

鈕晓艳, 李湃, 李海蓝, 等. 加州鲈禁食暂养过程中肌肉水分与质构特性相关性分析 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(13): 45–50. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020070372

ZU Xiaoyan, LI Pai, LI Hailan, et al. Correlation Analysis between Moisture and Texture in Muscles of *Micropterus salmoides* during Fasting Temporary Cultivation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(13): 45–50. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020070372

· 研究与探讨 ·

加州鲈禁食暂养过程中肌肉水分与质构特性相关性分析

鈕晓艳, 李 湃, 李海蓝, 廖 涛, 刘舒彦, 白 婵, 王炬光, 熊光权*
(湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究所, 湖北武汉 430064)

摘要:为提高加州鲈鱼肉品质, 在禁食条件下暂养加州鲈 8 周, 每周取鱼背肌肉, 运用低场核磁共振技术和质地剖面分析对样品水分横向弛豫时间 (transverse relaxation time, T_2) 和质构特性进行检测, 计算水分峰面积 (area, A) 和峰面积占比 (proportion, P), 并进行鱼肉水分和质构指标的相关性分析。结果表明: 加州鲈鱼肉水分主要为不易流动水, 其峰面积占比 P_{21} 可达 95.00% 以上。随着暂养周期延长, 鱼肉结合水 T_{2b} 呈下降趋势; 暂养至 6~8 周, 鱼肉自由水信号消失, P_{2b} 和 P_{21} 之和可达 100%。与第 1 周相比, 暂养 6~8 周鱼肉硬度和咀嚼性分别下降 34.34%~42.03% 和 18.54%~26.34%, 恢复性和凝聚性均显著上升 ($P<0.05$)。主指标相关性结果显示, 鱼肉咀嚼性和硬度均与 A_{22} 存在显著正相关 ($P<0.05$), 凝聚性和恢复性均与 T_{21} 存在显著正相关 ($P<0.05$)。以上结果表明, 禁食暂养期间鱼肉自由水和不易流动水的是影响其质构特性的主要因素; 加州鲈禁食暂养 6~8 周, 可以提高鱼肉与水分的结合力, 改善鱼肉品质。

关键词:加州鲈, 禁食暂养, 水分迁移, 质构特性

中图分类号:S98 文献标识码:A 文章编号:1002-0306(2021)13-0045-06

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2020070372

Correlation Analysis between Moisture and Texture in Muscles of *Micropterus salmoides* during Fasting Temporary Cultivation

ZU Xiaoyan, LI Pai, LI Hailan, LIAO Tao, LIU Shuyan, BAI Chan, WANG Juguang, XIONG Guangquan*

(Institute of Agricultural Products Processing and Nuclear Agricultural Technology,
Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China)

Abstract: To improve the quality of *Micropterus salmoides*, eight weeks temporary cultivation were performed under fasting condition. During the period, the back muscles of *Micropterus salmoides* were taken every week for measuring transverse relaxation time (T_2) and texture characteristics by the low field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) and the texture profile analysis (TPA). Then, the water peak area (A) and the peak area proportion (P) were calculated, and the correlation analysis between water and texture indexes was performed. The results showed that the main water of the samples was immobilized water, its peak area proportion P_{21} could reach more than 95.00%. With the prolongation of the cultivation time, the bound water T_{2b} decreased in samples. When the *Micropterus salmoides* was cultured for 6~8 weeks, the free water signals in the samples disappeared and the sum of the P_{2b} and P_{21} could reach 100%. Compared with the first week samples, the hardness and chewiness of the samples in 6~8 weeks decreased by 34.34%~42.03% and 18.54%~26.34% respectively, and the resilience and cohesion both increased significantly ($P<0.05$). On the case of correlation analysis, there was a significant positive correlation among the chewiness, hardness and A_{22} ($P<0.05$), and among the cohesion, resilience and T_{21} ($P<0.05$). The above result suggested that free water and immobilized water were the main factors affecting the

收稿日期: 2020-07-29

基金项目: 财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系专项 (CARS-46); 湖北省农业科技创新中心项目 (2020-620-000-001-036)。

作者简介: 鈕晓艳 (1981-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 水产品保鲜与加工, E-mail: 50655819@qq.com。

* 通信作者: 熊光权 (1965-), 男, 本科, 研究员, 研究方向: 水产品保鲜与加工, E-mail: 994239700@qq.com。

texture of the *Micropterus salmoides* during the cultivation. And the fasting cultivation of the *Micropterus salmoide* for 6~8 weeks can enhance the binding force between the fish muscle and the water, and improve the texture characteristics.

Key words: *Micropterus salmoides*; fasting temporary cultivation; moisture migration; texture characteristics

加州鲈(*Micropterus salmoides*)又称大口黑鲈,隶属鲈形目(Perciformes)、太阳鱼科(Ceetrachidae)、黑鲈属(*Micropterus*),是原产于北美洲的一种淡水鱼类^[1]。其具有生长快、适应性强、病害少^[2]、肉质鲜美、无肌间刺等特点,是我国重要的淡水养殖品种之一。由于消费习惯原因,我国淡水鱼多以生鲜形式上市销售,为了改良鱼肉品质和风味,上市之前会进行一段时间的禁食暂养,但此类暂养多限于较短时间(7~15 d)^[3-6],较长时间的暂养鲜少有研究提及。

水分是影响肉类品质的重要因素之一,其含量和分布会影响肉品的多汁性和嫩度^[7-8]。低场核磁共振技术(low field nuclear magnetic resonance, LF-NMR)可通过对氢质子弛豫时间的检测,直观反映样品中的水分分布与存在状态,具有快速、无损等特点^[9-10],该技术在肉制品领域得到广泛关注。辜雪冬等^[11]研究表明,与冷藏相比,冰温条件下牦牛肉的结合水更加稳定,有利于维持其生理生化品质。朱丹实等^[12]研究显示,-2与4℃贮藏条件下,鲤鱼肌肉中的不易流动水与自由水含量呈显著负相关,不易流动水明显向自由水迁移。Sánchez-Alonso等^[13]研究表明,冷冻鳕鱼片不易流动水的相对丰度会随贮藏时间的延长而降低。Fjelkner-Modig和Tornberg^[14]的研究显示,不易流动水是肌肉保水性的重要因素,自由水过高会带来较高的贮藏损失。以上研究主要关注产品贮藏过程中的水分变化,关于鲜活水产品暂养期间肌肉各类水分含量和分布的变化,尚未见研究报道。

质构是评价肉类品质的重要指标,传统的质构分析以剪切法为主^[15],但该方法仅能从剪切力角度对肉质进行衡量。质地剖面分析(Texture profile analysis, TPA),运用探头模拟口腔的咀嚼运动,对样品进行两次压缩,通过绘制TPA特征曲线^[16],分析样品硬度、恢复性、弹性、凝聚性、咀嚼性、胶着性等参数^[17],可以更全面、客观地描述样品质构特性^[18]。TPA技术已在食品行业多类产品中广泛应用,相关研究集中在加工后产品的质构指标检测、与感官评价指标的相关关系及数学回归模型的建立等方面^[16,19-20],尚未发现生鲜鱼肉质构特性与其水分分布相关性的研究报道。

本文以加州鲈为研究对象,运用LF-NMR和TPA技术对鱼肉水分横向弛豫时间(transverse relaxation time, T_2)和质构特性进行检测,计算水分峰面积(area, A)和峰面积占比(proportion, P);进行主成分载荷分析,及鱼肉水分和质构主指标之间的相关性分析;明确不同暂养时间下各类水分对鱼肉质构特性的影响,为提高暂养期间加州鲈鱼肉品质提供技术支撑。

1 材料和方法

1.1 材料与仪器

鲜活加州鲈50条(初始体重约650 g/条) 湖北嘉鱼县三湖渔业有限责任公司提供。

TA-XT Plus 质构仪 英国 Stable Micro System 公司; Mini MR-Rat 低场核磁共振成像系统 上海纽迈电子科技有限公司; YP3001N 型电子天平 上海舜宇恒平科学仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 加州鲈鱼肉样品的制备 循环水500 L 爆汽48 h后,放入50条鲜活加州鲈,禁食暂养1~8周(第1周为起始周,对照组),每周换水2次。暂养过程持续充氧,循环过滤,控制水温18~20℃。每周取出(650±50)g范围内的加州鲈6条,剖杀后沿脊椎两侧去皮取背部肌肉,两侧切出两片约4.0 cm×10.5 cm×2.0 cm,重量为(76.3±8.5)g的鱼肉,备用。

1.2.2 指标测定方法

1.2.2.1 LF-NMR测定 沿肌肉纤维方向切下2.0 cm×2.0 cm×1.0 cm的鱼块,放入核磁共振专用测试管(内径2.7 cm,长度20 cm)中,运用核磁共振成像分析仪检测鱼肉结合水、不易流动水及自由水分布。 T_2 测试参数^[21]:共振频率SF=20 MHz,90°脉宽 $P_1=8.52\ \mu\text{s}$,180°脉宽 $P_2=16.48\ \mu\text{s}$,谱宽SW=100 kHz;等待时间TW=1000 ms,回波间隔TR=1 ms,回波个数NECH=700,重复扫描次数NS=4。每组样品6个平行,使用核磁共振分析软件及CPMG序列采集样品信号,采用SIRT 100000进行反演,导出各水分弛豫时间 T_{2b} 、 T_{21} 、 T_{22} 和峰面积 A_{2b} 、 A_{21} 、 A_{22} ,并计算各水分峰面积占比 P_{2b} 、 P_{21} 、 P_{22} 。

1.2.2.2 TPA测定 将鱼肉沿肌肉纤维方向切成1.5 cm×1.5 cm×1.5 cm的块状,用TA-XT Plus质构仪进行测定。测定条件^[22-23]:探头P/36R,模式TPA,压缩比50%,测前、测中和返回速率均为1 mm/s,两次下压的时间间隔为5 s,下压距离6 mm,触发力设定Auto 5 g,每组样品6个平行样。选取硬度、恢复性、弹性、凝聚性、咀嚼性、胶着性6个指标进行分析。

1.3 数据处理

采用Microsoft Excel 2010进行数据收集、整理和制图,数据以平均值±标准差表示。采用SPSS 20.0对数据进行Pearson相关检验和主成分分析,以单因素方差分析(One-way ANOVA)中的邓肯氏(Duncan)检验法进行多组样本间差异显著性分析, $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 分别判定为差异显著和极显著。

2 结果与分析

2.1 暂养时间对鱼肉水分分布的影响

水分依据与组织结合的紧密程度可分为三类

型: 结合水(与肌肉大分子紧密结合的水)、不易流动水(肌纤维、肌原纤维及膜之间的水)、以及自由水(肌原纤维束外的水)^[11-12]。T₂ 为各类水分对应的横向弛豫时间, 按照波峰所覆盖区域界定的水分状态, 鲈鱼肉中各类水分对应的 T₂ 范围主要为(图 1): 结合水 T_{2b}(0~10 ms)、不易流动水 T₂₁(10~100 ms)和自由水 T₂₂(100~2000 ms)。根据图 1, 禁食暂养期间鲈鱼肉的水分分布是动态变化的, 水分弛豫时间 T₂ 在暂养 1~2 周时可分为 3 个区段(T_{2b}、T₂₁、T₂₂), 3~5 周为 4 个区段(T_{2b}、T_{2b}、T₂₁、T₂₂), 6~8 周为 2 个区段(T_{2b}、T₂₁); 其中, 鲈鱼暂养 3~5 周的水分由强结合水、弱结合水、不易流动水及自由水组成, 与其它鱼类, 如鲤鱼^[12] 和鳕鱼^[13] 的结果相似。

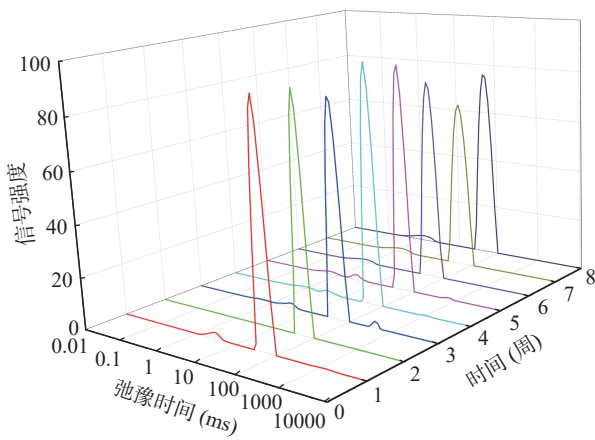


图 1 暂养期间加州鲈鱼肉水分横向弛豫时间 T₂ 的三维瀑布图

Fig.1 A three-dimensional waterfall plot for T₂ changes of waters in muscle of *Micropterus salmoides* during temporary cultivation

由表 1 可以看出, 随着禁食暂养时间的延长, 鲈鱼肉结合水 T_{2b} 呈现下降趋势, 不易流动水 T₂₁ 比较稳定, 自由水 T₂₂ 波动较大, 暂养 6~8 周自由水 T₂₂ 信号消失。T_{2b} 主要用于表征肌肉分子与水分的结合程度^[24], T_{2b} 越小, 说明肌肉大分子与水分结合越紧密。自由水为机体的生化反应提供液体环境^[25], T₂₂ 信号消失, 说明参与机体细胞反应和运输的自由水减少。根据表 1 结果, 鱼肉不易流动水峰面积占

比 P₂₁ 可达 95.00% 以上, 为鲈鱼肉水分的主要组成部分。暂养至第 5 周时, 鱼肉结合水峰面积 A_{2b} 与第 1 周相比增加约 143.36%(P<0.05), 峰面积占比 P_{2b} 增加约 60.68%(P<0.05); 说明随着暂养时间延长, 鱼肉自由水向不易流动水和结合水迁移, 鱼肉组织对水分的束缚力提高^[12,26]。暂养 6~8 周时, 鱼肉结合水峰面积占比 P_{2b} 和不易流动水峰面积占比 P₂₁ 之和可达 100%, 自由水占比 P₂₂ 忽略不计。推测, 鲈鱼暂养 6~8 周时, 由于禁食时间较长, 鱼体为维持稳态将新陈代谢降低, 细胞间生物化学反应及运输所需水分减少, 因此自由水 P₂₂ 降至最低, P_{2b} 和 P₂₁ 总和升至最高。

2.2 暂养时间对鱼肉质构特性的影响

硬度一般指用白齿第一次咬住样品所施加的力^[17]。咀嚼性是样品对咀嚼的抵抗能力, 也就是俗称的嚼劲^[27], 肉品嫩度与硬度、咀嚼性之间有着较高的相关性^[28]。根据表 2 结果, 暂养期间鱼肉硬度、弹性、咀嚼性总体呈下降趋势; 与第 1 周相比, 暂养 6~8 周时鱼肉弹性下降 26.40%~38.98%(P<0.05); 硬度下降 34.34%~42.03%, 咀嚼性下降 18.54%~26.34%, 这与鲫鱼和草鱼禁食暂养 7 和 15 d 后, 鱼肉硬度和咀嚼性下降的结果相一致^[5-6]。由于鱼在饥饿状态下会分解体内蛋白质来提供活动能量^[29], 咀嚼性等会受到鱼体内蛋白质含量的影响^[5], 而肉的硬度、弹性、咀嚼性等与肉品嫩度呈负相关^[27-28], 因此延长暂养周期至 6~8 周, 有利于提高加州鲈鱼肉口感和嫩度。

恢复性反映样品在压缩状态下快速恢复原状的能力^[27]。凝聚性反映样品分子或各结构要素间的结合作用的强弱, 及抵抗受损保持自身完整的能力^[18]。根据表 2 结果, 暂养期间鲈鱼肉恢复性和凝聚性总体呈上升趋势; 与第 1 周相比, 暂养 6~8 周时鱼肉恢复性和凝聚性分别上升 32.35%~49.29%(P<0.05) 和 50.00%~56.67%(P<0.05), 这与卵形鲳鲹禁食处理 15 d 后鱼肉凝聚性上升的结果相符^[30]。由于鱼肉样品越完整, 凝聚性越高, 咀嚼时口感越细腻^[21,30], 因此 6~8 周禁食暂养可以对鱼肉品质产生有利影响。

此外, 根据表 1 和表 2 结果, 随暂养时间延长, 水分指标 A_{2b} 与 P_{2b}, 质构指标硬度、弹性与咀嚼性,

表 1 暂养期间加州鲈鱼肉水分分布情况

Table 1 Moisture distribution in muscle of *Micropterus salmoides* during temporary cultivation

时间(周)	水分弛豫时间T ₂ (ms)			水分峰面积A			峰面积占比P(%)		
	T _{2b}	T ₂₁	T ₂₂	A _{2b}	A ₂₁	A ₂₂	P _{2b}	P ₂₁	P ₂₂
1	2.86±0.28 ^a	57.22	1431.30±280.65 ^a	9.04±7.89 ^b	295.72±256.10 ^{bcd}	1.03±0.95 ^b	2.95±0.30 ^b	96.71±0.40 ^b	0.34±0.10 ^b
2	3.53±1.13 ^b	57.22	907.28±437.24 ^a	5.05±0.09 ^a	411.49±14.77 ^a	1.10±0.25 ^a	1.20±0.12 ^a	99.94±0.06 ^c	0.26±0.06 ^a
3	1.72±1.25 ^a	49.77	403.70±56.27 ^a	15.53±4.44 ^b	445.04±0.56 ^{bcd}	6.91±0.23 ^c	3.32±0.91 ^b	95.20±0.85 ^a	1.48±0.06 ^c
4	1.94±1.36 ^a	57.22	1072.27±186.35 ^a	15.90±2.05 ^b	453.34±0.77 ^{de}	1.14±0.05 ^a	3.38±0.42 ^b	96.38±0.42 ^b	0.24±0.01 ^a
5	1.67±1.59 ^a	57.22	1179.32±92.71 ^a	22.00±4.17 ^c	440.27±0.65 ^{bc}	1.18±0.08 ^a	4.74±0.86 ^c	95.00±0.85 ^a	0.26±0.02 ^a
6	0.89±0.23 ^a	49.77	-	13.41±1.65 ^b	454.95±0.62 ^c	-	2.86±0.35 ^b	97.14±0.35 ^b	-
7	1.46±0.25 ^a	57.22	-	16.62±1.81 ^b	435.09±0.52 ^b	-	3.68±0.38 ^b	96.32±0.38 ^b	-
8	1.16±0.16 ^a	49.77	-	17.90±2.13 ^{bc}	449.61±0.72 ^{cde}	-	3.83±0.44 ^{bc}	96.17±0.44 ^b	-

注: 同列数据不同小写字母表示组间差异显著(P<0.05), 表2同。

表2 暂养期间加州鲈鱼肉 TPA 指标变化

Table 2 Changes of TPA indices in muscle of *Micropterus salmoides* during temporary cultivation

时间(周)	指标					
	硬度(g)	恢复性(%)	凝聚性	弹性(%)	胶着性(g·s)	咀嚼性(g)
1	2641.34±826.14 ^{abc}	16.88±4.03 ^a	0.30±0.06 ^a	66.58±8.45 ^c	814.95±255.34 ^a	459.79±138.12 ^b
2	2799.21±298.22 ^{bc}	21.74±1.59 ^b	0.40±0.03 ^b	51.92±3.82 ^b	771.49±42.03 ^a	397.40±48.34 ^{ab}
3	2955.06±933.44 ^c	15.14±4.83 ^a	0.32±0.09 ^a	37.52±3.44 ^a	877.14±144.37 ^a	411.78±160.93 ^{ab}
4	2092.95±820.80 ^{abc}	25.31±4.13 ^b	0.42±0.06 ^b	52.36±5.43 ^b	859.76±146.10 ^a	488.89±94.16 ^b
5	2078.16±330.80 ^{abc}	17.81±1.42 ^a	0.29±0.04 ^a	33.88±5.40 ^a	712.95±89.83 ^a	363.68±35.21 ^a
6	1734.31±393.48 ^{ab}	24.34±2.65 ^b	0.46±0.05 ^b	49.00±2.37 ^b	842.35±11.89 ^a	374.55±59.48 ^{ab}
7	1558.24±800.81 ^a	25.20±4.02 ^b	0.47±0.07 ^b	48.93±5.05 ^b	856.74±23.91 ^a	338.68±137.56 ^{ab}
8	1531.48±591.87 ^a	22.34±3.61 ^b	0.45±0.07 ^b	40.63±3.79 ^a	950.41±108.58 ^a	339.08±80.59 ^{ab}

恢复性与凝聚性,存在较为明显的共线性现象(即指标变化趋势相同)^[31],为了对样品水分和质构进行较为准确的评价,进一步进行指标相关性分析。

2.3 相关性分析

由表3可得, A₂₁与A_{2b}, P_{2b}与A_{2b}, P₂₁与T_{2b}, P₂₂与A₂₂均存在极显著正相关(P<0.01); P_{2b}与T_{2b}, T₂₂, P₂₁与A_{2b}, A₂₁, P_{2b}, P₂₂与T₂₁均存在极显著负相关(P<0.01)。由表4可知,硬度与恢复性、凝聚性存在极显著负相关(P<0.01),与胶着性、咀嚼性存在极显著正相关(P<0.01);恢复性与凝聚性,咀嚼性与弹性、胶着性存在极显著正相关(P<0.01)。以上结果度量了指标之间的线性相关程度,可更好地对水分和质构指标进行归类 and 筛选^[32]。为进一步明确暂养期间影响鱼肉水分和质构的主要因素,还需对其进行主成分分析。

2.4 主成分分析

主成分分析可以在最大限度保留原始数据信息

的基础上对高维变量进行空间降维,将原始数据中相关性很高的变量转化成彼此相互独立的变量^[20,33]。根据表5结果,水分指标因子1(f₁)和因子2(f₂)的特征值均大于1,方差贡献率分别为71.98%和22.82%,累积贡献率达到了94.80%。TPA指标因子1(F₁)和因子2(F₂)的特征值均大于1,累计方差贡献率达到了82.82%。说明f₁和f₂、F₁和F₂能够表征加州鲈鱼肉水分状态和质构特性的大部分情况,因此选取f₁和f₂、F₁和F₂作为反映样品水分指标和质构指标整体信息的主成分因子。进一步采用正交旋转法对水分指标的主成分因子进行旋转^[34],计算得到各指标的特征向量系数,获得主成分f₁、f₂与水分指标之间、主成分F₁、F₂与质构指标之间,具有统计学意义的数学方程,如下。

方程 1: f₁=0.365x₁+0.327x₂+0.293x₃-0.369x₄-0.251x₅-0.323x₆+0.365x₇-0.390x₈+0.292x₉;

方程 2: f₂=0.234x₁+0.347x₂-0.463x₃-0.201x₄+

表3 各水分指标间的皮尔逊相关系数

Table 3 Pearson correlation coefficients among the moisture indices

	A _{2b}	A ₂₁	A ₂₂	T _{2b}	T ₂₁	T ₂₂	P _{2b}	P ₂₁	P ₂₂
A _{2b}	1								
A ₂₁	0.608**	1							
A ₂₂	0.225	0.186	1						
T _{2b}	-0.896**	-0.639**	-0.117	1					
T ₂₁	-0.063	-0.516*	-0.510*	0.275	1				
T ₂₂	-0.655*	-0.467	-0.484	0.735*	0.373	1			
P _{2b}	0.810**	0.448*	0.006	-0.854**	-0.133	-0.765**	1		
P ₂₁	-0.858**	-0.621**	-0.344	0.824**	0.332	0.681*	-0.937**	1	
P ₂₂	0.431	0.316	0.984**	-0.393	-0.827**	-0.485	0.198	-0.512	1

注: **代表0.01水平(双侧)上极显著相关, *代表0.05水平(双侧)上显著相关;表4、表6同。

表4 TPA 指标之间的皮尔逊相关系数

Table 4 Pearson correlation coefficients among the TPA indices

	硬度	恢复性	凝聚性	弹性	胶着性	咀嚼性
硬度	1					
恢复性	-0.571**	1				
凝聚性	-0.656**	0.954**	1			
弹性	-0.013	0.199	0.152	1		
胶着性	0.684**	0.121	-0.015	0.235	1	
咀嚼性	0.375**	0.186	0.063	0.826**	0.681**	1

表 5 水分和 TPA 的总体方差分析
Table 5 Total variance analysis for moisture and TPA

因子	水分			因子	TPA		
	特征值	方差贡献率(%)	累积方差贡献率(%)		特征值	方差贡献率(%)	累积方差贡献率(%)
f ₁	6.48	71.98	71.98	F ₁	2.57	42.88	42.88
f ₂	2.05	22.82	94.80	F ₂	2.40	39.94	82.82
f ₃	0.35	3.90	98.70	F ₃	0.91	15.09	97.91
f ₄	0.09	1.02	99.72	F ₄	0.06	0.98	98.99
f ₅	0.02	0.23	99.95	F ₅	0.04	0.70	99.69
f ₆	0.004	0.05	100.00	F ₆	0.03	0.42	100.00
f ₇	0.00005	0.001	100.00				
f ₈	0.0000006	0.000007	100.00				
f ₉	0.000000008	0.0000001	100.00				

$0.534x_5 - 0.112x_6 + 0.235x_7 - 0.027x_8 - 0.465x_9;$

方程 3: $F_1 = 0.588X_1 - 0.454X_2 - 0.506X_3 + 0.075X_4 + 0.348X_5 + 0.256X_6;$

方程 4: $F_2 = 0.033X_1 + 0.393X_2 + 0.329X_3 + 0.497X_4 + 0.408X_5 + 0.569X_6;$

其中: $x_1: A_{2b}, x_2: A_{21}, x_3: A_{22}, x_4: T_{2b}, x_5: T_{21}, x_6: T_{22}, x_7: P_{2b}, x_8: P_{21}, x_9: P_{22}; X_1: 硬度, X_2: 恢复性, X_3: 凝聚性, X_4: 弹性, X_5: 胶着性, X_6: 咀嚼性。$

由方程 1~4 可知, 不同暂养时间下 f_1 载荷较高的是 T_{2b} 和 P_{21} , f_2 载荷较高的是 T_{21} 和 P_{22} , F_1 载荷较高的是硬度和凝聚性, F_2 的载荷较高的是咀嚼性和弹性。为明确与 2 个主成分相关性均较高的指标, 分别以水分和 TPA 的主成分 1 为横坐标、主成分 2 为纵坐标, 散点法绘制指标载荷图, 并进行各指标对坐标原点的距离计算。

载荷图表明指标距离原点越远, 其与两个主成分的关联度越高^[32]。根据图 2A 结果, 水分指标距原点的距离(d_i)由大到小顺序依次为: $A_{22}(d_1=0.999)$ 、 $P_{22}(d_2=0.999)$ 、 $T_{21}(d_3=0.996)$ 、 $P_{21}(d_4=0.994)$ 、 $P_{2b}(d_5=0.989)$ 、 $A_{2b}(d_6=0.988)$ 、 $T_{2b}(d_7=0.982)$ 、 $A_{21}(d_8=0.969)$ 、 $T_{22}(d_9=0.838)$; 其中 A_{22} 、 P_{22} 、 T_{21} 和 P_{21} 与 f_1 、 f_1 的关联程度最高, 故将 A_{22} 、 P_{22} 、 T_{21} 和 P_{21} 作为评价加州鲈鱼肉水分的主指标。根据图 2B 结果, TPA 各指标距原点的距离(D_i)由大到小顺序依次为: 咀嚼性($D_1=0.971$)、凝聚性($D_2=0.958$)、恢复性($D_3=0.948$)、硬度($D_4=0.944$)、胶着性($D_5=0.842$)、弹性($D_6=0.778$); 其中咀嚼性、凝聚性、

恢复性和硬度与 F_1 和 F_2 的关联程度最高, 因此可以将这 4 个指标作为评价鱼肉质构特性的主指标。

2.5 鱼肉水分与 TPA 指标之间的相关性

根据表 6 结果, 暂养期间, 鱼肉样品咀嚼性和硬度均与其自由水峰面积 A_{22} 存在显著正相关($P < 0.05$), 凝聚性与 A_{22} 存在显著负相关($P < 0.05$), 凝聚性和恢复性均与样品不易流动水弛豫时间 T_{21} 存在显著正相关($P < 0.05$)。表明暂养期间鱼肉自由水和不易流动水的分布是影响其质构变化的主要原因。结合表 1 和表 2 结果, 禁食暂养 6~8 周时, 鲈鱼肉自由水消失, 不易流动水出峰时间总体稳定, 结合水出峰时间降低、峰面积占比上升; 表明, 鱼肉自由水向不易流动水和结合水迁移, 鱼肉对水分的束缚力提高。同时, 鱼肉硬度和咀嚼性下降、凝聚性和恢复性上升, 即鱼肉嫩度上升^[8,27], 口感细腻度上升^[21,30]。

3 结论

加州鲈鱼肉水分中不易流动水占比可达 95.00% 以上。暂养 6~8 周时, 鱼肉自由水消失, 结合水占比

表 6 水分指标和 TPA 指标之间的皮尔逊相关系数

Table 6 Pearson correlation coefficients among moisture and TPA indices

指标	咀嚼性	凝聚性	恢复性	硬度
A_{22}	0.406*	-0.372*	-0.298	0.359*
P_{22}	0.319	0.011	0.130	0.338
T_{21}	-0.099	0.383*	0.430*	-0.140
P_{21}	-0.151	0.123	0.126	-0.187

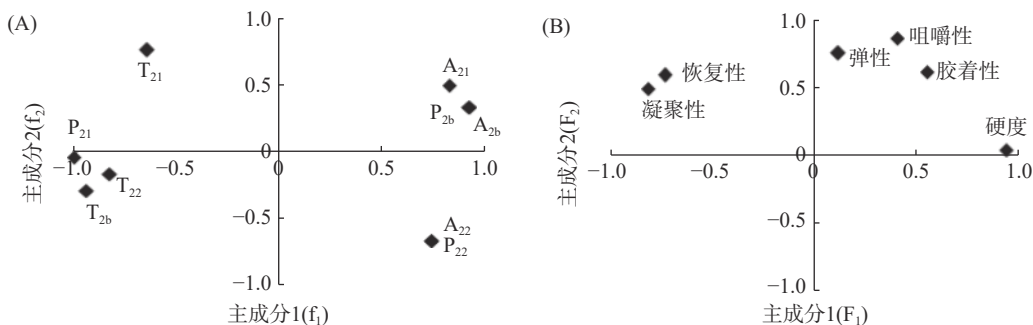


图 2 水分(A)和 TPA(B)指标主成分载荷图

Fig.2 Principal component load chart on moisture (A) and TPA (B) indices

上升。暂养期间, 鱼肉硬度、弹性、咀嚼性总体呈下降趋势, 鱼肉恢复性和凝聚性总体呈上升趋势。根据主成分分析结果, 受暂养时间影响较大的水分主指标为 A_{22} 、 P_{22} 、 T_{21} 和 P_{21} , 质构主指标为咀嚼性、凝聚性、恢复性和硬度。根据主指标的相关性分析, 鲈鱼肉咀嚼性和硬度均与自由水峰面积 A_{22} 存在显著正相关($P < 0.05$), 凝聚性和恢复性均与不易流动水横向弛豫时间 T_{21} 存在显著正相关($P < 0.05$)。综上, 暂养期间鱼肉中的自由水和不易流动水是影响其质构特性的主要因素。禁食暂养加州鲈 6~8 周, 鱼肉与水分结合力提高, 鱼肉硬度和咀嚼性降低, 凝聚性和恢复性提高。

参考文献

- [1] Hossain M M, Perhar G, Arhonditsis G B, et al. Examination of the effects of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) and bluegill (*Lepomis macrochirus*) on the ecosystem attributes of lake Kawahara-oike, Nagasaki, Japan[J]. *Ecological Informatics*, 2013, 18: 149-161.
- [2] Almeida D, Almodóvar A, Nicola G G, et al. Trophic plasticity of invasive juvenile largemouth bass *Micropterus salmoides* in Iberian streams[J]. *Fisheries Research*, 2012, 113: 153-158.
- [3] Day R D, Tibbetts I R, Secor S M. Physiological responses to short-term fasting among herbivorous, omnivorous, and carnivorous fishes[J]. *Journal of Comparative Physiology B*, 2014, 184(4): 497-512.
- [4] Caruso G, Denaro M G, Caruso R, et al. Response to short term starvation of growth, haematological, biochemical and non-specific immune parameters in European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) and blackspot sea bream (*Pagellus bogaraveo*) [J]. *Marine Environmental Research*, 2011, 72(1-2): 46-52.
- [5] 吴朝朝, 陈丽丽, 袁美兰, 等. 短期暂养对鲫鱼肉质影响的研究[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(15): 334-336.
- [6] 夏耘, 余德光, 谢骏, 等. 短期饥饿对草鱼肌肉质构的影响[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(9): 102-106.
- [7] 王娟, 张万刚, 刘念, 等. 梅山猪与三元杂交猪肉宰后成熟过程品质变化比较[J]. *食品科学*, 2015, 36(8): 254-259.
- [8] Tasoniero G, Bertram H C, Young J F, et al. Relationship between hardness and myowater properties in wooden breast affected chicken meat: A nuclear magnetic resonance study[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2017, 86: 20-24.
- [9] 杨赫鸿, 李沛军, 孔保华, 等. 低场核磁共振技术在肉品科学研究中的应用[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(13): 400-405.
- [10] 胡潇予, 蓝蔚青, 张楠楠, 等. 低场核磁共振技术在食品领域中的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(6): 386-390.
- [11] 辜雪冬, 孙术国, 杨飞艳, 等. 冰温或冷藏对牦牛肉贮藏品质及水分迁移的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(16): 343-350.
- [12] 朱丹实, 王立娜, 吴晓菲, 等. 冰温及冷藏对鲤鱼水分迁移及质构的影响[J]. *中国食品学报*, 2017, 17(10): 152-159.
- [13] Sánchez-Alonso I, Moreno P, Careche M. Low field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) relaxometry in hake (*Merluccius merluccius*, L.) muscle after different freezing and storage conditions[J]. *Food Chemistry*, 2014, 153: 250-257.
- [14] Fjelkner-Modig S, Tornberg E. Water distribution in porcine *M. longissimus dorsi* in relation to sensory properties[J]. *Meat Science*, 1986, 17(3): 213-231.
- [15] Romero de Ávila M D, Cambero M I, Ordóñez J A, et al. Rheological behaviour of commercial cooked meat products evaluated by tensile test and texture profile analysis (TPA)[J]. *Meat Science*, 2014, 98(2): 310-315.
- [16] Paula A M, Conti-Silva A C. Texture profile and correlation between sensory and instrumental analyses on extruded snacks[J]. *Journal of Food Engineering*, 2014, 121: 9-14.
- [17] 孙彩玲, 田纪春, 张永祥. TPA 质构分析模式在食品研究中的应用[J]. *实验科学与技术*, 2007, 5(2): 1-4.
- [18] 王智能, 高立琼, 崔文利, 等. 黄鳝片冷冻保藏的质构变化与控制[J]. *食品工业*, 2019, 40(5): 214-219.
- [19] 刘兴余, 金邦荃, 詹巍, 等. 猪肉质构的仪器测定与感官评定之间的相关性分析[J]. *食品科学*, 2007, 28(4): 245-248.
- [20] 钮晓艳, 王伟琼, 陈玉霞, 等. ^{60}Co - γ 辐照剂量对鲈鱼感官和质构的影响[J]. *现代食品科技*, 2017, 33(5): 202-206, 167.
- [21] Qin N, Zhang L, Zhang J, et al. Influence of lightly salting and sugaring on the quality and water distribution of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) during super-chilled storage[J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 215: 104-112.
- [22] Herrero A M, Ordóñez J A, Romerode A, et al. Breaking strength of dry fermented sausages and their correlation with texture profile analysis (TPA) and physico-chemical characteristics[J]. *Meat Science*, 2007, 77(3): 331-338.
- [23] Monaco R D, Cavella S, Masi P. Predicting sensory cohesiveness, hardness and springiness of solid foods from instrumental measurements[J]. *Journal of Texture Studies*, 2008, 39(2): 129-149.
- [24] Carneiro C D S, Mársico E T, Ribeiro R D O R, et al. Low-field nuclear magnetic resonance (LF NMR ^1H) to assess the mobility of water during storage of salted fish (*Sardinella brasiliensis*) [J]. *Journal of Food Engineering*, 2016(169): 321-325.
- [25] 张诚诚, 曹志华, 胡娟娟, 等. 水分胁迫对油茶容器苗生理生化特性的影响[J]. *安徽农业大学学报*, 2013, 40(4): 146-150.
- [26] 程天賦, 俞龙浩, 蒋奕, 等. 基于低场核磁共振探究解冻过程中肌原纤维水对鸡肉食用品质的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(9): 16-22.
- [27] 于慧春, 李欣, 张仲欣, 等. 采用质构仪分析氯化钙对牛肉品质的影响[J]. *食品研究与开发*, 2009, 30(5): 35-38.
- [28] 夏建新, 王海滨, 徐群英, 等. 肌肉嫩度仪与质构仪对燕麦复合火腿肠测定的比较研究[J]. *食品科学*, 2010, 31(3): 145-149.
- [29] 柴毅, 罗静波, 张远炯. 饥饿对奥尼罗非鱼能量物质消耗的影响[J]. *长江大学学报(自然科学版)*, 2010, 7(4): 41-43.
- [30] 钟金香, 李俊伟, 顾晓勇, 等. 短期饥饿处理对卵形鲳鲹鱼肉品质的影响[J]. *暨南大学学报(自然科学与医学版)*, 2018, 39(5): 394-399.
- [31] 张婷, 吴燕燕, 李来好, 等. 腌制鱼类品质研究的现状与发展趋势[J]. *食品科学*, 2011, 32(S1): 149-155.
- [32] 钮晓艳, 王伟琼, 熊光权. 模糊数学评价和主成分分析电子束辐照处理后的鲈鱼品质[J]. *食品科学*, 2017, 38(15): 38-42.
- [33] 马龙, 武杰, 吴玲玲, 等. 酱牛肉质构特性主成分分析[J]. *食品工业科技*, 2013, 34(8): 111-113, 117.
- [34] 林海明, 张文霖. 主成分分析与因子分析的异同和 SPSS 软件[J]. *统计研究*, 2005, 22(3): 65-68.