许英茹, 欧奥雅, 蒋诗怡, 等. 多糖复配对减盐鱼丸贮藏期间品质特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(1): 400−409. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020116
XU Yingru, OU Aoya, JIANG Shiyi, et al. Effect of Polysaccharide Compound on Quality Characteristics of Salt-reduced Fish Balls during Storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(1): 400−409. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020116

·贮运保鲜·

多糖复配对减盐鱼丸贮藏期间品质特性的影响

许英茹[1,2], 欧奥雅[1], 蒋诗怡[1], 陈杜连[1], 张　怡[1,2], 曾红亮[1,2,*]
（1.福建农林大学食品科学学院, 福建福州 350002;
2.闽台特色海洋食品加工及营养健康教育部工程研究中心, 福建福州 350002）

摘　要: 本研究采用不同复配比例（6∶0、4∶2、2∶4 和 0∶6）的辛烯基琥珀酸淀粉酯（Octenyl succinic anhydride modified starches，OSAS）与卡拉胶（*κ*-Carrageenan，KCG），制备减盐 30% 的鱼丸，并以高盐鱼丸组（HC）与减盐 30% 鱼丸组（LC）作为对照，于−18 ℃ 条件下进行 180 d 的贮藏实验。结果表明，相较于 HC 组，LC 组的理化性质与感官特性整体呈下降趋势。OSAS/KCG 的添加提高了减盐鱼丸的白度，且持水力和质构特性显著增加（*P*<0.05）。随着贮藏时间的增加，鱼丸的挥发性盐基氮和硫代巴比妥酸值显著提高（*P*<0.05）。在贮藏末期（第 150~180 d），LC 组的挥发性盐基氮超过了国标要求的 30 mg/100 g，OSAS/KCG 的添加有利于减少减盐鱼丸在 0~180 d 挥发性盐基氮含量，且低于国标限定值，延长其保质期。此外，随着贮藏时间的延长，鱼丸咸味和鲜味显著减弱（*P*<0.05），酸味显著增强（*P*<0.05）。OSAS/KCG 复配比例为 2∶4 组（L-2-4）的鱼丸与 HC 组的风味无显著差异（*P*>0.05）。L-2-4 组鱼丸咸鲜味适中且总体可接受性得分最高。研究结果表明添加 2∶4 复配的 OSAS/KCG 可提高减盐鱼丸贮藏期间的品质特性。

关键词: 减盐鱼丸, 辛烯基琥珀酸淀粉酯, 卡拉胶, 贮藏特性, 品质特性
中图分类号: TS254.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)01−0400−10
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020116　　本文网刊:

Effect of Polysaccharide Compound on Quality Characteristics of Salt-reduced Fish Balls during Storage

XU Yingru[1,2], OU Aoya[1], JIANG Shiyi[1], CHEN Dulian[1], ZHANG Yi[1,2], ZENG Hongliang[1,2,*]
（1.College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;
2.Engineering Research Center of Fujian-Taiwan Special Marine Food Processing and Nutrition, Ministry of Education, Fuzhou 350002, China）

Abstract: In this study, fish balls with a 30% salt reduction were prepared by using octenyl succinic anhydride modified starches (OSAS) and *κ*-carrageenan (KCG) with different compounding ratios (6∶0, 4∶2, 2∶4 and 0∶6). Using the high-salt fish ball group (HC) and the 30% salt-reduced fish ball group (LC) as controls, the quality characteristics of reduced salt fish balls stored at −18 ℃ for 180 days were determined. The results showed that the physical and sensory properties of fish balls in LC group showed an overall downward trend compared to those in the HC group. The whiteness of the reduced-salt fish balls was improved and their water-holding capacity and texture properties were significantly enhanced with the addition of OSAS/KCG (*P*<0.05). With the increase of storage time, the total volatile basic nitrogen and thiobarbituric acid value of fish balls were increased significantly (*P*<0.05). At the end of storage time (at 150~180 d), the total volatile basic

收稿日期: 2025−02−17
基金项目: “十四五”国家重点研发计划“食品制造与农产品物流科技支撑”重点专项项目（2022YFD2101301）; 2022 年度福州市海洋科创高地“揭榜挂帅”项目（2022-ZD-017）。
作者简介: 许英茹（2000−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品科学, E-mail: 18059086365@163.com。
*** 通信作者:** 曾红亮（1986−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品科学, E-mail: zhlfst@fafu.edu.cn。

nitrogen of fish balls in the LC group were exceeded the national standard requirement value of 30 mg/100 g, while the addition of OSAS/KCG was effectively reduced the total volatile basic nitrogen of salt-reduced fish balls, which was lower than 30 mg/100 g, and it extended their shelf life more. In addition, with the extension of storage time, the saltiness and umami of fish balls were significantly weakened (P<0.05), and their sourness was significantly increased (P<0.05). Moreover, there was no significant difference (P>0.05) in flavor between the fish balls of the 2∶4 (w/w) of OSAS/KCG (L-2-4) and the HC group. The fish balls in the L-2-4 group had a moderate saltiness and umami, and displayed the highest overall acceptability score. These research result demonstrated that a 2∶4 complex of OSAS/KCG could improve the quality characteristics of salt-reduced fish balls during storage.

Key words: reduced-salt fish balls; octenyl succinic anhydride modified starches; κ-carrageenan; storage characteristics; quality characteristics

鱼糜制品是指鱼糜经盐、淀粉、辅料等添加后, 经过浆化和加热成型制成的弹性凝胶状食品的统称[1]。鱼糜制品因富含蛋白质、碳水化合物等营养成分而深受消费者喜爱。然而, 鱼糜制品中盐的添加量较高(占生肉质量的 3%), 在夏季为延长产品保质期, 一些公司生产的鱼糜制品中盐的添加量高达 3.5%[2]。在鱼糜中添加盐不仅能促进食品基质中挥发性香气化合物的释放, 还能调节咸味、刺激食欲[3], 维持细胞外液的渗透压[4], 保证产品的持水性[5]、使产品具有弹性、脆性和延长货架期[6]。然而, 日常饮食中过量摄入盐(氯化钠)已成为全球范围内对人类健康的重大威胁。高盐饮食是导致心血管疾病、肾脏疾病以及各种慢性病的主要因素[7]。全球疾病负担(GBD)研究的结果表明, 高钠饮食每年在全球造成超过 300 万人死亡, 这已成为世界上最严重的饮食危机[8]。因此, 在确保咸度感知和品质不受影响的前提下, 如何通过技术手段有效降低鱼糜制品中的 NaCl 含量已成为研究热点。

目前, 降低鱼糜制品中盐含量主要方法包括: 使用复合替代盐部分取代传统钠盐[6,9]、添加风味增强剂以弥补低盐带来的咸味损失[10]、改变盐的物理性质以提高溶解率及分布均匀性[11]、采用新型非热加工技术促进钠离子在食品基质中的扩散作用[12] 以及通过胶体结构的设计[13] 来改善低盐鱼糜制品质构特性。这些方法共同作用, 有助于改善低盐鱼糜制品的整体品质。其中, 添加多糖调节鱼糜制品的胶体结构被认为是减少盐含量的关键策略之一。Shi 等[14] 指出, 魔芋葡甘聚糖(Konjac glucomannan, KGM)促进了低盐(减钠 50%)罗非鱼鱼糜凝胶形成分布均匀的网络结构, 从而改善了鱼糜的品质和抗冻能力。Lan 等[15] 证明, κ-卡拉胶改变了水的分布, 促进蛋白质的有序聚集, 从而提高鱼糜的咸味感知及凝胶性能。此外, Wang 等[16] 通过对比卡拉胶、高酰基结冷胶、黄原胶和刺槐豆胶对低盐鱼肠质构特性(断裂特性)和微观结构的影响, 得出了具有脆性、多孔和连续微观结构的产品有更高的盐释放率和更强的咸度感知。不同的多糖具有不同的结构和凝胶特性, 因此它们对鱼糜制品凝胶特性的影响也各不相同。目前, 利用单一多糖改善低盐肉制品质量特性的研究较多, 而多糖复配在鱼糜制品中的应用却鲜有报道。

因此, 本实验采用不同复配比例(6∶0、4∶2、2∶4 和 0∶6)的辛烯基琥珀酸淀粉酯(Octenyl succinic anhydride modified starches, OSAS)与卡拉胶(κ-Carrageenan, KCG)制备减盐 30% 的鱼丸, 通过分析贮藏过程中鱼丸的颜色、质构、持水性、水分分布、挥发性盐基氮、硫代巴比妥酸值、滋味、气味以及感官特性, 探究不同复配比例多糖对减盐鱼丸贮藏期间品质特性的影响, 为减盐鱼丸的开发提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

金线鱼糜、马铃薯变性淀粉　海欣食品股份有限公司; 猪肥肉　福州永辉超市; 食盐　中盐上海市盐业有限公司; 白糖　莲花健康产业集团股份有限公司; 味精　太太乐食品有限公司; 白胡椒粉　北京吉得利食品有限公司; 大豆油、香油　益海嘉里金龙鱼粮油食品股份有限公司; 辛烯基琥珀酸淀粉酯钠(食品级, 纯度>99%)　上海源叶生物科技有限公司; 卡拉胶(食品级, 纯度>99%)　河南中辰生物有限公司; 三氯乙酸、硫代巴比妥酸、氧化镁、硼酸、硫酸、甲基红、溴甲酚绿　均为分析级, 国药集团化学试剂有限公司。

101-0ES 高速捣碎机　济南金光仪器设备制造有限公司; CR-10 色差仪　日本柯尼卡公司; Pen3 电子鼻　德国艾尔森斯检测公司; SA402B 电子舌　日本 INSENT 公司; TA.XT Express 质构仪　大罗科学仪器有限公司; MesoMR23-060H-I 脉冲^{1}H 核磁共振波谱仪　中国苏州纽迈分析仪器股份有限公司; kjelte8400 全自动凯氏定氮仪　丹麦福斯分析仪器公司; XHEY-200D Synergy H1 酶标仪　美国伯腾仪器有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　鱼丸的制备　将冷冻鱼糜于室温解冻 3 h, 取 500 g 鱼糜于高速组织搅拌机中斩拌 5 min, 加入相较于鱼糜质量 2.1%~3% 的食盐进行斩拌 3 min, 随后加入鱼糜质量 15% 的马铃薯变性淀粉、10% 的猪油、0.9% 的白糖、1.5% 的味精、0.6% 的香油、0.5% 的白胡椒粉、1.5% 的大豆油以及 OSAS 和 KC 继续

斩拌 5 min。斩拌的过程中少量多次加入碎冰(总量占鱼糜质量 9%),以防止温度过高,斩拌全程温度不高于 10 ℃。将斩拌均匀所得鱼浆捏成直径为 2 cm 球状,于 40 ℃ 水浴锅定型 30 min,随后在 90 ℃ 下加热 10 min。所得鱼丸在 4 ℃ 下静置冷却 1 h,并在 24 h 内完成 0 d 时所有指标的测定。本研究采用 3% 食盐添加量的鱼丸作为高盐对照 HC 组,采用 2.1% 食盐添加量(减盐 30%)的鱼丸作为低盐对照 LC 组。采用 4 种 OSAS 与 KC 的复配比例作为实验组,复配比例分别为(OSAS∶KC):6∶0、4∶2、2∶4、0∶6,每组实验组中 OSAS/KCG 合计质量始终占鱼糜质量的 0.6%,食盐含量均为 2.1%。将四组实验组命名为:L-6-0、L-4-2、L-2-4、L-0-6。将所得鱼丸真空包装,在−18 ℃ 下保存 6 个月,每隔 30 d 测定相关指标。

1.2.2 色差的测定 使用色差仪测定鱼丸色差的相关参数值,白度的计算公式如下:

$$白度 = 100 - [(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}]^{1/2}$$

式中:L^*表示亮度,a^*表示(红色/绿色),b^*表示(黄色/蓝色)。

1.2.3 解冻损失和蒸煮损失的测定 将鱼丸切成 2 cm×2 cm×2 cm 的块状,放在室温中 30 min,待其完全解冻,擦去其表面水分,按以下公式计算其解冻损失:

$$解冻损失率(\%) = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100$$

式中:M_1 表示解冻前鱼丸的质量,g;M_2 表示解冻后鱼丸的质量,g。

将解冻完的鱼丸放入蒸煮袋置于 100 ℃ 水浴煮制 10 min,捞出冷却至室温后,擦去其表面水分,按以下公式计算其蒸煮损失:

$$蒸煮损失率(\%) = \frac{M_2 - M_3}{M_2} \times 100$$

式中:M_2 表示蒸煮前鱼丸的质量,g;M_3 表示蒸煮后鱼丸的质量,g。

1.2.4 磁共振成像(MRI)的测定 将鱼丸切成 2 cm×2 cm×2 cm 的块状并放入 MRI 管中。使用伪彩色处理图像软件获得水质子密度的伪彩色图。主要参数分别为 18.2 ms 的回波时间(TE)和 500 ms 的重复时间(TR)。

1.2.5 质构特性的测定 将鱼丸切成直径 20 mm、高度 20 mm 的圆柱体测定其硬度、弹性与咀嚼性。参数设置为:探头 P/36R,压缩程度 50%,压缩次数 2 次,间隔 5 s,测前速率 3.0 mm/s,测定速率 3600 mm/s,测后速率 3.0 mm/s,触发力 0.75 N。

1.2.6 挥发性盐基氮(TVB-N)值的测定 按照 GB/T 5009.228-2016《食品安全国家标准食品中挥发性盐基氮的测定》[17] 中半微量定氮法测定 TVB-N 值,每组样品平行测定 3 次。

1.2.7 硫代巴比妥酸(TBARS)值的测定 按照 GB 5009.181-2016《食品安全国家标准 食品中丙二醛的测定》[18] 中分光光度法测定丙二醛的含量,TBARS 值用丙二醛的质量分数来表示。

1.2.8 电子舌测定滋味 取 10 g 切碎的鱼丸加入 50 mL 去离子水均匀混合,使用绞肉机低速搅碎 1 min。将混合溶液置于离心机中以 4000 r/min 离心 10 min(4 ℃),过滤取上清液上机测定。该仪器配有鲜味、涩味、咸味、酸味和苦味传感器以及两个参比电极。

1.2.9 电子鼻测定挥发性风味 将 5 g 切碎的鱼丸放入 20 mL 顶空瓶中密封,在 45 ℃ 恒温水浴锅中加热 60 min 后进行测定。电子鼻分析系统配备 10 个传感器:W1C(芳香成分)、W5S(氮氧化合物)、W3C(氨类、芳香成分)、W6S(氢化物)、W5C(烷烃、芳香成分)、W1S(甲基类)、W1W(无机硫化物)、W2S(醇类、醛酮类)、W2W(芳香成分、有机硫化物)、W3S(长链烷烃类)。

1.2.10 感官评价 根据胡越等[19] 的方法对鱼丸进行感官评价,并略作修改。感官评价由 10 名具备感官评价经验的人员组成(5 名男性和 5 名女性)。在感官评价前统一进行了课程培训,以保证小组成员在培训后均掌握感官评价的基本操作和不同感官特征的质量标准。将鱼丸切成 2 mm 厚的片状,并使用无规律的 3 位数字进行标记不同处理组的鱼丸。鱼丸的咸味、风味、口感和总体可接受性使用 7 点线等级进行评估,各项满分均为 7 分(表 1)。

表 1 鱼丸感官评价标准

Table 1 Sensory evaluation criteria for fish balls

指标	7分	4分	1分
咸味	咸味过重	咸味适中	较淡无咸味
风味	鱼香明显、具有鲜味、无腥味	鱼香正常、鲜味不足、无腥味	味道不好,有腥味
口感	口感过硬	硬度弹性正常	口感绵软
总体可接受性	可接受性最好	可接受性适中	可接受性差

1.3 数据处理

所有实验均重复 3 次,结果用平均值±标准差表示。采用 SPSS 20.0 软件进行双因素方差分析(ANOVA)和 Duncan 多重检验,$P<0.05$ 表示差异具有显著性。采用 Origin 2023b 和 GraphPad prism 9.0 进行绘图分析。

2 结果与分析

2.1 色差分析

水产品的色泽和质构是影响消费者接受程度的重要指标[20],减盐处理与 OSAS/KCG 的添加对鱼丸的色泽都有一定的影响(表 2)。随贮藏时间的延长,各处理组 L^*值与白度均显著降低($P<0.05$)。在贮藏第 180 d,LC 组的 L^*值与白度显著低于 HC 组($P<$

表 2　不同复配比例对贮藏期间鱼丸色差的影响

Table 2　Effect of different compounding ratio on color difference of fish balls during storage

指标	组别	0 d	30 d	60 d	90 d	120 d	150 d	180 d
L^*	HC	86.42±0.62^{Aa}	86.17±0.80^{Aa}	85.37±0.09^{Bab}	85.08±0.17^{Bab}	84.68±0.18^{BCa}	84.29±0.10^{CDab}	83.84±0.18^{Dab}
	LC	82.38±1.80^{Ab}	81.27±1.22^{ABc}	80.14±0.60^{BCd}	79.44±0.32^{CDe}	78.60±0.30^{CDEd}	78.24±0.23^{DEd}	77.53±0.28^{Ed}
	L-6-0	87.21±1.19^{Aa}	85.99±0.56^{Bab}	85.58±0.35^{Bab}	84.43±0.39^{Cc}	83.93±0.41^{Cb}	83.66±0.58^{Cbc}	83.22±0.65^{Cbc}
	L-4-2	87.11±0.32^{Aa}	86.33±0.20^{Ba}	85.89±0.06^{Ca}	85.25±0.20^{Da}	85.02±0.18^{Da}	84.62±0.30^{Ea}	84.21±0.24^{Fa}
	L-2-4	85.44±0.13^{Aa}	84.80±0.46^{Bb}	84.40±0.40^{Bc}	83.82±0.23^{Cd}	83.31±0.24^{Dc}	83.02±0.18^{Dc}	82.83±0.16^{Dc}
	L-0-6	85.81±0.95^{Aa}	85.19±0.11^{Bab}	85.01±0.05^{Bb}	84.61±0.38^{Cbc}	84.18±0.23^{Db}	83.46±0.49^{Ec}	82.82±0.33^{Fc}
a^*	HC	−9.13±1.87^{Gd}	−8.65±1.09^{Fd}	−8.11±0.89^{Ed}	−7.68±0.77^{Dd}	−6.96±0.72^{Cd}	−6.41±0.64^{Bd}	−5.86±0.82^{Ad}
	LC	7.66±2.78^{Aa}	8.17±2.87^{Aa}	8.70±3.35^{Aa}	9.09±4.09^{Aa}	9.58±4.04^{Aa}	10.16±4.33^{Aa}	10.66±3.73^{Aa}
	L-6-0	−4.82±2.79^{Ac}	−4.10±2.23^{Ac}	−3.45±2.60^{Ac}	−2.82±2.53^{Ac}	−2.86±2.04^{Ac}	−2.37±2.02^{Ac}	−2.21±1.91^{Ac}
	L-4-2	−1.90±3.39^{Ac}	−1.39±3.42^{Ac}	−1.03±3.35^{Ac}	−0.57±3.02^{Ac}	−0.13±2.56^{Ac}	0.09±2.39^{Ac}	0.38±2.32^{Ac}
	L-2-4	3.20±0.62^{Eb}	3.41±0.61^{DEb}	3.93±0.43^{CDb}	4.33±0.46^{BCb}	4.73±0.55^{BCb}	5.14±0.72^{ABb}	5.56±0.71^{Ab}
	L-0-6	2.81±0.73^{Cb}	3.15±0.76^{BCb}	3.35±0.71^{BCb}	3.67±0.65^{ABCb}	4.08±0.87^{ABCb}	4.60±0.77^{ABb}	4.90±0.86^{Ab}
b^*	HC	8.69±1.32^{Ab}	9.24±1.19^{Ab}	9.38±1.18^{Ab}	9.83±1.29^{Ab}	10.31±1.26^{Ab}	10.61±1.28^{Ac}	10.82±1.30^{Ac}
	LC	12.65±0.35^{Fa}	13.00±0.25^{EFa}	13.43±0.35^{DEa}	13.96±0.30^{CDa}	14.46±0.49^{BCa}	14.80±0.54^{ABa}	15.28±0.55^{Ab}
	L-6-0	10.98±1.53^{Bab}	11.47±1.51^{ABab}	11.95±1.39^{ABab}	12.5±1.01^{ABab}	12.95±1.08^{ABab}	13.43±0.90^{Aab}	13.78±0.78^{Aab}
	L-4-2	10.09±2.13^{Aab}	10.48±1.90^{Aab}	11.04±1.86^{Aab}	11.32±1.74^{Aab}	11.86±1.66^{Aab}	12.13±1.60^{Abc}	12.46±1.49^{Abc}
	L-2-4	8.99±1.39^{Ab}	9.32±1.42^{Ab}	9.48±1.31^{Ab}	10.18±1.22^{Ab}	10.43±1.28^{Ab}	10.81±1.50^{Abc}	11.33±1.45^{Abc}
	L-0-6	8.84±2.06^{Ab}	9.43±1.82^{Ab}	9.73±1.95^{Ab}	10.20±2.06^{Ab}	10.67±2.09^{Ab}	10.96±1.97^{Abc}	11.40±1.85^{Abc}
白度	HC	81.37±0.28^{Aa}	81.19±0.31^{Aa}	80.79±0.52^{ABa}	80.52±0.65^{BCa}	80.23±0.51^{BCa}	79.96±0.45^{CDa}	79.65±0.59^{Da}
	LC	76.93±2.51^{Ab}	75.70±1.97^{ABb}	74.36±1.33^{BCb}	73.36±1.61^{CDb}	72.28±1.46^{DEb}	71.60±1.66^{DEb}	70.67±1.39^{Eb}
	L-6-0	82.28±1.21^{Aa}	81.32±0.92^{ABa}	80.83±1.32^{ABa}	79.72±0.82^{BCa}	79.09±0.71^{Ca}	78.63±0.53^{Ca}	78.11±0.45^{Ca}
	L-4-2	83.22±1.19^{Aa}	82.44±1.03^{ABa}	81.81±1.13^{BCa}	81.20±0.94^{CDa}	80.74±0.81^{CDa}	80.27±0.67^{DEa}	79.77±0.65^{Ea}
	L-2-4	82.57±0.94^{Aa}	81.83±1.19^{ABa}	81.30±0.78^{ABa}	80.38±0.67^{BCa}	79.73±0.59^{CDa}	79.20±0.81^{CDa}	78.66±0.81^{Da}
	L-0-6	83.00±1.76^{Aa}	82.12±1.14^{ABa}	81.77±1.16^{BCa}	81.12±1.22^{BCa}	80.43±1.33^{CDa}	79.57±0.87^{DEa}	78.76±0.92^{Ea}

注: 对于同一指标, 不同大写字母表示同组鱼丸样品下不同贮藏期之间存在显著差异(P<0.05); 不同小写字母表示同一贮藏期内不同组别样品之间存在显著差异(P<0.05); 表3、表4同。

0.05)。推测这是由于减盐条件诱导的鱼丸凝胶强度结构较为松散, 样品表面透过率增加, 白度值减少[21]。而相较于减盐对照组, 添加了 OSAS/KCG 的鱼丸实验组 L^*值与白度显著增加(P<0.05), 这与 Shi 等[22] 的研究结果一致, 适量添加魔芋葡甘聚糖可有效改善低盐鱼糜的白度。这可能是由于 OSAS 与 KCG 间存在协同作用, 改善了鱼丸的凝胶网络结构, 使其形成更均匀、致密的凝胶体系, 增强光的散射能力, 从而提升鱼丸的白度[23]。然而各复配组间差异不显著(P>0.05), 说明 OSAS/KCG 的复配比例对鱼丸白度影响较小。

2.2　持水性分析

持水性是评定鱼糜产品品质的关键指标之一, 对产品的质地、嫩度等品质具有重要影响[24]。解冻损失和蒸煮损失是衡量持水性的主要指标, 这两项指标的升高表明肉制品的保水性能有所下降[25]。由图 1 可知, 对照组和各处理组的解冻损失和蒸煮损失随着冻藏时间的增加均呈上升趋势, 说明冻藏时间延长导致保水性降低。0~60 d 时, 解冻损失和蒸煮损失增加的幅度较大, 这是由于鱼丸冷冻生成冰晶破坏肌球蛋白结构, 且肌原纤维蛋白变性, 导致凝胶网络劣化, 水分保留能力降低[26]; 60~120 d 时, 解冻损失和蒸煮损失的增幅均变小, 这是因为随着冻藏时间延长, 肌原纤维蛋白逐渐大量变性并趋于稳定, 体系中可继续变性的蛋白数量减少, 结构劣化速度减缓; 进入后期

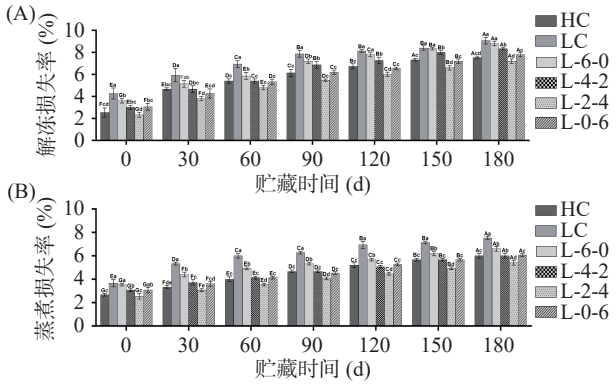


图 1　不同复配比例对贮藏期间鱼丸持水性的影响

Fig.1　Effect of different compounding ratio on water retention of fish balls during storage

注: (A)解冻损失, (B)蒸煮损失。对于同一指标, 不同大写字母表示同组鱼丸样品下不同贮藏期之间存在显著差异(P<0.05); 不同小写字母表示同一贮藏期内不同组别样品之间存在显著差异(P<0.05); 图 4 同。

时(120~180 d), 由于蛋白已充分变性, 鱼丸持水性劣化的速率趋于平缓[27]。由图 1 可知, 冻藏期间, LC 组的解冻损失和蒸煮损失始终高于 HC 组, 这说明减盐导致了鱼丸的持水性的降低。这是由于盐含量较低的条件下鱼丸中肌原纤维蛋白溶解率低, 导致其在加热成型的过程中无法充分交联形成三维凝胶网络结构, 使组织间隙中的水分流失[22]。OSAS/KCG 的添加显著提高了减盐鱼丸的持水性, 且单独

添加 OSAS/KCG 的减盐鱼丸其持水能力低于二者复配的鱼丸，这说明了 OSAS 与 KCG 对改善减盐鱼丸持水性具有协同作用。且当 OSAS 与 KCG 的比例为 2∶4 时，鱼丸解冻与蒸煮的损失达到最小值。

2.3 MRI 成像分析

MRI 成像图是一种快速和非侵入性的技术，已被越来越多地应用于食品中，通过绘制质子旋转的密度和移动性来分析鱼丸水分分布和内部（宏观结构）结构[14]。H 质子密度与水分含量有关，密度越大，水分含量越高，成像图中就表现为红色越明显，鱼丸中水分含量越低成像图中蓝色越明显。由图 2 可知 0~180 d 鱼丸样品 MRI 的 H 质子分布情况，由于鱼丸由手工捏制，且在冻藏前经过真空包装处理，导致鱼丸受到轻微挤压，形态上未能完全保持规则的块体。在贮藏 0 d 时 LC 组的鱼丸 H 质子密度低于其余组别，表明减盐导致鱼丸持水性下降引发汁液流失，而 OSAS/KCG 的添加可改善这种情况。由图 2 可知，随着贮藏时间增加，鱼丸内部出现汁液流失并伴随着水分迁移的现象。贮藏至 60 d 时，减盐对照组 MRI 图像已经完成变为蓝绿色，鱼丸水分流失严重。而正常盐对照组，在贮藏 120 d 后，MRI 图像才转变为蓝绿色，这说明减盐处理加速了鱼丸贮藏过程中水分的流失。添加了 OSAS/KCG 的鱼丸在贮藏 120 d 后 MRI 成像才开始转变为蓝绿色，表明 OSAS/KCG 的添加可以改善减盐处理下鱼丸的汁液流失。此外在贮藏 120 d 时，OSAS/KCG 复配的鱼丸其质子密度显著高于单独添加多糖的鱼丸。已有研究报道，鱼糜凝胶的水分分布与其网络结构相关[27]。因此推测添加 OSAS/KCG 后，鱼丸凝胶具有较高的网络致密度。综上所述，相较单独添加 OSAS/KCG，二者复配使用更有利于保持减盐鱼丸的水分，这与上文中鱼丸持水性的变化规律一致（见图 1）。

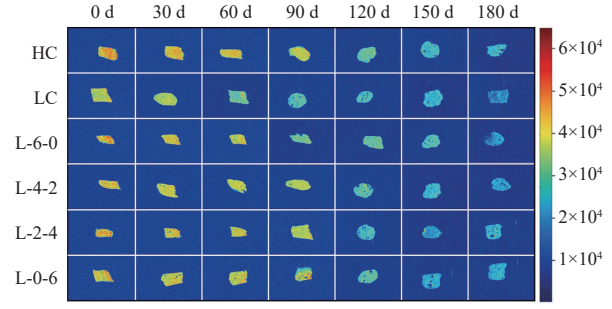


图 2 不同复配比例对贮藏期间鱼丸 MRI 成像的影响

Fig.2 Effect of different compounding ratio on MRI imaging of fish balls during storage

2.4 质构特性分析

鱼丸在贮藏期内的质构特性变化如表 3 所示，随着贮藏时间的增加，各处理组硬度、弹性和咀嚼性均呈逐渐降低的趋势（P<0.05），鱼丸贮藏期间质构特性的变化可能与水分的散失密切相关[28]。HC 组鱼丸的硬度和弹性相对较高，减盐处理后，鱼丸的硬度、弹性和咀嚼性显著降低（P<0.05）。这与胡越等[19] 的研究结果一致，直接减盐法制备的哈尔滨红肠其硬度和致密性相对较差。这可能是由于正常的盐添加水平有利于增加蛋白质分子的净电荷，同时静电排斥相互作用增加，蛋白质溶解度增强，从而更好地形成网络结构[29]。由表 3 可观察到，在贮藏末期（180 d）时，添加了 OSAS/KCG 的鱼丸其硬度、弹性和咀嚼性均显著大于 LC 组（P<0.05），当二者复配比例为 2∶4 时，鱼丸的质构特性最优。这可能是由于 OSAS 富含疏水性羧基，有利于鱼丸肌原纤维蛋白展开，促进了蛋白-水分子间相互作用，从而生成更牢固的水合结构[30]。而 KCG 主要与 MP 形成短链密集交联的刚性网络[31]。这与 Wasinnitiwong 等[32] 的研究结果相似，即 κ-卡拉胶与蛋清粉复配对提高金线鱼鱼糜凝胶的凝胶强度具有协同作用。

2.5 新鲜度分析

挥发性盐基氮（Total volatile basic nitrogen，TVB-N）是动物性食品中通过酶和微生物分解蛋白质产生氨和胺类等碱性含氮物质，它可以反映鱼丸蛋白质的降解与腐败的过程[33]。如图 3A 所示，各样品组鱼丸 TVB-N 初始值为 5.30±0.22 mg/100 g。随冻藏时间的延长，各组间的差异也越来越大。可以看出在贮藏后期（150~180 d），相较 HC 组，LC 组鱼丸的 TVB-N 值显著增加（P<0.05），超过 NY/T 1327-2018《绿色食品鱼糜制品》[34] 中对鱼糜制品 TVB-N 的规定值（30 mg/100 g）。这说明了减盐处理加速了鱼丸 TVB-N 值的增长，这可能是由于低盐环境削弱了抑菌作用和蛋白质稳定性，使残余微生物及内源酶的活性相对提高，从而促进了蛋白质的分解与氮类挥发性物质的积累。在整个冻藏期间添加了 OSAS/KCG 的实验组均低于限制水平（30 mg/100 g），且当 OSAS/KCG 复配比例为 2∶4 时，其 TVB-N 值达到最低。这可能是由于 KCG 的阴离子特性与 OSAS 淀粉的成膜性形成致密凝胶屏障，抑制腐败菌的侵入，从而突破鱼丸防腐依赖高盐添加剂的局限[35]。

硫代巴比妥酸（Thiobarbituric acid reactive substances，TBARS）值是反映鱼丸贮藏期间脂质氧化程度的指标，脂肪的氧化与肉制品的颜色和风味密切相关，且脂肪过度氧化会引起肉制品风味以及品质的劣变[36]。如图 3B 所示，在贮藏初期各处理组 TBARS 值较低，均为 0.5 mg/kg 左右，这与贾娜等[37] 报道的牛肉丸初始值（0.5~1.0 mg/kg）一致，表明此时样品存在轻度脂质氧化，主要原因是鱼糜含不饱和脂肪酸，在鱼糜擂溃斩拌及加热等过程中与空气中的氧气接触。由图 3B 可知在贮藏末期（180 d），LC 组的 TBARS 值明显高于 HC 组，这说明食盐添加量的减少，会加剧鱼丸新鲜度的降低。这可能是由于鱼糜蛋白中的铁离子对脂质的过氧化活性在减盐条件下得到增强[38]。贮藏 120~180 d，各组鱼丸之间的 TBARS 值差异逐渐显著（P<0.05），呈现为 LC 组>

表 3　不同复配比例对贮藏期间鱼丸质构特性的影响

Table 3　Effects of different compounding ratios on the texture characteristics of fish balls during storage

指标	组别	0 d	30 d	60 d	90 d	120 d	150 d	180 d
硬度(N)	HC	18.19±0.14^{Aa}	17.49±0.34^{Ba}	17.30±0.21^{Ba}	16.92±0.10^{Ca}	16.28±0.15^{Da}	15.82±0.08^{Ea}	15.28±0.14^{Fa}
	LC	9.42±0.11^{Af}	9.00±0.15^{Bf}	8.77±0.13^{Cf}	8.24±0.16^{Df}	8.01±0.17^{Ef}	7.41±0.11^{Fe}	6.77±0.05^{Ge}
	L-6-0	12.64±0.08^{Ae}	12.30±0.20^{Be}	11.76±0.08^{Ce}	11.27±0.06^{De}	10.92±0.10^{Ee}	10.65±0.08^{Fd}	10.45±0.18^{Fd}
	L-4-2	14.48±0.28^{Ac}	13.73±0.11^{Bc}	13.14±0.10^{Cc}	12.92±0.08^{CDc}	12.56±0.18^{Dc}	12.14±0.14^{Ec}	11.57±0.39^{Fc}
	L-2-4	15.75±0.21^{Ad}	14.83±0.10^{Bb}	14.41±0.16^{Cb}	14.13±0.11^{Db}	13.82±0.14^{Eb}	13.27±0.02^{Fb}	12.81±0.12^{Gb}
	L-0-6	13.55±0.26^{Ab}	13.07±0.05^{Bd}	12.85±0.07^{BCd}	12.53±0.15^{CDd}	12.25±0.14^{Dd}	12.25±0.59^{Dc}	11.60±0.11^{Ec}
弹性(mm)	HC	5.25±0.10^{Aa}	5.01±0.09^{Bab}	4.75±0.06^{Ca}	4.63±0.06^{Ca}	4.27±0.06^{Dab}	3.86±0.13^{Ea}	3.53±0.10^{Fb}
	LC	3.42±0.12^{Ac}	3.16±0.05^{Bd}	2.91±0.11^{Ce}	2.54±0.12^{De}	2.23±0.08^{Ee}	2.00±0.11^{Fd}	1.76±0.06^{Ge}
	L-6-0	4.74±0.08^{Ab}	4.43±0.08^{Bc}	4.19±0.01^{Cd}	3.94±0.07^{Dd}	3.60±0.19^{Ed}	3.14±0.14^{Fc}	2.79±0.09^{Gd}
	L-4-2	4.82±0.09^{Ab}	4.53±0.07^{Bc}	4.34±0.06^{Cc}	4.1±0.09^{Dc}	3.84±0.10^{Ec}	3.59±0.05^{Fb}	3.36±0.07^{Gc}
	L-2-4	5.28±0.07^{Aa}	5.06±0.05^{Ba}	4.83±0.12^{Ca}	4.54±0.07^{Da}	4.31±0.05^{Ea}	4.00±0.11^{Fa}	3.75±0.06^{Ga}
	L-0-6	5.13±0.04^{Aa}	4.90±0.12^{Bb}	4.60±0.08^{Cb}	4.35±0.08^{Db}	4.10±0.05^{Eb}	3.85±0.04^{Fa}	3.65±0.04^{Gab}
咀嚼性(mJ)	HC	43.37±0.57^{Ab}	41.76±0.88^{Bb}	39.91±0.38^{Cb}	37.78±0.59^{Db}	36.55±0.44^{Eb}	35.53±0.34^{Fb}	33.73±0.16^{Gb}
	LC	26.15±0.58^{Af}	25.60±0.69^{Af}	23.80±0.35^{Be}	23.03±0.21^{Bf}	21.76±0.54^{Ce}	19.79±0.60^{Df}	18.72±0.51^{Ee}
	L-6-0	35.18±0.33^{Ae}	33.68±0.44^{Be}	32.34±0.76^{Cd}	30.52±0.43^{De}	29.20±0.35^{Ed}	28.58±0.28^{Ee}	27.75±0.26^{Fd}
	L-4-2	41.42±0.61^{Ac}	39.48±0.93^{Bc}	37.27±0.47^{Cc}	36.21±0.21^{Dc}	35.71±0.22^{Db}	33.84±0.78^{Ec}	32.54±1.01^{Fc}
	L-2-4	44.75±0.59^{Aa}	43.35±0.45^{Ba}	42.22±0.44^{Ca}	40.67±0.37^{Da}	39.52±0.65^{Ea}	38.39±0.16^{Fa}	37.66±0.30^{Fa}
	L-0-6	37.97±0.35^{Ad}	37.27±0.86^{ABd}	36.54±0.46^{Bc}	35.42±0.17^{Cd}	34.15±0.71^{Dc}	32.80±0.43^{Ed}	32.06±0.36^{Ec}

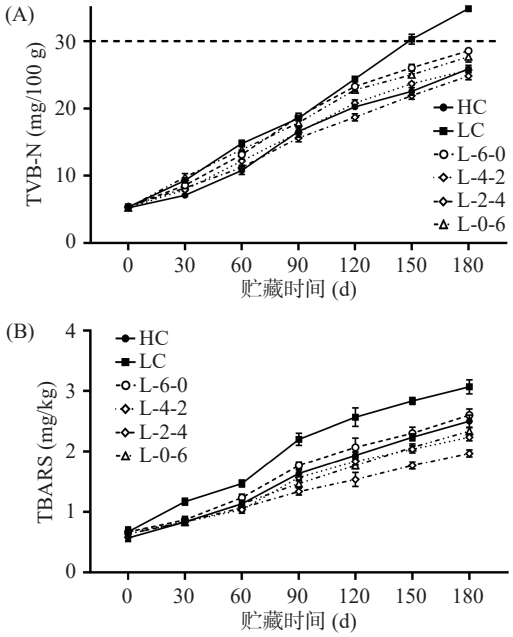


图 3　不同复配比例对鱼丸贮藏期间新鲜度的影响

Fig.3　Effects of different compounding ratios on freshness of fish balls during storage

L-6-0 组>HC 组>L-0-6 组>L-4-2 组>L-2-4 组。这说明了 OSAS/KCG 可抑制减盐鱼丸的氧化速率，且二者复配相较单独使用显示出更佳效果。这可能是由于 OSAS 的包埋作用减少自由基接触脂质，KCG 的硫酸基团清除自由基[35]，二者协同降低了 TBARS 值，延缓了减盐鱼丸贮藏期间的酸败。综合 TVB-N 与 TBARS 值对鱼丸新鲜度的评价结果表明，OSAS/KCG 复配比例为 2∶4 时，鱼丸的保鲜效果显著提升，相较 LC 组保质期可至少延长 30 d。

2.6　滋味分析

电子舌作为新兴的仿生设备，可以有效避免由生理味觉带来的主观影响和缺陷，无偏测量食品的滋味[39]。不同处理条件下的鱼丸在贮藏期间滋味变化情况如图 4 所示，贮藏 0 d 时，LC 组的咸味与鲜味显著低于 HC 组（P<0.05）。添加了 OSAS/KCG 的鱼丸相较 LC 组，咸味与鲜味值有所增加。说明了减盐处理降低了鱼丸的咸味与鲜味值，这可能是由于咸味与鲜味存在味觉互作效应，咸度的降低导致鱼丸鲜味的丧失[40]。而 OSAS/KCG 的添加可增加减盐鱼丸的咸鲜味。随着贮藏时间的延长，不同处理组鱼丸的酸味显著增强（P<0.05），鲜味与咸味显著减弱（P<0.05），其余滋味特征在贮藏期间变化幅度较小，没有出现显著性差异（P>0.05）。如图 4F 所示，在第 0 d 时，各处理组主要分布在 PC1 正半轴及 PC2 负半轴上，与咸味和鲜味相关，说明这几种味道在第 0 d 时较为突出。而在贮藏末期（180 d）各处理组主要分布在 PC2 正半轴上，与酸味、苦味、丰富度相关，说明贮藏期间鱼丸滋味发生变化。此外，在贮藏末期（180 d）时，L-2-4 组与 HC 组的距离最近，这表明 OSAS/KCG 复配比为 2∶4 时，与正常鱼丸对照组的滋味最为相似。

2.7　风味分析

不同处理组的鱼丸在贮藏初期（0 d）和贮藏末期（180 d）电子鼻各传感器响应值如图 5 所示，不同处理组各传感器的响应值变化趋势相似。传感器 W1W、W1S、W2S、W2W、W5C 和 W6S 的响应值较大，其中 W1W、W1S、W2S 和 W2W 在贮藏期间响应值显著降低（P<0.05），而 W5C 和 W6S 有所增加。如图 5B 所示，所有样品第一主成分（PC1）和第二主成分（PC2）的贡献率分别是 68.1% 和 15.2%，累计方差贡献率 83.3%，可以较好地表征鱼丸大部分挥发性风味特征信息。其中第一主成分代表了样品

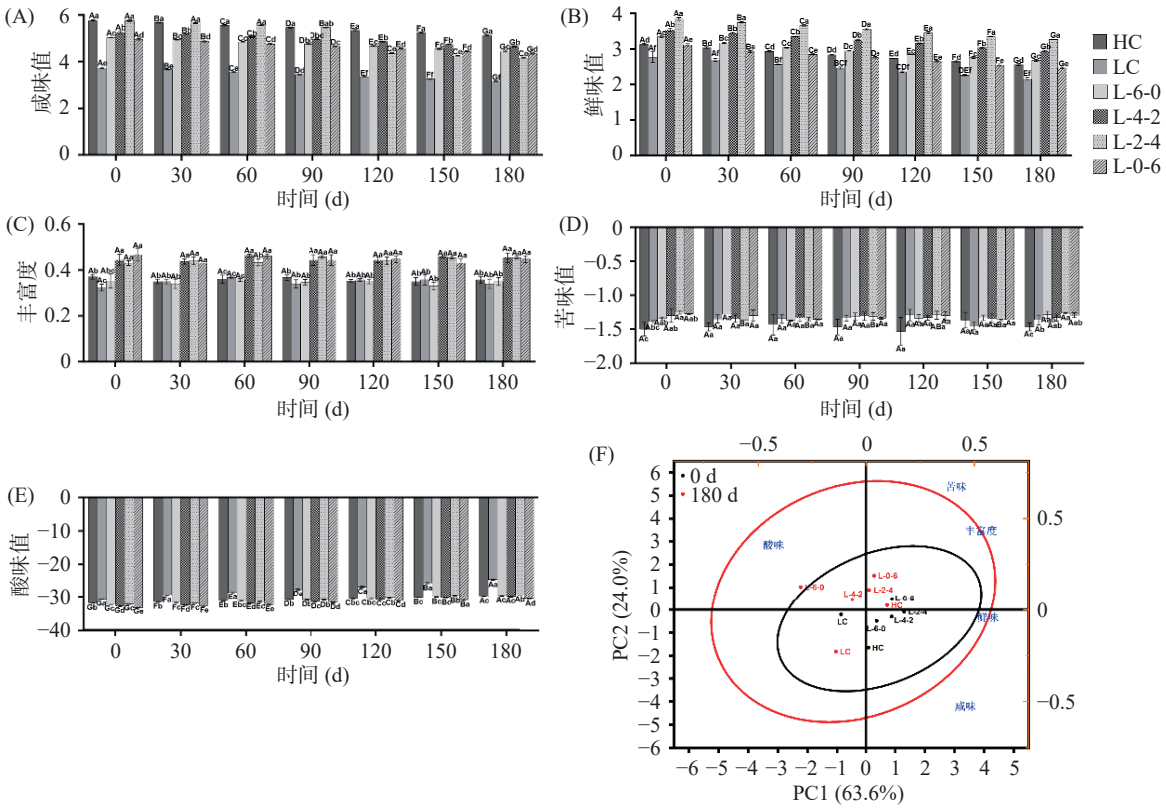


图 4　不同复配比例对鱼丸贮藏期间滋味的影响

Fig.4　Effects of different compounding ratios on the taste of fish balls during storage

注:(A)咸味值;(B)鲜味值;(C)丰富度;(D)苦味值;(E)酸味值;(F)主成分分析。

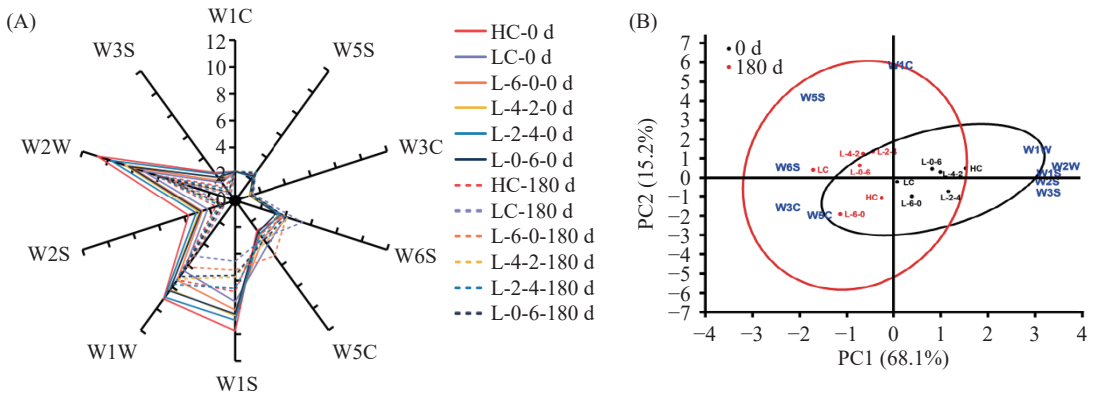


图 5　不同复配比例对鱼丸贮藏期间风味的影响

Fig.5　Effects of different compounding ratios on the flavor of fish balls during storage

68.1% 的特征信息,第 0 d 各处理组均分布在第一主成分正半轴,第 180 d 各处理组均分布在第一主成分负半轴,说明了贮藏时间对鱼丸的风味存在显著性影响(P<0.05)。同时在整个贮藏期间,添加了 OSAS/KCG 处理组与 HC 组距离较近,说明整体气味更为相似。

2.8　感官评价

感官评定是通过视觉、嗅觉、触觉、味觉和听觉而感知到的产品感官特性[28]。如表 4 所示,所有处理组鱼丸均在−18 ℃ 条件下贮藏 180 d,随着贮藏时间的延长,各处理组鱼丸样品的口感、风味和总体可接受性均有所下降。而咸味没有显著性差异(P>0.05),

表 4　不同复配比例对贮藏期间鱼丸感官评价的影响

Table 4　Effects of different compounding ratios on sensory evaluation of fish balls during storage

指标	组别	0 d	30 d	60 d	90 d	120 d	150 d	180 d
口感	HC	6.27 ± 0.21^{Aa}	6.00 ± 0.18^{Ba}	5.72 ± 0.19^{Ca}	5.49 ± 0.25^{CDa}	5.31 ± 0.31^{DEa}	5.08 ± 0.34^{Ea}	4.84 ± 0.33^{Fa}
	LC	5.19 ± 0.13^{Ae}	5.00 ± 0.19^{Be}	4.71 ± 0.25^{Cd}	4.38 ± 0.16^{Dd}	4.15 ± 0.18^{Ee}	3.95 ± 0.18^{Fd}	3.76 ± 0.17^{Gd}
	L-6-0	5.54 ± 0.20^{Ad}	5.32 ± 0.21^{Bd}	5.06 ± 0.18^{Cc}	4.85 ± 0.20^{Dc}	4.60 ± 0.16^{Ed}	4.43 ± 0.16^{Fc}	4.24 ± 0.13^{Gc}

续表 4

指标	组别	0 d	30 d	60 d	90 d	120 d	150 d	180 d
口感	L-4-2	5.73±0.15^{Ac}	5.49±0.12^{Bc}	5.28±0.15^{Cb}	5.04±0.14^{Db}	4.84±0.17^{Ec}	4.64±0.20^{Fb}	4.54±0.16^{Fb}
	L-2-4	6.03±0.12^{Ab}	5.79±0.14^{Bb}	5.60±0.18^{Ca}	5.42±0.15^{Da}	5.22±0.14^{Eab}	5.07±0.13^{Fa}	4.95±0.11^{Fa}
	L-0-6	5.73±0.16^{Ac}	5.54±0.16^{Bc}	5.37±0.18^{BCb}	5.20±0.21^{CDb}	5.06±0.22^{DEb}	4.93±0.22^{EFa}	4.78±0.18^{Fa}
咸味	HC	6.42±0.13^{Aa}	6.26±0.16^{Ba}	6.35±0.07^{ABa}	6.30±0.18^{ABa}	6.31±0.10^{ABa}	6.39±0.07^{Aa}	6.40±0.11^{Aa}
	LC	3.58±0.19^{Ae}	3.57±0.21^{Ae}	3.69±0.23^{Ae}	3.57±0.27^{Ae}	3.48±0.15^{Af}	3.64±0.27^{Ae}	3.58±0.28^{Ae}
	L-6-0	4.07±0.22^{ABd}	4.03±0.23^{ABd}	4.17±0.19^{Ad}	4.12±0.19^{ABd}	3.99±0.19^{ABe}	4.03±0.22^{ABd}	3.95±0.15^{Bd}
	L-4-2	5.02±0.19^{Ac}	4.93±0.19^{Ac}	5.04±0.21^{Ac}	5.10±0.16^{Ac}	5.00±0.19^{Ad}	5.03±0.16^{Ac}	5.00±0.19^{Ac}
	L-2-4	5.60±0.24^{Ab}	5.71±0.16^{Ab}	5.61±0.21^{Ab}	5.77±0.18^{Ab}	5.69±0.26^{Ab}	5.73±0.20^{Ab}	5.65±0.21^{Ab}
	L-0-6	5.63±0.19^{Ab}	5.62±0.20^{Ab}	5.52±0.14^{Ab}	5.63±0.16^{Ab}	5.52±0.14^{Ac}	5.64±0.24^{Ab}	5.60±0.12^{Ab}
风味	HC	6.76±0.13^{Aa}	6.62±0.10^{Ba}	6.46±0.08^{Ca}	6.34±0.10^{Da}	6.24±0.10^{Ea}	6.15±0.11^{Ea}	6.02±0.09^{Fa}
	LC	5.26±0.14^{Ae}	5.13±0.14^{Ae}	4.97±0.13^{Be}	4.83±0.17^{BCe}	4.71±0.19^{CDe}	4.59±0.18^{DEf}	4.47±0.21^{Ef}
	L-6-0	5.69±0.09^{Ad}	5.51±0.09^{Ad}	5.40±0.12^{Bd}	5.29±0.14^{BCd}	5.19±0.14^{CDd}	5.07±0.15^{DEe}	4.96±0.13^{Ee}
	L-4-2	6.05±0.11^{Ac}	5.89±0.13^{Bc}	5.78±0.11^{Cc}	5.65±0.08^{Dc}	5.54±0.05^{Ec}	5.42±0.09^{Ed}	5.33±0.08^{Fd}
	L-2-4	6.40±0.08^{Ab}	6.29±0.09^{Bb}	6.16±0.10^{Cb}	6.00±0.09^{Db}	5.89±0.11^{Eb}	5.77±0.14^{Eb}	5.67±0.13^{Fb}
	L-0-6	6.10±0.09^{Ac}	5.96±0.11^{Bc}	5.84±0.14^{Cc}	5.72±0.13^{Dc}	5.65±0.14^{DEc}	5.58±0.13^{EFc}	5.50±0.12^{Fc}
总体可接受性	HC	6.60±0.12^{Aa}	6.47±0.12^{Ba}	6.34±0.13^{Ca}	6.24±0.13^{CDa}	6.16±0.14^{DEa}	6.05±0.16^{EFa}	5.97±0.18^{Fa}
	LC	5.09±0.14^{Ae}	4.96±0.13^{ABe}	4.84±0.17^{BCe}	4.75±0.21^{CDe}	4.62±0.18^{DEf}	4.52±0.20^{EFf}	4.44±0.22^{Ff}
	L-6-0	5.44±0.07^{Ad}	5.30±0.09^{Bd}	5.19±0.13^{Cd}	5.09±0.12^{Dd}	4.99±0.12^{Ee}	4.88±0.11^{Fe}	4.79±0.12^{Fe}
	L-4-2	5.83±0.11^{Ac}	5.66±0.07^{Bc}	5.54±0.07^{Cc}	5.41±0.07^{Dc}	5.29±0.06^{Ed}	5.15±0.08^{Fd}	5.04±0.08^{Gd}
	L-2-4	6.30±0.16^{Ab}	6.12±0.13^{Bb}	6.01±0.12^{BCb}	5.89±0.12^{CDb}	5.77±0.15^{DEb}	5.70±0.14^{EFb}	5.64±0.14^{Fb}
	L-0-6	5.85±0.14^{Ac}	5.69±0.15^{Bc}	5.58±0.15^{BCc}	5.53±0.13^{CDc}	5.47±0.13^{CDEc}	5.41±0.15^{DEc}	5.34±0.14^{Ec}

这与电子舌的研究结果不同，这可能是由于鱼丸基质与人类唾液的相互作用对口腔行为和咸味感知产生了影响[41]。第 0 d 时，LC 组的感官品质显著低于 HC 组（P<0.05），且添加了 OSAS/KCG 的鱼丸相较于 LC 组其感官品质均有所提高，但略低于 HC 组。贮藏末期（180 d）时，添加了 OSAS/KCG的鱼丸总体可接受性评分较高。当 OSAS/KCG 复配比例为 2∶4 或单独添加 KCG 时，鱼丸的口感与 HC 组无显著差异（P>0.05），表明其可维持减盐鱼丸的感官品质。其中，复配比例为 2∶4 时，鱼丸的总体可接受性最接近正常对照组。

3　结论

研究不同配比的 OSAS/KCG 对减盐鱼丸贮藏期间品质特性的影响。结果表明，相较 HC 组，LC 组颜色较暗、持水力较差，质地较软，腐败更快且脂肪氧化程度更高。而添加了 OSAS/KCG 的减盐鱼丸表现出更高的白度、持水力、质构特性，更低的 TVB-N 值与 TBARS 值，延长其保质期。此外，随着贮藏时间的延长，鱼丸的酸味逐渐增强，而咸味和鲜味则逐渐减弱。与 LC 组相比，添加了 OSAS/KCG 的减盐鱼丸风味特征与 HC 组无显著性差异。总而言之，当 OSAS/KCG 以 2∶4 的比例复配时，能够较好地提高减盐鱼丸在贮藏期间的白度、持水性、质构特性及感官品质。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 雍金叶, 邹钰萱, 朱雨博, 等. 膳食纤维在鱼糜食品中的应用研究进展[J]. 中国调味品, 2025, 50(1): 227−232. [YONG Jinye, ZOU Yuxuan, ZHU Yubo, et al. Research progress on application of dietary fiber in surimi food[J]. China Condiment, 2025, 50(1): 227−232.]

[2] 黄诗钰, 施文正, 王锡昌, 等. NaCl 对水产制品品质的影响及减盐调控技术研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(11): 260−268. [HUANG Shiyu, SHI Wenzheng, WANG Xichang, et al. Effect of NaCl on the quality of aquatic products and research progress on salt reduction technologies[J]. Food Science, 2023, 44(11): 260−268.]

[3] YANG Siqi, ZHENG Baodong, HUANG Luyao, et al. Saltiness perception mechanism and salt reduction strategies in food[J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 148: 104521.

[4] FARQUHAR W B, EDWARDS D G, JURKOVITZ C T, et al. Dietary sodium and health: More than just blood pressure[J]. Journal of the American College of Cardiology, 2015, 65(10): 1042−1050.

[5] WANG Ji, HUANG Xuhui, ZHANG Yuying, et al. Effect of sodium salt on meat products and reduction sodium strategies: A review[J]. Meat Science, 2023, 205: 109296.

[6] 陕怡萌, 蒲丹丹, 张玉玉, 等. 食品减盐方法研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(13): 267−275. [SHAN Yimeng, PU Dandan, ZHANG Yuyu, et al. A review of methods for salt reduction in foods[J]. Food Science, 2022, 43(13): 267−275.]

[7] VINITHA K, SETHUPATHY P, MOSES J A, et al. Conventional and emerging approaches for reducing dietary intake of salt[J]. Food Research International, 2022, 152: 110933.

[8] KOCARNIK J M, COMPTON K, DEAN F, et al. The global burden of 29 cancer groups from 2010 to 2019: A systematic analysis for the Global Burden of Disease study 2019[J]. Journal of Clinical Oncology, 2021, 39(15_suppl): 10577.

[9] 谢航涛, 杨玥, 罗永康, 等. KCl 复配 5'-肌苷酸二钠替代钠盐对鱼糜凝胶特性的影响[J]. 肉类研究, 2022, 36(1): 14−19. [XIE Hangtao, YANG Yue, LUO Yongkang, et al. Effects of substitution of KCl combined with inosine-5' monophosphate disodium salt for

sodium salt on gel properties of surimi[J]. Meat Research, 2022, 36(1): 14−19.]

[10] VILAR E G, OUYANG Hao, O'SULLIVAN M G, et al. Effect of salt reduction and inclusion of 1% edible seaweeds on the chemical, sensory and volatile component profile of reformulated frankfurters[J]. Meat Science, 2020, 161: 108001.

[11] YI C, TSAI M L, LIU T. Spray-dried chitosan/acid/NaCl microparticles enhance saltiness perception[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 172: 246−254.

[12] 汪雪娇. 微波处理对鱼肉制品咸度感知的增强作用与减盐鱼糜的加工适应性[D]. 无锡: 江南大学, 2021. [WANG Xuejiao. Saltiness perception enhancement of fish products by microwave treatment and processing adaptability in salt-reduced surimi[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.]

[13] 张彦慧, 郑红霞, 刘楠, 等. 胶体结构设计在减盐食品中的应用[J]. 食品科学, 2022, 43(1): 213−222. [ZHANG Yanhui, ZHENG Hongxia, LIU Nan, et al. Design of colloidal structures for salt-reduced foods[J]. Food Science, 2022, 43(1): 213−222.]

[14] SHI Liu, YIN Tao, HUANG Qilin, et al. Effects of filleting methods on composition, gelling properties and aroma profile of grass carp surimi[J]. Food Science and Human Wellness, 2021, 10(3): 308−315.

[15] LAN Haijing, CHEN Lei, WANG Yitong, et al. Effect of κ-carrageenan on saltiness perception and texture characteristic related to salt release in low-salt surimi[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 253(Pt 7): 126852.

[16] WANG Xuejiao, FENG Tingting, XIA Shuqin. Saltiness perception related to salt release of surimi emulsified sausages: Modulation in texture and microstructure by polysaccharides[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2021, 56(8): 3893−3902.

[17] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.228-2016 食品中挥发性盐基氮的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission, People's Republic of China. GB 5009.228-2016 Determination of volatile basic nitrogen in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]

[18] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.181-2016 食品中丙二醛的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission, People's Republic of China. GB 5009.181-2016 Determination of malondialdehyde in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]

[19] 胡越, 刘昊天, 夏秀芳, 等. 直接减盐法对哈尔滨红肠贮藏期间品质的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(7): 184−191. [HU Yue, LIU Haotian, XIA Xiufang, et al. Effect of direct salt reduction on the quality characteristics of Harbin red sausages during storage[J]. Food Science, 2023, 44(7): 184−191.]

[20] FENG Lifang, JIANG Tianjia, WANG Yanbo, et al. Effects of tea polyphenol coating combined with ozone water washing on the storage quality of black sea bream (*Sparus macrocephalus*)[J]. Food Chemistry, 2012, 135(4): 2915−2921.

[21] ZHAO Yadong, WEI Ganping, LI Jiajia, et al. Comparative study on the effect of different salts on surimi gelation and gel properties[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 144: 108982.

[22] SHI Haibo, ZHANG Mengxin, LIU Xiaochen, et al. Improved qualities of salt-reduced tilapia surimi by adding konjac glucomannan: Insight into the edible traits, gel properties and anti-freezing ability[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 153: 109971.

[23] HE Ni, CHEN Xinran, LI Lin, et al. κ-Carrageenan masking bitterness perception in surimi gels containing potassium chloride-based salt substitutes: Gel properties, oral processing, and sensory evaluation[J]. Food Chemistry, 2024, 456: 139859.

[24] LING Liang, LIU Ying, ZHANG Xin, et al. Effect of *Flammulina velutipes* polysaccharides on the physicochemical properties of catfish surimi and myofibrillar protein oxidation during frozen storage[J]. Frontiers in Nutrition, 2023, 10: 1268580.

[25] 马文慧, 韩馨蕊, 李晓云, 等. L-精氨酸与谷氨酰胺转氨酶复配对反复冻融猪肉制作香肠品质的影响[J]. 肉类研究, 2024, 38(8): 8−15. [MA Wenhui, HAN Xinrui, LI Xiaoyun, et al. Effects of L-arginine and transglutaminase in combination on the quality of sausage made from repeatedly frozen-thawed pork[J]. Meat Research, 2024, 38(8): 8−15.]

[26] LIU Yueyue, ZHANG Longteng, GAO Song, et al. Effect of protein oxidation in meat and exudates on the water holding capacity in bighead carp (*Hypophthalmichthys nobilis*) subjected to frozen storage[J]. Food Chemistry, 2022, 370: 131079.

[27] JIA R, JIANG Q Q, KANDA M, et al. Effects of heating processes on changes in ice crystal formation, water holding capacity, and physical properties of surimi gels during frozen storage[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 90: 254−265.

[28] 崔天琦, 杜宏, 吕欣然, 等. 植物乳杆菌 JY-22 细菌素粗提物在鲢鱼鱼丸保鲜中的应用[J]. 食品科学, 2019, 40(21): 229−235. [CUI Tianqi, DU Hong, LÜ Xinran, et al. Application of crude bacteriocin of *Lactobacillus plantarum* JY-22 in preservation of silver carp meatballs[J]. Food Science, 2019, 40(21): 229−235.]

[29] ROS-POLSKI V, KOUTCHMA T, XUE J, et al. Effects of high hydrostatic pressure processing parameters and NaCl concentration on the physical properties, texture and quality of white chicken meat[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2015, 30: 31−42.

[30] 尚梦珊. OSA 淀粉基团取代规律及调控研究[D]. 无锡: 江南大学, 2023. [SHANG Mengshan. Study on the substitution rule and regulation of OSA starch substituent[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023.]

[31] DU Mengjia, LU Wei, ZHANG Yin, et al. Natural polymer-sourced interpenetrating network hydrogels: Fabrication, properties, mechanism and food applications[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 116: 342−356.

[32] WASINNITIWONG N, BENJAKUL S, HONG Hui. Effects of κ-carrageenan on gel quality of threadfin bream (*Nemipterus* spp.) surimi containing salted duck egg white powder[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 221: 61−70.

[33] BEKHIT A E A, HOLMAN B W B, GITERU S G, et al. Total volatile basic nitrogen (TVB-N) and its role in meat spoilage: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 109: 280−302.

[34] 中华人民共和国农业部. 绿色食品 鱼糜制品: NY/T 1327-2007[S]. 北京: 中国农业出版社, 2007. [Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Green food-Surimilducts: NY/T 1327-2007[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2007.]

[35] ABUBAKER M A, ZHANG D D, LIU G X, et al. Polysaccharides as natural enhancers for meat quality, preservation, and pro-

tein functionality: A comprehensive review[J]. Food Chemistry, 2025, 468: 142428.
[36] 徐梅. 低盐香肠贮藏特性及天然保鲜技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019. [XU Mei. Research on storage characteristics and natural preservation technology of low-salt sausage[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019.]
[37] 贾娜, 陈璐, 孔保华. 迷迭香提取物对牛肉丸冻藏过程中脂肪氧化和品质特性的影响[J]. 现代食品科技, 2015, 31(9): 117−123. [JIA Na, CHEN Lu, KONG Baohua. Effect of rosemary extract on lipid oxidation and quality of beef meat balls during frozen storage[J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 31(9): 117−123.]
[38] 陈佳新, 陈倩, 孔保华. 食盐添加量对哈尔滨风干肠理化特性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(12): 85−92. [CHEN Jiaxin, CHEN Qian, KONG Baohua. Effect of reducing NaCl content on physicochemical characteristics of Harbin dry sausages[J]. Food Science, 2018, 39(12): 85−92.]
[39] 冯廷闯, 符漫, 熊英梅, 等. 基于电子舌、电子鼻和 GC-MS 分析襄阳大头菜新、老卤水滋味和挥发性物质[J]. 中国酿造, 2021, 40(11): 49−54. [FENG Tingchuang, FU Man, XIONG Yingmei, et al. Analysis of taste and volatile compounds in new and old brine of Xiangyang mustard root based on electronic tongue, electronic nose and GC-MS[J]. China Brewing, 2021, 40(11): 49−54.]
[40] WU Dan, XIONG Jian, LI Pei, et al. Dual enhancement effects of different yeast extract on gel properties and saltiness perception of low-salt surimi gel from silver carp[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 152: 109925.
[41] HEBISHY E, DU H, BRITO-OLIVEIRA T C, et al. Saltiness perception in gel-based food systems (gels and emulsion-filled gels)[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2025, 65(3): 457−474.