

云南 5 种火腿水分分布与质构特性研究

杨子江^{1,2}, 赵娅英^{1,2}, 王桂瑛^{1,2*}, 尹晓燕^{1,2}, 张丽红^{1,2},
田 梅^{1,2}, 葛长荣², 廖国周^{2*}

(1. 云南农业大学食品科学技术学院, 昆明 650201; 2. 云南农业大学云南省畜产品加工工程技术研究中心, 昆明 650201)

摘 要: 目的 探究云南 5 种火腿水分分布与质构特性的差异及相关性。**方法** 以一年陈的宣威火腿、诺邓火腿、撒坝火腿、三川火腿和鹤庆火腿为原料, 利用低场核磁共振(low-field nuclear magnetic resonance, LF-NMR)与质地剖面分析(texture profile analysis, TPA)分别测定不同地区火腿的水分分布与质构特性。**结果** 撒坝火腿的不易流动水和自由水横向弛豫时间(T_2)分别为 26.29 与 151.13 ms, 均显著高于其他 4 种火腿($P<0.05$); 5 种火腿的不易流动水单位质量信号量(A_{22})均高于结合水(A_{21})和自由水(A_{23}), 其中撒坝火腿的 A_{22} 为 8857.97, 显著高于其他 4 种火腿($P<0.05$); 宣威火腿的硬度、咀嚼性和内聚性在 5 种火腿中最高, 而弹性和回复性在 5 种火腿中最低; 相关性分析显示, 5 种火腿的不易流动水含量与回复性、弹性呈极显著正相关($P<0.01$), 与硬度呈显著负相关($P<0.05$), 与咀嚼性、内聚性呈极显著负相关($P<0.01$), 自由水含量与弹性、回复性呈极显著正相关($P<0.01$), 而结合水含量与质构指标无显著相关性。**结论** 本研究表明不易流动水在 5 种火腿中占主要优势, 其在 5 种火腿中的含量变化导致了火腿之间的质构特性差异, 可以为火腿的品质调控提供理论依据。

关键词: 干腌火腿; 水分迁移; 弛豫现象; 质构特性

Study on moisture distribution and texture characteristics of 5 kinds of hams in Yunnan

YANG Zi-Jiang^{1,2}, ZHAO Ya-Ying^{1,2}, WANG Gui-Ying^{1,2*}, YIN Xiao-Yan^{1,2},
ZHANG Li-Hong^{1,2}, TIAN Mei^{1,2}, GE Chang-Rong², LIAO Guo-Zhou^{2*}

(1. College of Food Science and Technology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. Livestock Product Processing and Engineering Technology Research Center of Yunnan Province, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

ABSTRACT: Objective To explore the difference and correlation between moisture distribution and textural characteristics of 5 kinds of hams in Yunnan. **Methods** The moisture distribution and textural characteristics of hams in different regions were measured by low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) and texture profile analysis (TPA) with one-year old Xuanwei Ham, Nuodeng Ham, Saba Ham, Sanchuan Ham and Heqing Ham as raw

基金项目: 云南省中青年学术和技术带头人后备人才项目(202105AC160068)、云南省科技计划项目重大科技专项(2019ZG003)

Fund: Supported by the Yunnan Young and Middle-aged Academic and Technical Leaders Reserve Talent (202105AC160068), and the Major Science and Technology Projects of Yunnan Science and Technology Plan (2019ZG003)

*通信作者: 王桂瑛, 硕士, 副教授, 主要研究方向为食品加工与质量控制。E-mail: ynkmgwy@ynau.edu.cn

廖国周, 博士, 教授, 主要研究方向为肉品加工与质量控制。E-mail: liaoguo Zhou@ynau.edu.cn

*Corresponding author: WANG Gui-Ying, Master, Associate Professor, College of Food Science and Technology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China. E-mail: ynkmgwy@ynau.edu.cn

LIAO Guo-Zhou, Ph.D, Professor, Livestock Product Processing and Engineering Technology Research Center of Yunnan Province, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China. E-mail: liaoguo Zhou@ynau.edu.cn

materials. **Results** The transverse relaxation time (T_2) of non-flowing water and free water of Saba Ham were 26.29 and 151.13 ms respectively, which were significantly higher than those of the other 4 kinds of ham ($P<0.05$); the unit mass signal quantity (A_{22}) of non-flowing water of 5 kinds of ham was higher than that of bound water (A_{21}) and free water (A_{23}), among them, the A_{22} of Saba Ham was 8857.97, which was significantly higher than that of the other 4 kinds of ham ($P<0.05$); the hardness, chewiness and cohesiveness of Xuanwei Ham were the highest among the 5 kinds of ham, while the springiness and resilience were the lowest among the 5 kinds of ham; correlation analysis showed that the content of non-flowing water was significantly positively correlated with resilience and springiness ($P<0.01$), negatively correlated with hardness ($P<0.05$), and negatively correlated with chewiness and cohesiveness ($P<0.01$), the content of free water was positively correlated with springiness and resilience ($P<0.01$), while the content of bound water had no significant correlation with texture indexes. **Conclusion** This study shows that the water which is not easy to flow is dominant in 5 kinds of hams, and the change of its content in 5 kinds of hams leads to the difference of texture characteristics among hams, which can provide theoretical basis for the quality control of hams.

KEY WORDS: dry-cured ham; moisture migration; relaxation phenomenon; texture characteristics

0 引 言

干腌火腿是一种很受欢迎的腌腊肉制品, 其以猪后腿为原料, 食盐为主要腌制剂, 经历长时间腌制发酵而成^[1-2]。干腌火腿品质受多种因素影响, 包括火腿原料、地理气候、腌制工艺条件和腌制时间等^[3]。腌制发酵过程中其会发生多种物理化学变化, 包括水分损失、质构变化、蛋白质和脂肪降解等, 对火腿特征品质的形成有重要贡献^[4]。

通过低场核磁共振 (low-field nuclear magnetic resonance, LF-NMR) 来测量氢原子核在强静磁场中射频脉冲作用下的横向和纵向弛豫时间, 可以将肉制品的水分分布、迁移和含量进行量化分析, 该方法具有快速、无损等优点^[5]。其检测到的横向弛豫时间(T_2)信号幅度变化范围大、对多相态敏感、检测时间短^[6]。质构特性可以反映肉制品的物理性质和组织结构, 包括硬度、脆性、黏着性、弹性和内聚性等^[7]。质地剖面分析(texture profile analysis, TPA)是一种质构分析的有效手段, 其作为食品质构感官评价和仪器分析的桥梁, 通过模拟人类牙齿的咀嚼过程替代人体感官评价, 使感官评定更具客观性与准确性^[8]。然而, 在肉制品中, 不同状态水分含量与质构特性之间具有内在联系^[9]。

宣威火腿、撒坝火腿、三川火腿、诺邓火腿和鹤庆火腿是云南省具有代表性的 5 种干腌火腿, 其主要分布于海拔 2000 m 左右的云南北部多个地区, 均以传统自然发酵方式进行加工, 生产季节性强, 发酵周期长^[10]。由于云南独特的立体气候, 不同地区的温湿度存在较大差异, 从而促进各种火腿特征品质的形成。目前各种云南火腿中水分分布及质构特性差异鲜见报道, 因此本研究以一年陈的 5 种云南火腿为对象, 通过 LF-NMR 技术测定 5 种火腿的 T_2 及弛豫峰面积(A_2), 分析不同地区火腿的水分分布及含量, 同时以 TPA 分析 5 种火腿的硬度、弹性、咀嚼性、内聚性和回复性, 进一步探讨 5 种云南火腿的水分分布与质构特

性的内在联系, 为云南火腿的加工与品质调控提供科学理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

宣威火腿、诺邓火腿、撒坝火腿、三川火腿和鹤庆火腿分别由宣威市浦记火腿食品有限公司、大理州云龙县诺邓火腿食品厂、昆明建国撒坝火腿有限公司、丽江三川火腿有限公司以及鹤庆县一香食品有限公司提供, 均为一年陈火腿(2018 年 1 月—2019 年 1 月), 每种火腿随机选取 5 条作为试验样品。

1.2 试验仪器

Meso MR23-060H-I 型台式核磁共振分析仪(上海纽迈电子科技有限公司); TA. new plus 质构仪(美国 ISENSO 公司)。

1.3 试验方法

1.3.1 样品制备

分别选取 5 种火腿的股二头肌部位, 去除结缔组织和皮下脂肪作为样品。

1.3.2 LF-NMR 弛豫时间测定

结合课题组前期的方法^[11], 用刀修整肉块的边沿, 并找出肌纤维的自然走向, 沿肌原纤维方向取 2.0 g 左右的火腿样品, 并修整为 2 cm×1 cm×1 cm 的火腿肉样, 放入 25 mm 核磁专用检测管中进行测定。使用低场核磁共振仪采集 T_2 样品信号, 并使用 SIRT 算法 100000 次迭代拟合, 每条火腿样品测定 3 次, 分析其弛豫现象。在 32 °C、23.312 MHz 共振频率下, 使用弛豫时间编辑(carr-purcell-meiboom-gill, CPMG)脉冲序列(90°脉冲和 180°脉冲之间的时间 $\tau = 200 \mu\text{s}$), 重复扫描 8 次, 间隔 3 s, 得到 3000 个回波。

1.3.3 质构测定

准确将火腿样品切成 1.5 cm×1.5 cm×1.5 cm 的正方形

小块,使用质构仪测定肌肉组织的硬度、弹性、咀嚼性、内聚性和回复性。测定条件:探头型号 P50,下压变形率 50%,测试前探头速度 2 mm/s,测试中探头速度 1 mm/s,测试后探头速度 1 mm/s,触发力为 5 g,每条火腿样品测定 3 次。

1.4 数据分析

所有样品均进行 3 次重复测定,用 Excel 2010 对数据进行初步整理后,按“平均值±标准偏差”记录,以 SPSS 21.0 软件进行数据统计分析,对各组进行单因素方差分析(one-way analysis of variance, ANOVA),并用邓肯氏复极差法(Dunken's)进行多重显著性差异分析, $P<0.05$ 作为显著差异检验的标准。

2 结果与分析

2.1 5 种火腿中的不同状态水分含量差异

低场核磁共振技术可以通过测定 T_2 来反映水分子的存在状态,从而分析水分子与肌肉组织的相互作用^[12]。 T_2 弛豫时间反应的是氢质子的自由度以及受到的束缚力^[13]。分析结果表明,宣威火腿、诺邓火腿、三川火腿、鹤庆火腿和撒坝火腿样品中均含有 3 个特征峰,分别为 T_{21} 、 T_{22} 、 T_{23} 峰,3 个峰之间的分界明显。 T_{21} 峰对应结合水相态,结合水通常与肌肉蛋白表面的极性基团紧密结合,弛豫时间在 0~10 ms 以内; T_{22} 峰为肌原纤维内的不易流动水,弛豫时间在 10~100 ms 以内; T_{23} 峰代表自由水,存在于肌原纤维外部与细胞间隙,弛豫时间在 100~1000 ms 范围内^[14]。5 种火腿中不同状态水分的 T_2 差异见表 1。

由表 1 可知,在 5 种火腿中,鹤庆火腿结合水 T_{21} 最长为 1.35 ms,显著长于诺邓火腿($P<0.05$),但与其他火腿相

比没有显著性差异($P>0.05$)。5 种火腿的不易流动水 T_{22} 排序为:撒坝火腿>鹤庆火腿>三川火腿>诺邓火腿>宣威火腿,其中撒坝火腿的 T_{22} 值集中在 24.17~28.48 ms 之间,与其他 4 种火腿相比,其 T_{22} 相对较长,显著长于其他 4 种火腿($P<0.05$)。宣威火腿的 T_{22} 值最小,在 12.83~14.17 ms 之间,不易流动水氢质子所受到的束缚力较大,自由度相对较小,可能是由于宣威当地的温度在 5 个地区中相对较低^[10]。5 种火腿自由水 T_{23} 由大到小依次为:撒坝火腿>鹤庆火腿>三川火腿>诺邓火腿>宣威火腿,撒坝火腿的 T_{23} 值集中在 133.98~166.75 ms 之间,显著长于其他 4 种火腿($P<0.05$),自由水流动性相对较好。

T_2 弛豫曲线的峰面积与氢质子的含量成正比,即峰面积越大,对应水分子的含量越高^[15]。 A_{21} 、 A_{22} 和 A_{23} 分别表示 T_{21} 、 T_{22} 和 T_{23} 的峰面积,云南 5 种火腿 T_2 峰面积差异见表 2。

由表 2 可知,5 种火腿样品的整体峰面积大小为: $A_{22}>A_{23}>A_{21}$,说明在 5 种火腿中水分主要以不易流动水的形式存在。在 5 种火腿样品中, A_{21} (结合水)均无显著性差异($P>0.05$)。 A_{22} (不易流动水)是干腌火腿中水分的主要存在形式,5 种火腿的不易流动水单位质量信号量(A_{22})大小为:撒坝火腿>鹤庆火腿>三川火腿>诺邓火腿>宣威火腿,其中撒坝火腿的不易流动水含量显著高于其他 4 种火腿($P<0.05$),而宣威火腿中的不易流动水含量最低。 A_{23} 则代表自由水单位质量信号量,自由水是干腌火腿中水分活度最大的水,5 种火腿中 A_{23} 排序为:宣威火腿>诺邓火腿>三川火腿>鹤庆火腿>撒坝火腿,其中宣威火腿的自由水含量最高,撒坝火腿最低,宣威火腿自由水含量显著高于鹤庆火腿和撒坝火腿($P<0.05$),与其他 2 种火腿相比差异不显著($P>0.05$)。

表 1 云南 5 种火腿的横向弛豫时间差异($n=5$)
Table 1 Differences in transverse relaxation time of 5 kinds of ham in Yunnan ($n=5$)

火腿 指标	宣威火腿	诺邓火腿	三川火腿	鹤庆火腿	撒坝火腿
T_{21}/ms	1.21±0.22 ^{ab}	1.07±0.08 ^b	1.22±0.07 ^{ab}	1.35±0.14 ^a	1.18±0.06 ^{ab}
T_{22}/ms	13.39±0.49 ^d	17.19±1.49 ^c	17.50±1.42 ^c	20.20±0.99 ^b	26.29±2.06 ^a
T_{23}/ms	100.39±9.91 ^c	102.83±4.94 ^c	107.99±7.57 ^c	124.04±13.52 ^b	151.13±14.88 ^a

注:表中数据均为均值±标准偏差;同行肩标不同字母表示差异显著($P<0.05$),下同。

表 2 云南 5 种火腿 T_2 峰面积差异($n=5$)
Table 2 Differences in T_2 peak area of 5 kinds of ham in Yunnan ($n=5$)

火腿 指标	宣威火腿	诺邓火腿	三川火腿	鹤庆火腿	撒坝火腿
A_{21}	169.41±14.18 ^a	167.17±10.60 ^a	148.77±18.83 ^a	150.54±17.88 ^a	157.71±15.54 ^a
A_{22}	7221.57±271.21 ^c	7500.00±316.74 ^c	7751.46±356.98 ^{bc}	8240.58±408.17 ^b	8857.97±475.50 ^a
A_{23}	1269.64±108.08 ^a	1090.54±114.36 ^a	963.34±108.18 ^a	877.37±103.56 ^b	823.52±96.74 ^c

2.2 云南 5 种火腿质构特性差异分析

本试验研究了云南 5 种火腿的 5 个质构特性指标, 分别为硬度、弹性、咀嚼性、内聚性和回复性, 用以判断不同地区火腿肌肉组织质构的差异, 如表 3 所示。

表 3 展示了云南 5 种火腿质构特性的差异。硬度是描述使食品形变或穿透产品所需的力有关的机械质地特性, 是食品保持形状的内部结合力^[16]。5 种火腿的硬度从大到小依次为: 宣威火腿>诺邓火腿>三川火腿>鹤庆火腿>撒坝火腿, 其中宣威火腿的硬度最大为 9298.69 g, 分别比鹤庆火腿和撒坝火腿显著高出 24.54% ($P<0.05$)与 28.95% ($P<0.05$)。弹性表示物体在外力作用下发生形变, 撤去外力后恢复为原来状态的能力^[17]。5 种火腿的弹性排序为: 撒坝火腿>鹤庆火腿>三川火腿>诺邓火腿>宣威火腿, 与硬度值相反。其中撒坝火腿的弹性值最大为 0.58, 显著高于其他 4 种火腿($P<0.05$)。咀嚼性是指将固体食品咀嚼到可吞咽时所需做功的大小^[18]。在 5 种火腿中咀嚼性最大的是宣威火腿, 为 2845.47, 最小的是撒坝火腿, 比宣威火腿低 58.61% ($P<0.05$)。内聚性可用于反应火腿细胞组织间的结合力大小^[19]。宣威火腿的内聚性在 5 种火腿中最大, 达 0.53, 分别比诺邓火腿、三川火腿、鹤庆火腿和撒坝火腿高 0.10 ($P>0.05$)、0.23 ($P<0.05$)、0.36 ($P<0.05$)与 0.61 ($P<0.05$)倍, 5 种火腿的内聚性均与硬度呈正相关。回复性反映了食

品以弹性形变保存的能量, 表示形变样品在与导致形变同样的速度、压力条件下回复的程度^[20]。5 种火腿的回复性大小为: 撒坝火腿>鹤庆火腿>诺邓火腿>三川火腿>宣威火腿, 撒坝火腿的回复性最大, 为 0.22, 显著高于宣威火腿 ($P<0.05$), 与其他 3 种火腿相比差异不显著($P>0.05$)。

2.3 云南 5 种火腿不同状态水分与质构的 Pearson 相关性

表 4 显示了 5 种云南火腿不同状态水分与质构的相关性分析结果。

由表 4 可知, 5 种火腿的弹性、回复性与不易流动水呈极显著正相关($P<0.01$), 表明 5 种火腿随着不易流动水含量升高, 弹性与回复性也越好。硬度与不易流动水呈显著负相关($P<0.05$), 咀嚼性、内聚性与不易流动水呈极显著负相关($P<0.01$), 在 5 种火腿中, 不易流动水含量越高, 火腿的硬度、咀嚼性和内聚性则越小。结合水与 5 种火腿的硬度、弹性、咀嚼性和内聚性呈负相关, 与回复性呈正相关, 但均无显著性($P>0.05$), 说明结合水的含量对 5 种火腿的质构无明显影响。5 种火腿的弹性、回复性与自由水呈极显著正相关($P<0.01$), 表明自由水的含量越高, 5 种火腿的弹性与回复性也越大。综上所述, 云南 5 种火腿的不易流动水与自由水含量变化对火腿质构特性影响较显著, 可以通过 T_2 来判断云南 5 种火腿的质构特性差异。

表 3 云南 5 种火腿的质构特性差异($n=5$)
Table 3 Differences in texture characteristics of 5 kinds of ham in Yunnan ($n=5$)

火腿 质构指标	宣威火腿	诺邓火腿	三川火腿	鹤庆火腿	撒坝火腿
硬度/g	9298.69±1549.94 ^a	8998.65±1610.94 ^{ab}	7878.55±1136.39 ^{ab}	7466.40±1009.72 ^b	7210.97±1144.62 ^b
弹性	0.49±0.02 ^d	0.51±0.02 ^{cd}	0.53±0.02 ^{bc}	0.54±0.02 ^b	0.58±0.03 ^a
咀嚼性	2845.47±259.48 ^a	2156.10±345.44 ^b	1807.28±302.49 ^{bc}	1459.09±175.07 ^{cd}	1177.65±188.15 ^d
内聚性	0.53±0.04 ^a	0.48±0.03 ^a	0.43±0.03 ^b	0.39±0.04 ^c	0.33±0.02 ^d
回复性	0.17±0.02 ^b	0.20±0.01 ^{ab}	0.18±0.02 ^a	0.21±0.02 ^a	0.22±0.02 ^a

表 4 云南 5 种火腿不同状态水分与质构的 Pearson 相关性
Table 4 Pearson correlation between different states moisture and texture of 5 kinds of ham in Yunnan

相关性	硬度	弹性	咀嚼性	内聚性	回复性	结合水	不易流动水	自由水
硬度	1	-0.371	0.804**	0.483*	-0.14	-0.037	-0.496*	-0.315
弹性		1	-0.692**	-0.752**	0.465*	-0.064	0.815**	0.710**
咀嚼性			1	0.876**	-0.442*	-0.165	-0.806**	-0.628**
内聚性				1	-0.493*	-0.246	-0.852**	-0.758**
回复性					1	0.071	0.615**	0.557**
结合水						1	0.1	0.299
不易流动水							1	0.890**
自由水								1

注: *表示 $P<0.05$ 显著相关; **表示 $P<0.01$ 极显著相关。

3 讨 论

水分分布及含量差异,对火腿的色泽、嫩度、风味、保水性等多项品质指标存在潜在影响^[21-22]。LF-NMR 可以对样品中的含氢流体进行监测,实现在无损条件下观察样品中含氢流体的分布和变化规律。 T_2 值越高,水分子的流动性越高,在 T_2 图谱上峰位置越靠右;而 T_2 值越低,水分子的流动性越差,在 T_2 图谱上峰位置越靠左^[23]。在 5 种火腿中,结合水 T_{21} 最短,均在 1~2 ms 之间,其次是不易流动水 T_{22} (10~30 ms 之间),最长为自由水 T_{23} (90~170 ms 之间)。有研究报道^[24],弛豫时间越短说明水与底物结合越紧密,越长则表明水分子越易流动,与本研究结果一致。结合水含量(A_{21})在 5 种火腿中均无显著性差异($P>0.05$),表明腌制工艺、当地气候条件和用盐量等对火腿结合水无显著性影响。不易流动水含量(A_{22})在 5 种火腿中均高于结合水(A_{21})和自由水(A_{23}),占主要优势,其在撒坝火腿中最高,在宣威火腿中最低,可能是由于禄劝地区的相对湿度较高,造成含水量差异^[10]。不易流动水对于火腿的保水性具有决定性作用,其可通过溶解火腿内部的小分子物质增强蛋白质分子间的互斥力,使肌纤维结构变松弛,从而提高肉制品的保水能力^[25]。水分子流动性的降低,也可以增强肉制品的保水性^[26]。随着火腿内总含水率的降低,结合水 T_{21} 变化不明显,而不易流动水 T_{22} 和自由水 T_{23} 则随着总含水率的降低呈现减少趋势。赵亚等^[14]报道,含水率的变化与 T_2 (T_{21} 、 T_{22} 、 T_{23})的相关性取决于食品种类及组成、预处理方式等诸多因素。

火腿品质既取决于原料的某些特性(如遗传因素、pH、内源酶活性、保水能力),也取决于工艺变量(如食盐用量、温度和相对湿度)^[27]。质构特性反应了肉类结构物理特性^[28]。在 5 种火腿中,宣威火腿的硬度最大,显著高于鹤庆火腿和撒坝火腿($P<0.05$),宣威地区的相对湿度在 5 个地区内较低,造成火腿水分含量较少,质构测定中硬度也较大^[10]。郝红涛等^[29]报道,硬度受肉制品中水分含量、蛋白质含量以及脂肪含量等因素的影响,不同品种火腿成熟过程中蛋白质降解方式存在差异,盐溶性蛋白析出速率不同,从而导致硬度存在一定差异。撒坝火腿的弹性值最大,显著高于其他 4 种火腿($P<0.05$)。赵宇鹏等^[30]报道,肉制品的弹性与原料肉的种类和物理化学性质有关。火腿中的蛋白质与其水化层形成网状结构,有一定抵抗外力的能力,5 种火腿中水分含量与蛋白质差异导致了弹性的不同,火腿中的水分含量越高,硬度越小,反而弹性越大。咀嚼性最大的为宣威火腿,显著高于其他 4 种火腿($P<0.05$),5 种火腿的咀嚼性均随着硬度的增大而增大,主要是由于火腿内水分含量的降低,导致肌肉组织硬度上升,将火腿咀嚼到可吞咽状态时所需要做的功就越多。宣威火腿的内聚性也最大,与硬度呈正相关,火腿失水导致细胞结构受到损伤,细胞内部

结合力降低。李斌等^[31]研究发现,内聚性与样品分子内部的蛋白基质结构有关,联结不紧密会使得内聚性降低。LUND 等^[32]报道,蛋白质氧化和降解不仅促进腌腊肉风味的形成,更对腌腊肉质构形成有重要的影响。撒坝火腿的回复性最大,5 种火腿的回复性呈现出随着硬度的增大而降低的趋势,可能与火腿内的水分含量和肌原纤维破坏有关,在一定范围内,火腿的含水率越高,硬度越小,回复性越大。

RENOU 等^[33]研究表明,肉制品中水分的存在状态与感官特性具有较强的相关性。本研究结果表明,5 种火腿中随着不易流动水含量升高,弹性与回复性越好,而硬度与不易流动水呈显著负相关($P<0.05$),咀嚼性、内聚性与不易流动水呈极显著负相关($P<0.01$)。甘潇等^[34]研究表明,随着肉品的持水力下降,会使肉样中含水量下降,从而使硬度、胶着性和咀嚼性等质构特性增加。不易流动水对于干腌火腿的保水性具有决定性作用,因此在本研究结果中,不易流动水与质构特性表现出明显的相关性。此外,由于各地区火腿中食盐添加量不同,会造成火腿保水性的差异,火腿保水性会随着食盐添加量的降低而不断减弱,进而影响各地区火腿质构特性^[35-36]。

4 结 论

本研究通过 LF-NMR 和 TPA 发现,不易流动水含量在 5 种云南火腿中占主要优势,其在撒坝火腿中最高,宣威火腿中最低,对火腿的保水性具有决定性作用。撒坝火腿中不易流动水和自由水的流动性均高于其他 4 种火腿;结合质构指标,不易流动水含量能显著影响 5 种火腿的质构特性,不易流动水含量越高,火腿的回复性、弹性越高,硬度、咀嚼性和内聚性越低,自由水含量也与火腿的弹性、回复性呈极显著正相关($P<0.01$),而结合水含量则对质构特性无显著影响。不易流动水含量是影响 5 种火腿质构特性的重要因素,未来研究可以通过检测不易流动水含量变化间接反应火腿的质构特性变化,实现火腿质构特性的无损检测。本研究结果可以为火腿的精深加工及品质调控提供理论依据。

参考文献

- [1] 杨子江,张丽红,王桂瑛,等.无硝干腌火腿中红色素形成机制研究进展[J/OL].食品科学,1-11. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.ts.20211220.1509.024.html>
- [2] YANG ZJ, ZHANG LH, WANG GY, *et al.* Advances in formation mechanism of red pigment derived from nitrate free dry-cured ham [J/OL]. Food Sci, 1-11. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.ts.20211220.1509.024.html>
- [2] 李平,张志,周辉,等.干腌火腿中肽的形成机理研究进展[J].食品与发酵工业,2022,48(4):294-300.
- LI P, ZHANG Z, ZHOU H, *et al.* Research progress on the formation

- mechanism of peptides in dry cured ham [J]. Food Ferment Ind, 2022, 48(4): 294–300.
- [3] QIAN K, BAO Y, ZHU JX, *et al.* Development of a portable electronic nose based on a hybrid filter-wrapper method for identifying the Chinese dry-cured ham of different grades [J]. J Food Eng, 2021, 290: 110250.
 - [4] WANG WL, LI Y, ZHOU XR, *et al.* Changes in the extent and products of *in vitro* protein digestion during the ripening periods of Chinese dry-cured hams [J]. Meat Sci, 2021, 171: 108290.
 - [5] XUAN Y, XIANG YL, YANG J, *et al.* Analysis of internal moisture change of camphor seeds during drying by low-field NMR [J]. Agric Biotechnol, 2019, 8(4): 119–122.
 - [6] 谢安国, 王满生, 石晓微, 等. 牛肉加热过程中低场核磁共振信号与品质特征的动态分析[J]. 食品与机械, 2020, 36(7): 23–27, 71.
XIE ANG, WANG MS, SHI XW, *et al.* Dynamic analysis of LF-NMR relaxation signals and quality characteristics during heating beef [J]. Food Mach, 2020, 36(7): 23–27, 71.
 - [7] CAMPOS AKRD, CAVALIERI-POLIZELI KMV, MELO VDF. Effects of compaction on lead availability in contaminated soils with contrasting texture [J]. Environ Monit Assess, 2020, 192(11): 672.
 - [8] 田晓静, 王俊. 质构分析在肉制品检测中的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2014, 5(6): 1654–1660.
TIAN XJ, WANG J. Application of texture analysis on quality detection of meat products [J]. J Food Saf Qual, 2014, 5(6): 1654–1660.
 - [9] 赵家艺, 马梦斌, 李亚蕾, 等. 加热温度对酱卤牛肉肉质特性及水分分布的影响[J]. 肉类研究, 2020, 34(7): 18–21.
ZHAO JY, MA MB, LI YL, *et al.* Effect of reheating temperature on texture properties and moisture distribution of sauced beef [J]. Meat Res, 2020, 34(7): 18–21.
 - [10] LIU SY, WANG GY, XIAO ZC, *et al.* ¹H-NMR-based water-soluble low molecular weight compound characterization and free fatty acid composition of five kinds of Yunnan dry-cured hams [J]. LWT-Food Sci Technol, 2019, 108: 174–182.
 - [11] 俞媛瑞, 王桂瑛, 罗雨婷, 等. 武定鸡加工过程理化指标与特征风味变化研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(3): 90–97.
YU YR, WANG GY, LUO YT, *et al.* Changes of physicochemical indexes and characteristic flavor substances in Wuding chicken processing [J]. Food Ind Sci Technol, 2020, 41(3): 90–97.
 - [12] 孙文彬, 罗欣, 张一敏, 等. 低场核磁共振在肉与肉制品水分测定与分析中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2019, 40(15): 346–351.
SUN WB, LUO X, ZHANG YM, *et al.* A review of the application of low field nuclear magnetic resonance in detection and analysis of water in meat and meat products [J]. Food Sci, 2019, 40(15): 346–351.
 - [13] 王尊, 谢晶, 钱韻芳. 带鱼冷藏过程中品质变化与水分迁移的相关性[J]. 食品科学, 2017, 38(13): 257–262.
WANG Z, XIE J, QIAN YF. Correlation between quality change and moisture migration of *Trichiurus haumela* during cold storage [J]. Food Sci, 2017, 38(13): 257–262.
 - [14] 赵亚, 朱智壮, 刘静, 等. 基于LF-NMR的超声波预处理时间对扇贝柱热泵干燥动力学及品质特性的影响[J/OL]. 食品科学, 1–13. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20211203.0056.004.html>
ZHAO Y, ZHU ZZ, LIU J, *et al.* Effects of ultrasonic pretreatment time on the drying kinetics and quality attributes of heat pump dried scallop adductors [J/OL]. Food Sci, 1–13. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20211203.0056.004.html>
 - [15] 薛广, 李敏, 关志强, 等. 基于低场核磁共振的罗非鱼片微波真空干燥过程水分变化规律[J]. 广东海洋大学学报, 2020, 40(6): 123–129.
XUE G, LI M, GUAN ZQ, *et al.* Moisture change of tilapia fillet in microwave vacuum drying process based on low-field nuclear magnetic resonance [J]. J Guangdong Ocean Univ, 2020, 40(6): 123–129.
 - [16] 刘庆珊, 何雁, 曹秋芳, 等. 基于 LF-NMR/MRI 的白芍润制过程水分状态及质构相关性的研究[J]. 中国中药杂志, 2020, 45(20): 4882–4888.
LIU QS, HE Y, CAO QF, *et al.* Correlation between water state and texture during moistening of *Paeoniae radix* Alba by LF-NMR/MRI [J]. China J Chin Mater Med, 2020, 45(20): 4882–4888.
 - [17] 尚坤, 陈金玉, 张坤生, 等. 鸡胸肉冻藏温度下的理化和感官特性变化研究[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(1): 1–6.
SHANG K, CHEN JY, ZHANG KS, *et al.* Study on the changes of physicochemical and sensory properties of chicken breast at frozen storage temperatures [J]. Food Res Dev, 2019, 40(1): 1–6.
 - [18] JANNAT-ALIPOUR H, REZAEI M, SHABANPOUR B, *et al.* Addition of seaweed powder and sulphated polysaccharide on shelf life extension of functional fish surimi restructured product [J]. J Food Sci Technol, 2019, 56(8): 3777–3789.
 - [19] 谢安国, 康怀彬, 王飞翔, 等. 高光谱成像检测煎制中调理牛肉品质的变化[J]. 食品与机械, 2018, 34(11): 20–23, 54.
XIE ANG, KANG HB, WANG FX, *et al.* Visual detection of beef quality during frying process by hyper spectral imaging technology [J]. Food Mach, 2018, 34(11): 20–23, 54.
 - [20] 吴立根, 王岸娜, 屈凌波. 热压活化麸皮对馒头冷藏期间水分分布及质构影响的研究[J]. 粮油食品科技, 2020, 28(5): 117–124.
WU LG, WANG ANN, QU LB. Study on the effect of fine bran processed by heating and pressuring on the water distribution and structure of the steamed bread in cool storage [J]. Sci Technol Cere Oils Foods, 2020, 28(5): 117–124.
 - [21] 姜秀丽, 牛海力, 孔保华, 等. 烘干温度对牛肉干水分分布与品质相关性的影响[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(21): 10–14, 15.
JIANG XL, NIU HL, KONG BH, *et al.* The relationship between water distribution and quality of beef jerky as attributed to different drying temperatures [J]. Food Res Dev, 2016, 37(21): 10–14, 15.
 - [22] SCUSSAT S, VAULOT C, OTT F, *et al.* The impact of cooking on meat microstructure studied by low field NMR and neutron tomography [J]. Food Struct, 2017, 14: 36–25.
 - [23] XU FF, JIN X, ZHANG L, *et al.* Investigation on water status and distribution in broccoli and the effects of drying on water status using NMR and MRI methods [J]. Food Res Int, 2017, 96: 191–197.
 - [24] 孟林, 李艳萍, 康壮丽, 等. 谷氨酰胺转氨酶对鸭胸肉糜凝胶性能的影响[J]. 肉类研究, 2019, 33(8): 25–28.
MENG L, LI YP, KANG ZL, *et al.* Impact of transglutaminase on gel properties of duck breast meat batter [J]. Meat Res, 2019, 33(8): 25–28.
 - [25] 赵改名, 银峰, 祝超智, 等. 滚揉腌制对牛肉盐火腿品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(15): 72–78.
ZHAO GM, YIN F, ZHU CZ, *et al.* Effect of tumbling on the quality of beef brined ham [J]. Food Sci, 2020, 41(15): 72–78.
 - [26] 魏法山, 高在上, 张涛, 等. 不同温度处理的大豆分离蛋白乳化的大豆油对猪肉糜品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(22): 8852–8856.

- WEI FS, GAO ZS, ZHANG T, *et al.* Effects of the pre-emulsified soybean oils with soybean protein isolate treated by different temperatures on the quality of pork batter [J]. *J Food Saf Qual*, 2021, 12(22): 8852–8856.
- [27] 许倩, 朱秋劲, 叶春, 等. 低场核磁共振分析冰温牛肉中不同状态水分变化[J]. *肉类研究*, 2013, 27(5): 17–21.
- XU Q, ZHU QJ, YE C, *et al.* LF-NMR studies of variations of different water states during controlled freezing point storage of beef [J]. *Meat Res*, 2013, 27(5): 17–21.
- [28] 王耀球, 卜坚珍, 于立梅, 等. 不同品种、不同部位对鸡肉质构特性与同位素的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2018, 9(1): 87–92.
- WANG YQ, BU JZ, YU LM, *et al.* Effects of different varieties and different parts on texture and isotope composition of chicken [J]. *J Food Saf Qual*, 2018, 9(1): 87–92.
- [29] 郝红涛, 赵改名, 柳艳霞, 等. 肉类制品的质构特性及其研究进展[J]. *食品与机械*, 2009, 25(3): 125–128.
- HAO HT, ZHAO GM, LIU YX, *et al.* The texture characteristics and advances of meat products [J]. *Food Mach*, 2009, 25(3): 125–128.
- [30] 赵宇鹏, 卜坚珍, 于立梅, 等. 鸡肉的营养成分和质构特性研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2016, 7(10): 4096–4100.
- ZHAO YP, BU JZ, YU LM, *et al.* Nutrition composition and texture properties of chicken [J]. *J Food Saf Qual*, 2016, 7(10): 4096–4100.
- [31] 李斌, 陶敏, 徐丹丹, 等. 长江上游中华沙鳅食性特征的 C、N 同位素分析[J]. *水生生物学报*, 2016, 40(5): 978–984.
- LI B, TAO M, XU DD, *et al.* Diet of *Sinibotia supercilialis* by stable isotope signature from the upper reaches of the yangtze river [J]. *Acta Hydrobiol Sin*, 2016, 40(5): 978–984.
- [32] LUND MN, HEINONEN M, BARON CP, *et al.* Protein oxidation in muscle foods: A review [J]. *Mol Nutr Food Res*, 2011, 55(1): 83–95.
- [33] RENOU JP, FOUCAT L, BONNY JM. Magnetic resonance imaging studies of water interactions in meat [J]. *Food Chem*, 2003, 82(1): 35–39.
- [34] 甘潇, 李洪军, 王兆明, 等. KCl 部分替代 NaCl 对腊肉蛋白质氧化、降解及质构的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(4): 167–173.
- GAN X, LI HJ, WANG ZM, *et al.* Effect of partial replacement of NaCl by KCl on protein oxidation, proteolysis and texture of bacon [J]. *Food Ferment Ind*, 2019, 45(4): 167–173.
- [35] SCHIVAZAPPA C, VIRGILI R. Impact of salt levels on the sensory profile and consumer acceptance of Italian dry-cured ham [J]. *J Sci Food Agric*, 2020, 100(8): 3370–3377.
- [36] 黄梅香, 张建林, 王海滨. 降低食盐添加量对火腿肠的感官、质构及保水特性的影响[J]. *食品科学*, 2011, 32(7): 125–128.
- HUANG MX, ZHANG JL, WANG HB. Effects of reducing the amount of salt on the sensory, texture and water retention characteristics of ham sausage [J]. *Food Sci*, 2011, 32(7): 125–128.

(责任编辑: 张晓寒 韩晓红)

作者简介



杨子江, 硕士研究生, 主要研究方向为肉品加工与质量控制。

E-mail: 1301782832@qq.com

王桂瑛, 硕士, 副教授, 主要研究方向为食品加工与质量控制。

E-mail: ynkmgwy@ynau.edu.cn



廖国周, 博士, 教授, 主要研究方向为肉品加工与质量控制。

E-mail: liaoguozhou@ynau.edu.cn