

冻藏和冻融条件对鲢鱼不漂洗鱼糜中 α -二羰基化合物形成的影响

苏 婕^{1,2} 李佳艺^{1,2} 刘永乐^{1,2} 周劲松³ 黄轶群^{1,2} 李向红^{1,2} 王发祥^{1,2}

(1. 长沙理工大学食品与生物工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 湖南省水生资源食品加工
工程技术研究中心, 湖南 长沙 410114; 3. 平江县劲仔食品有限公司, 湖南 岳阳 414000)

摘要: [目的] 调控鲢鱼不漂洗鱼糜中的 α -二羰基化合物 (α -DCs)。[方法] 分析鱼糜样品在 -18 、 -60 $^{\circ}\text{C}$ 下冻藏和冻融过程中 3-脱氧葡萄糖醛酮 (3-DG)、乙二醛 (GO)、丙酮醛 (MGO)、2,3-丁二酮 (2,3-BD) 含量的变化, 以及冻结方式、抗冻剂 (鲢鱼酶解产物) 添加量对 4 种 α -DCs 形成的影响。[结果] 鱼糜于 -60 $^{\circ}\text{C}$ 冻藏 60 d 后, 3-DG、MGO 和 2,3-BD 含量分别上升了 209%、122%、139%, 显著低于 -18 $^{\circ}\text{C}$ 冻藏组; GO 含量先升后降, 于 -60 $^{\circ}\text{C}$ 冻藏第 45 天达到最大值, 变化速率低于 -18 $^{\circ}\text{C}$ 冻藏组 (第 30 天时最大), 表明超低温冻藏能减少 α -DCs 形成。冻融过程中, 3-DG、2,3-BD 含量随冻融次数的增加逐渐上升, 而 GO、MGO 含量呈先升后降趋势, 除 -60 $^{\circ}\text{C}$ 冻结有利于抑制 GO 生成外, 其他冻结方式和冻结温度对 α -DCs 的形成均无显著性影响; 添加鲢鱼酶解产物可抑制鱼糜冻融 3 次后 GO、MGO 和 2,3-BD 含量的增加, 以及冻融 6 次后 GO、MGO 含量下降。[结论] 添加抗冻剂能一定程度上抑制部分 α -DCs 的形成和转化。

关键词: 鲢鱼; 不漂洗; 鱼糜; 冻藏; 冻融循环; α -二羰基化合物

Effects of the conditions of frozen storage and freeze-thaw treatment on the formation of α -dicarbonyl compounds in unwashed silver carp surimi

SU Jie^{1,2} LI Jiayi^{1,2} LIU Yongle^{1,2} ZHOU Jinsong³ HUANG Yiqun^{1,2}
LI Xianghong^{1,2} WANG Faxiang^{1,2}

(1. School of Food Science and Bioengineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 2. Hunan Provincial Engineering Technology Research Center of Aquatic Food Resources Processing, Changsha, Hunan 410114, China; 3. Pingjiang Jinzai Food Co., Ltd., Yueyang, Hunan 414000, China)

Abstract: [Objective] To regulate the formation of α -dicarbonyl compounds (α -DCs) in unwashed silver carp surimi. [Methods] The levels of 3-deoxyglucosaldosterone (3-DG), glyoxal (GO), pyroacetal (MGO) and 2,3-butanedione (2,3-BD) were analyzed in surimi during frozen storage and freeze-thaw cycles at -18 $^{\circ}\text{C}$ and -60 $^{\circ}\text{C}$. The effects of freezing temperature, freezing method, and the addition of an antifreeze agent (enzymatic hydrolysis product of silver carp) on the formation of these α -DCs were evaluated. [Results] After 60 days of storage at -60 $^{\circ}\text{C}$, the levels of 3-DG, MGO and 2,3-BD increased by 209%, 122% and 139%, respectively, but were significantly lower compared to storage at -18 $^{\circ}\text{C}$. GO levels initially increased, peaking on day 45 during -60 $^{\circ}\text{C}$ storage, with a slower rate of change compared to the -18 $^{\circ}\text{C}$ group, which peaked on day 30. These findings indicate that ultra-low temperature storage can effectively reduce α -DCs formation. During freeze-thaw cycles, 3-DG and 2,3-BD levels increased progressively with more cycles, while GO and MGO levels initially increased and later declined. Freezing at -60 $^{\circ}\text{C}$ notably inhibited α -DC formation, whereas other freezing methods and temperature showed no significant effects. Adding enzymatic hydrolysates from silver carp suppressed increases in GO, MGO and 2,3-BD after 3 freeze-thaw cycles and mitigated declines in GO and MGO after 6 cycles. [Conclusion] The addition of antifreeze agents can partially inhibit the formation and transformation of α -DCs, especially under repeated freeze-thaw conditions.

Keywords: silver carp; unwashed; surimi; frozen storage; freeze-thaw cycle; α -dicarbonyl compounds

基金项目: 湖南省重点研发计划项目 (编号: 2022NK2038); 国家自然科学基金面上项目 (编号: 31972106, 32072251)

通信作者: 王发祥 (1978—), 男, 长沙理工大学教授, 博士。E-mail: wfx@csust.edu.cn

收稿日期: 2024-07-16 改回日期: 2024-10-30

鲢鱼是中国四大家鱼之一,2022 年养殖产量达 387.98 万 t,约占淡水鱼总量的 15%^[1];同时鲢鱼肌间刺多,价格低廉,也是最典型的大宗低值淡水鱼。为获得良好的产品凝胶强度和感官质量,传统鱼糜加工需要通过漂洗工序除去鱼肉中的水溶性蛋白、脂肪、血液和色素等,但漂洗过程会损失大量的营养和风味物质,同时也带来了额外的水资源消耗和环境污染问题^[2-3]。由于不漂洗鱼糜中含有较多的水溶性蛋白质(酶)、不饱和脂质及金属离子等,其在冻藏过程中较易发生蛋白质和脂肪的氧化、降解等生化反应,除导致鱼糜品质下降外^[4],也可能形成一些潜在的危害物,如 α -二羰基化合物(α -DCs)、晚期糖基化终末产物(AGEs)等^[5-6]。

α -DCs 是一类含有两个羰基基团的化合物,具有高度反应活性,其在体内蓄积会引发肥胖、衰老、糖尿病、糖尿病血管并发症、慢性肾病以及细胞、组织功能障碍等^[7-8],同时也会进一步反应产生 AGEs、丙烯酰胺、呔喃等危害人体健康的有害物质。天然食品中一般较少存在 α -DCs,但可通过糖裂解、美拉德反应和脂质过氧化等反应产生,其广泛存在于高温热处理或者长期贮藏的食品中^[9-10],如 3-脱氧葡萄糖醛酮(3-DG)、乙二醛(GO)、丙酮醛(MGO)、2,3-丁二酮(2,3-BD)等^[11]。鲢鱼不漂洗鱼糜富含蛋白质、不饱和脂肪酸等营养成分,冻藏过程中仍会发生氧化等化学反应,有利于 α -DCs 的生成,并进一步增加 AGEs 等危害物含量^[12]。目前,关于鲢鱼不漂洗鱼糜冻藏和冻融过程中 α -DCs 形成的规律、影响因素的研究较少。杨海琦等^[13-14]研究表明,冻结和冻藏会显著影响水产品冻藏过程中的脂质水解和氧化程度;课题组^[15]前期研究发现,冻藏温度、时间等对鲢鱼不漂洗鱼糜 AGEs 的形成有重要影响,而脂质和蛋白质氧化是 AGEs 形成的重要原因;李婷等^[16]研究表明,鲢鱼鱼糜制品中 AGEs 的形成与其原料冻融处理后的 GO、MGO 等 α -DCs 含量显著相关。 α -DCs 的生成对产品的质量安全非常不利,但目前关于不漂洗鱼糜产品中 α -DCs 的研究较少,尤其是有关冻藏和冻融过程及条件对其 α -DCs 形成的影响尚未见报道。研究拟探讨冻藏时间、冻结方式、冻藏温度及添加蛋白类抗冻剂等条件对鲢鱼不漂洗鱼糜 α -DCs 含量的影响,为明晰不漂洗鱼糜冻藏过程中 α -DCs 的形成规律及其有效调控提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

新鲜鲢鱼:每尾重(2.0±0.2) kg,市售;

5-甲基喹啉、3-脱氧葡萄糖醛酮(3-DG)、2,3-丁二酮(2,3-BD):上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

乙二醛(GO):北京百灵威科技有限公司;

丙酮醛(MGO):英国 Fluorochem 公司;

氯化钠、高氯酸、邻苯二胺等均为国产分析纯;

乙腈、甲醇、乙酸等均为国产色谱纯。

1.1.2 主要仪器设备

斩拌机:ZB-20 型,山东省诸城市华钢机械有限公司;

高效液相色谱仪:LC-20A 型,配有 SPD-20A 检测器、CBM-20A 系统控制器和泵 LC-20AT,日本岛津公司;

手持式均质机:T10-BASIC 型,德国 IKA 公司;

高速低温离心机:Centrifuge 5430R 型,德国 eppendorf 公司;

速冻柜:SDG-3 型,广州佰鲜制冷设备有限公司;

无霜冷藏冰箱:BCD-568WPCF 型,长虹美菱股份有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 不漂洗鱼糜样品制备 参照 Li 等^[17]的方法并修改,新鲜鲢鱼宰杀、去头去尾去内脏后,取背部白色肌肉于斩拌机中,0~4℃预斩 1 min,按每 100 g 鱼肉加入 2.5 g 食盐、0 或 2 g 抗冻剂继续斩拌 5 min,得鲢鱼不漂洗鱼糜样品。将鱼糜分装于若干带盖塑料盒中,每盒 25 g,分别置于一18、-60℃冻藏或冻融处理后进行后续试验。

1.2.2 α -DCs 含量测定 采用衍生法^[18]。色谱柱为 Cap-cell PAK C₁₈ AQ(4.6 mm I.D.×150 mm),柱温 25℃,进样量 20 μ L,参照 Li 等^[19]的方法采用体积分数为 0.15% 的乙酸水溶液(流动相 A)和乙腈(流动相 B)梯度洗脱,流速 0.8 mL/min,检测波长 313 nm。

1.2.3 冻藏时间对 α -DCs 含量的影响 将不漂洗鱼糜样品分别冻藏或冻融 0, 15, 30, 45, 60 d, 4℃解冻 15 h 后测定样品中 α -DCs 含量。

1.2.4 冻结方式对 α -DCs 含量的影响 不漂洗鱼糜样品一部分于一18℃按传统方式冻结(慢冻组);另一部分于鼓风速冻柜中进行快速冻结(速冻组)。待两组鱼糜样品几何中心温度(采用预埋的热电偶温度传感器测定)达 -18℃后,取出立即置于同一个 -18℃冰箱中进行冻融循环处理(-18℃冷冻 9 h, 4℃解冻 15 h 为 1 次冻融循环);分别于冻融循环 0, 3, 6 次后测定样品中 α -DCs 含量。

1.2.5 冻结温度对 α -DCs 含量的影响 将不漂洗鱼糜样品分别于一18、-60℃进行冻融循环处理(每次冻融循环包括在一18℃或 -60℃冷冻 9 h, 4℃解冻 15 h),分别于冻融循环 0, 3, 6 次后测定样品中 α -DCs 含量。

1.2.6 抗冻剂对 α -DCs 含量的影响 以课题组前期筛选的具有良好抗冻活性的鲢鱼酶解产物作为抗冻剂。参照 Wang 等^[20]的方法并修改,鲢鱼宰杀采肉后匀浆,按固液比($m_{\text{鱼糜}}:V_{\text{溶液}}$)1:5 (g/mL)分散于水溶液中,加入 3% 复合蛋白酶(以鱼肉干重计),在 pH 6.5, 温度 50℃下水解 30 min,结束后取样,90℃灭酶 15 min, 4 000 r/min 离心收集上清液,冷冻干燥,得鲢鱼酶解产物(FPH)。加入不漂洗鱼糜样品中,作为抗冻剂组(FPH),以不加抗冻剂的为对照组(CK)进行 0, 3, 6 次冻融循环处理(-18℃冷冻 9 h, 4℃解冻 15 h 为 1 次冻融循环)后测定样品中 α -DCs

含量。

1.3 数据处理

每组试验均重复3次,结果以平均值 $\pm$ 标准差表示,以Origin 2024软件绘图;使用SPSS 23软件进行方差分析(先进行Welch检验,方差齐者用Duncan法进行多重比较,方差不齐者用Dunnett-T3分析)和Pearson相关性分析,均值在 $\alpha=0.05$ 水平进行显著性检验。

2 结果与分析

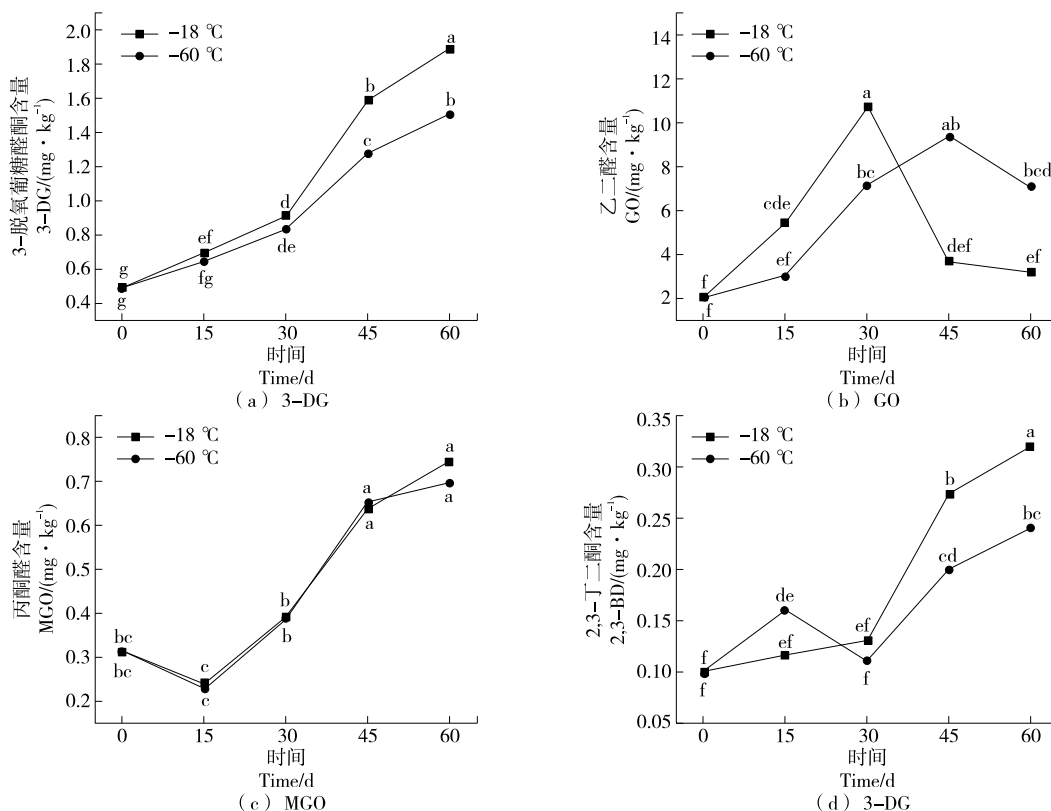
2.1 冻藏温度和时间对不漂洗鱼糜中 α -DCs形成的影响

由图1可知,冻藏过程中,3-DG、MGO和2,3-BD含量均随时间的延长逐渐上升,说明冻藏条件下,不漂洗鱼糜中的某些生化反应仍在进行,从而导致 α -DCs及其他潜在有害物质形成和积累^[21]。冻藏60 d后,−18℃冻藏组鱼糜样品中3-DG、2,3-BD、MGO含量分别增加了286%,221%,138%,而−60℃冻藏组鱼糜样品中相应的 α -DCs含量分别增加了209%,139%,122%,显著低于−18℃组,说明超低温冻藏(−60℃)有利于抑制不漂洗鱼糜中3-DG、2,3-BD、MGO的形成。此外,这3种 α -DCs含量的变化趋势与其TBA值和蛋白质羰基含量的变化一致^[22],说明 α -DCs的形成可能与鱼糜样品中脂质和蛋白质氧化紧密相关。GO含量在冻藏过程中呈先上升后下降趋势,

−18℃冻藏组贮藏第30天达到最大值,随后逐渐减少,可能是因为冻藏前期鱼糜脂质氧化等反应不断生成了GO,但贮藏过程中GO可以通过不同的化学反应进行进一步修饰和转化,生成乙醛酸、AGEs等次生代谢物质^[23],导致其含量减少,这与Huang等^[24]的研究结果相似;与−18℃组相比,−60℃冻藏组鱼糜GO含量的上升速率明显较慢,在冻藏第45天达到最大值,此后下降的幅度也较小,说明超低温冻藏能延缓不漂洗鱼糜中GO的生成和进一步转化,从而减少潜在危害物的积累^[17]。

2.2 冻藏方式对不漂洗鱼糜中 α -DCs形成的影响

由图2可知,相同冻融循环次数下,两组鱼糜样品中4种 α -DCs含量均无显著性差异,说明冻结方式不是影响鱼糜中 α -DCs形成的主要因素,可能是因为冻融循环中冻结阶段的时间较短,而试验选用的两种冻结方式对鱼糜品质的损害未形成实质性差异。鱼糜样品的反复冻融会加速蛋白质和脂质氧化反应,从而促进 α -DCs的生成,其中两组样品中的3-DG和2,3-BD含量在冻融过程中逐渐上升,6次冻融循环时分别增加了135%和144%;而两组样品的GO和MGO含量均在冻融循环3次后达到最高值,此后逐渐降低。Jetsada等^[25]研究发现,鱼露贮藏前期GO和MGO含量不断增加,随着贮藏时间的进一步延长,



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

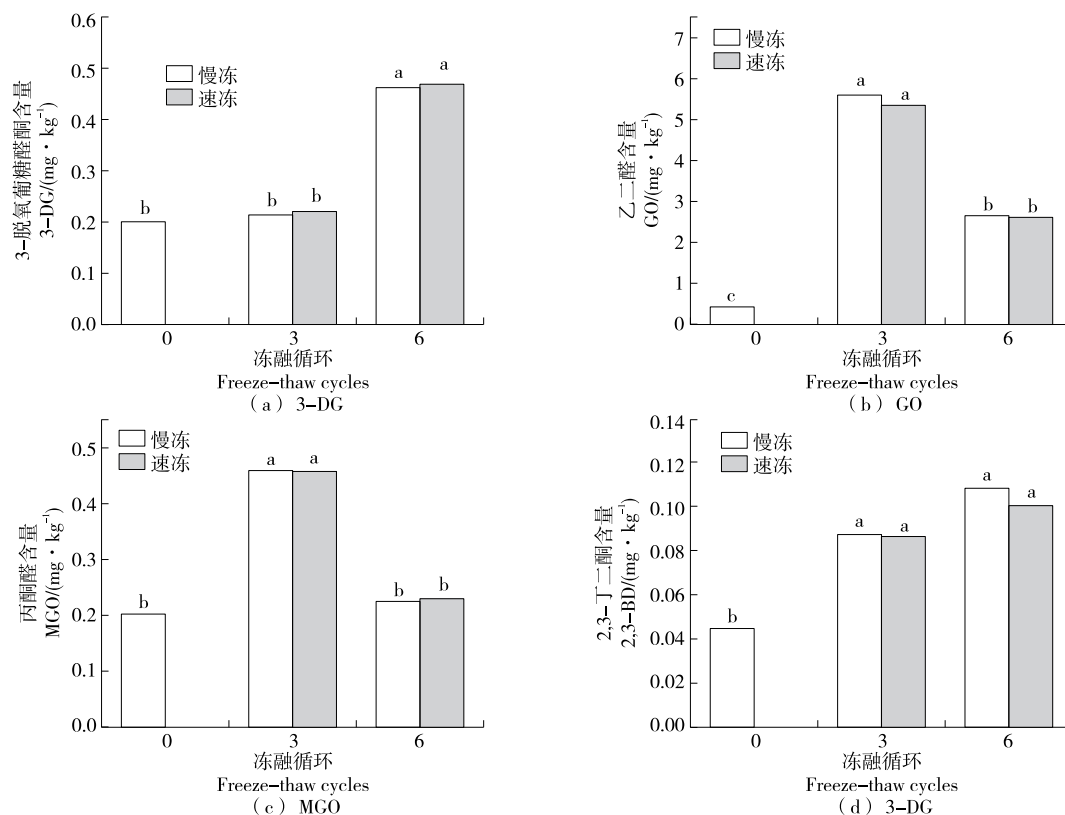
图1 不同冻藏时间下不漂洗鱼糜中3-DG、GO、MGO和2,3-BD含量的变化

Figure 1 Changes of 3-DG, GO, MGO and 2,3-BD in unwashed surimi under different frozen storage times

其含量开始减少,与试验结果类似。

2.3 冻藏温度对不漂洗鱼糜中 α -DCs 形成的影响

由图 3 可知,鱼糜中 3-DG 含量在冻融循环 3 次前上升缓慢,冻融循环 3 次后急剧增加,但冻藏温度对其影响不显著;2,3-BD 含量随冻融循环次数的增加逐渐上升,冻融循环 6 次后, -18°C 组鱼糜中 2,3-BD 含量为 0.12 mg/kg,而 -60°C 组为 0.09 mg/kg,稍低于 -18°C 组。



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 2 不同冻藏方式下不漂洗鱼糜中 3-DG、GO、MGO 和 2,3-BD 含量的变化

Figure 2 Changes of 3-DG, GO, MGO and 2,3-BD in unwashed surimi under different frozen storage methods

2.4 抗冻剂对不漂洗鱼糜中 α -DCs 形成的影响

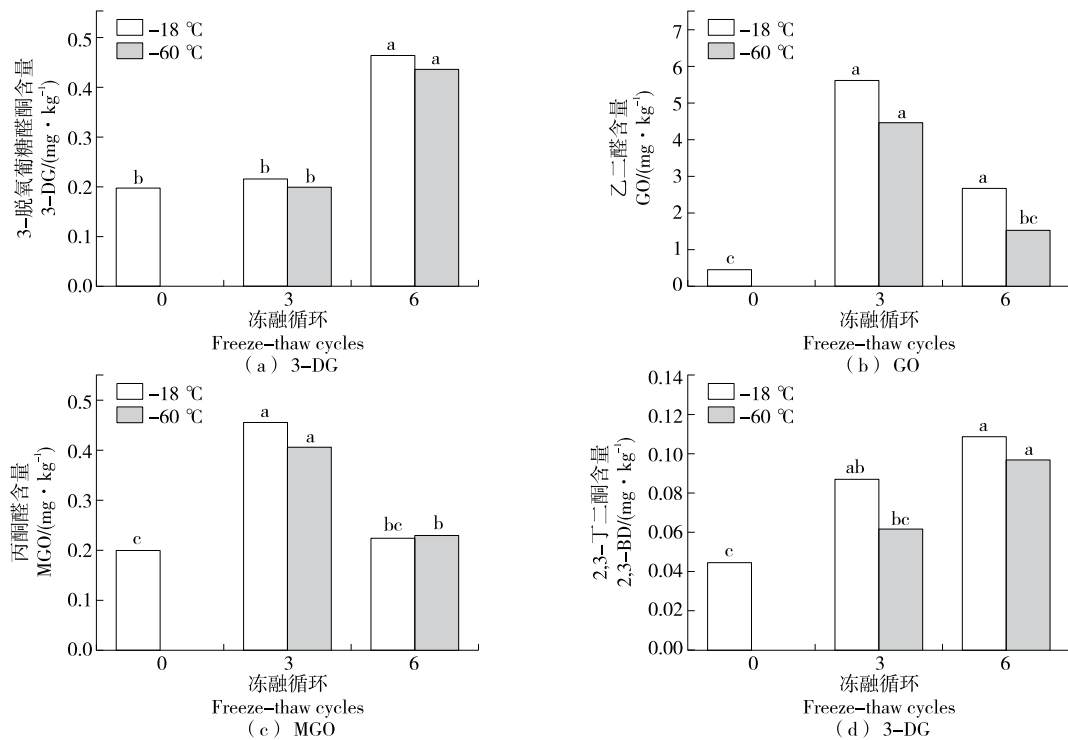
鲑鱼酶解产物(FPH)是一种抗冻剂,其主要抗冻组分为 1 000~3 000 的抗冻肽,大部分来源于鲑鱼小清蛋白^[27]; Shen 等^[28]研究发现, FPH 对鱼糜肌原纤维蛋白具有良好的抗冻保护作用,还可以延缓脂肪氧化并与蛋白质相互作用保护鱼糜凝胶结构。由图 4 可知,两组鱼糜的 α -DCs 含量在冻融过程中的变化趋势基本相同, FPH 组鱼糜样品中 4 种 α -DCs 含量的初始值略高于 CK 组 ($P > 0.05$); 冻融循环 3 次后, FPH 组鱼糜样品中 3-DG、GO、MGO、2,3-BD 含量分别为 0.25, 5.46, 0.37, 0.07 mg/kg, 除 3-DG 外, 其余 3 种 α -DCs 含量均低于 CK 组。Zhang 等^[29]研究发现, 鲑鱼鱼鳍水解物可以有效减缓冻融过程中鱼片蛋白和脂质降解程度,一定程度上抑制了 α -DCs 的形成。冻融循环

两组鱼糜样品中 GO 和 MGO 均在冻融循环 3 次时达到最大值,之后开始下降;冻融循环 3 次时, -18°C 组鱼糜中 GO 含量由 0.45 mg/kg 升至 5.61 mg/kg, 上升率为 11.59%, 而相应的 -60°C 组为 4.48 mg/kg, 上升率仅为 9.04%, 低于 -18°C 组。这可能是一 -60°C 超低温条件下, 鱼糜脂肪氧化程度相对 -18°C 组的低^[26], 有利于抑制部分 α -DCs 的生成。

6 次后, FPH 组鱼糜的 GO、MGO 含量未发生明显变化, 而 CK 组的显著下降, 说明添加 FPH 能较好抑制 GO、MGO 等 α -DCs 进一步修饰和转化, 从而减少 AGEs 等有害物质的生成; 此外, 两组鱼糜样品的 3-DG、2,3-BD 含量均有所增加, 而 FPH 组的稍高于 CK 组, 具体原因尚不清楚, 可能是因为 FPH 的抗冻和抗氧化作用延缓了 3-DG、2,3-BD 的进一步转化, 也可能是与 FPH 富含氨基酸和多肽等有利于美拉德反应发生有关^[30]。

2.5 不漂洗鱼糜中 α -DCs 形成与冻藏过程的相关性分析

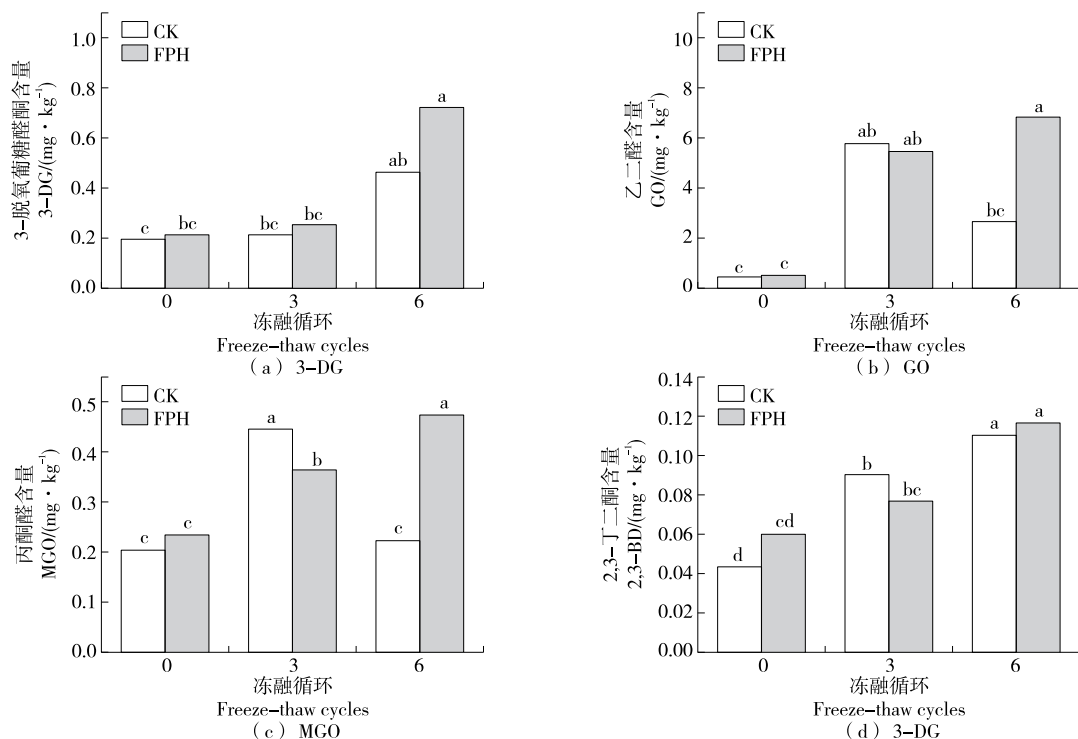
由表 1 可知, 鱼糜样品中 4 种 α -DCs 含量与冻藏时间、冻融次数呈显著正相关 ($P < 0.05$), 说明冻藏或冻融过程促进了 α -DCs 的形成; 其中, 4 种 α -DCs 与冻藏时间极显著相关 ($P < 0.01$), 而 MGO 与冻融次数无相关性, 可能与其



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图3 不同冻藏温度下不漂洗鱼糜中3-DG、GO、MGO和2,3-BD含量的变化

Figure 3 Changes of 3-DG, GO, MGO and 2,3-BD in unwashed surimi at different frozen storage temperatures



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图4 添加鲢鱼酶解产物后不漂洗鱼糜中3-DG、GO、MGO和2,3-BD含量的变化

Figure 4 Changes of 3-DG, GO, MGO and 2,3-BD in unwashed surimi after adding enzymatic hydrolysate of silver carp

冻融过程中容易被进一步修饰和转化有关。4 种 α -DCs 含量均与冻藏温度极显著相关,表明贮藏温度越低越有利于抑制 α -DCs 的形成或转化;除 GO 含量与冻结温度显著正相关外,4 种 α -DCs 含量与冻结方式、冻结温度之间均无相关性,说明冻结过程对 α -DCs 的形成影响较小,可能是因为导致 α -DCs 形成的蛋白质和脂质氧化等反应主要发生在鱼糜长期冻藏或解冻过程中,也可能与试验中冻融处理时冷冻过程相对解冻过程的时间更短有关。此外,GO 和 MGO 含量与抗冻剂显著正相关,主要是因为添加抗冻剂能增加鱼糜的冻融稳定性,从而减轻 α -DCs 的进一步转化。

表 1 鲢鱼不漂洗鱼糜中 α -二羰基化合物含量与冻藏条件和抗冻剂之间的相关性[†]

Table 1 Correlation analysis of α -dicarbonyl and frozen storage conditions and antifreeze agents in unwashed silver carp surimi

化合物	冻藏时间	冻藏温度	冻融次数	冻结方式	冻结温度	抗冻剂
3-DG	0.957**	0.933**	0.806**	0.098	0.297	0.293
GO	0.515**	-0.878*	0.429*	-0.098	0.878*	0.878*
MGO	0.863**	0.878*	0.249	-0.104	-0.518	0.891*
2,3-BD	0.871**	0.933**	0.863**	-0.311	0.396	0.201

† **表示在 $P<0.01$ 水平显著;*表示在 $P<0.05$ 水平显著。

3 结论

不漂洗鱼糜冻藏过程中,氧化等生化反应仍在进行,导致 4 种 α -二羰基化合物不断生成和进一步转化,但超低温冻藏 ($-60\text{ }^{\circ}\text{C}$) 能显著延缓这些变化,从而减少 α -二羰基化合物等潜在危害物的积累。冻融也是影响鱼糜样品中 α -二羰基化合物含量变化的重要原因,其中 3-脱氧葡萄糖醛酮和 2,3-丁二酮含量均随冻融次数的增加而上升,乙二醛和丙酮醛含量在冻融过程中先增加后下降。此外,冻结方式和冻结温度对冻融过程中 4 种 α -二羰基化合物含量变化影响不显著,而添加抗冻剂能在一定程度上抑制部分 α -二羰基化合物的形成和转化。总体而言,改善冻藏和冻融条件有利于有效调控不漂洗鱼糜中 α -二羰基化合物的形成和积累,但对于 4 种 α -二羰基化合物含量之间的关联及其形成机制需深入研究。

参考文献

[1] 栾微男,王传洋,KEVIN L,等.干制工艺对鲢鱼品质及晚期糖化终末产物含量的影响[J].食品与机械,2022,38(7):13-20.
LUAN A N, WANG C Y, KEVIN L, et al. Effects of silver carp drying process on quality and content of advanced glycation end products[J]. Food & Machinery, 2022, 38(7): 13-20.

[2] 陆婷婷,张晓昀,戴志远,等.羧甲基壳聚糖与复合盐单次漂洗对白鲢鱼糜品质的影响[J].中国食品学报,2024,24(1):169-178.
LU T T, ZHANG X D, DAI Z Y, et al. Effect of single rinse treatment of carboxymethyl chitosan and compound salt on the quality of silver carp surimi[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(1): 169-178.

[3] 孟珺,郭颖,高红亮,等.不漂洗鱼糜的制作工艺研究[J].食品工业科技,2012,33(10):247-249.
MENG J, GUO Y, GAO H L, et al. Study on the processing technology of surimi without rinsing[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(10): 247-249.

[4] 李艳青,孔保华,夏秀芳,等.不同漂洗处理后冻藏对鲤鱼蛋白功能特性的影响[J].现代食品科技,2014,30(9):166-172.
LI Y Q, KONG B H, XIA X F, et al. Effect of frozen storage after different washing methods on functional properties of myofibrillar proteins in cyprinus carpio[J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(9): 166-172.

[5] WU X G, ZHANG Z G, HE Z Y, et al. Effect of freeze-thaw cycles on the oxidation of protein and fat and its relationship with the formation of heterocyclic aromatic amines and advanced glycation end products in raw meat[J]. Molecules, 2021, 26: 1264.

[6] LI T, NIU L H, LI X H, et al. Formation of advanced glycation end-products in silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) surimi products during heat treatment as affected by freezing-thawing cycles[J]. Food Chem, 2022, 395: 133612.

[7] 蔡智立,陈诗炜,陈媛媛,等.食品中 α -二羰基化合物产生的危害及控制[J].中国调味品,2018,43(10):185-189.
CAI Z L, CHEN S W, CHEN Y Y, et al. Hazard and control of α -dicarbonyl compounds in food[J]. China Condiment, 2018, 43(10): 185-189.

[8] 杨阳,刘少静,焦淑玲,等. α -二羰基化合物检测方法的研究进展[J].化学与生物工程,2020,37(10):1-6,53.
YANG Y, LIU S J, JIAO S L, et al. Research progress in detection method of α -dicarbonyl compound[J]. Chemistry & Bioengineering, 2020, 37(10): 1-6, 53.

[9] YAN S, WU L M, XUE X F. α -Dicarbonyl compounds in food products: comprehensively understanding their occurrence, analysis, and control[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2023, 22(2): 1387-1417.

[10] ZHANG Y, CHEN Y H, LIU H L, et al. Advances of nanoparticle derived from food in the control of α -dicarbonyl compounds: a review[J]. Food Chemistry, 2024, 444: 138660.

[11] MAASEN K, SCHEIJEN J L, OPPERHUIZEN A, et al. Quantification of dicarbonyl compounds in commonly consumed foods and drinks; presentation of a food composition database for dicarbonyls[J]. Food Chemistry, 2020, 339: 128063.

[12] 余璐涵,陈旭,吴金鸿,等.不同低温冻融循环对鱼糜品质与

- 加工特性的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(7): 352-360.
- YU L H, CHEN X, WU J H, et al. Effects of freezing and thawing cycles on quality and processing characteristics of surimi[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(7): 352-360.
- [13] 杨海琦, 陈季旺, 徐言, 等. 冻结及冻藏温度对小龙虾蛋白质理化性质的影响[J]. 中国食品学报, 2022, 22(4): 254-264.
- YANG H Q, CHEN J W, XU Y, et al. Effect of frozen and freezing storage temperatures on physicochemical properties of protein from red swamp crawfish[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(4): 254-264.
- [14] NAKAZAWA N, OKAZAKI E. Recent research on factors influencing the quality of frozen seafood[J]. Fisheries Science, 2020, 86(3): 231-244.
- [15] MIRANDA L T, RAKOVSKI C, WERE L M. Effect of Maillard reaction products on oxidation products in ground chicken breast[J]. Meat Science, 2012, 90(2): 352-360.
- [16] 李婷, 廖梓康, 李珍, 等. 冻融及加热过程鲢鱼鱼糜制品中晚期糖化终末产物的形成机制[J]. 食品科学, 2023, 44(2): 45-53.
- LI T, LIAO Z K, LI Z, et al. Formation mechanism of advanced glycation end products in silver carp surimi products during freeze-thaw and heating treatment[J]. Food Science, 2023, 44(2): 45-53.
- [17] LI J Y, NIU L H, WANG F X, et al. Effects of frozen temperature and multiple freeze-thaw cycles on gel structure, protein and lipid oxidation and formation of advanced glycation end-products in unwashed silver carp surimi[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2022, 57(9): 6 191-6 200.
- [18] NEMET I, VARGA D, TURK L, et al. Methylglyoxal in food and living organisms[J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2010, 50(12): 1 105-1 117.
- [19] LI L, KONG S S, LIU Y L, et al. Effects of acetic acid, ethanol, and sodium chloride on the formation of N^{ϵ} -carboxymethyllysine, N^{ϵ} -carboxyethyllysine and their precursors in commercially sterilized pork[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2021, 15(6): 5 337-5 344.
- [20] WANG F X, XIONG S J, LI X H, et al. Cryoprotective effect of silver carp muscle hydrolysate on baker's yeast *Saccharomyces cerevisiae* and its underlying mechanism[J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(1): 190-198.
- [21] BARON C P, JACOBSEN C, JESSEN F, et al. Protein and lipid oxidation during frozen storage of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55(20): 8 118-8 125.
- [22] 何羽茜, 柏妮, 王余德, 等. 不漂洗鲢鱼鱼糜浸渍冻藏及其品质变化[J]. 食品与机械, 2023, 39(2): 120-126.
- HE Y X, BO N, WANG Y D, et al. Quality changes in the unwashed silver carp surimi during the immersion frozen storage[J]. Food & Machinery, 2023, 39(2): 120-126.
- [23] LUEVANO C C, CHAPMAN N K. Dietary advanced glycation end products and aging[J]. Nutrients, 2010, 2(12): 1 247-1 265.
- [24] HUANG S, DONG X, ZHANG Y, et al. Effects of oxidation and precursors (lysine, glyoxal and schiff base) on the formation of N^{ϵ} -Carboxymethyl-lysine in aged, stored and thermally treated chicken meat[J]. Food Science and Human Wellness, 2022, 11(5): 1 252-1 258.
- [25] JETSADA W, ANUPAM G, TOSHIAHI O, et al. Determination of glyoxal and methylglyoxal in thai fish sauce and their changes during storage test[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2014, 8(3): 241-248.
- [26] KIM E J, LEE S, PARK D H, et al. Physicochemical properties of pork neck and chicken leg meat under various freezing temperatures in a deep freezer[J]. Food Science of Animal Resources, 2020, 40(3): 444-460.
- [27] CUI M L, WANG F X, LI X H, et al. Investigation of the cryoprotective mechanisms of silver carp muscle hydrolysate for frozen dough exposed to multiple freeze-thaw cycles[J]. LWT, 2023, 187: 115321.
- [28] SHEN X L, LI T, LI X H, et al. Dual cryoprotective and antioxidant effects of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) protein hydrolysates on unwashed surimi stored at conventional and ultra-low frozen temperatures[J]. Food Science and Technology, 2020, 153: 112563.
- [29] ZHANG L T, SHAN Y K, HONG H, et al. Prevention of protein and lipid oxidation in freeze-thawed bighead carp (*Hypophthalmichthys nobilis*) fillets using silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) fin hydrolysates[J]. LWT, 2020, 123: 109050.
- [30] WANG F X, CUI M L, LIU H D, et al. Characterization and identification of a fraction from silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) muscle hydrolysates with cryoprotective effects on yeast[J]. LWT, 2021, 137: 110388.