard conjugate derived from a κ -carrageenan/milk protein isolate mixture as a stabilizer in ice cream[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2022, 161: 113406.
- [24] CHAN W S, BYOUNGSEUNG Y. Effect of κ -carrageenan/milk protein interaction on rheology and microstructure in dairy emulsion systems with different milk protein types and κ -carrageenan concentrations[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2021, 45(1): e15038.
- [25] GUO Q B, ZHU X R, ZHEN W Q, et al. Rheological properties and stabilizing effects of high-temperature extracted flaxseed gum on oil/water emulsion systems[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 112: 106289.
- [26] QIAN K Y, CUIS W, WU Y, et al. Flaxseed gum from flaxseed hulls: Extraction, fractionation, and characterization[J]. *Food Hydrocolloids*, 2012, 28(2): 275–283.
- [27] ELBOUTACHFAITIR, DELATTRE C, QUERO A, et al. Fractionation and structural characterization of six purified rhamnogalacturonans type I from flaxseed mucilage[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 62: 273–279.
- [28] MUHAMMAD N A, ZARINA M, NAZIR A, et al. Optimal ultrasound-assisted process extraction, characterization, and functional product development from flaxseed meal derived polysaccharide gum[J]. *Processes*, 2019, 7(4): 189.
- [29] THIERRY H, CLAIRE G, S'EBASTIEN C, et al. Exploration of the co-structuring and stabilising role of flaxseed gum in whey protein isolate based cryo-hydrogels[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 289: 119424.
- [30] 焦宇知. 双歧杆菌芦荟酸奶冰淇淋的研制[J]. *食品工业*, 2008(3): 36–38. [JIAO Zhiyu. Preparation of yog-ice cream with active bifidobacterium and aloe juice[J]. *The Food Industry*, 2008(3): 36–38.]
- [31] 胡国华, 陈明. 亚麻籽胶的特性及其在冰淇淋中的应用[J]. *食品科学*, 2003(4): 23–25. [HU Guohua, CHEN Ming. Properties of flaxseed gum and its application in ice cream production[J]. *Food Science*, 2003(4): 23–25.]
- [32] 付爽, 张秋俊, 倪辉, 等. 冰淇淋复配稳定剂的研究[J]. *泉州师范学院学报*, 2017, 35(6): 25–29. [FU Shuang, ZHANG Qiu-jun, NI Hui, et al. Study on the compound stabilizer of ice cream[J]. *Journal of Quanzhou Normal University*, 2017, 35(6): 25–29.]
- [33] SEBAYANG F, SEMBIRING H. Synthesis of CMC from palm midrib cellulose as stabilizer and thickening agent in food[J]. *Oriental Journal of Chemistry*, 2017, 33: 519–530.
- [34] SARA B, NAGHMEHH, SEYED S S, et al. Flaxseed mucilage: A natural stabilizer in stirred yogurt[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 187: 59–65.
- [35] KOUPANTIS T, KIOSSEOGLOU V. Whey protein-carboxymethylcellulose interaction in solution and in oil-in-water emulsion systems. Effect on emulsion stability[J]. *Food Hydrocolloids*, 2009, 23: 1156–1163.
- [36] CHENG J J, MA Y, LIX S, et al. Effects of milk protein-polysaccharide interactions on the stability of ice cream mix model systems[J]. *Food Hydrocolloids*, 2015, 45: 327–336.
- [37] 蔡坤洪. 结冷胶的改性及性能研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2018. [CAI Kunqi. Modifications and functional properties of gellan gum[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2018.]
- [38] 徐雪蛟. 酰基化差异结冷胶的选择性制备、分子构象、流变性质及其应用特性研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2020. [XU X J. Selective preparation of gellan gum with different acylation and its molecular conformation, rheological behavior and application properties[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2020.]
- [39] HONGBIN Z, FEI Z, RONNIE Y. Hydrogels based on natural polymers[M]. Dutch: Elsevier, 2020: 357–410.
- [40] SAKIE N, TAKAHIROF, MAKOTO N, et al. Molecular structures of gellan gum imaged with atomic force microscopy in relation to the rheological behavior in aqueous systems[J]. *Food Hydrocolloids*, 2008, 22(6): 1148–1159.
- [41] CAROLINA S F P, ROSIANE L C. Interactions between milk proteins and gellan gum in acidified gels[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 112: 106289.

loids 2010, 24: 502–511.

[42] SAGNITE V C, ALBERTO T. Nanocellulose and microcrystalline cellulose from agricultural waste: Review on isolation and application as reinforcement in polymeric matrices[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 118: 106771.

[43] BEATRIZ H, ADRIAN M, MARIA D A. Influence of fiber addition on white sauces made with corn starch: Effect on their freezing/thawing stability[J]. *Journal of Food Science*, 2019, 84(8): 2128–2138.

[44] 薛玉清, 舒成亮, 余立意, 等. 微晶纤维素特性及其在中性乳饮料中的应用研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2016, 7(8): 3143–3147. [XUE Yuqing, SHU Chengliang, YU Liyi, et al. Characteristics of microcrystalline cellulose and its application in neutral dairy beverage[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2016, 7(8): 3143–3147.]

[45] JOHN N A, MAOSHEN C, GOFF H D, et al. Functionality and nutritional aspects of microcrystalline cellulose in food[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 172: 159–174.

[46] 陈珍珍. 微晶纤维素在冰淇淋中的应用[D]. 天津: 天津商业大学, 2014. [CHEN Zhenzhen. The application of microcrystalline cellulose in ice cream[D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2014.]

[47] SUSANA R, MARTA G, JOSE M B, et al. Impact of chia seed mucilage on technological, sensory, and *in vitro* digestibility properties of a texture-modified puree[J]. *Journal of Functional Foods*, 2022, 89: 104943.

[48] COOREY R, TJOE A, JAYASENA V. Gelling properties of chia seed and flour[J]. *Journal of Food Science*, 2014, 79(5): 859–866.

[49] SUSANA R, NATALY P, ANA F, et al. Chia (*Salvia hispanica* L.) seed mucilage as a fat replacer in yogurts: Effect on their nutritional, technological, and sensory properties[J]. *Journal of Dairy Science*, 2021, 104(3): 2822–2833.

[50] 刘婷婷, 张闪闪, 赵文婷, 等. 奇亚籽皮多糖对冰淇淋乳化稳定性及品质的影响[J]. *食品科学*, 2021, 42(10): 32–37. [LIU Tingting, ZHANG Shanshan, ZHAO Wenting, et al. Effect of chia seed peel polysaccharide on aggregate stability of emulsions[J]. *Food Science*, 2021, 42(10): 32–37.]

[51] REIHANEH F, KELVIN K T G, ANTHONY N M. Effect of chia seed mucilage as stabilizer in ice cream[J]. *International Dairy Journal*, 2021, 120: 105087.

[52] BRUNO E C, THIAGO D R, MONICA R S S, et al. Optimization of the mucilage extraction process from chia seeds and application in ice cream as a stabilizer and emulsifier[J]. *Food Science and Technology*, 2016, 65: 874–883.

[53] BAYRAM Ü. Effect of using chia seed powder on physicochemical, rheological, thermal, and texture properties of ice cream[J]. *Journal of Food Process and Preservation*, 2021, 45(5): 15418.

[54] GIOVANNI F, EMILIANO F, PASQUALE S, et al. Structural characterization and physical ageing of mucilage from chia for food processing applications[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 129: 107614.

[55] ERIK A R, STEFANI C C, ANGELICA R G, et al. Micro- and nanoengineered gum-based biomaterials for drug delivery and biomedical applications[M]. Dutch: Elsevier, 2022: 347–382.

[56] YAMATOYA K, TABUCHI A, SUZUKI Y, et al. Biopolymer-based formulation: Biomedical and food applications[M]. Dutch: Elsevier, 2020: 445–461.

[57] 何玉洁. 罗望子胶在凝固型酸奶中的应用及稳定机理研究

[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2018. [HE Yujie. Study on the application and stability mechanism of tamarind gum in set yogurt[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2018.]

[58] 韩明会, 于海龙, 朱莉伟, 等. 罗望子胶的流变学性质及凝胶特性研究[J]. *中国野生植物资源*, 2015, 34(3): 7–11. [HAN Minghui, YU Hailong, ZHU Liwei, et al. Study of rheological properties and gel performance of tamarind gum[J]. *Chinese Wild Plant Resources*, 2015, 34(3): 7–11.]

[59] 孙利军, 辛修锋, 张新川. 新型冷饮稳定剂-罗望子胶的性质及应用[C]. 第十四届中国国际食品添加剂和配料展览会暨第二十届全国食品添加剂生产应用技术展示会. 上海: 中国食品添加剂, 2010: 252–257. [SUN Lijun, XIN Xiufeng, ZHANG Xinchuan. Properties of tamarind gum, a new cold drink stabilizer[C]. The 14th China International Food Additives and Ingredients Exhibition and the 2nd The tenth National Food Additive Production and Application Technology Exhibition. Shanghai: Chinese Food Added Dose, 2010: 252–257.]

[60] 张幸运, 钟秋婵, 王树欣, 等. 亲水胶体对糖溶液模拟冷冻过程中冰晶生长的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(22): 21–27.

[ZHANG Xingyun, ZHONG Qiuchan, WANG Shuxin, et al. Effects of hydrocolloids on the growth of ice crystals in simulated freezing of sugar solutions[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(22): 21–27.]

[61] 刘爱国, 王思昕, 樊凯凯, 等. 罗望子胶与常用胶体的复配研究[J]. *食品研究与开发*, 2013, 34(15): 17–19. [LIU Aiguo, WANG Sixin, FAN Kaikai, et al. Synthesis of tamarind gum and colloids[J]. *Food Research and Development*, 2013, 34(15): 17–19.]

[62] SUN X B, WU Y, SONG Z B, et al. A review of natural polysaccharides for food cryoprotection: Ice crystals inhibition and cryo-stabilization[J]. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 2022, 27: 100291.

[63] TASNEEM H R, VEENA Y, MALLIKARJUNAN N, et al. Radiation processing of locust bean gum and assessing its functionality for applications in probiotic and enteral foods[J]. *Food Science and Technology*, 2019, 112: 108228.

[64] PRAJAPATI V D, MAHERIYA P M, ROY S D. Plant and algal hydrogels for drug delivery and regenerative medicine plant and algal hydrogels for drug delivery and regenerative medicine[M]. Britain: Woodhead Publishing, 2021: 217–260.

[65] BARAK S, MUDGIL D. Locust bean gum: Processing, properties and food applications-A review[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2014, 66: 74–8.

[66] GOFF H D, FERDINANDO D, SCHORSCH C. Fluorescence microscopy to study galactomannan structure in frozen sucrose and milk protein solutions[J]. *Food Hydrocolloids*, 1999, 13: 353–362. SCH.

[67] MARCIA A C, JULIANE P, LUANA T M, et al. Extraction and application of chia mucilage (*Salvia hispanica* L.) and locust bean gum (*Ceratonia siliqua* L.) in goat milk frozen dessert[J]. *Food Sci Technol*, 2018, 55(10): 4148–4158.

[68] AMIN F, RAMMILE E, MELVINH. Influence of pH value and locust bean gum concentration on the stability of sodium caseinate-stabilized emulsions[J]. *Food Hydrocolloids*, 2013, 32: 402–411.

[69] SCHOESCH C, JONES M, NORTON I T. Thermodynamic incompatibility and microstructure of milk protein/locust bean gum/sucrose systems[J]. *Food Hydrocolloids*, 1999, 13(2): 89–99.

[70] ANNA K D, SYLWIA L, EWA J. The effects of selected stabilizers addition on physical properties and changes in crystal struc-

- ture of whey ice cream[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 154: 112841.
- [71] HIMASHREE P, ANIMESH S S, SUNIL C K. Food thickening agents: Sources, chemistry, properties and applications: A review [J]. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 2022, 27: 100468.
- [72] ATHINA T, IOANNIS M, CHRISTOS R. The role of guar gum on sensory perception, on food function, and on the development of dysphagia supplements: A review[J]. *Food Hydrocolloids for Health*, 2022, 2: 100053.
- [73] WU Y B, DING W, JIA L R, et al. The rheological properties of tara gum (*Caesalpinia spinosa*)[J]. *Food Chemistry*, 2015, 168: 366–371.
- [74] WENTAO L, TIM F. Phase separation of a milk protein and guar gum: The effect of guar gum molecular weight and oil addition on the phase diagram[J]. *Food Hydrocolloids for Health*, 2022: 100048.
- [75] FATEMEH J, SEYED M A R. Rheological, physical and sensory characteristics of light ice cream as affected by selected fat replacers[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2018, 12(3): 1872–1884.
- [76] SUMIT G, PRASAD S V. Biopolymers for food design[M]. Academic Press, 2018: 383–407.
- [77] CORTEZ T M C, GAYT M M, REYES V M L, et al. Protein-gum-based gels: Effect of gum addition on microstructure, rheological properties, and water retention capacity[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 116: 303–317.
- [78] HUAMANI M V J, MAURO M A, DARROS B R. Physicochemical and rheological properties of aqueous tara gum solutions [J]. *Food Hydrocolloid*, 2020, 111: 106195.
- [79] ELIANA M V, KARINA B, RENATA S R, et al. High internal phase emulsions (HIPE) using pea protein and different polysaccharides as stabilizers[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 105: 105775.
- [80] LUISA E, LAURA P, JUAN A C, et al. Chemical, microbial and sensory properties of a chestnut and milk ice cream with improved healthy characteristics[J]. *International Journal of Food Properties*, 2020, 23(1): 2271–2294.
- [81] DILEK S, MOSTAFA S, NURAY G. Physical, chemical, and microstructural properties of nonfat yogurts fortified with the addition of tara gum alone or in combination with buttermilk powder[J]. *Journal of Food Process Preservation*, 2019, 43(11): e14217.
- [82] WU Y B, DING W, HE Q. The gelation properties of tara gum blended with *k*-carrageenan or xanthan[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 77: 764–771.
- [83] ABDALBASIT A M. Gum arabic: Structure, properties, application and economics[M]. Academic Press, 2018: 283–295.
- [84] 吉笑盈, 黄洋, 胡希, 等. 魔芋葡甘聚糖与阿拉伯胶复合水溶液流变特性及结构表征[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(14): 101–109.
- [85] JI Xiaoying, HUANG Yang, HU Xi. Rheological properties and structural characterization of konjac glucomannan/arabic gum composite hydrosol[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(14): 101–109.]
- [86] SUN C X, WANG C X, XIONG Z Q, et al. Properties of binary complexes of whey protein fibril and gum arabic and their functions of stabilizing emulsions and simulating mayonnaise[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2021, 68: 102609.
- [87] FERNANDO A A, BIANKA R S, JESSCIAB D S. et al. Acacia mearnsii gum: A residue as an alternative gum arabic for food stabilizer[J]. *Food Chemistry*, 2021, 344: 128640.
- [88] RAHIL R, MOREZA K, MAHDI K, et al. Effects of guar gum and arabic gum on the physicochemical, sensory and flow behaviour characteristics of frozen yoghurt[J]. *International Journal of Dairy Technology*, 2011, 64: 563–568.