

基于低共熔溶剂的直接浸液式载冷剂的制备及其在冰鲜鸡胸肉保鲜中的应用

毕鹏慧^{1,2,3}, 张锦华³, 唐道邦², 邹金浩², 林耀盛², 程镜蓉², 杨怀谷², 刘学铭², 张德权¹, 王旭苹^{1,2*}

(1. 中国农业科学院农产品加工研究所, 农业农村部农产品质量安全收贮运管控重点实验室, 北京 100193)

(2. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 农业农村部功能食品重点实验室, 广东省农产品加工重点实验室, 广东广州 510610) (3. 山西大学生命科学学院, 山西太原 030006)

摘要:理想的液体载冷剂应具有冻结点低和安全性高的特点。本文以低共熔溶剂(Deep Eutectic Solvents, DES)为改性剂, 设计制备了9种直接浸液式载冷剂, 并研究了载冷剂特性及其对鸡胸肉贮藏期品质的影响。结果表明, 以甜菜碱和丙三醇组成改性剂制备的载冷剂(BeGlyNS)具有传热性能高、冻结点和黏度低的优点, 可作为最优的载冷剂配方。相比于用水作为载冷剂, BeGlyNS载冷剂缩短了鸡胸肉的冷却时间; BeGlyNS冷却处理可将冰鲜鸡胸肉的货架期延长1~2 d。贮藏5 d后, BeGlyNS组的水分损失均低于对照组, 且BeGlyNS-I和BeGlyNS-II组鸡胸肉的肌苷酸含量降低率降低率分别比对照组低10.77%和12.30%, 次黄嘌呤含量增加率分别低于对照组49.22%和71.06%。该研究可为生鲜鸡肉直接浸液式冷却锁鲜技术的应用提供理论依据。

关键词:低共熔溶剂; 载冷剂; 鸡胸肉; 减损保鲜

文章编号: 1673-9078(2026)03-153-162

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.3.0012

Preparation of A Direct Immersion Secondary Refrigerant Based on Deep Eutectic Solvents and Its Application in Chicken Breast Meat Preservation

BI Penghui^{1,2,3}, ZHANG Jinhua³, TANG Daobang², ZOU Jinhao², LIN Yaosheng², CHENG Jingrong²,

YANG Huaigu², LIU Xueming², ZHANG Dequan¹, WANG Xuping^{1,2*}

(1. Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Agro-products Quality & Safety in Harvest, Storage, Transportation, Management and Control, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193, China) (2. Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Sericultural & Agri-food Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510610, China) (3. School of Life Science, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

引文格式:

毕鹏慧, 张锦华, 唐道邦, 等. 基于低共熔溶剂的直接浸液式载冷剂的制备及其在冰鲜鸡胸肉保鲜中的应用[J]. 现代食品科技, 2026, 42(3): 153-162.

BI Penghui, ZHANG Jinhua, TANG Daobang, et al. Preparation of a direct immersion secondary refrigerant based on deep eutectic solvents and its application in chicken breast meat preservation [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(3): 153-162.

收稿日期: 2025-01-03; 修回日期: 2025-04-17; 接受日期: 2025-04-21

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2022YFD2100500); 广东省现代农业产业共性关键技术研发创新团队建设项目(2024CXTD16); 清远市科技计划项目(2023DZX011); 广州市青年科技人才托举项目(QT-2023-044); 广东省农业科学院科技创新战略专项(R2021PY-QF009); 广东省科技厅“百千万工程”农村科技特派员项目(KTP20240715)和江门市科技特派员科研项目(2024760000670010247)

作者简介: 毕鹏慧(2001-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 畜产品加工科技, E-mail: 1756089952@qq.com

通讯作者: 王旭苹(1988-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 肉品加工科学与技术, E-mail: wangxuping@gdaas.cn

Abstract: An ideal liquid secondary refrigerant should have a low freezing point and high safety. In this study, nine types of direct immersion liquid secondary refrigerants were designed and prepared using deep eutectic solvents as modifiers, and their characteristics and effects on the quality of chicken breast meat during storage then investigated. Results showed that BeGlyNS, a secondary refrigerant modified by betaine and glycerol, exhibited a high heat transfer performance, low freezing point, and low viscosity, making it the optimal refrigerant. Compared with water as a secondary refrigerant, BeGlyNS significantly shortened the cooling time of chicken breast meat. The shelf life of fresh chicken breast meat treated with BeGlyNS was extended by 1–2 days. After five days of storage, water loss in the BeGlyNS groups was lower than that of the control group. The decrease in inosine monophosphate content measured in chicken breast meat from the BeGlyNS-I and BeGlyNS-II groups was 10.77% and 12.30% lower than that of the control group, respectively. Additionally, the increase in hypoxanthine content measured in the BeGlyNS-I and BeGlyNS-II groups was 49.22% and 71.06% lower than that of the control group, respectively. This study provides a theoretical basis for the application of direct immersion cooling and preservation technology for fresh chicken meat.

Key words: deep eutectic solvents; secondary refrigerant; chicken breast; loss reduction and preservation

鸡肉因蛋白质含量高、脂肪和胆固醇含量低,被认为是低价高质量蛋白质来源。冰鲜鸡是指肉鸡屠宰后经快速温度降至 10 ℃ 以下,并在 0~4 ℃ 存储销售的鸡肉^[1]。根据无公害农产品生产质量安全控制技术规范第 12 部分,畜禽胴体的冷却介质为 4 ℃ 冷水,存在冷却速率慢、耗时长的问题。超快速冷却是指在宰后 5 h 内将鸡肉的中心温度降低到 -1 ℃^[2]。研究发现,超快速冷却可显著提升鲜肉品质,且冷却速度越快,肉品的品质越好^[2]。因此,研究生鲜鸡肉的快速冷却技术,以实现生鲜鸡肉快速冷却锁鲜,同时降低损耗,提升企业的经济效益备受关注。

随着冷却/冻技术的发展,越来越多的研究表明以空气为载冷剂的冷冻技术已不能满足高品质食品的贮运^[3]。浸液式冷却/冻技术,以液体介质为载冷剂,其传热系数远高于空气,具有冷却/冻速率快、能耗低等优点,广泛应用于食品工业^[4]。低共熔溶剂(Deep Eutectic Solvents, DES)是由两种或两种以上化合物(如葡萄糖、氨基酸、有机酸和胆碱衍生物等)按特定的摩尔比组合而成的,且熔点低于任一组分的溶剂,具有生物相容性好、成本低、易制备及环境友好等优点,广泛应用于食品领域^[5-8]。杨贤庆等^[9]以甜菜碱为主要成分用作浸渍冷冻的冷冻液取得不错的效果,既解决了冻结液的食用安全问题,又扩展了甜菜碱的应用范围。王雪松等^[10]研究发现以氯化钙、丙二醇等组成的多元冻结液体体系冻结速率快,冻结后的鱼肉持水力高,蛋白变性程度低,并且可以有效减少浸渍冻结过程中盐的渗透,保持鱼肉的口感。马晓斌等^[11]以丙二醇和甜菜碱等组成冷冻液,结果发现浸渍冻结利于减少脆肉鲩鱼蛋白的变性。目前的研究结果发现,以 DES 的单组分水溶液为载冷剂,可实现鱼肉的快速降温,冷冻处理后鱼肉持水力高,蛋白质变性程度低。同时可以解决以乙醇等醇类化合物为主要成

分的载冷剂所存在的挥发量大和食品安全问题。因此,推测 DES 具有降低载冷剂冻结点的潜力,而相关研究鲜有报道。

因此,本文以可用于食品添加剂的小分子化合物为组分制备 DES,与生理盐水(Normal Saline, NS)按一定比例进行混合,制备 DES/NS 低温载冷剂,根据载冷剂的理化特性筛选较优的载冷剂组成,进一步研究载冷剂冷却处理对鸡胸肉品质的影响。以期获得可以用于鸡肉乃至所有肉类的直接浸液式冷却剂,缩短宰后肉类的冷却时间,同时降低企业的冷却能耗,提升经济价值。研究结果不仅可以为低温载冷剂的设计制备提供新视角,还可为冰鲜鸡的直接浸液式快速冷却减损保鲜技术的应用提供技术指导。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

江村黄鸡(当天宰杀冷链运输的冷鲜鸡)购于广州市江丰实业有限公司,光鸡质量约为 1 kg,屠宰后,收集鸡胸肉并去除脂肪和可见筋膜,然后立即用冰盒送往实验室。

丙三醇、无水甜菜碱、氯化胆碱、葡萄糖、海藻糖、木糖醇、苹果酸、脯氨酸、山梨醇(均为食品级),德州汇洋生物科技有限公司;磷酸二氢钾、甲醇(均为色谱级),天津市科密欧化学试剂有限公司;BWZ81582016 高氯酸溶液标准物质,北京北方伟业计量技术研究院;无水碳酸钾、硼酸、氢氧化钠(均为分析纯),天津市大茂化学试剂厂。

RE-5210A 型旋转蒸发仪,上海亚荣生化仪器厂;NDJ-8S 数字旋转粘度计,上海方瑞仪器有限公司;CJM-2000 波美密度计,沈阳创原计量仪器有限公司;AR1500EX TA 流变仪,美国 NewCastle;DSC 214

Polymer 差示扫描量热仪, 德国耐驰仪器制造有限公司; LFA 467 HyperFlash 闪射法导热仪, 德国耐驰仪器制造有限公司; TGL-16M 型高速冷冻离心机, 湖南湘仪仪器有限公司; C-LM4 电脑测控型肌肉嫩度仪, 北京天翔飞域科技有限公司; LRH 生化培养箱, 上海一恒科技有限公司; T25D 均质机, 德国 IKA 集团; LC1260 液相色谱仪, 美国 Agilent 科技有限公司。

1.2 载冷剂的制备与性质研究

1.2.1 载冷剂的制备

按照表 1 摩尔比例配制 DES^[12]。分别精确称取各组分, 置于 500 mL 圆底烧瓶, 采用旋转蒸发 (80 ℃, 4 000 r·min⁻¹) 加热旋转混合, 直至形成均匀透明的液体, 即为 DES, 置于干燥器中备用^[13]。

将制备好的 DES 与 NS 按照 0.1:1、0.2:1 和 1:1 的体积比混合配制为载冷剂^[5]。

表 1 低共熔溶剂组成
Table 1 The composition of DES

序号	DES	缩写	组分一	组分二	摩尔比例
1	氯化胆碱 / 葡萄糖	ChGlu	氯化胆碱	葡萄糖	3:2
2	氯化胆碱 / 海藻糖	ChTre	氯化胆碱	海藻糖	3:1
3	氯化胆碱 / 丙三醇	ChGly	氯化胆碱	丙三醇	1:2
4	氯化胆碱 / 木糖醇	ChXyl	氯化胆碱	木糖醇	1:2
5	甜菜碱 / 苹果酸	BeMC	甜菜碱	苹果酸	1:2
6	甜菜碱 / 木糖醇	BeXyl	甜菜碱	木糖醇	2:1
7	甜菜碱 / 丙三醇	BeGly	甜菜碱	丙三醇	1:2
8	脯氨酸 / 丙三醇	ProGly	脯氨酸	丙三醇	1:2
9	脯氨酸 / 山梨醇	ProSor	脯氨酸	山梨醇	1:1

1.2.2 载冷剂冻结点的测定

取配制好的载冷剂置于烧杯中, 将热电偶的探头用防水胶带固定在载冷剂中, 另一端与 Picolog TC-08 数据记录器进行连接, 随后置于 -80 ℃ 的冰箱中, 开启数据记录器, 记录载冷剂的降温曲线, 每两秒记录一次载冷剂的温度, 记录时长 3 h, 绘制时间 - 温度曲线, 取降温曲线上平缓曲线区间对应的温度求平均值, 即为载冷剂的冻结点^[9]。

1.2.3 载冷剂黏度的测定

打开数字黏度仪进行调平, 根据载冷剂的黏度选择合适的转子与螺杆连接, 取 25 mL 载冷剂倒入转筒内, 并将转筒固定在套筒上, 保持转子浸没在转筒中的载冷剂中, 选择合适的转速进行测定, 直到黏度数值不再发生变化, 记录数值, 重复测三次取平均值^[5,9]。

1.2.4 载冷剂密度的测定

载冷剂的密度通过密度计进行测量, 将载冷剂倒

入量筒中, 选择合适量程的密度计插入载冷剂中, 待液位稳定之后, 记录数值, 重复测三次取平均值^[14]。

1.2.5 载冷剂流变性能的测定

载冷剂的流变性能采用 AR1500EX TA 流变仪测定, 测量使用 40 mm 平行板, 间隙为 1 mm, 测量时间为 180 s, 将预先配制好的载冷剂均匀置于旋转流变仪测试平台的中心, 测量剪切速率为 50~200 s⁻¹ 范围内的载冷剂黏度^[15]。

1.2.6 载冷剂比热容的测定

载冷剂的比热容采用 DSC 214 Polymer 差示扫描量热仪进行测定, 先将仪器开机进行预热 30 min, 然后对空坩埚、蓝宝石标样和载冷剂样品进行比热的测试, 获得对应的 DSC 曲线结果, 最后将测试结果输入分析软件进行对比分析, 获得载冷剂的比热容值^[16]。

1.2.7 载冷剂导热系数和热扩散系数的测定

载冷剂的导热系数和热扩散系数使用 LFA 467 HyperFlash 闪射法导热仪进行测定。首先对低黏度液体样品支架的上、下盖片均匀喷涂石墨, 待表面完全干后对支架进行组装, 再将载冷剂从孔隙中注入, 封紧空隙上机检测。激光发射器会均匀发射一束激光照射在薄片下表面中心位置, 热能逐渐传递至上表面, 待上表面温度达到 25 ℃ 时, 数据采集器会对此温度下的热物性数值进行 3 次采集。最后使用分析软件对数值进行计算, 得到载冷剂的导热系数与热扩散系数^[17]。

1.3 载冷剂冷却在鸡胸肉保鲜中的应用

1.3.1 样品的制备

样品的制备参考杨茜等^[18]的方法, 稍作修改。将鸡胸肉去除表面筋膜及脂肪后, 平均分为 4 组, 对照组: 将鸡胸肉放置在 4 ℃ 的水中进行冷却; 实验组 I (BeGlyNS-I): 将鸡胸肉放置在 -1 ℃ 的 BeGlyNS 中进行冷却; 实验组 II (BeGlyNS-II): 将鸡胸肉放置在 -5 ℃ 的 BeGlyNS 中进行冷却。冷却过程中实时监测鸡肉中心温度变化, 当对照组中心温度降到 10 ℃, BeGlyNS-I 组和 BeGlyNS-II 组中心温度降到 0 ℃ 时, 分别取出鸡胸肉, 随机分割成 4×4×4 cm³ 的肉块。对照组采用自封袋包装, 放在冰箱 4 ℃ 贮藏; BeGlyNS-I 和 BeGlyNS-II 组, 先用 0 ℃ 水清洗鸡胸肉表面残留的载冷剂后, 再用自封袋包装, 放在冰箱 4 ℃ 贮藏。另外, 为了直观比较降温效率, 设置了对比组, 以 BeGlyNS 为直接浸液式载冷剂, 将载冷剂温度稳定在 4 ℃ 后用于鸡胸肉冷却处理, 待鸡胸肉中心温度降到 10 ℃ 后取出。

1.3.2 挥发性盐基氮 (Total Volatile Basic Nitrogen, TVB-N)

TVB-N 的测定参照中国食品安全国家标准方法 GB5009.228-2016 食品中总挥发性盐基氮的测定^[19]。将约 5 g 鸡胸肉加入 20 mL 蒸馏水中, 均质, 浸泡 30 min 后过滤。在扩散皿的外室加入 1 mL 滤液, 空白组加蒸馏水。在扩散皿的内室加入 1 mL 硼酸 (20 g·L⁻¹) 和 1 滴指示剂 (1 g·L⁻¹ 甲基红乙醇溶液和 5 g·L⁻¹ 溴甲酚绿乙醇溶液)。盖上盖子留一个缝隙加入 1 mL 饱和碳酸钾溶液。推平盖子, 在 37 °C 培养箱中培养 2 h。扩散皿放凉后用 0.01 mol·L⁻¹ 盐酸对内室进行滴定, 滴定终点颜色为蓝紫色。TVB-N 值的计算公式如下:

$$A = \frac{(V - V_0) \times 14 \times c \times 100 \times a}{m} \quad (1)$$

式中:

A —TVB-N 值, mg/100 g;

V —样品消耗的盐酸体积, mL;

V_0 —空白组消耗的盐酸体积, mL;

c —盐酸的浓度, mol·L⁻¹;

a —稀释倍数;

m —样品质量, g。

1.3.3 蒸煮损失

从包装袋中取出肉样, 迅速用吸水纸吸掉表面多余水分, 将样品切成 4×3×3 cm³ 块状, 称重, 放置于蒸煮袋内, 排出袋内空气。置于 71 °C 的水浴锅中加热 35 min 后取出, 用流水冷却 30 min, 用滤纸擦去表面水分后再次称重, 蒸煮损失的计算公式如下:

$$B = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

B —蒸煮损失率, %;

m_1 —鸡胸肉蒸煮前的质量, g;

m_2 —鸡胸肉蒸煮后的质量, g。

1.3.4 离心损失

从包装袋中取出肉样, 迅速用吸水纸吸掉表面多余水分, 切取中心位置肉样 (5±0.5) g, 称重, 用吸水纸包裹, 置于 50 mL 离心管中, 并用吸水纸配平。在 4 °C, 6 000 r·min⁻¹ 离心 10 min 后, 取出肉样, 用滤纸擦去肉样表面的多余水分, 再次称重, 平行测定 3 组, 取平均值^[20]。通过如下公式计算离心损失:

$$C = \frac{m_3 - m_4}{m_3} \times 100\% \quad (3)$$

式中:

C —离心损失率, %;

m_3 —鸡胸肉离心前的质量, g;

m_4 —鸡胸肉离心后的质量, g。

1.3.5 肌苷酸 (Inosine Monophosphate, IMP) 和次黄嘌呤 (Hypoxanthine, Hx)

用高效液相色谱法定量分析 IMP 和 Hx 含量。称取鸡胸肉 3 g, 置于 50 mL 离心管中, 加入 15 mL 的冷高氯酸 (质量分数为 10%) 匀浆 2 min, 在 4 °C、10 000 r·min⁻¹ 下离心 15 min, 吸取上清液, 沉淀物再用 15 mL 的 10% 冷高氯酸提取一次, 合并上清液。上清液用 0.5 mol·L⁻¹ 和 0.05 mol·L⁻¹ 的 NaOH 溶液调至 pH 值为 6.5~6.8, 4 °C 下静置 30 min 以沉淀高氯酸, 在 4 °C、10 000 r·min⁻¹ 下离心 15 min。取 1 mL 上清液采用 0.22 μm 水系滤膜过滤后进样^[21]。

色谱检测参数: 色谱柱为 Agilent ZORBAX SB-C18 (250 mm×4.6 mm, 5 μm); 柱温 30 °C; 紫外检测波长 254 nm; 流速为 1 mL·min⁻¹; 进样量 20 μL; 洗脱程序为 98% 的流动相 A (0.05 mol·L⁻¹ 磷酸二氢钾缓冲液) 和 2% 的流动相 B (甲醇), 洗脱时间 20 min^[22]。采用外标法定量分析 IMP 和 Hx 含量, 结果表示为 g/100 g。

1.4 数据处理

每组样品设置 3 个平行组, 实验测试重复 3 次, 数据表示为平均值 ± 标准差, 利用 IBM SPSS Statistics 26 进行误差及显著性分析 (其中 $P < 0.05$ 为有统计学意义), 再用 Origin 2021 软件作图。

2 结果与分析

2.1 载冷剂的物理性能

2.1.1 DES 对载冷剂冻结点的影响

冻结点作为载冷剂的关键指标, 是指一定条件下液态物质转为固态的相变温度点^[23]。如图 1 所示, 载冷剂在降温的过程中会出现一段降温速率下降或略微升温的情况, 此过程为结晶的过程, 取这段平缓曲线上对应的温度求平均值, 即为载冷剂的冻结点^[13]。

为解决鸡胸肉组织细胞与冷却液直接接触后, 因渗透压差导致肌肉细胞内外环境液体交换问题。选择以生理盐水为基质, 其渗透压与动物和人体血浆的渗透压相等, 同时生理盐水冻结点低约为 -2 °C, 其传热速率远高于空气冻结, 冻结能耗相比空气冻结可降低 25% 以上^[24]。随着 DES 比例增加, 载冷剂的冻结点显著降低 ($P < 0.05$), 表明 DES 具有降低冻结点的作用 (表 2)。杨贤庆等^[9]发现, 添加甜菜碱可以降低载冷剂的冻结点, 且甜菜碱的质量分数越大, 载冷剂的

冻结点越低。当甜菜碱的质量分数为 60% 时, 载冷剂的冻结点为 $-28.67\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。而本研究中 BeGlyNS 载冷剂中甜菜碱的质量分数为 7.5%, 就可以将载冷剂的冻结点降低至 $-31.20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这一结果表明, DES 及其单一组分均可以降低载冷剂的冻结点, 但添加 DES 较单一组分具有更低的冻结点。由于低冻结点的载冷剂其冰晶出现的温度更低, 可以满足低温环境工作的需求。因此选择冻结点低的载冷剂进行实验。不同 DES 对载冷剂的冻结点影响是不同的 (表 2), 其中 ProGlyNS 组、BeGlyNS 组和 ChGlyNS 组的冻结点显著 ($P<0.05$) 低于其他组。其中丙三醇不仅具备醇类载冷剂低冻结点的优点, 而且安全性优于乙醇和丙二醇, 丙三醇还可以对食品进行直接浸液式, 不会存在安全问题^[25]。故从冻结点方面考虑, 应选择 DES 与 NS 为 1:1 比例配置的 ProGlyNS 组、BeGlyNS 组和 ChGlyNS 组。

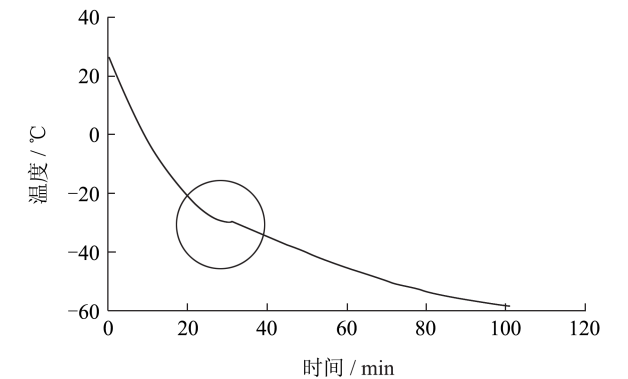


图 1 载冷剂的冻结点曲线图

Fig.1 Freezing point curve of refrigerant

表 2 不同载冷剂的冻结点 ($^{\circ}\text{C}$)

载冷剂	DES:NS		
	0.1:1	0.2:1	1:1
ChGluNS	$-1.84 \pm 0.13^{\text{Ac}}$	$-2.83 \pm 0.09^{\text{Bb}}$	$-22.33 \pm 0.08^{\text{Ce}}$
ChTreNS	$-0.61 \pm 0.10^{\text{Aab}}$	$-1.42 \pm 0.30^{\text{Aa}}$	$-15.60 \pm 0.09^{\text{Bb}}$
ChGlyNS	$-1.02 \pm 0.24^{\text{Ab}}$	$-4.27 \pm 0.20^{\text{Bc}}$	$-30.31 \pm 0.60^{\text{Cf}}$
ChXylNS	$-0.59 \pm 0.11^{\text{Aab}}$	$-2.51 \pm 0.16^{\text{Bb}}$	$-19.60 \pm 0.64^{\text{Cd}}$
BeMcNS	$-0.63 \pm 0.10^{\text{Aab}}$	$-1.14 \pm 0.13^{\text{Aa}}$	$-11.05 \pm 0.40^{\text{Ba}}$
BeXylNS	$-0.48 \pm 0.18^{\text{Aab}}$	$-2.51 \pm 0.10^{\text{Bb}}$	$-18.28 \pm 0.05^{\text{Cc}}$
BeGlyNS	$-0.15 \pm 0.03^{\text{Aa}}$	$-4.12 \pm 0.01^{\text{Bc}}$	$-31.20 \pm 0.10^{\text{Cf}}$
ProGlyNS	$-2.19 \pm 0.07^{\text{Ac}}$	$-3.88 \pm 0.17^{\text{Bc}}$	$-32.74 \pm 0.55^{\text{Cg}}$
ProSorNS	$-0.42 \pm 0.29^{\text{Aa}}$	$-2.78 \pm 0.13^{\text{Bb}}$	$-20.71 \pm 0.23^{\text{Cd}}$

注: 不同大写字母代表同行之间有显著差异 ($P<0.05$), 不同小写字母代表同列之间有显著性差异 ($P<0.05$)。表 3、表 4 同。

2.1.2 DES对载冷剂黏度的影响

黏度, 是指流体受外力作用移动时所表现的阻力。

黏度的大小会对载冷剂的传热产生影响, 载冷剂的黏度不易过高, 会影响载冷剂的流动, 从而影响载冷剂与食物的换热效果^[16]。由表 3 可以看出各组载冷剂的黏度均随 DES 比例的增加而显著增加 ($P<0.05$)。虽然 DES 与 NS 以 1:1 配制的载冷剂黏度显著高于 ($P<0.05$) 其他两种比例, 但其中 ChGlyNS、ChGluNS、ChXylNS 和 BeGlyNS 组的黏度均优于现有载冷剂。张涛等^[26]以乙醇和低聚果糖等制备的载冷剂黏度为 $4.64\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。王雪松等^[10]以氯化钙、丙二醇和海藻糖等组成的多元冻结液体系黏度为 $4.784\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。因此从载冷剂的黏度来考虑, DES 与 NS 以 1:1 配制的 ChGlyNS、ChGluNS、ChXylNS 和 BeGlyNS 组载冷剂要优于其他组。

载冷剂	DES:NS		
	0.1:1	0.2:1	1:1
ChGluNS	$1.04 \pm 0.01^{\text{Cd}}$	$1.18 \pm 0.01^{\text{Bef}}$	$3.72 \pm 0.04^{\text{Ah}}$
ChTreNS	$1.06 \pm 0.00^{\text{Cc}}$	$1.21 \pm 0.01^{\text{Bcde}}$	$4.84 \pm 0.02^{\text{Ac}}$
ChGlyNS	$1.02 \pm 0.01^{\text{Cc}}$	$1.14 \pm 0.01^{\text{Bf}}$	$3.19 \pm 0.03^{\text{Ai}}$
ChXylNS	$1.03 \pm 0.00^{\text{Cd}}$	$1.20 \pm 0.01^{\text{Bde}}$	$3.83 \pm 0.02^{\text{Ag}}$
BeMcNS	$1.07 \pm 0.01^{\text{Cbc}}$	$1.21 \pm 0.01^{\text{Bde}}$	$5.24 \pm 0.01^{\text{Ad}}$
BeXylNS	$1.10 \pm 0.01^{\text{Ca}}$	$1.23 \pm 0.03^{\text{Bcd}}$	$5.88 \pm 0.03^{\text{Ab}}$
BeGlyNS	$1.08 \pm 0.01^{\text{Cb}}$	$1.25 \pm 0.01^{\text{Bc}}$	$4.33 \pm 0.06^{\text{Af}}$
ProGlyNS	$1.10 \pm 0.01^{\text{Ca}}$	$1.31 \pm 0.01^{\text{Bb}}$	$5.44 \pm 0.01^{\text{Ac}}$
ProSorNS	$1.11 \pm 0.01^{\text{Ca}}$	$1.36 \pm 0.01^{\text{Ba}}$	$7.20 \pm 0.03^{\text{Aa}}$

2.1.3 DES对载冷剂密度的影响

载冷剂的密度越小, 则相应的水泵等辅助设备的运行功耗也会小^[14]。如表 4 所示, DES 与 NS 比例为 1:1 时, 载冷剂的密度显著高于其他比例的载冷剂 ($P<0.05$)。其中 ChGlyNS 密度最小, 其次是 ChXylNS、ChTreNS 和 BeGlyNS 组, BeMcNS 密度最大。DES 与 NS 比例为 0.2:1 时, 不同载冷剂的密度在 $1.01\sim1.02\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 范围内变化, 密度与水的密度相差不大。DES 与 NS 比例为 0.1:1 时, 9 种载冷剂的密度没有显著性差异。

2.1.4 DES对载冷剂流变性能的影响

从载冷剂的冻结点来看, DES 与 NS 的比例为 0.2:1 和 0.1:1 时, 载冷剂的冻结点显著高于 DES 与 NS 比例为 1:1 的载冷剂冻结点。冻结点高的载冷剂在低温环境中会发生冻结, 则不能完成与鸡胸肉之间的热交换, 不满足作为载冷剂低冻结点的要求^[23]。因此本文选择 DES 与 NS 比例为 1:1 的载冷剂进行物理性质评价, 以选出最优载冷剂。

表 4 不同载冷剂的密度 (g · cm⁻³)
Table 4 The density of different refrigerants

载冷剂	DES:NS		
	0.1:1	0.2:1	1:1
ChGluNS	1.02 ± 0.001 ^{Ba}	1.02 ± 0.001 ^{Bbc}	1.14 ± 0.001 ^{Ad}
ChTreNS	1.03 ± 0.002 ^{Ba}	1.02 ± 0.002 ^{Cab}	1.13 ± 0.001 ^{Ae}
ChGlyNS	1.01 ± 0.001 ^{Ba}	1.02 ± 0.003 ^{Bbc}	1.09 ± 0.001 ^{Af}
ChXylNS	1.03 ± 0.000 ^{Ba}	1.02 ± 0.001 ^{Cbc}	1.12 ± 0.003 ^{Ae}
BeMcNS	1.02 ± 0.002 ^{Ba}	1.02 ± 0.003 ^{Ba}	1.18 ± 0.004 ^{Aa}
BeXylNS	1.02 ± 0.001 ^{Ba}	1.01 ± 0.001 ^{Ce}	1.16 ± 0.001 ^{Ae}
BeGlyNS	1.01 ± 0.044 ^{Ba}	1.02 ± 0.002 ^{ABbcd}	1.13 ± 0.002 ^{Ae}
ProGlyNS	1.01 ± 0.002 ^{Ba}	1.01 ± 0.001 ^{Bde}	1.14 ± 0.001 ^{Ad}
ProSorNS	1.01 ± 0.002 ^{Ba}	1.01 ± 0.002 ^{Bcde}	1.17 ± 0.001

流变是指流体黏度和剪切速率之间的关系。流体的黏度不随剪切速率的增大而发生变化的为牛顿流体，如水和血浆等。流体的黏度随剪切速率的增大而出现黏度增大或减小的为非牛顿流体，如高聚物溶液和混悬液等^[27]。如图 2 为 DES 与 NS 比例为 1:1 的 9 种载冷剂的流变性能。9 种载冷剂的黏度均不随剪切速率的增加而发生变化，属于牛顿流体。在鸡胸肉的浸泡过程中不会出现黏度变稠或变稀现象，以防止影响载冷剂与食物之间的换热效果。

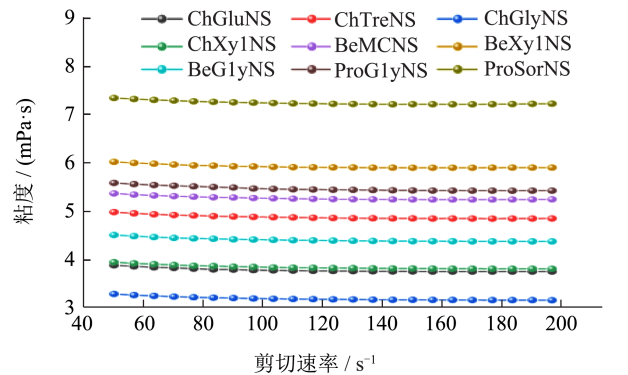


图 2 不同载冷剂的流变性能

Fig.2 Rheological properties of different refrigerants

2.1.5 DES对载冷剂传热性能的影响

为了选择出最优载冷剂，本文评价了载冷剂的传热性能。传热性能通常包括比热容、导热系数和热扩散系数。比热容是指单位质量的某种物质，当温度变化 1 ℃时吸收或释放的热量。比热容越大，单位质量的载冷剂所能承载的冷量越大，则冷冻 / 冷却过程所需的载冷剂少^[14]。导热系数是反映载冷剂传递热量的能力，导热系数越大，传递的热量越大，与食物的换热效果越好^[16]。热扩散系数可反映载冷剂的温度扩散速率，与其比热、密度和导热能力密切相关^[25]。9 种载冷剂的传热性能如表 5 所示，比热容最大的

载冷剂为 BeGlyNS，其次为 ProSorNS、ChTreNS、ChGluNS、ProGlyNS、BeXylNS、BeMcNS，且它们之间无显著性差异。导热系数最大的为 ProSorNS，除了 ChGlyNS 和 ChXylNS 外，ProSorNS 与其他几组载冷剂之间的导热系数无显著差异。热扩散系数最大的载冷剂为 ProSorNS，除 ChXylNS 外，ProSorNS 与其他几组载冷剂之间的热扩散系数无显著性差异。基于比热容、导热系数和热扩散系数越大，载冷剂性能越好的标准，ChGluNS、ChTreNS、BeMcNS、BeXylNS、BeGlyNS、ProGlyNS、ProSorNS 均为较好的载冷剂。由于 ProGlyNS 和 ProSorNS 载冷剂呈淡黄色且有难闻气味，为避免对食品的颜色和风味产生影响而未被选择，ChGluNS 和 ChTreNS 冻结点较高以及 BeMcNS 和 BeXylNS 载冷剂黏度较大，最终选择 BeGlyNS 作为载冷剂用于后续实验。

表 5 不同载冷剂的传热性能

Table 5 The heat transfer performance of different refrigerants

载冷剂	比热容 (J/g·K)	导热系数 (W/m·K)	热扩散系数 (mm ² /s)
ChGluNS	3.40 ± 0.118 ^{ab}	0.375 ± 0.014 ^{ab}	0.097 ± 0.005 ^{bc}
ChTreNS	3.41 ± 0.180 ^{ab}	0.428 ± 0.026 ^{ab}	0.111 ± 0.002 ^{ab}
ChGlyNS	2.47 ± 0.003 ^c	0.305 ± 0.008 ^b	0.113 ± 0.005 ^a
ChXylNS	2.96 ± 0.048 ^b	0.310 ± 0.069 ^b	0.093 ± 0.006 ^c
BeMcNS	3.11 ± 0.057 ^{ab}	0.398 ± 0.043 ^{ab}	0.109 ± 0.003 ^{ab}
BeXylNS	3.25 ± 0.152 ^{ab}	0.404 ± 0.017 ^{ab}	0.107 ± 0.003 ^{abc}
BeGlyNS	3.71 ± 0.228 ^a	0.470 ± 0.020 ^a	0.112 ± 0.004 ^{ab}
ProGlyNS	3.35 ± 0.170 ^{ab}	0.426 ± 0.015 ^{ab}	0.112 ± 0.004 ^{ab}
ProSorNS	3.48 ± 0.096 ^{ab}	0.487 ± 0.092 ^a	0.120 ± 0.005 ^a

注：不同小写字母代表不同载冷剂的比热容、导热系数和热扩散系数之间有显著差异 ($P < 0.05$)。

2.2 载冷剂冷却处理对鸡胸肉贮藏期品质的影响

2.2.1 载冷剂冷却处理对鸡胸肉降温速率的影响

超快速冷却技术是指在屠宰后 5 h 内将畜禽肉的中心温度降至 -1 ℃^[2]。生鲜肉中含有大约 75% 的水分^[28]，这些水分在储存过程中可能会从肉中渗出，导致肉质的嫩度和风味发生变化。与传统冷却相比，超快速冷却处理具有加速畜禽肉温度降低的优势，延缓屠宰后的生理和生化过程^[29]，防止肉类发生屠宰后的僵硬^[30]，并有效减少畜禽肉表面微生物的数量。重要的是，传统冷却中生鲜肉水分损失造成的经济损失是超快速冷却所用能源损耗的 17 倍^[31]。根据《GB 12694-2016 食品安全国家标准 畜禽屠宰加工卫生规范》要求^[32]，屠宰后的禽肉需立即预冷至 4 ℃，但目前工业水冷仅能达到预冷约至 10 ℃。因此本文以 4 ℃

水将鸡胸肉冷却至 10℃ 为对照组；另外，前期预实验发现，若快速冷却处理将鸡胸肉表面温度降至 -1℃ 后，鸡胸肉表面呈现冻结的现象，属于冷却肉；而将鸡胸肉表面温度降到 0℃ 后，鸡胸肉表面未出现冻结现象，基于以上结果，本文以鸡胸肉表面温度为 0℃ 为冷却终点温度，研究不同载冷剂冷却处理后，鸡胸肉 4℃ 贮藏期水分损失、TVB-N 含量等品质指标的变化。

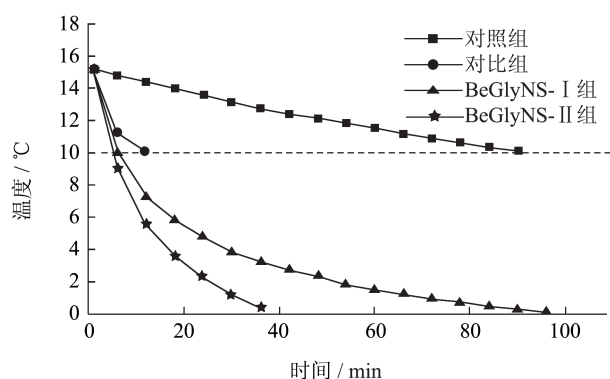


图 3 生鲜鸡胸肉在不同温度下的降温速率

Fig.3 The cooling rate of chicken breast meat at different temperatures

预冷冷却时间决定工业生产中的能耗，与企业经济效益直接相关。基于此，本文评价了不同预冷冷却温度处理所需的时间，为冷却技术在生产应用中提供能耗值参考。如图 3 所示，采用 4℃ 水冷却处理（对照组），胴体由初始温度 15.17℃ 降到 10℃，约需 94 min；采用 -1℃ 的 BeGlyNS 载冷剂冷却处理（BeGlyNS- I 组），胴体由初始温度 15.17℃ 降到 0℃，约需 98 min，与对照组处理时间相近；采用 -5℃ 的 BeGlyNS 载冷剂冷却处理（BeGlyNS- II 组），胴体由初始温度 15.17℃ 降到 0℃，约需 44 min，处理时间远小于对照组。另外，为了直观比较降温效率，进一步分析了 4℃ 的 BeGlyNS 载冷剂冷却处理（对比组），胴体由初始温度 15.17℃ 降到 10℃，所需时间为 11 min。以上结果表明，采用 BeGlyNS 载冷剂处理鸡胸肉，缩短了鸡胸肉的冷却时间，不仅降低了鸡胸肉在冷却过程中的品质损耗，而且也降低了冷却设备长时间运行的能量损耗，延长鸡肉货架期的同时降低生产成本。

2.2.2 载冷剂冷却处理对鸡胸肉贮藏期 TVB-N 含量的影响

TVB-N 是指蛋白质分解产生的氨以及胺类等碱性含氮物质，是目前用于评价肉类新鲜度的关键指标，其含量越高，肉品的新鲜度越低^[33]。鸡胸肉在贮藏期间 TVB-N 含量的变化如图 4 所示。根据 GB 2707-

2016《食品安全国家标准 鲜（冻）畜、禽产品》中规定^[34]，TVB-N 含量 ≤ 15 mg/100 g 的肉为新鲜肉。鸡胸肉在 4℃ 贮藏 5 d 后，三组鸡胸肉的 TVB-N 呈现逐渐上升的趋势，分析原因是在贮藏期间，微生物的数量逐渐增加，分泌出来大量的酶会使蛋白质发生降解，使得 TVB-N 的值变大。贮藏 5 d 时，对照组、BeGlyNS- I 组和 BeGlyNS- II 组鸡胸肉的 TVB-N 含量分别为 17.47、16.06 和 14.02 mg/100 g。根据鲜肉的标准，对照组和 BeGlyNS- I 组的鸡胸肉贮藏 5 d 后变质，而 BeGlyNS- II 组在贮藏 5 d 时被认为是新鲜的，贮藏 6 d 后变质。另外，BeGlyNS- I 组的鸡胸肉贮藏 2 d，BeGlyNS- II 组的鸡胸肉贮藏 3 d 与对照组贮藏 1 d 的鸡胸肉 TVB-N 含量无显著差异。这些研究结果表明，采用 BeGlyNS 载冷剂进行直接浸液冷却处理，可延缓鸡胸肉在 4℃ 贮藏条件下的腐败变质速率，延长货架期 1~2 d，且载冷剂的温度越低，货架期的时间越长。已有研究证明浸液式冷却与传统空气冷冻相比，能够显著延缓牛肉 TVB-N 值的增加^[35]。

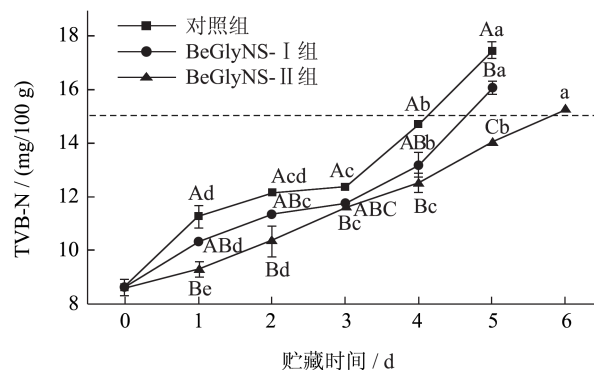


图 4 鸡胸肉在贮藏期间 TVB-N 的变化

Fig.4 The changes in TVB-N of chicken breast meat during the storage period

注：BeGlyNS- I 组：-1℃ 的 BeGlyNS 载冷剂冷却处理组；BeGlyNS- II 组：-5℃ 的 BeGlyNS 载冷剂冷却处理组。A~C 代表在贮藏相同时间后不同组间的显著性差异 ($P < 0.05$)，a~e 代表相同组在不同贮藏时间的显著性差异 ($P < 0.05$)。下同。

2.2.3 载冷剂冷却处理对鸡胸肉贮藏期水分损失的影响

肉类的水分损失是评价肉质优劣的重要指标，研究发现，水分损失越低，肉类的品质越好^[36]。因此，降低肉类在贮藏过程中的水分损失有利于改善其多汁性、嫩度和整体食用性，并提高其经济价值^[37]。肉类的水分损失可以通过离心损失和蒸煮损失来评估^[38]。图 5a 描述了鸡胸肉在贮藏期间蒸煮损失的变化，随着贮藏时间的延长，三组的鸡胸肉的蒸煮损失均逐渐增加。在贮藏 5 d 后，对照组的蒸煮损失为 29.92%，实

验组的蒸煮损失分别为 25.91% 和 26.10%。对照组显著高于 ($P<0.05$) 两个实验组。其中, BeGlyNS- I 组和 BeGlyNS- II 组鸡胸肉的蒸煮损失分别比对照组减少了 4.01% 和 3.86%。郑华等^[1]研究不同冷却方式对黄羽肉鸡胴体僵直进程与品质的影响, 表明快速冷却可以降低蒸煮损失率。研究中, 水冷冷却速率并不高, 从而导致鸡肉蒸煮损失率较高。

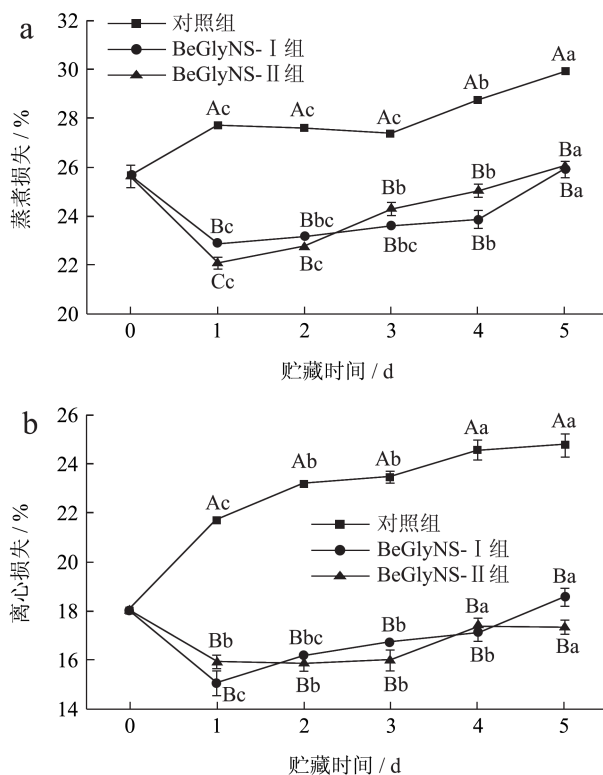


图 5 鸡胸肉在贮藏期间水分损失的变化

Fig.5 The changes in water loss of chicken breast meat during the storage period

注: a 为蒸煮损失; b 为离心损失。

与蒸煮损失类似, 在 5 d 的贮藏过程中, 三组鸡胸肉的离心损失都随着时间的延长而显著增加 (图 5b)。在贮藏 5 d 后, 对照组的离心损失为 24.77%, 实验组的离心损失分别为 18.58% 和 17.34%。其中, BeGlyNS- I 组和 BeGlyNS- II 组鸡胸肉的离心损失分别比对照组减少了 6.19% 和 7.43%。并且在整个贮藏期内, 两个实验组鸡胸肉的离心损失均显著低于对照组 ($P<0.05$)。研究结果表明, 与传统的水冷方法相比, 采用 BeGlyNS 载冷剂冷却处理获得的鸡胸肉在 4 °C 贮藏期能够保留更多水分。

非常有趣的是, 经载冷剂冷却的两组实验组在贮藏前期的蒸煮损失和离心损失均显著低于新鲜鸡胸肉, 推测可能原因有两个, 一是经载冷剂冷却后, 虽然进行充分冲洗, 但仍有部分载冷剂残留在鸡胸肉表面形成薄膜锁住水分; 二是鸡胸肉在贮藏 1 d 过程中因体内

生物代谢和外界环境微生物引起的蛋白质微弱变性, 增加了蛋白与水分的结合。具体机理还有待深入研究。

2.2.4 载冷剂冷却处理对鸡胸肉鲜度的影响

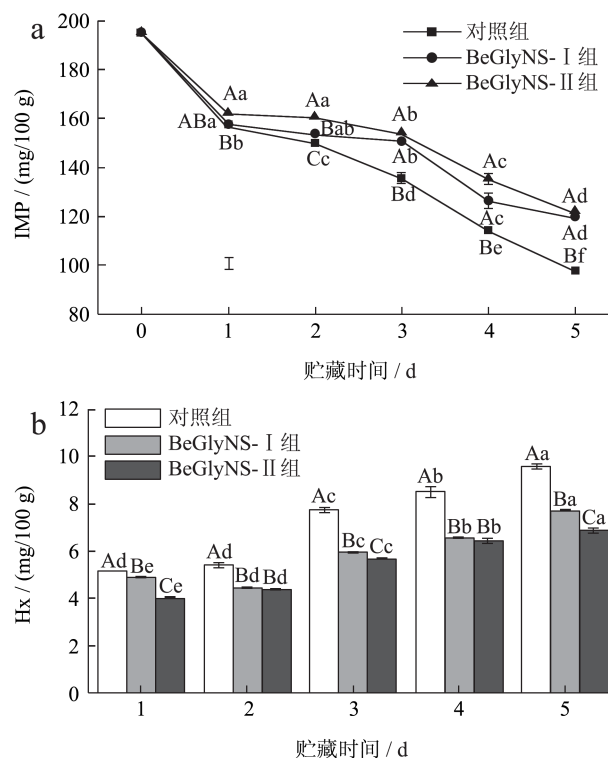


图 6 鸡胸肉在贮藏期间鲜度的变化

Fig.6 The changes in freshness during the storage period of chicken breast meat

注: a 为 IMP; b 为 Hx。

IMP 是公认的可用于评估生鲜肉鲜度的重要指标, 但在生鲜肉贮藏过程中不能稳定存在, 会进一步分解成具有苦味的 Hx^[39]。因此, 肉类在贮藏过程中新鲜度的降低与 IMP 的降解密切相关。如图 6a 所示, 随着贮藏时间的延长, IMP 含量显著下降 ($P<0.05$), 这一结果表明, 随着贮藏时间的延长, 鸡胸肉的新鲜度会随着贮藏时间的延长而降低^[40]。贮藏 5 d 后, 对照组的 IMP 含量从 195 降低至 98 mg/100 g, 减少了 49.74%; BeGlyNS- I 组和 BeGlyNS- II 组的 IMP 含量分别减少了 38.97% 和 37.44%, BeGlyNS- I 和 BeGlyNS- II 组鸡胸肉的 IMP 含量降低率分别比对照组低 10.77% 和 12.30%。表明使用 BeGlyNS 载冷剂进行直接浸液式冷却处理, 能显著降低鸡胸肉贮藏期 IMP 的降解速率。

此外, 在贮藏过程中, IMP 的分解会产生 Hx, 从而影响其感官品质^[41]。随着贮藏时间的延长, 三组鸡胸肉的 Hx 含量均显著增加 (图 6b)。贮藏 0 d 时, 即新鲜鸡胸肉的 Hx 含量为 3.80 mg/100 g, 贮藏 5 d 后, 对照组鸡胸肉的 Hx 含量增加为 9.58 mg/100 g (增加

了 152.11%)，BeGlyNS- I 组和 BeGlyNS- II 组的 Hx 含量分别增加了 102.89% 和 81.05%，BeGlyNS- I 和 BeGlyNS- II 组鸡胸肉的 Hx 含量增加率分别低于对照组 49.22% 和 71.06%。这些结果表明，采用 BeGlyNS 载冷剂冷却处理显著减少了贮藏期鸡胸肉 Hx 的生成量。其可能原因为：快速冷却缩短了肉类的冷却时间，降低了宰后畜禽生物体内因应激引起的生物酶代谢活动，从而降低了 IMP 的分解^[42]；其次快速冷却降低了肉类表面微生物的生长繁殖，降低了肉类的腐败，延缓了肉类的鲜度损失^[30]。

3 结论

以低共熔溶剂（Deep Eutectic Solvents, DES）为改性剂，设计制备了 9 种直接浸液式载冷剂，并研究了载冷剂特性及其对鸡胸肉贮藏期品质的影响。采用甜菜碱 / 丙三醇组成的 DES 与 NS 按照 1:1 配制得到的载冷剂，具有低冻结点、低黏度以及高传热能力的显著优势。与传统水冷方式相比，该载冷剂能够显著提升冷却速率。在本研究制备的 9 组载冷剂中，BeGlyNS 载冷剂展现出较为优异的物理特性。

实验结果表明，应用 BeGlyNS 载冷剂对鸡胸肉进行冷却处理后，在 4 ℃贮藏条件下，鸡胸肉的水分损失、TVB-N 含量显著降低，同时 IMP 的分解速率减缓，Hx 的生成量也得到有效控制。因此，采用本研究报道的 BeGlyNS 载冷剂冷却处理，能够显著减少鸡胸肉在 4 ℃贮藏期间的品质损耗，实现减损保鲜。本研究结果不仅为生鲜鸡肉的快速冷却锁鲜技术提供了理论依据，还为新型食品载冷剂的研发提供了重要的理论参考。

参考文献

- [1] 郑华,梁颖思,林捷,等.冷却方式对黄羽肉鸡胴体僵直进程与品质的影响[J].现代食品科技,2017,33(6):228-233.
- [2] LIANG C, ZHANG D, WEN X, et al. Effects of chilling rate on the freshness and microbial community composition of lamb carcasses [J]. LWT -Food Science and Technology, 2022, 153: 112559.
- [3] 黄文权,阚启鑫,刘果,等.冷冻及冻藏过程中鸡肉的食用品质及化学质量属性变化研究进展[J].食品科学,2024,45(6):326-336.
- [4] 李晓燕,陈杰,樊博玮,等.浸渍式冷冻技术的研究进展[J].食品与发酵工业,2020,46(15):307-312.
- [5] DU X, KONG B, HE J, et al. Cryoprotective effect of water-tailored trehalose-based natural deep eutectic solvents on frozen-thawed mirror carp (*Cyprinus carpio* L.) surimi [J]. Food Chemistry, 2023, 426: 136633.
- [6] OZTURK B, PARKINSON C, GONZALEZ-MIQUEL M. Extraction of polyphenolic antioxidants from orange peel waste using deep eutectic solvents [J]. Separation and Purification Technology, 2018, 206: 1-13.
- [7] KRANZ M, HOFMANN T. Food-grade synthesis of maillard-type taste enhancers using natural deep eutectic solvents (NADES) [J]. Molecules, 2018, 23(2): 261.
- [8] WEN H, TANG D, LIN Y, et al. Enhancement of water barrier and antimicrobial properties of chitosan/gelatin films by hydrophobic deep eutectic solvent [J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 303: 120435.
- [9] 杨贤庆,侯彩玲,林婉玲,等.响应面法优化食品浸渍速冻冻结液配方[J].食品科学,2012,33(24):1-5.
- [10] 王雪松,谢晶.竹荚鱼浸渍冻结液配方的优化与应用效果[J].食品与发酵工业,2021,47(19):195-200.
- [11] 马晓斌,林婉玲,杨贤庆,等.浸渍式快速冷冻液的优化及冻结技术对脆肉鲩品质的影响[J].食品工业科技,2014,35(18):338-341.
- [12] 曾朝喜.天然低共熔溶剂理化性质及其在脂肪酶催化转化应用中的研究[D].广州:华南理工大学,2017.
- [13] SINGH L, SINGH B, BHATT I D. NADES-based extraction optimization and enrichment of Cyanidin-3-O-galactoside from *Rhododendron arboreum* Sm.: Kinetics and thermodynamics insights [J]. Food Chemistry, 2024, 455: 139793.
- [14] 陈杰.对虾浸渍式冷冻过程的冻结特性研究[D].哈尔滨:哈尔滨商业大学,2024.
- [15] 郭春英,王克俭,王旭,等.旋转流变法表征粳米粉糊化过程[J].食品科技,2016,41(9):167-170.
- [16] 苗馨月.低温载冷剂制备及食物浸渍式冷冻过程中传热性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨商业大学,2020.
- [17] 刘东,胡乐天.咪唑类离子液体对煤传热特性的影响实验研究[J].煤矿安全,2022,53(6):44-49.
- [18] 杨茜,贾庆超.不同预冷方式对新鲜鸡肉品质影响的研究[J].食品科技,2022,47(10):153-158.
- [19] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会.GB 5009.228-2016,食品安全国家标准食品中挥发性盐基氮的测定[S].北京:中国标准出版社,1996.
- [20] RINWI T G, SUN D W, MA J, et al. Underlying mechanisms and molecular interactions of isochoric freezing on enhancing the freshness of chicken breast meat [J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 187: 115305.
- [21] ZOU Y, KANG D, LIU R, et al. Effects of ultrasonic assisted cooking on the chemical profiles of taste and flavor of spiced beef [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 46: 36-45.
- [22] LIU H, MA J, PAN T, et al. Effects of roasting by charcoal, electric, microwave and superheated steam methods on (non) volatile compounds in oyster cuts of roasted lamb [J]. Meat Science, 2021, 172: 108324.
- [23] 李展.浸渍速冻载冷剂冻结点调控机理和性能优化[D].南宁:广西大学,2023.
- [24] 徐霞,徐梦意,虞舟,等.载冷剂的流动特性及在水产品贮运保鲜中的应用研究进展[J].食品与机械,2023,39(9):201-208+233.
- [25] 韩光赫.直接浸渍冷冻载冷剂组成、传递特性及应用研究[D].广州:华南理工大学,2010.
- [26] 张涛,吴燕燕,李来好,等.响应面法优化水产品液体速冻用的载冷剂配比[J].南方水产科学,2019,15(5):99-108.
- [27] 常心洁,洪国同,杨鲁伟,等.载冷剂低温热物性测试方法综述[J].真空与低温,2009,15(3):131-136.
- [28] CAO C, XIAO Z, GE C, et al. Application and research progress

- of proteomics in chicken meat quality and identification: A review [J]. *Food Reviews International*, 2022, 38(3): 313-334.
- [29] WARNER R D, JACOB R H, ROSENVOLD K, et al. Altered post-mortem metabolism identified in very fast chilled lamb M. longissimus thoracis et lumborum using metabolomic analysis [J]. *Meat Science*, 2015, 108: 155-164.
- [30] YAN T, HOU C, WANG Z, et al. Effects of chilling rate on progression of rigor mortis in postmortem lamb meat [J]. *Food Chemistry*, 2022, 373(Pt B): 131463.
- [31] BROWN T, IAN RICHARDSON R, WILKIN C A, et al. Vascular perfusion chilling of red meat carcasses-a feasibility study [J]. *Meat Science*, 2009, 83(4): 666-671.
- [32] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会;国家食品药品监督管理总局.GB 12694-2016,食品安全国家标准畜禽屠宰加工卫生规范[S].北京:中国标准出版社,1996.
- [33] QIAO L, TANG X, DONG J. A feasibility quantification study of total volatile basic nitrogen (TVB-N) content in duck meat for freshness evaluation [J]. *Food Chemistry*, 2017, 237: 1179-1185.
- [34] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会;国家食品药品监督管理总局.GB 2707-2016,食品安全国家标准鲜(冻)畜、禽产品[S].北京:中国标准出版社,1996.
- [35] REN W, YUAN G, LIN X, et al. Comparison of the immersion chilling and freezing and traditional air freezing on the quality of beef during storage [J]. *Food Science & Nutrition*, 2021, 9: 6653-6661.
- [36] ROLDÁN M, ANTEQUERA T, PÉREZ-PALACIOS T, et al. Effect of added phosphate and type of cooking method on physico-chemical and sensory features of cooked lamb loins [J]. *Meat Science*, 2014, 97(1): 69-75.
- [37] HAYAT M N, ISMAIL-FITRY M R, KAKA U, et al. Assessing meat quality and textural properties of broiler chickens: The impact of voltage and frequency in reversible electrical water-bath stunning [J]. *Poultry Science*, 2024, 103(7): 103764.
- [38] BARBUT S. Measuring water holding capacity in poultry meat [J]. *Poultry Science*, 2024, 103(5): 103577.
- [39] HUANG Z, CAI Z, ZHANG J, et al. Integrating proteomics and metabolomics to elucidate the molecular network regulating of inosine monophosphate-specific deposition in jingyuan chicken [J]. *Poultry Science*, 2023, 102(12): 103118.
- [40] TIKK M, TIKK K, TØRNGREN M A, et al. Development of inosine monophosphate and its degradation products during aging of pork of different qualities in relation to basic taste and retronasal flavor perception of the meat [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2006, 54(20): 7769-7777.
- [41] WILLIAMSON J, RYLAND D, SUH M, et al. The effect of chilled conditioning at 4 °C on selected water and lipid-soluble flavor precursors in bison bison longissimus dorsi muscle and their impact on sensory characteristics [J]. *Meat Science*, 2014, 96(1): 136-146.
- [42] BAI Y, REN C, HOU C, et al. Phosphorylation and acetylation responses of glycolytic enzymes in meat to different chilling rates [J]. *Food Chemistry*, 2023, 421: 135896.