DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250928004
引用格式: 李明泽, 杨发军, 毛健鑫, 等. 灰豆子软儿梨冰淇淋配方优化及产品开发[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(3): 31–39.
LI MZ, YANG FJ, MAO JX, *et al*. Formula optimization and product development of ice cream with *Pisum sativum* and *Pyrus ussuriensis* Ruan'er [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(3): 31–39. (in Chinese with English abstract).

灰豆子软儿梨冰淇淋配方优化及产品开发

李明泽[1], 杨发军[2], 毛健鑫[3], 张霁红[1*], 李 祯[1], 谢亚琼[1]

(1. 甘肃省农业科学院农产品贮藏加工研究所, 兰州 730070; 2. 甘肃渭水源药业科技有限公司, 定西 748200; 3. 甘肃农业大学园艺学院, 兰州 730070)

摘 要: 目的 以兰州皋兰县产软儿梨为核心原料, 研发灰豆子软儿梨冰淇淋。**方法** 通过单因素试验筛选适宜的复合胶种类, 对比黄原胶、卡拉胶、瓜尔胶、刺槐豆胶、明胶、羧甲基纤维素钠(sodium carboxymethyl cellulose, CMC-Na) 6 种食用胶对冰淇淋感官品质、融化特性的影响, 确定最优复配食用胶; 在此基础上, 以复合胶添加量(0.100%、0.125%、0.150%)、奶粉添加量(30%、35%、40%)、软儿梨汁添加量(25%、30%、35%)为关键因素, 设计 $L_9(3^3)$正交试验, 结合模糊数学感官评价法优化配方。**结果** 确定灰豆子软儿梨冰淇淋最佳配方为复合胶添加量 0.125%、软儿梨汁添加量 35%、奶粉添加量 35%; 该配方下产品感官综合评分 91.2 分, 色泽均匀, 软儿梨果香与乳香协调, 口感细腻, 总固形物含量 31.2 g/100 g、脂肪含量 6.4 g/100 g、蛋白质含量 2.91 g/100 g, 抗融性良好, 蛋白质含量较高。**结论** 本研究开发的灰豆子软儿梨冰淇淋配方科学合理, 兼具鲜明地域特色, 产品核心理化指标均符合 GB/T 31114—2014《冷冻饮品 冰淇淋》要求, 且营养优势突出, 为软儿梨的高值化开发利用及中式特色冷冻食品的创新研发提供了一定的理论与实践参考。。

关键词: 软儿梨; 灰豆子; 冰淇淋

Formula optimization and product development of ice cream with *Pisum sativum* and *Pyrus ussuriensis* Ruan'er

LI Ming-Ze[1], YANG Fa-Jun[2], MAO Jian-Xin[3], ZHANG Ji-Hong[1*], LI Zhen[1], XIE Ya-Qiong[1]

(1. *Agricultural Product Storage and Processing Research Institute*, *Gansu Academy of Agricultural Sciences*, *Lanzhou* 730070, *China*; 2. *Gansu Weishuiyuan Pharmaceutical Technology Co*., *Ltd*., *Dingxi* 748200, *China*; 3. *College of Horticulture*, *Gansu Agricultural University*, *Lanzhou* 730070, *China*)

ABSTRACT: Objective To develop ice cream with *Pisum sativum* and *Pyrus ussuriensis* Ruan'er using *Pyrus ussuriensis* Ruan'er produced in Gaolan County, Lanzhou as the core raw material. **Methods** Suitable compound gums were screened through single-factor experiments. The effects of 6 kinds of edible gums—xanthan gum, carrageenan, guar gum, locust bean gum, gelatin and sodium carboxymethyl cellulose (CMC-Na) on the sensory quality and melting properties of the ice cream were compared to determine the optimal compound edible gum. Based

收稿日期: 2025-09-28
基金项目: 甘肃省农业科学院重点研发计划项目(2023GAAS16); 甘肃省兰州市皋兰县科技计划项目(2022-03)
第一作者: 李明泽(1986—), 男, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为农产品贮藏加工。E-mail: 496716477@qq.com
***通信作者:** 张霁红(1977—), 女, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为农产品贮藏加工。E-mail: 172235399@qq.com

on these results, an $L_9(3^3)$ orthogonal experiment was designed with the addition levels of compound gum (0.100%, 0.125%, 0.150%), milk powder (30%, 35%, 40%), and *Pyrus ussuriensis* Ruan'er juice (25%, 30%, 35%) as key factors. The formula was optimized by combining the fuzzy mathematics sensory evaluation method. **Results** The optimal formulation for the *Pisum sativum* and *Pyrus ussuriensis* Ruan'er ice cream was determined as follows: Compound gum 0.125%, *Pyrus ussuriensis* Ruan'er juice 35% and milk powder 35%. Under this formulation, the product achieved a comprehensive sensory score of 91.2, exhibiting uniform color, a harmonious aroma of *Pyrus ussuriensis* Ruan'er and milk, and a delicate texture. The content of total solids, fat and protein was 31.2, 6.4 and 2.91 g/100 g, respectively. The ice cream demonstrated good melt-resistance and a relatively high protein content. **Conclusion** The *Pisum sativum* and *Pyrus ussuriensis* Ruan'er ice cream formula developed in this study is scientifically rational and exhibits distinct regional characteristics. All its core physicochemical indicators meet the requirements of GB/T 31114—2014 *Frozen drinks-Ice cream*, and the product has prominent nutritional advantages. This study provides both theoretical and practical references for the high-value development and utilization of *Pyrus ussuriensis* Ruan'er as well as for the innovative research and development of characteristic Chinese frozen foods.

KEY WORDS: *Pyrus ussuriensis* Ruan'er; *Pisum sativum*; ice cream

0 引 言

冰淇淋是全球范围内广受欢迎的冷冻甜点。统计数据显示, 2024 年我国冰淇淋市场规模近 1900 亿元, 预计 2030 年将突破 2300 亿元, 融入国内本地中式特色食材或元素的冰淇淋更是成为市场新宠[1]。传统的冰淇淋一般是以水、甜味剂、乳制品、稳定剂、乳化剂等为主要原料, 经过混合、灭菌、均质、冷却、老化、凝冻、硬化等工艺制作出来的含脂率较高的休闲冷冻食品[2–3]。高糖高脂的食物会刺激神经元形成依赖, 有损健康[4]。消费者对冰淇淋的需求已从传统的"消暑解渴"转向"营养健康"与"风味体验"并重, 推动了低脂、低糖、高蛋白、益生菌等功能性冰淇淋的快速发展。目前, 新型冰淇淋开发除品种口味创新以外, 还呈现出营养功能化和原料天然化的特点[5]。例如高蛋白冰淇淋, 能够有效替代脂肪和乳化剂, 很有市场前景[6–8], 还有近年来较为火热的益生菌冰淇淋[9–10]、减脂冰淇淋[11], 以及玫瑰冰淇淋[12]、猕猴桃冰淇淋[13]、百香果冰淇淋[14]、大麦冰淇淋[15]等添加了各种天然原料的特色冰淇淋。在保持冰淇淋口感、贮藏稳定性的同时去除某些成分或添加一定的功能性成分的功能性冰淇淋食品[16], 例如加入合生元、益生元、抗氧化剂的冰淇淋[17–18]也是冰淇淋新产品开发方面的热点。

软儿梨, 又称香水梨, 是甘肃兰州皋兰县的特产, 也是全国农产品地理标志产品[19]。软儿梨通常在立冬后成熟, 果皮较厚, 果肉硬, 味道酸涩, 经后熟工艺处理后, 果肉质地变软, 汁液增多, 口感有所改善, 呈现出独特的风味[20], 具有润肺止咳、凉心消痰、降火、解疮毒、酒毒等功效[21]。虽在地方饮食中具有悠久历史, 却鲜见在现代化食品加工中得到充分开发, 其在冷冻食品中的应用研究也鲜有报道。麻豌豆, 是豌豆属的一种植物, 属于豆科, 长日型冷季型豆类[22]。在甘肃等地, 麻豌豆常用来制作灰豆子等特色小吃, 颜色呈暗黑色, 可作为天然的食品着色剂。

本研究通过添加软儿梨汁和灰豆子汁(麻豌豆)制作冰淇淋, 旨在开发一款兼具地方特色、天然原料与潜在功能性的冰淇淋产品。通过模糊数学感官评价法, 优化主辅料配比, 并对其理化指标与感官品质进行综合评价。本研究不仅为软儿梨与灰豆子的高值化利用提供了新路径, 也为中式特色冷冻食品的开发提供了理论依据与技术参考, 符合当前食品工业"天然、健康、文化"融合发展的趋势。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

软儿梨(产地兰州市皋兰县什川镇); 麻豌豆(甘肃省兰州市华联超市); 奶粉(临夏燎原乳业有限公司); 木糖醇(食品级, 江苏史蒂文生物科技有限公司); 卡拉胶(食品级, 河南万邦化工科技有限公司); 刺槐豆胶(食品级, 正宏生物科技有限公司); 瓜尔胶(食品级, 北京瓜尔润科技股份有限公司); 羟丙基纤维素(食品级, 泰安瑞泰纤维素有限公司); 单甘酯、谷氨酰胺转氨酶(transglutaminase, TG)[食品级, 佳力士添加剂(海安)有限公司]; 香兰素(食品级, 商丘青山香精香料有限公司); β 环糊精(食品级, 孟州市华兴生物化工有限公司); 食用碱(食品级, 京山吉匠食品有限公司)。

1.2 仪器和设备

PAL-1 折射仪(日本 ATAGO 公司); BSA223S-CW 千分之一电子天平[赛多利斯科学仪器(北京)有限公司]; RE212

型旋转蒸发仪(重庆雅马拓科技有限公司); S-LD150 手持搅拌器(九阳股份有限公司); BC/BD-200GHS9D 海尔冰柜(青岛海尔特种电冰柜有限公司)。

1.3 试验方法

1.3.1 原材料处理及工艺流程

(1)原材料处理

浓缩汁的制备: 将冻藏后的软儿梨果进行打浆, 过滤后使用旋转蒸发仪进行浓缩后制成软儿梨浓缩汁[23]。

灰豆子: 灰豆子是用麻豌豆制作煮成的。先将精选的麻豌豆进行水洗干净, 用清水将其泡胀。放入锅中, 加适量食用碱和少量水, 边炒边煮。豆子皮软瓤沙, 放入砂锅, 加清水、红枣等调料, 用小火煮。煮成稀糊后, 色呈暗红, 豆汁浓稠适度即可, 晾凉后备用。

(2)工艺流程

工艺流程为: 原料→混合→灭菌→均质→冷却→老化→凝冻→硬化。

混合调配: 准确称取所有原辅料, 为防结块, 将复合胶与少量奶粉干混后, 于 40~50 ℃温水中预分散。随后, 将软儿梨汁、灰豆子糊与部分水混合, 低速搅拌下依次加入奶粉、木糖醇、香兰素至溶解。缓慢加入预分散胶液后, 再投入单甘酯、β 环糊精、羧甲基纤维素钠(sodium carboxymethyl cellulose, CMC-Na)等剩余辅料, 提高转速充分搅拌 10~15 min 至体系均匀。最后定量补水至设定总质量。

杀菌、均质: 90 ℃水浴杀菌 20 min, 均质(1350 r/min, 至物料呈均匀液体, 无肉眼可见的奶粉结块、胶体颗粒, 液体顺滑无颗粒感)。

冷却: 均质后冷却到 0~4 ℃。

老化: 在 2~4 ℃条件下老化, 老化时间为 3 h(采用 BC/BD-200GHS9D 海尔冰柜进行老化处理, 密封静置)。

凝冻: 在–6~–2 ℃低温下进行, 凝冻时间为 2 h[采用 BC/BD-200GHS9D 海尔冰柜进行凝冻处理, 每 30 min 取出, 用手持搅拌机低速 1 档(300 r/min)搅打 1 min, 4 次]。

硬化: 在–30~–25 ℃条件下进行速冻, 硬化时间 12 h(采用 BC/BD-200GHS9D 海尔冰柜进行硬化处理, 密封静置)。

1.3.2 灰豆子软儿梨冰淇淋食用胶单因素试验

在软儿梨汁 35%、奶粉 35%、水 24%、木糖醇 4%、TG 酶 0.1%、β 环糊精 0.4%、单甘脂 0.15%、香兰素 0.025%、灰豆子 1.2%配方条件下, 分别考察不同的黄原胶添加量(0.100%、0.125%、0.175%、0.250%、0.350%、0.500%)、卡拉胶添加量(0.05%、0.07%、0.10%、0.13%、0.16%、0.20%)、瓜尔胶添加量(0.10%、0.15%、0.20%、0.25%、0.30%、0.40%)、刺槐豆胶添加量(0.05%、0.07%、0.09%、0.12%、0.16%、0.20%)、明胶添加量(0.50%、0.75%、1.00%、1.25%、1.55%、1.75%)、CMC-Na 添加量(0.20%、0.25%、0.35%、0.45%、0.55%、0.60%)对灰豆子软儿梨冰淇淋品质影响。不同食用胶单因素试验设置 3 次重复试验。

1.3.3 灰豆子软儿梨冰淇淋配方

冰淇淋主要原料包括非脂乳固体、甜味料、脂肪、乳化剂、食品胶体等物质。油脂、甜味料、乳化剂、胶体等是冰淇淋中常用的食品添加剂。甜味剂包括白砂糖、蔗糖、果糖、木糖醇等。油脂包括奶油、淡奶油、棕榈油、黄油等。乳化剂包括单甘酯、蔗糖脂肪酸酯和丙二醇脂肪酸酯等。在冰淇淋工业生产中, 常用的胶体包括刺槐豆胶、卡拉胶、瓜尔豆胶等。本研究选用木糖醇、香兰素作为矫味剂, 卡拉胶、瓜尔胶和刺槐豆胶作为复合胶(1:1:1, *m*:*m*:*m*)[24], 单甘酯作为乳化剂, β 环糊精作为增稠剂, CMC-Na 作为稳定剂, 灰豆作为天然着色剂。灰豆子软儿梨冰淇淋配料及其作用说明见表 1。

1.3.4 主辅料添加量对灰豆子软儿梨冰淇淋感官品质影响研究

(1)单因素试验设计

在其他辅料添加量固定不变(水 24%、木糖醇 4%、TG 酶 0.1%、β 环糊精 0.4%、单甘脂 0.15%、香兰素 0.025%、灰豆子 1.2%)的条件下, 考察软儿梨汁、复合胶、奶粉添加量对灰豆子软儿梨冰淇淋感官品质的影响。软儿梨汁添加量为 25%、30%、35%、40%、45%; 奶粉添加量为 25%、30%、35%、40%、45%; 复合胶添加量为 0.100%、0.125%、0.150%、0.175%、0.200%。每个水平设置 3 次重复试验。

表 1　灰豆子软儿梨冰淇淋配料及其作用说明

Table 1　Ingredients and their functions in *Pisum sativum* and *Pyrus ussuriensis* Ruan'er ice cream

名称	作用
木糖醇	低热量甜味剂, 可用来代替蔗糖
复合胶	起到增稠、稳定、乳化、凝胶作用
单甘酯	有乳化、稳定、抗氧化的作用, 起到保质期作用
TG 酶	增强稳定性及胶凝能力, 改善质地
β 环糊精	增加黏稠性、提升稳定性, 改善口感
香兰素	增加香气、改善口感
奶粉	平衡其他成分, 提升口感细腻程度
灰豆	天然着色剂
软儿梨汁	赋予独特风味及一定的功能性

(2)灰豆子软儿梨冰淇淋配方优化

通过单因素试验确定了软儿梨汁、奶粉及复合胶 3 个影响因素对灰豆子软儿梨冰淇淋感官品质影响较大的取值范围, 以单因素试验的结果为基础设计三因素三水平正交试验, 对灰豆子软儿梨冰淇淋配方进行优化。正交因素与水平设计见表 2。

1.3.5 灰豆子软儿梨冰淇淋感官评定表

参照 GB/T 31114—2014《冷冻饮品 冰淇淋》, 制定灰豆子软儿梨冰淇淋感官品质评定标准。分别对不同配比

的灰豆子软儿梨冰淇淋色泽、形态、组织、滋味气味、杂质进行评价。感官评价人员 10 人，男女各占二分之一，其中 25~35 岁 3 人，36~45 岁 4 人；45 岁以上 3 人，参与感官评价人员均为具有食品研发工作经验且接受过基础感官评价培训。评价过程各样品顺序随机，感官评价采用百分制，色泽、形态及组织状态、口感、滋味气味、杂质 5 项指标分别设定最高分数，见表 3。

表 2 正交因素与水平设计
Table 2 Orthogonal factors and level design

水平	因素		
	A(复合胶添加量)/%	*B*(奶粉添加量)/%	*C*(软儿梨汁添加量)/%
1	0.100	30	25
2	0.125	35	30
3	0.150	40	35

表 3 灰豆子软儿梨冰淇淋感官评价标准
Table 3 Sensory evaluation criteria for *Pisum sativum* and *Pyrus ussuriensis* Ruan'er ice cream

项目	评分标准	评分
色泽	主体色泽均匀一致	20
形态及组织状态	形态完整，大小一致，不变形，不软塌，不收缩、无气孔	15
口感	细腻滑润、无颗粒感、入口即化	35
滋味气味	有冰淇淋的乳香味和软儿梨独特风味，无异味	15
杂质	无正常视力可见外来杂质	15

1.3.6 测定指标及方法

(1)融化率测定

在恒定温度 30 ℃下，取冰淇淋 50 g，放在金属筛网上。筛网下方放置一个已知重量的纸杯，用于盛放融化后滴下的冰淇淋。测量 30 min 称量并记录一次融化的冰淇淋[25]。每个样品设置 3 个独立批次，每批进行 3 次重复测定，融化率计算如公式(1)所示：

$$C/\%=\frac{M_1}{M_0}\times 100\% \quad (1)$$

式中：C 为融化率，%；M_1 为融化的冰淇淋质量，g；M_0 为冰淇淋总质量，g。

(2)理化指标测定

总固形物、脂肪、蛋白质测定按照 GB/T 31114—2014、GB/T 31321—2014《冷冻饮品检验方法》、GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》方法进行测定。每个样品设置 3 个独立批次，每批进行 3 次重复测定。

1.4 数据处理

采用 Origin 2021、SPSS 26 对单因素和正交试验数据进行处理与分析。

2 结果与分析

2.1 复合胶筛选单因素试验

2.1.1 黄原胶对灰豆子软儿梨冰淇淋品质影响

添加少量的黄原胶即可使灰豆子软儿梨冰淇淋形成高黏度体系[26]，由图 1 可知，随着黄原胶添加量提升冰淇淋的挂壁感和厚实度，使得冰淇淋呈现出假塑性流体的特性，质感更为顺滑。黄原胶添加量在 0.175%时达到感官评分最高值 91 分，随着黄原胶添加量的逐渐增大，冰淇淋黏度不断增大，其强假塑性会使冰淇淋口感黏腻，破坏灰豆子软儿梨冰淇淋的清爽感。这与黄原胶"高剪切下黏度下降、静态下保持高黏"的特性相关，已有研究证实，黄原胶虽能有效延缓冰淇淋冰晶生长，但过量会因体系黏度过高引发感官不适。冰淇淋融化后再冻结稳定性分数随着黄原胶添加量增大呈现非线性增长趋势，融化后再冻结稳定性分数在黄原胶添加量 0.350%时达到最大值，此时胶体网络对融化后冰晶再生长的抑制作用最强，但对应的感官评分较低，只有 83 分，综合考虑，选择黄原胶添加量为 0.175%作为最适宜的添加量。

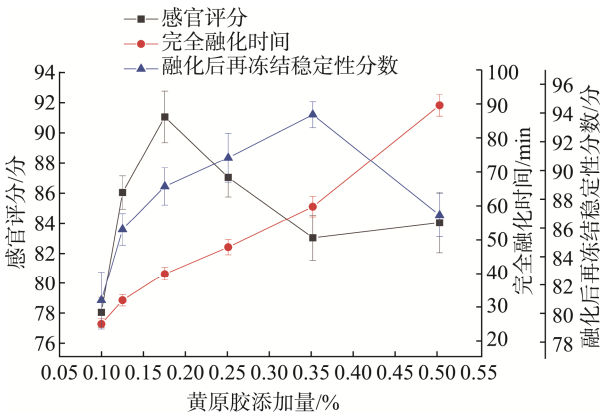


图 1 黄原胶添加量对灰豆子软儿梨冰淇淋品质影响
Fig.1 Effects of xanthan gum addition amount on the quality of *Pisum sativum* and *Pyrus ussuriensis* Ruan'er ice cream

2.1.2 卡拉胶对灰豆子软儿梨冰淇淋品质影响

卡拉胶可与乳蛋白(酪蛋白)通过静电作用结合，稳定乳脂肪乳化体系，防止脂肪上浮和乳清析出，形成弱凝胶结构[27]，在冰淇淋中抑制大冰晶生长，使冰淇淋整体更加细腻。由图 2 可知，随着卡拉胶添加量增大，完全融化时间随之增加，感官评分和融化后再冻结稳定性分数呈现先增加后降低的趋势，在添加量 0.10%时感官评分和融化后再冻结稳定性最佳，冰淇淋质地细腻、保形性佳，评分分别为 96 分和 94 分。卡拉胶添加量超 0.10%后，卡拉胶凝胶作用过强，导致冰淇淋出现明显胶质感，且体系易析水，这与卡拉胶高浓度下形成刚性凝胶结构的特性一致，因此综合考虑卡拉胶添加量 0.10%最为适宜。

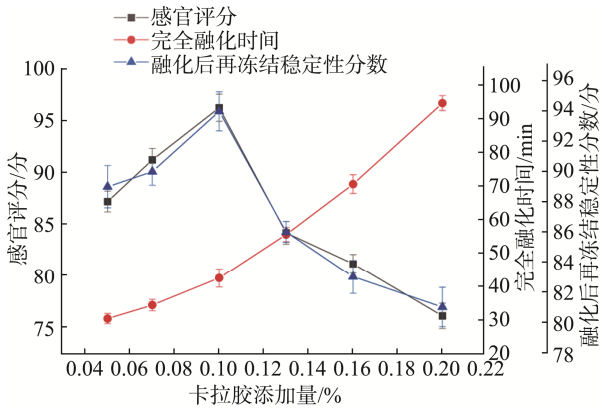


图 2　卡拉胶添加量对灰豆子软儿梨冰淇淋品质影响

Fig.2　Effects of carrageenan addition amount on the quality of *Pisum sativum* and *Pyrus ussuriensis* Ruan'er ice cream

2.1.3　瓜尔胶对灰豆子软儿梨冰淇淋品质影响

瓜尔胶有较高的吸水性，可有效增加冰淇淋的持水性，提升冰淇淋细腻度，延缓融化速度[28]。由图 3 可知，灰豆子软儿梨冰淇淋的感官评分、完全融化时间和融化后再冻结稳定性分数都随着瓜尔胶添加量增加呈现先增大后降低的趋势，感官评分和融化后再冻结稳定性分数在瓜尔胶添加量 0.20%时达到峰值，冰淇淋乳化稳定性与气泡分散性最好，产品质地均匀细腻，但添加量超过 0.20%后，瓜尔胶分子在体系中过度缠结，其高增稠性会使冰淇淋口感过于黏稠、出现糊口感，破坏了灰豆子软儿梨冰淇淋的适口性。因此综合考虑选择瓜尔胶添加量为 0.20%最为适宜。

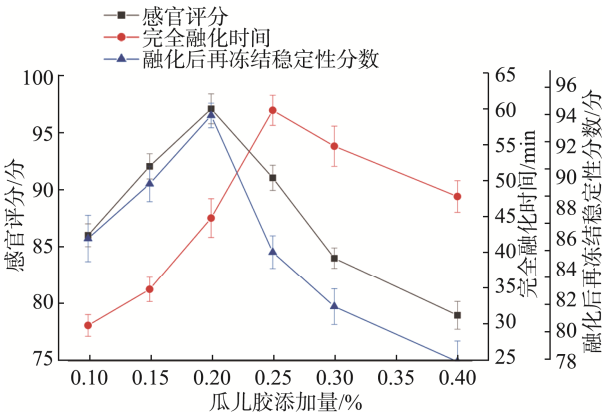


图 3　瓜尔胶添加量对灰豆子软儿梨冰淇淋品质影响

Fig.3　Effects of guar gum addition amount on the quality of *Pisum sativum* and *Pyrus ussuriensis* Ruan'er ice cream

2.1.4　刺槐豆胶对灰豆子软儿梨冰淇淋品质影响

刺槐豆胶有较好的增稠作用[29]，能够显著改善冰淇淋的抗融性，使灰豆子软儿梨冰淇淋在低温下形成弹性网络。由图 4 可知，灰豆子软儿梨冰淇淋的感官评分、完全融化时间和融化后再冻结稳定性分数都随着瓜尔胶添加量增加呈现先增大后降低的趋势，感官评分和融化后再冻结稳定性分数在刺槐豆胶添加量 0.07%时达到峰值，刺槐豆角可与冰淇淋中脂肪、蛋白质相互作用，形成稳定乳化体系，提升产品细腻度与保形性。完全融化时间在刺槐豆胶添加量 0.12%时达到峰值，添加量继续增大，过量的胶体会阻碍凝冻膨化进程，使结构过于紧密，综合考虑刺槐豆角添加量 0.07%最为适宜。

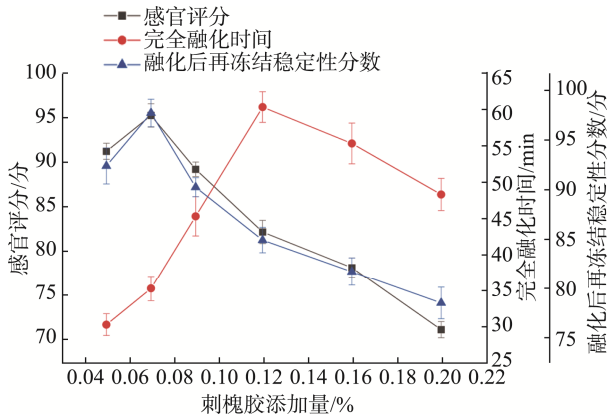


图 4　刺槐豆胶添加量对灰豆子软儿梨冰淇淋品质影响

Fig.4　Effects of locust bean gum addition amount on the quality of *Pisum sativum* and *Pyrus ussuriensis* Ruan'er ice cream

2.1.5　明胶对灰豆子软儿梨冰淇淋品质影响

明胶可以在低温下通过氢键交联形成弹性凝胶，物理阻隔灰豆子软儿梨冰淇淋中的水分流动，并形成具有热可逆性的凝胶[30]。由图 5 可知，随着明胶添加量的增加，灰豆子软儿梨冰淇淋的各项品质指标均呈先升高后降低的趋势，明胶添加量在 1.0%时，形成柔性凝胶网络，改善冰淇淋乳脂感与细腻度，同时增强气泡持留性，使产品口感滑润，灰豆子软儿梨冰淇淋感官评分和融化后再冻结稳定性分数最高，分别为 94 分和 95 分，灰豆子软儿梨冰淇淋冰晶微小，质地柔滑。但明胶添加量超过 1.0%后，明胶凝胶作用增强，导致冰淇淋口感呈韧性、出现胶状感。因此综合考虑选择明胶添加量 1.0%最为适宜。

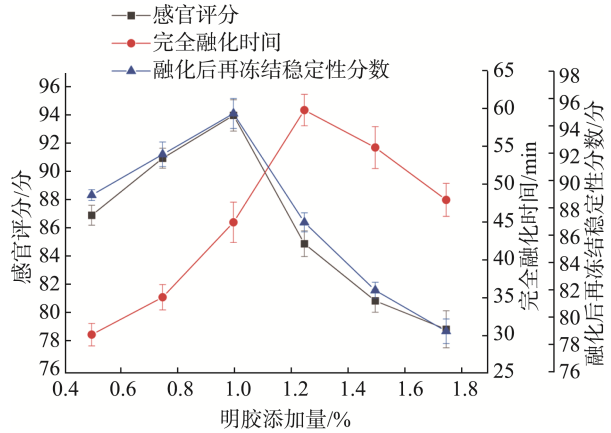


图 5　明胶添加量对灰豆子软儿梨冰淇淋品质影响

Fig.5　Effects of gelatin addition amount on the quality of *Pisum sativum* and *Pyrus ussuriensis* Ruan'er ice cream

2.1.6　羧甲基纤维素钠对灰豆子软儿梨冰淇淋品质影响

CMC-Na 有较强的水溶性和分散性，能够有效防止冰晶聚集，保持冰淇淋的细腻度[31]。添加过高的 CMC-Na 会导致灰豆子软儿梨冰淇淋黏度过高，凝冻时空气混入较少，

冰淇淋整体结构较为紧密，热传导速度加快。由图 6 可知，当 CMC-Na 添加量为 0.35%时，灰豆子软儿梨冰淇淋品质达到最佳平衡点，感官评分和融化后再冻结稳定性分数达到峰值92分，随后随着CMC-Na添加量继续增加而随之下降，完全融化时间在 CMC-Na 添加量为 0.45%时达到最大值，随着添加量持续增大而缓慢下降。

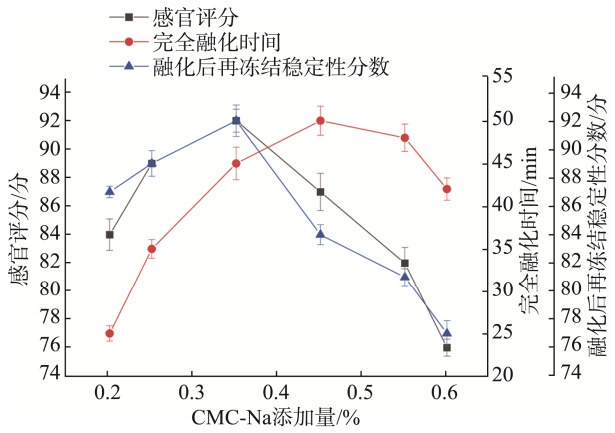


图 6 CMC-Na 添加量对灰豆子软儿梨冰淇淋品质影响

Fig.6 Effects of CMC-Na addition amount on the quality of *Pisum sativum* and *Pyrus ussuriensis* Ruan'er ice cream

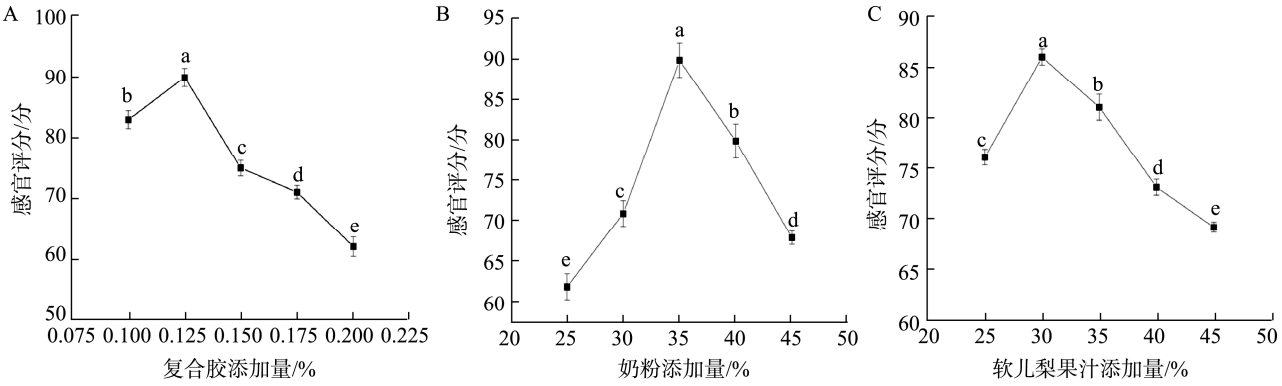
通过比对 6 种食用胶对灰豆子软儿梨冰淇淋品质影响，卡拉胶、瓜尔胶及刺槐豆胶感官评分及融化后再冻结稳定性分数最高。卡拉胶构建的热稳定凝胶网络能够有效提升抗融性，瓜尔胶通过高持水性防止脱水收缩，刺槐豆胶强效抑制冰晶生长并提供低温下的弹性；黄原胶高黏度会在一定程度上导致凝冻膨胀率下降且残留胶感；明胶热可逆性容易引发室温结构崩塌及重结晶砂砾化；CMC-Na 过量容易引发冰淇淋质地僵硬，均无法兼顾抗融性、口感与工艺稳定性。卡拉胶、瓜尔胶和刺槐豆胶三者协同使用可以规避单一胶体缺陷(卡拉胶脆性、瓜尔胶粉质感、刺槐豆胶过度弹性)，形成顺滑冷融口感，且成本较黄原胶/明胶方案更低。复合胶初始配比 1:1:1 (*m*:*m*:*m*)为协同可行性验证基础，后续基于单因素试验明确了胶体功能特性与冰淇淋“细腻无冰渣>乳化稳定>抗融性”核心需求，参考选定的 3 种食用胶单因素最佳添加量，瓜尔胶因持水性最优且是保障细腻度的关键，比例提升至 2 以充分锁水防冰渣，其黏腻缺陷可被其他胶体中和；卡拉胶低添加量即可实现乳化稳定，比例为 1 既能防脂肪上浮又避免胶质感；刺槐豆胶抗融性为辅助需求，比例 0.7 可规避过量导致的体系僵硬，三者通过功能互补协同改善冰淇淋综合品质。因此复合胶中卡拉胶、瓜尔胶、刺槐豆胶添加比例参考试验结果设置为 1:0.2:0.7 (*m*:*m*:*m*)。

2.2 冰淇淋配方单因素试验

由图 7A 可知，随着复合胶添加量逐渐增大，灰豆子软儿梨冰淇淋感官品质逐渐提升，在添加量达到 0.125%时，感官评分达到峰值，与其他添加量冰淇淋感官评分有显著性差异。但是随着复合胶添加量进一步增大，胶类物质的增多，口感过于黏稠，导致灰豆子软儿梨冰淇淋的感官评分有所降低。复合胶(卡拉胶-瓜尔胶-刺槐豆胶复配体系)通过协同作用形成稳定的三维网络结构，适量添加(0.125%)时可优化冰淇淋的乳化稳定性与质地细腻度，提升乳脂感与保形性，从而获得最高感官评分。但添加量过高时，胶体分子过度缠结，产生了食用胶添加“过量劣变”的问题，导致冰淇淋口感黏腻、胶质感突出，严重破坏适口性。

由图 7B 可知，奶粉添加量在 25%时感官评价低至 62，此时由于奶粉含量低，质地均匀，但冰晶明显，口感差。而当添加量达到 35%时，冰淇淋的感官评价达到最大值，提升明显，口感细腻，质地绵软。奶粉作为冰淇淋的核心原料，其含有的乳脂肪与蛋白质可改善产品的乳脂感、细腻度与保形性。添加量为 35%时，乳脂肪与蛋白质的乳化、持气作用达到最优，冰淇淋质地绵软、口感细腻且乳香协调；添加量过低(25%)时，脂肪与蛋白质不足，体系冰晶生长不受抑制，口感粗糙；添加量过高(≥40%)时，体系黏度剧增，口感厚重发腻，同时风味平衡被破坏。显著性差异结果表明，35%是奶粉的最优添加量，与其他水平存在显著差异。

由图 7C 可知，果汁添加量在 30%的时候感官评价达



注：不同小写字母代表差异显著(P<0.05)。

图 7 复合胶、奶粉、软儿梨果汁添加量对感官评分影响

Fig.7 Effects of addition amounts of composite gum, milk powder and *Pyrus ussuriensis* Ruan'er juice on sensory score

到最大值, 在加入到 35%时感官评价开始下降, 由于果汁中含有大量的水, 所以冰晶增多, 口感下降, 加上果汁中的糖分过多, 使其融化率降低。软儿梨果汁为冰淇淋提供特色风味与色泽, 适量添加(30%)时, 果汁中的可溶性固形物与风味物质可协同优化产品口感, 同时水分含量处于合理区间, 冰晶生长被有效抑制, 使冰淇淋质地细腻、风味协调; 添加量过高(≥35%)时, 果汁中大量水分导致冰晶增多、口感粗糙, 且高糖分改变体系冻结点, 引发融化特性劣变, 同时浓郁的果汁风味掩盖乳香, 破坏风味平衡。显著性分析显示, 30%是软儿梨果汁的最优添加量, 与其他水平差异显著。

2.3　模糊矩阵感官评价结果

矩阵中的行向量代表灰豆子软儿梨冰淇淋的色泽、形态和组织状态、口感、滋味和气味、杂质 5 个维度, 列向量分别代表冰淇淋的优、良、中、差 4 个评分维度。得到 u_1={0.3 0.3 0.2 0.2}, 同理得到 u_2={0.4 0.2 0.3 0.1}, u_3={0.2 0.5 0.2 0.1}, u_4={0.3 0.3 0.2 0.2}, u_5={0.4 0.3 0.2 0.1}把上述得到的 5 个因素评价结果组成一个矩阵。

根据公式 $Y=A\times R$, 得到 1 号灰豆子软儿梨冰淇淋的感官评价结果:

$$R_1=\begin{bmatrix}3&3&2&2\\4&2&3&1\\2&5&2&1\\3&3&2&2\\4&3&2&1\end{bmatrix}$$ 同理可得:

$$R_2=\begin{bmatrix}3&4&2&1\\4&2&2&2\\4&2&2&2\\4&2&3&1\\5&2&2&1\end{bmatrix}\quad R_3=\begin{bmatrix}4&3&2&1\\4&2&3&1\\4&3&2&1\\5&3&1&1\\5&1&2&2\end{bmatrix}$$

$$R_4=\begin{bmatrix}3&2&3&1\\5&2&2&1\\5&3&2&0\\4&2&3&1\\4&3&2&1\end{bmatrix}\quad R_5=\begin{bmatrix}8&1&1&0\\8&2&0&0\\8&1&1&0\\7&2&1&0\\8&1&1&0\end{bmatrix}$$

$$R_6=\begin{bmatrix}3&3&2&2\\5&3&1&1\\4&4&1&1\\4&3&1&2\\4&4&1&1\end{bmatrix}\quad R_7=\begin{bmatrix}4&2&1&3\\4&1&3&2\\4&2&2&2\\3&4&2&1\\4&2&2&2\end{bmatrix}$$

$$R_8=\begin{bmatrix}5&2&2&1\\5&3&2&0\\5&1&2&2\\4&3&3&0\\4&2&3&1\end{bmatrix}\quad R_9=\begin{bmatrix}6&2&1&1\\6&1&2&1\\5&3&2&0\\5&4&1&0\\5&2&2&1\end{bmatrix}$$

根据公式 $Y=A\times R$, 得到 1 号灰豆子软儿梨冰淇淋的感官评价结果:

$$Y_1=A\times R_1=\begin{bmatrix}0.25&0.25&0.3&0.1&0.1\end{bmatrix}\times\begin{bmatrix}0.3&0.3&0.2&0.2\\0.4&0.2&0.3&0.1\\0.2&0.5&0.2&0.1\\0.3&0.3&0.2&0.2\\0.4&0.3&0.2&0.1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0.305&0.335&0.225&0.135\end{bmatrix}$$

矩阵计算结果不等于 1 的做归一化处理, 同理可得: Y_2={0.400 0.340 0.125 0.135}, Y_3={0.420 0.255 0.215 0.110}, Y_4={0.438 0.246 0.243 0.073}, Y_5={0.790 0.135 0.075 0}, Y_6={0.400 0.340 0.125 0.135}, Y_7={0.390 0.195 0.200 0.215}, Y_8={0.480 0.205 0.220 0.095}, Y_9={0.550 0.225 0.165 0.060}。

2.4　综合得分和最佳工艺配方

根据之前设定的灰豆子软儿梨冰淇淋评价标准, 将灰豆子软儿梨冰淇淋的评价等级设定为优(95 分)、良(80 分)、中(60 分)、差(40 分), 得到评价等级 N={95, 80, 60, 40}, 最终 1 号冰淇淋工艺配方的感官评分。$S_1=Y_1\times N=\begin{bmatrix}0.305&0.350&0.225&0.135\end{bmatrix}\times\begin{bmatrix}95\\80\\60\\40\end{bmatrix}=75.88$。同理可得: S_2=78.10, S_3=77.60, S_4=78.79, S_5=90.35, S_6=78.10, S_7=73.25, S_8=79.00, S_9=82.55。由此可得灰豆子软儿梨冰淇淋的配方优化结果见表 4。

2.5　正交试验设计

根据表 2 开展正交试验, 试验结果见表 5。由表 5 可知, 极差值的排列顺序为 $C>B>A$, 即影响灰豆子软儿梨冰淇淋的感官评价的因素主次顺序为软儿梨果汁添加量>奶粉添加量>复合胶添加量。以感官评分为评价标准的各因素最佳水平组合为 $A_2B_2C_3$, 即复合胶添加量 0.125%, 果汁添加量 35%, 奶粉添加量 35%。

2.6　最优配方感官评价验证试验

在单因素试验中, 当复合胶和奶粉添加量固定时, 果汁添加量30%时水分与其他成分比例适宜, 感官评分最高; 但在正交试验中, 复合胶、奶粉与果汁三者存在交互作用(表 4), 当复合胶添加量 0.125%、奶粉添加量 35%时, 适当提高果汁添加量至35%, 可使软儿梨果香与乳香更好地融合, 同时复合胶的稳定作用可有效抑制因果汁水分增加导致的冰晶生长, 因此感官评分反而更高。按照正交试验得出的最佳配方制作灰豆子软儿梨冰淇淋, 经最优配方制作的冰淇淋色泽得分 91 分, 组织 93 分, 滋味气味 92, 杂质 90 分, 冰淇淋呈现均匀的淡黄色, 无色泽不均现象, 符合水果冰淇淋应有的色泽特征; 形态得分为 90 分, 产品外形完整、大小一致, 无软塌、收缩或变形, 冷冻储存

表 4 不同工艺制作的灰豆子软儿梨冰淇淋感官品质评分结果

Table 4 Sensory quality evaluation results of *Pisum sativum* and *Pyrus ussuriensis* Ruan'er ice cream prepared by different processes

编号	色泽				形态和组织状态				口感				滋味和气味				杂质			
	n_1	n_2	n_3	n_4	n_1	n_2	n_3	n_4	n_1	n_2	n_3	n_4	n_1	n_2	n_3	n_4	n_1	n_2	n_3	n_4
1	3	3	2	2	4	2	3	1	2	5	2	1	3	3	2	2	4	3	2	1
2	3	4	2	1	4	2	2	2	4	2	2	2	4	2	3	1	5	2	2	1
3	4	3	2	1	4	2	3	1	4	3	2	1	5	3	1	1	5	1	2	2
4	3	2	3	1	5	2	2	1	5	3	2	0	4	2	3	1	4	3	2	1
5	8	1	1	0	8	2	0	0	8	1	1	0	7	2	1	0	8	1	1	0
6	3	3	2	2	5	3	1	1	4	4	1	1	4	3	1	2	4	4	1	1
7	4	2	1	3	4	1	3	2	4	2	2	2	3	4	2	1	4	2	2	2
8	5	2	2	1	5	3	2	0	5	1	2	2	4	3	3	0	4	2	3	1
9	6	2	1	1	6	1	2	1	5	3	2	0	5	4	1	0	5	2	2	1

注: $n1$~$n4$ 为 4 个评价等级, 分别对应优、良、中、差; 表中数字为感官评价人员给予每个评价等级的人数。

表 5 灰豆子软儿梨冰淇淋正交试验结果

Table 5 Orthogonal test results of *Pisum sativum* and *Pyrus ussuriensis* Ruan'er ice cream

试验号	*A*	*B*	*C*	感官评分
1	1	1	1	72
2	1	2	2	80
3	1	3	3	83
4	2	1	2	78
5	2	2	3	90
6	2	3	1	77
7	3	1	3	79
8	3	2	1	76
9	3	3	2	76
K_1	78.3	76.3	75.0	
K_2	81.6	82.0	78.0	
K_3	77.0	78.7	84.0	
R	4.6	5.7	9.0	

后保形性良好; 组织得分 93 分, 质地细腻滑润, 无明显气孔或粗糙感, 口腔中融化时无冰渣感, 体现出复合胶体系对冰晶生长的有效抑制作用; 滋味气味得分 92 分, 软儿梨的清新果香与奶粉的柔和乳香协调融合, 甜酸适宜, 无异味或风味突兀感; 杂质得分 90 分, 无正常视力可见的外来杂质。感官评价综合评分为 91.2 分, 该配方下产品的感官品质均衡且优异, 满足消费者对冰淇淋风味、质地及外观的核心需求。

2.7 灰豆子软儿梨冰淇淋理化指标

参照 GB/T 31321—2014 检测方法, 对最优配方的灰豆子软儿梨冰淇淋的核心理化指标进行测定, 产品总固形物含量为 31.2 g/100 g, 符合 GB/T 31114—2014 中半乳脂冰淇淋组合型大于等于 30.0 g/100 g 的要求; 脂肪含量为 6.4 g/100 g, 介于半乳脂冰淇淋和全乳脂冰淇淋脂肪含量 6%~8%的适宜区间, 既能保证产品的乳脂感与滑润口感, 又避免了高脂配方的油腻感; 蛋白质含量达 2.91 g/100 g,高于国家标准规定的各类冰淇淋大于等于 2.2~2.5 g/100 g 的标准, 产品具有良好的营养价值。灰豆子软儿梨冰淇淋各项理化指标均符合国家标准要求, 且关键营养指标表现优异, 表明该配方在保证产品品质稳定性的同时, 兼顾了营养均衡性, 为后续产品的开发提供了一定的理论参考。

3 结 论

本研究以兰州特色水果软儿梨为核心原料, 结合奶粉与复合食用胶, 旨在开发一款兼具地域特色、营养与风味的新型冰淇淋产品。通过单因素试验明确了复合胶、奶粉、软儿梨果汁 3 类关键原料对产品感官品质的影响规律及适宜取值范围, 在此基础上以感官综合评分为响应值, 采用正交试验对三者配比进行系统优化, 最终确定最优配方为: 复合胶添加量 0.125%、软儿梨果汁添加量 35%、奶粉添加量 35%。该配方下制备的灰豆子软儿梨冰淇淋感官综合评分为 91.2 分, 产品色泽均匀、形态完整、质地细腻无冰渣, 软儿梨特有的清新果香与奶粉的柔和乳香实现了完美平衡, 无不良风味或黏腻感; 核心理化指标均满足 GB/T 31114—2014, 其中蛋白质含量达 2.91 g/100 g, 高于国家标准最低要求, 营养优势突出。本研究开发的灰豆子软儿梨冰淇淋配方科学合理, 兼具地域特色、优良风味与营养品质, 有效解决了软儿梨鲜食期短、加工途径单一的问题, 为软儿梨产业链延伸提供了新方向。产品不仅满足消费者对天然、健康、特色冷饮的需求, 还具有明确的市场定位与开发潜力。后续将进一步开展产品储存稳定性研究, 优化工业化生产工艺参数, 并探索低糖、低脂版本的配方改良, 以拓展产品的市场覆盖面与消费群体。

参考文献

[1] 王瑞红. 冰淇淋卷向新中式 千亿市场冰爽来袭[J]. 中国食品工业, 2025(12): 10–11.
WANG RH. Ice cream turns to new Chinese style: The 100-billion-yuan market arrives coolly [J]. China Food Industry, 2025(12): 10–11.

[2] 彭敏, 王婷, 张迎庆, 等. 功能性冰淇淋的研究进展[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(S1): 20–24.
PENG M, WANG T, ZHANG YQ, *et al*. Research progress on functional ice cream [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2021, 60(S1): 20–24.

[3] AKBARI M, ESKANDARI MH, NIAKOSARI M, *et al*. The effects of inulin on the physicochemical properties and sensory attributes of low-fat ice cream [J]. International Dairy Journal, 2016, 57: 52–55.

[4] 康飘, 张盈, 李华婷. 食物偏好机制及其对肥胖影响的研究进展[J].

上海交通大学学报(医学版), 2024, 44(9): 1190–1196.
KANG P, ZHANG Y, LI HT. Research progress on food preference mechanism and its impact on obesity [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Medical Science), 2024, 44(9): 1190–1196.

[5] 连家威, 张婧婕, 韩迪, 等. 高品质营养冰淇淋的研究进展[J]. 中国乳业, 2019(11): 69–73.
LIAN JW, ZHANG JJ, HAN D, *et al*. Research progress on high-quality nutritious ice cream [J]. China Dairy, 2019(11): 69–73.

[6] 李曼, 刘立增, 刘爱国, 等. 蛋白质对冰淇淋品质影响及其在冰淇淋中应用的研究进展[J]. 食品工业科技, 2024, 45(24): 416–426.
LI M, LIU LZ, LIU AIG, *et al*. Research progress on the effect of protein on ice cream quality and its application in ice cream [J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(24): 416–426.

[7] 陈雪, 刘立增, 刘爱国, 等. 脂肪球的部分聚结对冰淇淋品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(6): 359–366.
CHEN X, LIU LZ, LIU AIG, *et al*. Effect of partial aggregation of fat globules on ice cream quality [J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(6): 359–366.

[8] GOFF HD. Controlling ice-cream structure by examining fat: Protein interactions [J]. Proceedings Dairy Ingredient Science, Melbourne, 2000, 55(2): 78–81.

[9] 孙双玉, 张嘉齐, 王秀丽. 高活性益生菌冰淇淋加工技术研究分析[J]. 中外食品工业, 2024(14): 7–9.
SUN SY, ZHANG JQ, WANG XL. Research and analysis on processing technology of high-activity probiotic ice cream [J]. Chinese and Foreign Food Industry, 2024(14): 7–9.

[10] SHAIKH A, JANA AH, MEHTA BM, *et al*. Ice cream and frozen yoghurt-a suitable carrier for probiotics: A review [J]. Agricultural Reviews, 2022, 43(4): 436–442.

[11] MABROUK AM, ABD-ELGAWAD AR, ABD-EL-MONTALEB HS. Effect of inulin and oat flour on viability of probiotics and physicochemical properties of reduced fat synbiotic ice cream [J]. British Food Journal, 2022, 124(11): 3695–3704.

[12] 李向阳. 玫瑰冰淇淋的研制及品质分析[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023.
LI XY. Development and quality analysis of rose ice cream [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2023.

[13] 郭妍杰, 李光慧, 徐明妍, 等. 软枣猕猴桃冰淇淋的研制[J]. 食品工程, 2024(4): 33–36, 96.
GUO YJ, LI GH, XU MY, *et al*. Development of *Actinidia arguta* ice cream [J]. Food Engineering, 2024(4): 33–36, 96.

[14] 王蕾, 吉莹, 马成旺, 等. 百香果啤酒冰淇淋工艺配方优化及品质分析[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(11): 127–132.
WANG L, JI Y, MA CW, *et al*. Optimization of process formula and quality analysis of passion fruit beer ice cream [J]. Food Research and Development, 2025, 46(11): 127–132.

[15] 高玥雯, 候文静, 尉洁, 等. 大麦若叶青汁冰淇淋的开发及品质分析[J]. 中国乳业, 2022(8): 90–96.
GAO YW, HOU WJ, WEI J, *et al*. Development and quality analysis of barley grass juice ice cream [J]. China Dairy, 2022(8): 90–96.

[16] ALESSANDRO G, ANDREA B, ANTONIO S, *et al*. Functional ice cream health benefits and sensory implications [J]. Food Research International, 2022, 161: 111858.

[17] KHAIRULLAH NM, FIRDAUS MKB, HAWA NA, *et al*. Ice cream as functional food: A review of health-promoting ingredients in the frozen dairy products [J]. Journal of Food Process Engineering, 2022, 45(12): 14171.

[18] 姜新杰, 刘佳颖, 谷佳妮, 等. 益生菌豌豆蛋白冰淇淋浆料加工工艺研究[J]. 农产品加工, 2025(13): 58–63.
JIANG XJ, LIU JY, GU JN, *et al*. Study on processing technology of probiotic pea protein ice cream slurry [J]. Agricultural Products Processing, 2025(13): 58–63.

[19] 赵梅. 冬日飘香软儿梨[N]. 经济日报, 2023-01-16(12).
ZHAO M. Fragrant *Pyrus ussuriensis* Ruan'er in winter [N]. Economic Daily, 2023-01-16(12).

[20] 张芳, 秦飞, 秦玲, 等. 不同后熟温度对"兰州软儿梨"后熟品质的影响[J]. 北方园艺, 2024(5): 17–23.
ZHANG F, QIN F, QIN L, *et al*. Effect of different ripening temperatures on post-ripening quality of "Lanzhou *Pyrus ussuriensis* Ruan'er" [J]. Northern Horticulture, 2024(5): 17–23.

[21] 田晓菊. 软儿梨的研究进展[J]. 饮料工业, 2015, 18(3): 54–56.
TIAN XJ. Research progress on *Pyrus ussuriensis* Ruan'er [J]. Beverage Industry, 2015, 18(3): 54–56.

[22] 落桑次旦, 达瓦. 日喀则麻豌豆生产与加工利用现状及建议[J]. 现代农业科技, 2020(1): 221–222.
LUOSANG CD, DA W. Current situation and suggestions on production, processing and utilization of Shigatse brown speckled pea [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2020(1): 221–222.

[23] 吕春玲, 姜绍通, 沈鸿, 等. 浓缩对桑葚汁营养品质的影响[J]. 饮料工业, 2015, 18(5): 8–13, 19.
LV CL, JIANG ST, SHEN H, *et al*. Effect of concentration on nutritional quality of mulberry juice [J]. Beverage Industry, 2015, 18(5): 8–13, 19.

[24] 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 MY, LIU S, GU WJ, *et al*. Effects of different types of stabilizers and emulsifiers on the quality characteristics of ice cream [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(8): 75–80.

[25] 周伟杰, 胡明明, 陈蕾, 等. 棕榈油基抗融型冰淇淋油脂的研制和应用[J]. 南昌大学学报(理科版), 2023, 47(5): 456–464.
ZHOU WJ, HU MM, CHEN L, *et al*. Development and application of palm oil-based anti-melting ice cream oil [J]. Journal of Nanchang University (Natural Science), 2023, 47(5): 456–464.

[26] 任智. 黄原胶的流变性质及其在食品工业中的应用[J]. 食品与发酵科技, 2006(3): 4–7.
REN Z. Rheological properties of xanthan gum and its application in food industry [J]. Food and Fermentation Science & Technology, 2006(3): 4–7.

[27] 赵薇, 韩雪, 王鹏豪, 等. 结冷胶、卡拉胶与海藻酸钠复合凝胶特性及其在悬浮饮料中的应用[J/OL]. 食品工业科技, 1–12. [2025-09-14]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025040105
ZHAO W, HAN X, WANG PH, *et al*. Composite gel properties of gellan gum, carrageenan and sodium alginate and their application in suspended beverages [J/OL]. Science and Technology of Food Industry, 1–12. [2025-09-14]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025040105

[28] 吴岑琳, 郑远亮, 李晶, 等. 冷冻魔芋复合凝胶保水性和质构特性的调控[J]. 现代食品科技, 2020, 36(8): 86–94, 7.
WU CL, ZHENG YL, LI J, *et al*. Regulation of water retention and texture properties of frozen konjac composite gel [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(8): 86–94, 7.

[29] 柳晶涛, 张晓东. 刺槐豆胶漂白增稠工艺及其机理研究[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2010, 25(1): 65–70.
LIU JT, ZHANG XD. Study on bleaching and thickening process of locust bean gum and its mechanism [J]. Journal of Qingdao University (Engineering & Technology Edition), 2010, 25(1): 65–70.

[30] 谢苒黄, 杨晓波, 肖英宏. 不同因素对明胶凝胶特性的影响研究[J]. 食品工业, 2009, 29(1): 51–53.
XIE RY, YANG XB, XIAO YH. Study on the effects of different factors on gel properties of gelatin [J]. Food Industry, 2009, 29(1): 51–53.

[31] CHEN Y, XIAO W, JIA G, *et al*. Initial ice growth control mechanism for CMC-Na in model systems [J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 171: 114118.

(责任编辑: 安香玉　蔡世佳)