

水分含量对冻结金线鱼肉香肠品质的影响

张诗雯¹, 仪淑敏^{1,*}, 吕柯明¹, 李学鹏¹, 李远钊², 丁浩宸³, 徐永霞¹, 米红波¹, 朱文慧¹, 励建荣^{1,*}

(1.渤海大学食品科学与工程学院, 生鲜农产品贮藏加工及安全控制技术国家地方联合工程研究中心, 国家鱼糜及鱼糜制品加工技术研发分中心, 辽宁 锦州 121013; 2.烟台富美特信息科技股份有限公司, 山东 烟台 264000; 3.辽宁安井食品有限公司, 辽宁 鞍山 114100)

摘要:为考察水分含量对冻结金线鱼肉香肠品质影响, 将水分质量分数分别为76%、78%、80%、82%、84%的金线鱼肉香肠在-20℃条件下冻结, 并以4℃冷藏样品为对照组, 以冻结曲线、解冻损失、持水性、水分分布及存在状态、质构特性、微观结构、感官评价作为评定指标。结果显示: 在-20℃冻结条件下, 随着金线鱼肉香肠水分含量的增加, 冻结点升高, 解冻损失增大。鱼肉香肠的持水性、质构特性及感官评价均随着水分含量的增加而下降, 不易流动水转变为自由水, 凝胶网络结构对水分的束缚能力减弱, 微观结构松散多孔, 且-20℃冻结的金线鱼肉香肠各指标低于4℃冷藏组。表明降低冻结金线鱼肉香肠的水分含量可提高鱼肠的品质。

关键词:水分含量; 冻结; 金线鱼肉香肠; 品质

Effect of Moisture Content on Quality of Frozen *Nemipterus virgatus* Sausages

ZHANG Shiwen¹, YI Shumin^{1,*}, LÜ Keming¹, LI Xuepeng¹, LI Yuanzhao², DING Haochen³,
XU Yongxia¹, MI Hongbo¹, ZHU Wenhui¹, LI Jianrong^{1,*}

(1. National & Local Joint Engineering Research Center of Storage, Processing and Safety Control Technology for Fresh Agricultural and Aquatic Products, National R & D Branch Center of Surimi and Surimi Products Processing, College of Food Science and Technology, Bohai University, Jinzhou 121013, China; 2. Yantai Foodmate Information Technology Co. Ltd., Yantai 264000, China; 3. Liaoning Anjoy Food Co. Ltd., Anshan 114100, China)

Abstract: In order to investigate the effect of moisture content on the quality of frozen *Nemipterus virgatus* sausages, the fish sausages with moisture contents of 76%, 78%, 80%, 82% and 84% were frozen at -20℃ and then thawed at 4℃, while their counterparts maintained at 4℃ served as control. The freezing curve, thawing drip loss, water-holding capacity, moisture distribution and state, texture, microstructure and sensory evaluation were measured. The results showed that the freezing point and thawing drip loss increased with increasing moisture content of sausages, while the opposite was true for the water-holding capacity, texture and sensory evaluation. The immobilized water was transformed into free water. The gel microstructure became more loose and the ability to bind moisture was weakened. The quality indices of *N. virgatus* sausages frozen at -20℃ were lower than those of the controls. In summary, the quality of frozen *N. virgatus* sausages can be improved by reducing the moisture content.

Keywords: moisture content; freezing; *Nemipterus virgatus* sausages; quality

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190122-266

中图分类号: TS254.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2019)24-0021-06

引文格式:

张诗雯, 仪淑敏, 吕柯明, 等. 水分含量对冻结金线鱼肉香肠品质的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(24): 21-26.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190122-266. <http://www.spkx.net.cn>

收稿日期: 2019-01-22

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31571868); 辽宁省自然科学基金项目(辽科发(2018)25号);

辽宁省教育厅高水平创新团队(境)外培养项目(辽教函(2018)225号);

中央引导地方科技发展专项(2018107005)

第一作者简介: 张诗雯(1993—)(ORCID: 0000-0003-2016-163X), 女, 硕士, 研究方向为水产品贮藏加工。

E-mail: 15542846796@163.com

*通信作者简介: 仪淑敏(1980—)(ORCID: 0000-0002-7934-1355), 女, 教授, 博士, 研究方向为水产品贮藏加工及质量安全。E-mail: yishumin@163.com

ZHANG Shiwen, YI Shumin, LÜ Keming, et al. Effect of moisture content on quality of frozen *Nemipterus virgatus* sausages[J]. Food Science, 2019, 40(24): 21-26. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190122-266.
http://www.spkx.net.cn

金线鱼 (*Nemipterus virgatus*) 又称红衫、红哥鲤, 隶属于鲈形目金线鱼科, 体侧有多条明显黄色纵带, 肉质细嫩、营养丰富、价格低廉, 广泛分布在印度-西太平洋亚热带、热带海区, 是海产经济鱼类之一, 同时也是常见冷冻鱼糜及鱼糜制品的原料^[1-3]。据统计, 2017年金线鱼捕捞产量为37.46万 t, 与2009年相比增长了22.22%, 呈现持续增长趋势, 可为鱼糜制品提供充足稳定的原料^[4]。

鱼糜制品是以鱼糜为主要原料, 添加辅料调味、经斩拌、热凝胶化、成型等工艺制成的水产食品, 其种类多样, 例如鱼肠、鱼丸、鱼糕、模拟蟹棒等^[5]。鱼糜制品自2009年以来, 生产量增加了81.85%, 2017年占水产加工品总产量的7.02%, 是我国水产品加工中增长最快的产品之一^[4]。消费者不但对鱼糜制品的需求量在不断上升, 而且对其品质要求也不断提高^[5]。

鱼糜制品由于水分和蛋白质含量高, 导致易腐败变质^[6]。冻结可抑制微生物的生长繁殖, 生物化学反应速度减慢, 极大程度上延缓食品的腐败, 但冻结同时也会破坏食品的组织结构, 解冻后汁液流失严重, 不能保持食品的原有外观, 品质明显下降^[7]。其中水分含量是食品冻结过程中影响食品品质的重要因素, 冷冻产品的最终质量取决于水转化为冰的相变或结晶过程^[8-9]。

曹立伟等^[10]研究了变性淀粉对鲢鱼糜冻结速率及凝胶特性的影响; 岳开华等^[11]研究了冻藏温度和冻藏时间对海鲈鱼鱼糜的流变特性和凝胶结构的影响; Nui Liqiong等^[12]研究了乳化鱼油对冻藏期间狭鳕鱼糜热凝胶持水性和冰结晶形成的影响; Hunt等^[13]进行了碳酸氢钠对不同冷冻速率下制备的阿拉斯加鳕鱼鱼糜凝胶性能的比较研究; Jia Ru等^[14]对低糊化温度的甘薯淀粉提高鱼糜冷冻后凝胶质量进行了研究。但研究主要集中在冻藏方式或时间对生鲜产品或冷冻鱼糜品质的影响, 在水分含量及鱼糜制品方面的研究较少。鱼糜制品水分含量高, 且冻结过程的实质是水结成冰, 对食品品质有重要影响。同时水分作为鱼糜凝胶中的主要成分, 不仅在降低成本、提高产品收率方面起着重要的作用, 而且对产品质构特性也有着重要的作用^[15]。为探究水分对冻结鱼糜制品品质影响, 以金线鱼糜为原料制备不同水分含量的金线鱼肉香肠, -20℃冻结, 观察其冻结特性及品质变化, 旨在为实际的加工生产提供参考, 平衡成本与品质的关系。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

金线鱼糜 青岛新锦昀国际贸易有限公司; 食盐 市购。

磷酸氢二钠 天津市天力化学试剂有限公司; 磷酸二氢钠 天津市致远化学试剂有限公司; 无水乙醇 天津市风船化学试剂科技有限公司; 戊二醛 天津市福晨化学试剂厂。以上试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

UMC5真空斩拌机 德国Stephan公司; YSN立式灌肠机 广州优连食品加工机械有限公司; i100-E8T温度记录仪 苏州闽泰瑞泽电子科技有限公司; 全能台式高速冷冻离心机 美国Thermo Fisher Scientific公司; NMI20核磁共振成像仪 上海纽约电子科技有限公司; TA-XT-Plus质构仪 英国Stable Micro Systems公司; S4800场发射扫描电镜 日本Minolta公司。

1.3 方法

1.3.1 鱼肉香肠的制备

将冷冻的金线鱼糜静水解冻, 切块后放入真空斩拌机斩拌2 min, 加盐斩拌2 min, 调节水分并真空斩拌3 min, 取出物料灌肠(直径约3 cm, 长度约6 cm)。控制斩拌过程中物料低于10℃, 水分质量分数分别调节至76%、78%、80%、82%、84%。

将灌好的鱼肉香肠在40℃水浴锅中加热30 min凝胶化, 随后在90℃水浴锅中加热20 min熟化, 最后取出鱼肉香肠在冰水混合物中快速冷却, 放入4℃冰箱过夜备用。将不同水分含量的金线鱼肉香肠在-20℃冰箱冻结后4℃解冻, 测定各指标。

1.3.2 冻结曲线测定

参考Bainy等^[16]的方法略有修改。将温度记录仪的探头分别插入金线鱼肉香肠的几何中心处, 均匀放置于-20℃冰箱中进行冻结, 待中心温度达到-18℃完成冻结。温度记录仪每1 min记录一次温度, 根据温度变化绘制冻结曲线, 确定冻结点。

1.3.3 解冻损失测定

参考Xia Xiufang等^[17]的方法。称取金线鱼肉香肠冻结前的质量为 m_1 , 称取解冻后的质量为 m_2 , 每组3个平行, 解冻损失按式(1)计算:

$$\text{解冻损失}/\% = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (1)$$

1.3.4 持水性测定

参考Cao Hongwei等^[15]的方法略有修改。将金线鱼

肉香肠切成5 mm薄片 (1.00 ± 0.02) g, 准确称取质量 G_1 , 包裹在3层滤纸中, 放入50 mL离心管。离心参数: 4 °C, 5 000×g, 20 min。离心后立即取出称取质量 G_2 , 每组3个平行, 持水性按式(2)计算:

$$\text{持水性}/\% = \frac{G_2}{G_1} \times 100 \quad (2)$$

1.3.5 水分分布及存在状态测定

参考Ma Xingsheng等^[18]的方法。将金线鱼肉香肠放至室温, 取直径10 mm、高20 mm的圆柱体样品分别放入核磁管中, 用Carr-Purcell-Meiboom-Gill (CPMG) 脉冲序列进行横向弛豫时间 T_2 的测定。测定参数: 90 度脉冲宽度为14 μs, 频率为22 MHz, 接收谱宽为100 kHz, 采样重复时间为2 000 ms, 重复扫描次数为8, 半回波时间为150 μs, 回波个数为4 000, 每组3个平行。

1.3.6 质构特性测定

参考Pita-Calvo等^[19]的方法略有修改。将金线鱼肉香肠放至室温, 切成高2 cm的圆柱体。采用TA-XT-Plus质构仪进行质构特性分析。测定参数: 探头型号P/50, 测前、测试、测后速率均为1 mm/s, 压缩比为40%, 触发力5 g, 每组6个平行。

1.3.7 微观结构测定

参考王嵬等^[20]的方法略有修改。将金线鱼肉香肠切成3 mm×3 mm×2 mm薄片, 用2.5%戊二醛溶液(含50%、pH 7.2的磷酸盐缓冲溶液)固定24 h, 然后用磷酸盐缓冲溶液漂洗样品3次, 每次15 min, 去离子水漂洗1 h去除固定液, 分别用体积分数50%、70%、90%的乙醇溶液梯度脱水各1次, 每次15 min, 无水乙醇脱水3次, 每次10 min, 自然干燥后进行离子溅射镀金并在扫描电镜下观察。

1.3.8 感官评价

由10人组成感官评价小组, 进行基础培训, 按照感官评价标准对金线鱼肉香肠的色泽、质地、滋味、汁液流失方面进行打分(表1), 最终评分以总分计。

表1 感官评价标准

项目	1~5分	6~10分	11~15分
色泽	表面灰暗, 无光泽	白色, 略有光泽	白色, 光泽度高
质地	无弹性、多孔、质地不均匀	略有弹性、孔隙较小、质地均匀	有弹性、基本无孔隙、质地均匀
滋味	鱼腥味重	略有鱼腥味	有鱼肉香气
汁液流失	静置有汁液流出	挤压有汁液流出	挤压基本无汁液流出

1.4 数据统计分析

采用Flash Link软件对温度数据进行采集; 采用SPSS软件对数据进行显著性分析, $P < 0.05$, 差异显著; 采用Origin 8.5软件绘图。

2 结果与分析

2.1 水分含量对金线鱼肉香肠冻结曲线的影响

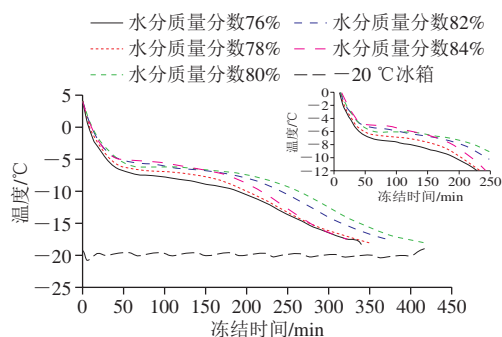
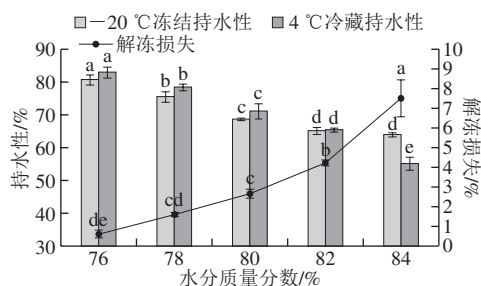


图1 不同水分含量金线鱼肉香肠的冻结曲线变化

Fig. 1 Freezing curves of *N. virgatus* sausages with different moisture contents

冻结过程中时间-温度变化的函数曲线称为冻结曲线, 食品中的水初始结晶时的温度称为冻结点, 纯水冻结点为0 °C, 食品中的水相当于溶有溶质的稀溶液, 所以冻结点低于纯水^[21-22]。食品的冻结点与食品中的水分存在状态及含量有密切关系, 冻结点与水分含量呈正相关^[22]。由图1可知, 随着金线鱼肉香肠水分含量的增加, 冻结点显著升高 ($P < 0.05$), 76%~84%水分质量分数的金线鱼肉香肠的冻结点依次为 (-7.10 ± 0.10)、(-6.77 ± 0.06)、(-5.87 ± 0.06)、(-5.40 ± 0.28)、(-4.85 ± 0.07) °C, 与陈日春等^[23]研究一致。

2.2 水分含量对金线鱼肉香肠解冻损失和持水性的影响



同一指标字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

图2 不同水分质量分数金线鱼肉香肠的解冻损失和持水性变化

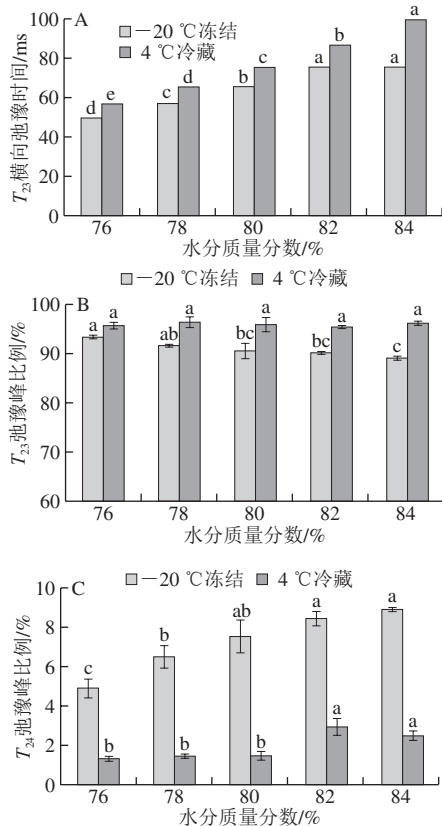
Fig. 2 Changes in thawing drip loss and water-holding capacity of *N. virgatus* sausages with different moisture contents

解冻损失是解冻后样品的水分损失与冷冻样品的初始质量之比, 通常解冻损失越低表明样品品质越好^[24-25]。由图2可知, 随着金线鱼肉香肠水分含量的增加, 解冻损失显著增大 ($P < 0.05$), 且解冻损失的增大幅度分别为1.00%、1.04%、1.57%、3.30%, 呈现迅速增长趋势, 表明凝胶网络结构的破坏程度增加, 品质下降。水分含量越高, 冻结过程中凝胶网络结构间隙形成的冰晶越大,

对组织的机械性损伤越严重,解冻后水分不能恢复到结合状态,自然流出,导致解冻损失增大^[26-27]。

持水性表明凝胶能够以一种外力或引力的物理方式包住大量的水分,抑制水分渗出,反映鱼糜凝胶中蛋白与水的结合情况^[12,18,24]。由图2可知,随着金线鱼肉香肠水分含量的增加,样品的持水性均显著下降($P<0.05$),说明水分含量过高时,由于蛋白与水的结合能力有限,凝胶网络结构对水分的束缚能力有限,使得结合不紧密的水分容易流失,且冻结使食品中的蛋白质发生不可逆变化,导致持水性下降^[27]。并且蛋白质含量的不同也可能是导致持水性变化的原因。持水性结果与解冻损失的结果呈相反趋势。水分质量分数在76%~82%范围内冻结组样品的持水性均低于冷藏组,说明冻结会使凝胶网络结构破坏,降低样品持水性。

2.3 水分含量对金线鱼肉香肠水分分布的影响



A. T_{23} 横向弛豫时间; B. T_{23} 弛豫峰比例; C. T_{24} 弛豫峰比例。

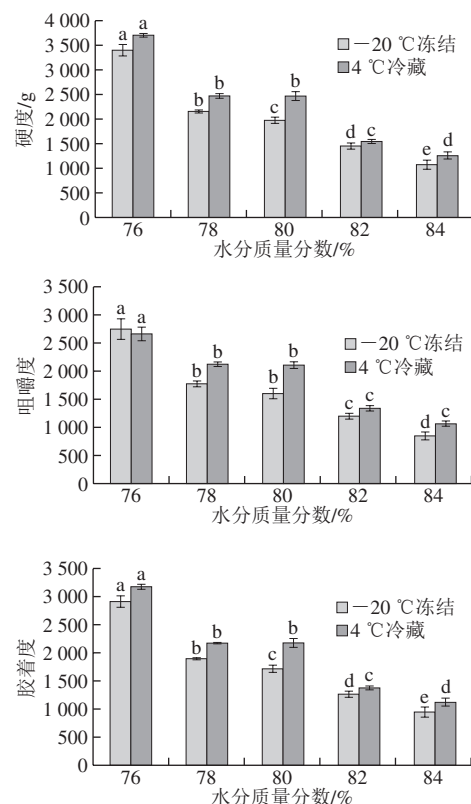
图3 不同水分质量分数金线鱼肠的水分分布及存在状态变化

Fig. 3 Changes in moisture distribution in *N. virgatus* sausages with different moisture contents

T_2 的弛豫特性反映鱼糜凝胶中的水分分布状态,其中 T_{23} 表示束缚在凝胶网络结构中的不易流动水,是鱼糜凝胶的主要水分,约占90%, T_{24} 表示网络结构外的自由水,与 T_{23} 共同反映凝胶的持水性,因此是主要的分析指标^[18,20]。横向弛豫时间反映底物与水分结合的紧密程度,横向弛豫时间越短,结合越紧密,水分越稳定。由

图3A可知,随着金线鱼肉香肠水分含量的增加,样品的 T_{23} 横向弛豫时间显著增加($P<0.05$),说明底物与水的结合能力下降,凝胶网络结构对不易流动水的束缚能力减弱,水分易流失。峰比例反映各状态水分占总水分的比例,可根据峰比例的变化分析水分的流动情况^[28-29]。由图3B可知,随着金线鱼肉香肠水分含量的增加,冻结组的 T_{23} 峰比例显著降低($P<0.05$),说明不易流动水显著减少;冷藏组的 T_{23} 峰比例略有下降,但无显著变化($P>0.05$),说明不易流动水的流动性小;冻结组的峰比例均低于冷藏组,说明不易流动水的含量少。由图3C可知,随着金线鱼肉香肠水分含量的增加,样品的 T_{24} 峰比例显著升高($P<0.05$),说明自由水含量增加;冻结组的 T_{24} 峰比例升高幅度大,冷藏组的升高幅度小,与不易流动水的变化相对应;冻结组的 T_{24} 峰比例均远高于冷藏组,说明冻结组的自由水含量高于冷藏组。对于样品的水分分布及状态,冻结组在冻结过程中由于水分含量的增加导致冰晶的体积增大,对凝胶网络结构破坏更加严重,使大量不易流动水向自由水方向移动,同时食品冻结过程中食品组织间隙先形成冰晶,由于渗透压差和浓度差的存在,组织内的水分向组织间转移,使冰晶生长,从而大量结合水向自由水方向移动^[27]。水分迁移是冻结食品的重要物理变化^[21]。冷藏组由于凝胶网络结构的束缚能力有限,随着水分含量的增加,不易流动水的稳定性下降,使少数不易流动水向自由水方向移动。

2.4 水分含量对金线鱼肉香肠质构特性的影响



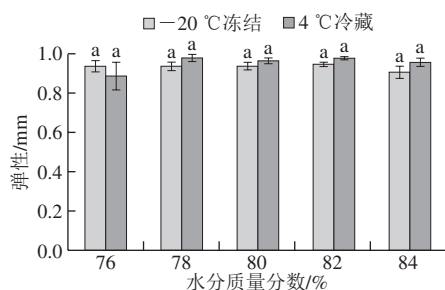
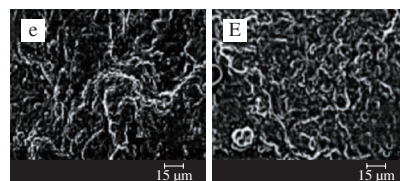
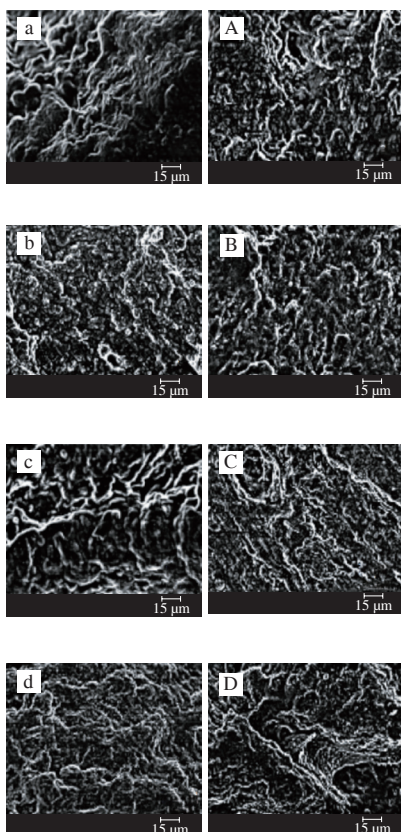


图4 不同水分质量分数金线鱼肠的质构变化

Fig. 4 Changes in texture of *N. virgatus* sausages with different moisture contents

质构分析是评价鱼糜凝胶品质的常用指标之一^[30]。由图4可知,随着金线鱼肉香肠水分含量的增加,样品的硬度、咀嚼度以及胶着度均显著下降($P < 0.05$),且冻结组基本低于冷藏组,说明水分过多时,网络结构无法束缚住水分,多余的水分会流失。冻结过程中水形成冰晶,会造成凝胶网络组织的机械损伤,导致品质下降。同时随着水分含量的增加,冻结时体积膨胀越严重,产生冻结膨胀压,以破裂的形式释放,产生的龟裂现象越明显,对质构破坏越严重。随着水分含量的增加,样品的弹性均无显著变化($P > 0.05$),冻结组基本低于冷藏组,说明冻结会破坏结构导致弹性下降,但水分含量对弹性并无显著性影响。

2.5 水分含量对金线鱼肉香肠微观结构的影响



a~e.水分质量分数分别为76%、78%、80%、82%、84%冻结金线鱼肠; A~E.水分质量分数分别为76%、78%、80%、82%、84% 4 °C冷藏金线鱼肠。

图5 不同水分含量金线鱼肠的微观结构变化(×8 000)

Fig. 5 Changes in microstructure in *N. virgatus* sausages with different moisture contents (×8 000)

由图5可知,随着金线鱼肉香肠水分含量的增加,凝胶网络结构更加松散,有较多孔洞,不能平整有序交联,且冻结组的孔洞更多更大,凝胶网络明显出现断裂,这是由于冻结时冰晶对结构造成破坏,解冻后的固态水转变为液态水,凝胶结构不能再截留所有的水,残留的融化水以解冻损失的形式流出,冰晶融化后在鱼糜凝胶结构中留下了空洞^[14]。在冻结食品的组织外通常形成较大的冰晶,会破坏食品的微观结构,导致解冻后解冻损失增加、持水力降低以及质构下降等现象^[8]。

2.6 水分含量对金线鱼肉香肠感官评价的影响

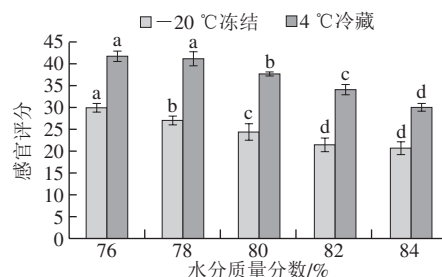


图6 不同水分质量分数金线鱼肠的感官评分变化

Fig. 6 Changes in sensory evaluation in *N. virgatus* sausages with different moisture contents

感官评价可直观反映消费者对产品的喜好度,反映产品的品质^[31]。由图6可知,随着金线鱼肉香肠水分含量的增加,样品的感官评分显著下降($P < 0.05$),且冻结组均低于冷藏组,说明含水量过高对鱼糜凝胶的色泽、质构、滋味及汁液流失有不利影响,使消费者的评分降低,且冻结对鱼糜凝胶的结构造成破坏后导致感官评分更低,难以满足消费者要求。冻结食品因冰层升华而失去水分,会对食品的感官特性产生不利影响,包括产品的外观等^[21]。

3 结论

在-20 °C冻结条件下,随着水分含量的增加,金线鱼肉香肠的冻结点升高及解冻损失升高。持水性、质地

特性及感官评价均下降, 不易流动水转变为自由水, 凝胶网络结构对水分的束缚能力减弱, 微观结构松散多孔, 且-20℃冻结的金线鱼肉香肠各指标低于4℃冷藏组。降低冻结金线鱼肉香肠的水分含量可提高鱼肠的品质。

参考文献:

- [1] 梁日深, 陈冬青, 苏国茂, 等. 基于COI及RAG2基因序列15种金线鱼科鱼类分子系统进化关系[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2017, 47(8): 74-81. DOI:10.16441/j.cnki.hdx.20160407.
- [2] 王金路, 王雪琦, 仪淑敏, 等. 金线鱼鱼丸冷藏过程中品质变化规律研究[J]. 水产科学, 2015, 34(1): 14-19. DOI:10.16378/j.cnki.1003-1111.2015.01.003.
- [3] WU Z, LI X. Complete mitochondrial genome of the *Nemipterus virgatus* (Perciformes: Nemipteridae)[J]. Mitochondrial DNA Part A: DNA Mapping, Sequencing and Analysis, 2016, 27(5): 3485-3486. DOI:10.3109/19401736.2015.1066360.
- [4] 农业部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴2011-2018[M]. 北京: 中国农业出版社.
- [5] 顾晓慧, 殷邦忠, 王联珠, 等. 我国冷冻鱼糜生产及标准现状分析[J]. 食品科学, 2014, 35(23): 303-307. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201423059.
- [6] 王当丰, 李婷婷, 国竞文, 等. 茶多酚-溶菌酶复合保鲜剂对白鲢鱼丸保鲜效果[J]. 食品科学, 2017, 38(7): 224-229. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20170707036.
- [7] SUN D W. Quality and safety of frozen foods, in handbook of frozen food processing and packaging[M]. 2nd ed. New York: CRC Press, 2006: 303-456.
- [8] LI D, ZHU Z, SUN D W. Effects of freezing on cell structure of fresh cellular food materials: a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 75: 46-55. DOI:10.1016/j.tifs.2018.02.019.
- [9] XANTHAKIS E, LE-BAIL A, RAMASWAMY H. Development of an innovative microwave assisted food freezing process[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2014, 26: 176-181. DOI:10.1016/j.ifset.2014.04.003.
- [10] 曹立伟, 熊善柏, 李莎莎, 等. 变性淀粉对鲢鱼糜冻结速率及凝胶特性的影响[J]. 水产学报, 2014, 38(9): 1592-1600. DOI:10.3724/SP.J.1231.2014.49228.
- [11] 岳开华, 黄永春, 张业辉, 等. 海鲈鱼鱼糜冻藏过程中流变特性及凝胶结构的变化规律[J]. 食品工业科技, 2016, 37(8): 330-334. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2016.08.061.
- [12] NUI L Q, HUYNH T T H, JIA R, et al. Effects of emulsifying fish oil on the water-holding capacity and ice crystal formation of heat-induced surimi gel during frozen storage[J]. 食品科学, 2016, 37(20): 293-298. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201620049.
- [13] HUNT A, PARK J W. Comparative study of sodium bicarbonate on gelling properties of Alaska Pollock surimi prepared at different freezing rates[J]. Journal of Food Quality, 2014, 37(5): 349-360. DOI:10.1111/jfq.12099.
- [14] JIA R, KATANO T, YOSHIMOTO Y, et al. Sweet potato starch with low pasting temperature to improve the gelling quality of surimi gels after freezing[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 81: 467-473. DOI:10.1016/j.foodhyd.2018.03.024.
- [15] CAO H W, FAN D M, JIAO X D, et al. Heating surimi products using microwave combined with steam methods: study on energy saving and quality[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2018, 47: 231-240. DOI:10.1016/j.ifset.2018.03.003.
- [16] BAINY E M, CORAZZA M L, LENZI M K. Measurement of freezing point of tilapia fish burger using differential scanning calorimetry (DSC) and cooling curve method[J]. Journal of Food Engineering, 2015, 161: 82-86. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2015.04.001.
- [17] XIA X F, KONG B H, LIU Q, et al. Physicochemical change and protein oxidation in porcine *longissimus dorsi* as influenced by different freeze-thaw cycles[J]. Meat Science, 2009, 83(2): 239-245. DOI:10.1016/j.meatsci.2009.05.003.
- [18] MA X S, YI S M, YU Y M, et al. Changes in gel properties and water properties of *Nemipterus virgatus* surimi gel induced by high-pressure processing[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 61(2): 377-384. DOI:10.1016/j.lwt.2014.12.041.
- [19] PITA-CALVO C, GUERRA-RODRÍGUEZ E, SARAIVA J A, et al. Effect of high-pressure processing pretreatment on the physical properties and colour assessment of frozen European hake (*Merluccius merluccius*) during long term storage[J]. Food Research International, 2018, 112: 233-240. DOI:10.1016/j.foodres.2018.06.042.
- [20] 王嵬, 马兴胜, 仪淑敏, 等. 肌原蛋白和大米蛋白对鲢鱼鱼糜凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(11): 46-51. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201711008.
- [21] CHAROENREIN S, HARNKARNSUJARIT N. Food freezing and non-equilibrium states[M]//Non-equilibrium states and glass transitions in foods. Elsevier, 2017: 39-62. DOI:10.1016/B978-0-08-100309-1.00004-3.
- [22] 关志强. 食品冷冻冷藏原理与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010: 238-243.
- [23] 陈日春, 滕用雄, 陈兴才, 等. 鱼丸冰点调节工艺的研究[J]. 农产品加工(学刊), 2013(8): 22-24. DOI:10.3969/j.issn.1671-9646(X).2013.04.033.
- [24] JIA G, SHA K, MENG J, et al. Effect of high voltage electrostatic field treatment on thawing characteristics and post-thawing quality of lightly salted, frozen pork tenderloin[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 99: 268-275. DOI:10.1016/j.lwt.2018.09.064.
- [25] LI D, JIA S, ZHANG L, et al. Effect of using a high voltage electrostatic field on microbial communities, degradation of adenosine triphosphate, and water loss when thawing lightly-salted, frozen common carp (*Cyprinus carpio*)[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 212: 226-233. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2017.06.003.
- [26] 陈竹兵, 朱志伟, 孙大文. 萝卜组织孔隙中气体含量对超声辅助浸渍冷冻冻结效果的影响[J]. 现代食品科技, 2017, 33(7): 178-185. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.7.025.
- [27] 夏文水. 食品工艺学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2014: 168-180.
- [28] 仪淑敏, 李欢, 陈思, 等. 鱼骨粉对金线鱼糜凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(9): 8-14. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201709001.
- [29] 王培森, 李倩如, 江文韬, 等. 可得然胶对肌球蛋白凝胶冻融稳定性的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(5): 30-34; 53. DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2017.05.006.
- [30] JI L, XUE Y, ZHANG T, et al. The effects of microwave processing on the structure and various quality parameters of Alaska pollock surimi protein-polysaccharide gels[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 63: 77-84. DOI:10.1016/j.foodhyd.2016.08.011.
- [31] 贾娜, 王乐田, 戴琳, 等. 真空闷帮子烧鸡贮藏中脂肪氧化及感官品质的变化[J]. 肉类研究, 2014, 28(9): 13-16.