

# 主成分分析法研究拉伸温度对纤丝干酪理化特性的影响

苗颖<sup>1,2</sup>, 张爱琳<sup>1</sup>, 赵征<sup>2</sup>

(1. 天津农学院食品科学与生物工程学院, 天津市农副产品深加工技术工程中心, 天津 300384)

(2. 天津科技大学教育部食品营养与安全重点实验室, 天津 300457)

**摘要:** 用单螺杆拉伸机制作纤丝干酪, 采用主成分分析法分析拉伸温度对纤丝干酪主要理化性质的影响规律。研究表明, 未经拉伸的凝块和 70 °C 拉伸的纤丝干酪的共同特征是可榨乳清含量高, 结合水、束缚水和自由水流动性强, 束缚水和自由水组分比例高,  $L^*$  和  $a^*$  值高, 同时结合水组分比例低、硬度、胶黏性、咀嚼性和回复性低; 90 °C 拉伸的纤丝干酪样品与其他拉伸温度干酪样品相比可榨乳清含量较低, 结合水、束缚水和自由水流动性弱, 束缚水和自由水组分比例小,  $L^*$  和  $a^*$  值低, 同时结合水组分比例高、硬度、胶黏性、咀嚼性和回复性高。拉伸温度对纤丝干酪弹性、 $b^*$  和  $C$  影响不显著 ( $p > 0.05$ )。运用主成分分析建立了拉伸温度与纤丝干酪理化指标的主成分综合评估模型。结合主成分评分, 拉伸温度为 80 °C 且螺杆转速为 45 r/min 时, 纤丝干酪能获得最佳的理化性质。

**关键词:** 主成分分析; 拉伸温度; 纤丝干酪; 理化特性

文章编号: 1673-9078(2014)12-48-54

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2014.12.009

## Influence of Stretching Temperature on the Physicochemical Properties of String Cheese Based on Principal Component Analysis

MIAO Ying<sup>1,2</sup>, ZHANG Ai-lin<sup>1</sup>, ZHAO Zheng<sup>2</sup>

(1. College of Food Science and Biotechnology, Tianjin Engineering and Technology Research Center of Agricultural Products Processing, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China) (2. Key Laboratory of Food Nutrition and Safety, Ministry of Education, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China)

**Abstract:** String cheeses were prepared using a single-screw extruder, and principal component analysis (PCA) was used to investigate the influence of the stretching temperature on their physicochemical properties. The results showed that both cheese curd and string cheese stretched at 70 °C had a high expressible serum content; strong mobility in bound, occluded, and free waters; a high proportion of occluded and free water components; high  $L^*$  and  $a^*$  values; a low proportion of bound water component; and low hardness, gumminess, chewiness, and resilience. Compared with the cheeses prepared at other stretching temperatures, string cheese prepared at a stretching temperature of 90 °C had a lower expressible serum content; weaker mobility in bound, occluded, and free waters; lower proportions of occluded and free water components; lower  $L^*$  and  $a^*$  values; higher proportion of bound water component; and higher hardness, gumminess, chewiness, and resilience. The elasticity,  $b^*$ , and  $c$  values of string cheese were not significantly influenced by the stretching temperature ( $p > 0.05$ ). The comprehensive assessment model of the stretching temperature and physicochemical properties of string cheese was established based on the PCA. The principal component score indicated that good physicochemical properties of string cheese could be obtained at 80 °C with a screw speed of 45 r/min.

**Key words:** principal component analysis; string cheese; stretching temperature; physicochemical properties

干酪含有丰富的蛋白质、脂肪、钙和维生素等营养成分, 易于消化, 有“奶黄金”之称, 是西方国家乳制品的主要消费点。随着我国经济的可持续发展,

收稿日期: 2014-06-10

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目 (2006BAD04A06)

作者简介: 苗颖 (1978-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 农产品贮藏与加工技术

通讯作者: 赵征 (1949-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向: 乳品科学

消费者对高附加值、高端乳制品的需求越来越旺盛, 目前高附加值乳制品占中国乳制品消费市场的 25%, 这一比例将随着国民收入的增长而快速增加。纤丝干酪是 Mozzarella 类干酪的一种, 由于纤丝干酪加工过程中存在热烫工艺, 食用安全, 成熟期较短, 可以冷冻保藏, 便于流通, 随着现代生活节奏的加快, 开发适合国人口味的纤丝干酪即食食品, 将成为今后的发展趋势<sup>[1]</sup>。

在纤丝干酪制造过程中,干酪凝块的热烫拉伸处理是典型的工艺。通常,干酪凝块在热水中被加热到熔化状态然后经过揉捏拉伸直到获得适当的质构。热烫拉伸处理使纤丝干酪具有独一无二的纤丝结构。机械拉伸的优势为每个独立的凝块颗粒被快速的混合并转变为连续的、具有流动性的混合物被泵入模具系统<sup>[2-3]</sup>,这将引起水分在新鲜的纤丝干酪中的不均匀分布。因此,热烫拉伸过程是一个不平衡的系统<sup>[4]</sup>。干酪是一个蛋白质、脂肪和水分混合的复杂的物质,当干酪的功能特性是由其微观结构决定的同时,对于酪理化特性的研究已经变得越来越重要。我国对纤丝干酪的研究目前正处于起步阶段,国内研究主要集中在工艺参数对干酪功能特性的研究上,罗洁等研究了乳化盐对Mozzarella干酪功能特性的影响<sup>[5]</sup>,郭媛等研究了堆叠pH值对Mozzarella干酪熔化特性的影响<sup>[6]</sup>,苗颖等研究了拉伸温度对纤丝干酪流变学特性及微观结构的影响<sup>[1]</sup>,但在拉伸温度对纤丝干酪主要理化指标的影响规律方面尚未有研究报道。主成分分析法(Principal Component Analysis)也称主分量分析,通过变量变换方法把相关变量变为若干不相关的综合指标变量,应用较少综合指标反应原来指标的一种统计方法<sup>[7]</sup>。主成分分析是多元数据降维的重要方法之一,应用广泛。Coker<sup>[8]</sup>等应用主成分分析法通过蛋白水解数据预测干酪的成熟程度。Martin<sup>[9]</sup>等应用主成分分析法对Camembert干酪红外光谱数据进行分析来评估红外光谱在奶酪成熟阶段描述奶酪特征的潜在应用性。本试验重点研究拉伸温度对纤丝干酪理化特性的影响,采用主成分分析法分析拉伸温度对纤丝干酪可榨乳清含量、T<sub>21</sub>、T<sub>22</sub>、T<sub>23</sub>、M<sub>21</sub>、M<sub>22</sub>、M<sub>23</sub>、硬度、胶黏性、咀嚼性、回复性、白度、红度等理化指标的影响规律,为纤丝干酪的工业化生产提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 原料

原料乳,购自塘沽奶牛养殖场;FD-DVS TCC-3直投式菌种(*Lactobacillus delbrueckii subspecies bulgaricus* & *Streptococcus thermophilus subsp.*),丹麦科汉森有限公司;Stamix1150凝乳酶,丹麦科汉森有限公司,含质量分数50%牛胃蛋白酶和质量分数50%小牛皱胃酶,酶活力1070 U/g。

### 1.2 主要仪器和设备

JT201N型电子天平,上海精天电子仪器有限公司;FE20型酸度计,梅特勒-托利多仪器有限公司;

DZ400-JO型多功能气调封口机,温州中聊包装机械有限公司;L420台式高速平衡离心机,北京雷勃尔离心机有限公司;TUST800型单螺杆干酪拉伸机,天津科技大学自制;UDK142凯式定氮仪,意大利Velp Scientific公司;TA-XT2i质构分析仪,英国Stable Micro System公司;NMI20型核磁共振分析仪,上海纽迈电子科技有限公司;CM-5分光测色计,Konica Minolta公司。

### 1.3 纤丝干酪工艺流程

纤丝干酪工艺流程:

新鲜牛乳→过滤→巴氏杀菌(63~65℃,30 min)→冷却(36~38℃)→加发酵剂、CaCl<sub>2</sub>(0.1 g/L)→凝乳酶凝乳→切割→加热收缩(41℃)→排乳清→堆酿→加盐→热烫拉伸→成型→冷却→包装→成品<sup>[10]</sup>

拉伸机螺杆转数固定为45 r/min,拉伸机夹套温度分别设定为70℃、80℃、90℃,即纤丝干酪成品分别为BT70、BT80、BT90,未经拉伸的新鲜凝块为FC。

### 1.4 纤丝干酪化学成分的测定

蛋白质含量的测定:参见GB 5009.5-2003中凯氏定氮法;脂肪含量的测定:参见GB/T 21375-2008中罗兹-哥特里法;水分含量的测定:参见GB 5009.3-2003中直接干燥法;灰分的测定:参见GB 5009.4-2010中食品中灰分的测定方法;pH值的测定:将10 g的干酪样品与10 mL脱除CO<sub>2</sub>的蒸馏水在研钵中混合,用pH计直接测定。

### 1.5 纤丝干酪可榨乳清质量分数的测定

称取15 g左右样品于离心管中,在25℃室温12500×g条件下离心75 min,弃去上清液并用滤纸吸干离心管壁残留水分的,最后计算可榨乳清占15 g样品量的百分比,即代表干酪持水力<sup>[11]</sup>。

$$\text{可榨乳清质量分数}(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中  $m_1$ -离心前样品质量, g;  $m_2$ -离心后样品质量, g。

### 1.6 自旋-自旋弛豫特性分析

干酪样品在0~4℃温度下保存,在制作之后的第1天测定样品的自旋-自旋弛豫时间 $T_2$ (ms)。样品直径10 mm,高度约为15 mm,装于15 mm外径的试管底部,置于磁场中心位置的射频线圈的中心,利用硬脉冲自由感应衰减信号(free induced decay, FID)调节共振中心频率,然后进行多脉冲回波序列

(carr-purcell-meiboom-gill, CPMG) 扫描试验, 轮流采样, 每个样品测试 3 遍<sup>[12]</sup>。仪器参数: 90°脉宽为 9.5 μs; 180°脉宽为 19 μs; 采样点数为 375 146; 采样谱宽为 250 kHz; 重复时间为 1500 ms; 累计扫描 4 次; 回波时间 100 μs; 回波个数为 7500。

低场核磁弛豫测量得到的图为多指数衰减曲线, 其数学模型为:

$$A(t) = \sum_i A_{0i} \exp\left(-\frac{t}{T_{2i}}\right) \quad (2)$$

式(2)中: A(t)-衰减到时间 t 时的幅值大小; t-衰减时间, ms; A<sub>0i</sub>-第 i 个组分平衡时的幅值大小; T<sub>2i</sub>-第 i 个组分的自旋-自旋弛豫时间, ms。

CPMG 指数衰减曲线用仪器自带的 MultiExp InvAnalysis 软件进行反演, 得到 T<sub>2</sub> 值。该软件使用整体迭代修正的 NMR 弛豫信号多指数反演算法, 结果为离散型与连续型相结合的 T<sub>2</sub> 谱。为了分析方便, 采用弛豫图每个组分峰值对应的时间作为 T<sub>2</sub>, 而弛豫峰的宽度为基线上峰底的宽度<sup>[13]</sup>。

### 1.7 TPA 分析

将干酪样品切割为 2 cm 的正方体, 放置于压缩盘上, 纤维方向垂直于压缩盘, 所有样品取样后至测试前统一放置于 0 °C~4 °C 冰箱中以防止温度对产品质地产生影响。每个样品取 4~6 个平行样。

质构仪参数设置: 测试前探头下降速度 5.0 mm/s; 测试速度 1.0 mm/s; 测试后探头回程速度 5.0 mm/s; 下压变形 40%; 触发力值 20 g; 探头类型 P/35<sup>[14]</sup>。

### 1.8 色差分析

所有样品取样后至测试前统一放置于 0 °C~4 °C 冰箱贮藏, 干酪样品用匹配 8 mm 直径测量孔和 D65 光源的 CM-5 分光测色计测定, 观察角 10°, 每个干酪样品上挑选三个无重叠区测定其 L\*(白度)、a\*(红度)、b\*(黄度)值<sup>[15]</sup>, 计算 C 色彩饱和度=(a\*<sup>2</sup>+b\*<sup>2</sup>)<sup>1/2</sup><sup>[16]</sup>。

### 1.9 数据处理

试验数据用 STATISTIX 8.1 软件进行处理, 试验数据采用完全随机设计方差分析, 均数之间采用 SSR 多重比较进行差异显著性分析, P<0.05 为差异有统计学意义。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同拉伸温度制作的纤维干酪成分分析

表 1 为不同拉伸温度制作的纤维干酪化学成分分析结果。从表 1 可以看出, 经过热烫拉伸后, 纤维干酪水分含量显著 (P<0.05) 下降, 脂肪含量降低, 拉伸温度高的 BT80、BT90 纤维干酪脂肪含量显著 (P<0.05) 降低, 蛋白质含量也降低, 但与未经拉伸的 FC 样品相比, 差异不显著 (P>0.05), 灰分含量四个样品差异不显著 (P>0.05), pH 值显著 (P<0.05) 升高。

表 1 干酪样品成分分析

样品	水分/%	脂肪/%	蛋白质/%	灰分/%	pH
FC	53.81±1.46 <sup>a</sup>	22.30±1.04 <sup>a</sup>	26.45±0.28 <sup>a</sup>	2.84±0.04 <sup>a</sup>	5.08±0.03 <sup>b</sup>
BT70	43.26±1.90 <sup>b</sup>	20.75±0.38 <sup>ab</sup>	25.02±0.79 <sup>a</sup>	2.49±0.11 <sup>a</sup>	5.16±0.02 <sup>a</sup>
BT80	44.30±2.03 <sup>b</sup>	19.25±0.48 <sup>b</sup>	25.41±0.05 <sup>a</sup>	2.48±0.13 <sup>a</sup>	5.20±0.03 <sup>a</sup>
BT90	45.30±1.57 <sup>b</sup>	19.10±0.28 <sup>b</sup>	25.72±0.32 <sup>a</sup>	2.73±0.06 <sup>a</sup>	5.30±0.03 <sup>a</sup>

注: 标有不同小写字母者表示组间差异显著 (P<0.05), 标有相同小写字母者表示组间差异不显著 (P>0.05)。

### 2.2 拉伸温度对纤维干酪可榨乳清含量影响

表 2 不同拉伸温度制作的纤维干酪的可榨乳清含量

测定项目	FC	BT70	BT80	BT90
可榨乳清质量分数/%	21.41±0.28 <sup>a</sup>	18.45±0.07 <sup>ab</sup>	14.80±0.80 <sup>bc</sup>	11.42±1.80 <sup>c</sup>

注: 标有不同小写字母者表示组间差异显著 (P<0.05), 标有相同小写字母者表示组间差异不显著 (P>0.05)。

可榨乳清为位于纤维干酪副酪蛋白纤维束空隙间的水分, 它的聚集对干酪的持水力不利, 可榨乳清质量分数降低表明干酪产品的持水力升高。由表 2 可以看出, 随着拉伸温度升高, 纤维干酪可榨乳清质量分数下降, 说明纤维干酪成品的持水力增强。纤维干酪成品持水力大小依次为 BT90>BT80>BT70>FC。FC 与 BT70、BT70 与 BT80、BT80 与 BT90 之间差异不显著 (P>0.05), 而 FC 与 BT80、BT90 之间差异显著 (P<0.05)。这可能是由于热烫拉伸过程中温度升高凝块融合, 促进纤维干酪副酪蛋白纤维束空隙间水分排出, 使酪蛋白网络内部水合作用增强, 酪蛋白网络可以容纳更多的水分子, 引起可榨乳清质量分数下降, 干酪持水力增强<sup>[17-18]</sup>。

### 2.3 拉伸温度对纤维干酪水分分布状态影响

不同拉伸温度制作的干酪的弛豫时间常数如表 3 所示。CPMG 指数衰减曲线拟合得到 3 种相态的水分弛豫时间常数 T<sub>21</sub>、T<sub>22</sub> 和 T<sub>23</sub>。3 种相态水分的弛豫时

间范围分别为  $T_{21}$  (0.1~1.5 ms),  $T_{22}$  (9~25 ms),  $T_{23}$  (50~160 ms)。自旋—自旋弛豫时间  $T_2$  反映了样品内部氢质子所处的化学环境, 与氢质子所受的束缚力及其自由度有关, 而氢质子的束缚程度又与样品的内部结构有密不可分的关系, 氢质子受束缚越大或自由度越小,  $T_2$  弛豫时间越短; 反之则  $T_2$  弛豫时间越长。由于干酪中的另一主要组成物质脂肪是疏水的, 因此纤维干酪中的水分子一定受干酪中蛋白质束缚程度不同, 或者与蛋白质紧密结合或者远离蛋白质。 $T_{21}$  部分的水分子定义为“结合水”, 指的是与干酪内蛋白质分子中亲水基团紧密结合的水分子层;  $T_{22}$  部分的水分子定义为“束缚水”, 指的是干酪中蛋白质网络内部的水分子层;  $T_{23}$  部分的水分子定义为“自由水”, 指的是蛋白质网络外部与蛋白质结合松散的水分子层。

表3 不同拉伸温度制作的纤维干酪的弛豫时间常数

Table 3 Proton transverse relaxation time values of string cheeses prepared at different stretching temperatures

Samples	弛豫时间常数/ms		
	$T_{21}$	$T_{22}$	$T_{23}$
FC	0.77±0.06 <sup>a</sup>	19.67±1.62 <sup>a</sup>	114.98±0 <sup>a</sup>
BT70	1.16±0.01 <sup>a</sup>	16.40±2.28 <sup>ab</sup>	133.05±18.52 <sup>a</sup>
BT80	1.08±0.02 <sup>a</sup>	14.17±0 <sup>b</sup>	109.98±8.64 <sup>a</sup>
BT90	0.24±0.01 <sup>b</sup>	9.32±0 <sup>c</sup>	62.94±4.95 <sup>b</sup>

注: 标有不同小写字母者表示组间差异显著 ( $P<0.05$ ), 标有相同小写字母者表示组间差异不显著 ( $P>0.05$ )。

表4 不同拉伸温度制作的纤维干酪的水组分相对比例

Table 4 Relative proportions of the water component in string cheeses produced at different stretching temperatures

Samples	组分比例/%		
	M21	M22	M23
FC	11.03±3.10 <sup>b</sup>	72.09±1.72 <sup>a</sup>	16.88±1.63 <sup>a</sup>
BT70	10.63±2.63 <sup>b</sup>	74.15±3.13 <sup>a</sup>	15.21±3.30 <sup>a</sup>
BT80	14.03±2.05 <sup>ab</sup>	68.59±1.44 <sup>ab</sup>	17.38±0.61 <sup>a</sup>
BT90	23.45±7.35 <sup>a</sup>	62.75±5.62 <sup>b</sup>	13.74±1.81 <sup>a</sup>

注: 标有不同小写字母者表示组间差异显著 ( $P<0.05$ ), 标有相同小写字母者表示组间差异不显著 ( $P>0.05$ )。

从表3可以看出, 对于结合水组分来说, 四个干酪样品  $T_{21}$  的增大顺序为 BT90<FC<BT80<BT70, 且 BT90 样品的  $T_{21}$  与 FC、BT80、BT70 样品间  $T_{21}$  差异显著 ( $P<0.05$ ), 说明 BT90 样品的水分子与蛋白质亲水基团结合的最紧密; 对于束缚水来说, 四个干酪样品  $T_{22}$  的增大顺序为 BT90<BT80<BT70<FC, 而且 FC、BT80、BT90 间差异显著 ( $P<0.05$ ), FC 和 BT70 间差异不显著 ( $P>0.05$ ), BT70 和 BT80 间差异不显著 ( $P>0.05$ ), 说明 BT90 样品蛋白质网

络内部的水分子流动性最小, FC 和 BT70 样品蛋白质网络内部的水分子流动性大; 对于自由水来说, 四个干酪样品  $T_{23}$  的增大顺序为 BT90<BT80<FC<BT70, 且 BT90 样品的  $T_{23}$  与 FC、BT80、BT70 样品间  $T_{23}$  差异显著 ( $P<0.05$ ), BT90 样品蛋白质网络外部的自由水分子流动性最小, FC、BT80、BT70 样品蛋白质网络外部的自由水分子流动性较大。说明 90℃ 的拉伸温度使纤维干酪水分子的流动性减弱, 这可能与较高的拉伸温度形成的干酪副蛋白质网络结构更致密有关<sup>[19]</sup>。

各组分水分子所占的相对比例分别为 M21、M22 和 M23 如表4所示。对于四组干酪样品来说, 结合水组分所占的相对比例在 8%~30% 之间, 束缚水组分所占的相对比例在 55%~78% 之间, 自由水组分所占的相对比例在 12%~19% 之间; 对于结合水组分相对比例 M21 来说, 四个干酪样品 M21 的增大顺序为 BT70<FC<BT80<BT90, BT90 样品的 M21 显著地 ( $P<0.05$ ) 高于 BT70 和 FC 样品, BT80 样品的 M21 与 BT70、FC、BT90 的 M21 差异均不显著 ( $P>0.05$ ), 说明螺杆转数固定为 45 r/min, 拉伸温度为 90℃ 拉伸的纤维干酪结合水组分比例显著增加; 对于束缚水组分相对比例 M22 来说, 四个干酪样品 M22 的增大顺序为 BT90<BT80<FC<BT70, BT70 和 FC 样品的相对比例显著地 ( $P<0.05$ ) 高于 BT90 样品, 说明螺杆转数固定为 45 r/min, 拉伸温度为 90℃ 拉伸的纤维干酪束缚水组分比例显著下降; 对于自由水组分相对比例 M23 来说, 各样品间差异均不显著 ( $P>0.05$ )。螺杆转数固定为 45 r/min, 拉伸温度为 90℃ 拉伸的纤维干酪蛋白质网络内部的一部分水分子与蛋白质亲水基团结合, 使束缚水比例下降结合水比例上升, 这可能是由高温促使蛋白质网络结构发生变化, 水合基团暴露引起的。

## 2.4 TPA 分析

表5为不同拉伸温度制作的纤维干酪的TPA分析结果。由表5可以看出, 硬度方面, BT90 硬度>BT80 硬度>FC 硬度>BT70 硬度, 四者差异显著 ( $P<0.05$ ); 弹性方面, BT70 样品弹性最小, 但四者差异不显著 ( $P>0.05$ ); 内聚性方面, BT90 内聚性>BT80 内聚性>FC 内聚性>BT70 内聚性, BT90 内聚性与 BT70 内聚性差异显著 ( $P<0.05$ ), BT70 内聚性与 BT80 内聚性和 FC 内聚性差异不显著 ( $P>0.05$ ); 胶黏性方面, BT90 胶黏性>BT80 胶黏性>FC 胶黏性>BT70 胶黏性, BT90 胶黏性、BT80 胶黏性与 BT70 胶黏性差异显著 ( $P<0.05$ ), FC 胶黏性与 BT80 胶黏

性和 BT70 胶黏性差异不显著 ( $P>0.05$ ); 咀嚼性方面, BT90 咀嚼性>BT80 咀嚼性>FC 咀嚼性>BT70 咀嚼性, BT90 咀嚼性、BT80 咀嚼性与 BT70 咀嚼性差异显著 ( $P<0.05$ ), FC 咀嚼性与 BT80 咀嚼性和 BT70 咀嚼性差异不显著 ( $P>0.05$ ); 回复性方面, BT90 回复性>BT80 回复性>FC 回复性>BT70 回复性, BT90 回复性、BT80 回复性与 BT70 回复性差异显著 ( $P<0.05$ ), FC 回复性与 BT70 回复性差异不显著 ( $P>0.05$ ); 说明经过热烫拉伸以后, 纤丝干酪的硬度、胶黏性、咀嚼性回复性都发生了变化, 且拉伸温度对纤丝干酪硬度影响较大。这可能是由于干酪的质构特性由于酪的微观结构决定, 而干酪的微观结构又由其加工参数决定, 70 °C 的拉伸温度对纤丝干酪的蛋白质网络结构影响较小, 90 °C 的拉伸温度对纤丝干酪的蛋白质网络结构影响较大。

著 ( $P>0.05$ ); 说明经过热烫拉伸以后, 纤丝干酪的硬度、胶黏性、咀嚼性回复性都发生了变化, 且拉伸温度对纤丝干酪硬度影响较大。这可能是由于干酪的质构特性由于酪的微观结构决定, 而干酪的微观结构又由其加工参数决定, 70 °C 的拉伸温度对纤丝干酪的蛋白质网络结构影响较小, 90 °C 的拉伸温度对纤丝干酪的蛋白质网络结构影响较大。

表 5 不同拉伸温度制作的纤丝干酪的 TPA 分析

**Table 5 TPA analysis of string cheeses produced at different stretching temperatures**

Samples	硬度/g	弹性	内聚性	胶黏性	咀嚼性	回复性
FC	553.7±48.3 <sup>c</sup>	0.94±0.04 <sup>a</sup>	0.75±0.02 <sup>ab</sup>	417.2±42.7 <sup>bc</sup>	390.5±41.4 <sup>bc</sup>	0.33±0.02 <sup>bc</sup>
BT70	367.9±19.6 <sup>d</sup>	0.89±0.02 <sup>a</sup>	0.69±0.02 <sup>b</sup>	255.2±18.7 <sup>c</sup>	225.9±13.2 <sup>c</sup>	0.28±0.02 <sup>c</sup>
BT80	863.0±21.9 <sup>b</sup>	0.93±0.02 <sup>a</sup>	0.77±0.04 <sup>ab</sup>	603.4±124.3 <sup>b</sup>	561.2±121.8 <sup>b</sup>	0.38±0.04 <sup>ab</sup>
BT90	1657.2±70.0 <sup>a</sup>	0.93±0.03 <sup>a</sup>	0.78±0.03 <sup>a</sup>	1288.4±106.3 <sup>a</sup>	1197.6±125.9 <sup>a</sup>	0.42±0.01 <sup>a</sup>

注: 标有不同小写字母者表示组间差异显著 ( $P<0.05$ ), 标有相同小写字母者表示组间差异不显著 ( $P>0.05$ )。

### 2.5 拉伸温度对纤丝干酪色差的影响

不同拉伸温度制作的干酪的 L\* (白度)、a\* (红度)、b\* (黄度) 和 C 值如下图所示。L\* 表示白度, +L\* 表示偏白, -L\* 表示偏暗; a\* 表示红度, +a\* 表示偏红, -a\* 表示偏绿; b\* 表示黄度, +b\* 表示偏黄, -b\* 表示偏蓝; C 表示色彩饱和度或者纯度, C 值越大, 色彩越饱和。

不显著 ( $P>0.05$ ), FC 和 BT70 与 BT80 和 BT90 差异显著 ( $P<0.05$ )。

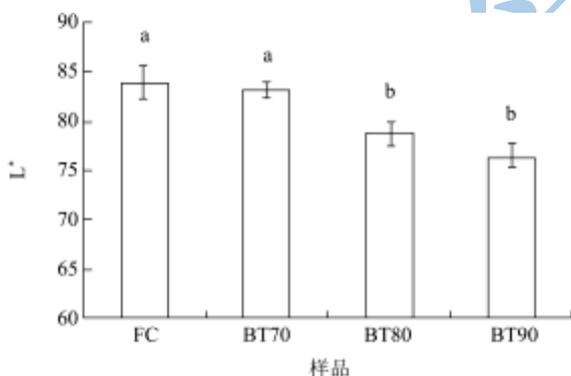


图 1 不同拉伸温度制作的纤丝干酪的 L\* 值

Fig.1 L\* values of string cheese produced at different stretching temperatures

从图 1 可以看出, 四个样品的 L\* 都为正值, 样品全部偏白, FC L\* > BT70 L\* > BT80 L\* > BT90 L\*, 但 FC 与 BT70 差异不显著 ( $P>0.05$ ), BT80 与 BT90 差异不显著 ( $P>0.05$ ), FC 和 BT70 与 BT80 和 BT90 差异显著 ( $P<0.05$ ), 干酪样品脂肪含量的差别能解释这一结果<sup>[20]</sup>。

从图 2 可以看出, 四个样品的 a\* 都为负值, 样品全部偏绿, FC a\* > BT70 a\* > BT80 a\* > BT90 a\*, 但 FC 与 BT70 差异不显著 ( $P>0.05$ ), BT80 与 BT90 差异

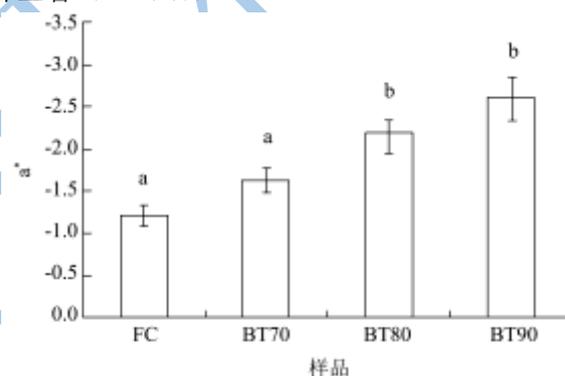


图 2 不同拉伸温度制作的纤丝干酪的 a\* 值

Fig.2 The a\* values of string cheese produced at different stretching temperatures

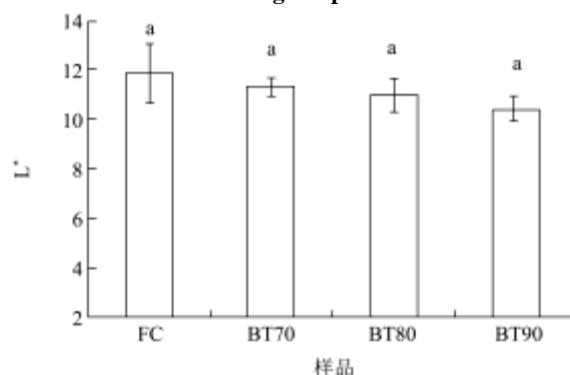


图 3 不同拉伸温度制作的纤丝干酪的 b\* 值

Fig.3 The b\* values of string cheese produced at different stretching temperatures

从图 3 可以看出, 四个样品的 b\* 都为正值, 样品全部偏黄, FC b\* > BT70 b\* > BT80 b\* > BT90 b\*, 但 FC、BT70、BT80 和 BT90 四个样品差异均不显著 ( $P>0.05$ )。

>0.05), 说明拉伸温度对干酪样品的黄度影响不显著。

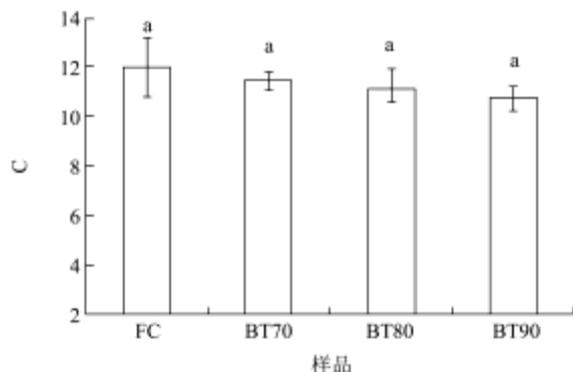


图4 不同拉伸温度制作的干酪样品的C值

Fig.4 C values of string cheese produced at different stretching temperatures

从图4可以看出,四个样品的C都为正值,FC C > BT70 C > BT80 C > BT90 C, 但FC、BT70、BT80和BT90四个样品差异均不显著 (P>0.05), 说明拉伸温度对干酪样品的饱和度影响不显著。

## 2.6 主成分分析

通过对13个理化指标的主成分分析,得到三个主成分的特征根与方差贡献率,如表6所示。由表6可知,第一、第二主成分的方差贡献率分别为86.112%和7.608%,2个主成分累计贡献率达到93.719%,全面反映了原干酪理化指标包含的全部信息。

表6 三个主成分特征根和方差贡献率

Table 6 Eigenvalues and variance contribution rates of the three principal components

主成分 PC	特征根	方差贡献 率/%	累计方差 贡献率/%
1	11.195	86.112	86.112
2	0.989	7.608	93.719
3	0.816	6.281	100.000

表7为13个理化指标变量与3个主成分的相关系数表。从表7可以看出,第一主成分主要与可榨乳清含量、T<sub>21</sub>、T<sub>22</sub>、T<sub>23</sub>、M<sub>22</sub>、M<sub>23</sub>、白度、红度呈正相关,与M<sub>21</sub>、硬度、胶黏性、咀嚼性、回复性呈负相关,第一主成分解释了86.1%的总体方差。第二主成分主要与可榨乳清含量、L\*、a\*呈正相关,与T<sub>21</sub>、M<sub>23</sub>呈负相关。筛选出两个主成分后,结合两个主成分的相关系数得出综合评估模型为:  $Y=0.873X_1+0.710X_2+0.877X_3+0.873X_4-0.905X_5+0.910X_6+0.538X_7-0.909X_8-0.901X_9-0.899X_{10}-0.848X_{11}+0.894X_{12}+0.869X_{13}$ 。从综合评估模型系数的绝对值可以看出,拉伸温度与干酪理化指标的相关性都比较大,

说明该公式可以用来评估拉伸温度与干酪理化指标的关系。

表7 主成分分析中变量与主成分相关系数表

Table 7 Table for the correlation coefficient between the variables and principle components in principal component analysis

变量	系数		
	PC1	PC2	PC3
可榨乳清含量	0.921	0.328	0.212
T <sub>21</sub>	0.820	-0.537	-0.197
T <sub>22</sub>	0.938	0.191	0.289
T <sub>23</sub>	0.967	-0.190	-0.166
M <sub>21</sub>	-0.994	0.100	-0.036
M <sub>22</sub>	0.987	0.037	-0.160
M <sub>23</sub>	0.628	-0.478	0.614
硬度	-0.994	0.051	0.093
胶黏性	-0.990	0.111	0.086
咀嚼性	-0.989	0.111	0.099
回复性	-0.908	-0.168	0.383
L*	0.944	0.329	0.022
a*	0.915	0.343	0.212

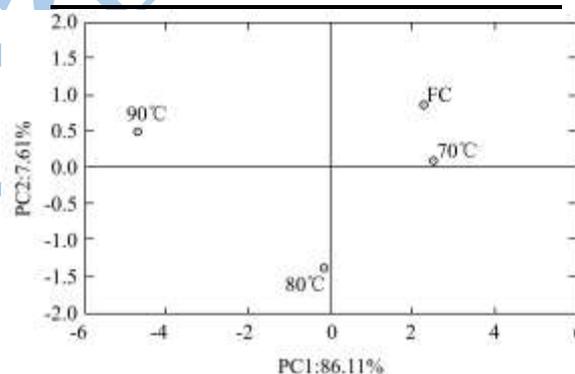


图5 不同拉伸温度样品第一、第二主成分评分

Fig.5 First and second principal component scores of string cheeses prepared at different stretching temperatures

图5为不同拉伸温度干酪样品第一、第二主成分评分图。从图5可以看出,FC和70℃干酪样品位于第一主成分的右端,它们的共同特征是可榨乳清含量高,结合水(T<sub>21</sub>)、束缚水(T<sub>22</sub>)和自由水(T<sub>23</sub>)流动性强,束缚水(M<sub>22</sub>)和自由水(M<sub>23</sub>)组分比例高,白度(L\*)和红度(a\*)值高,同时结合水组分比例(M<sub>21</sub>)低、硬度、胶黏性、咀嚼性和回复性低。90℃干酪样品位于第一主成分的左端,说明90℃干酪样品与其他样品相比可榨乳清含量较低,结合水(T<sub>21</sub>)、束缚水(T<sub>22</sub>)和自由水(T<sub>23</sub>)流动性弱,束缚水(M<sub>22</sub>)和自由水(M<sub>23</sub>)组分比例小,白度(L\*)和红度(a\*)值低,同时结合水组分比例(M<sub>21</sub>)高、

硬度、胶黏性、咀嚼性和回复性高。80℃干酪样品位于第一主成分的中间,说明80℃干酪样品主要理化指标含量较佳。

### 3 结论

3.1 FC和70℃拉伸的纤丝干酪样品的共同特征是可榨乳清含量高,结合水(T<sub>21</sub>)、束缚水(T<sub>22</sub>)和自由水(T<sub>23</sub>)流动性强,束缚水(M<sub>22</sub>)和自由水(M<sub>23</sub>)组分比例高,白度(L\*)和红度(a\*)值高,同时结合水组分比例(M<sub>21</sub>)低、硬度、胶黏性、咀嚼性和回复性低;90℃拉伸的纤丝干酪样品与其他样品相比可榨乳清含量较低,结合水(T<sub>21</sub>)、束缚水(T<sub>22</sub>)和自由水(T<sub>23</sub>)流动性弱,束缚水(M<sub>22</sub>)和自由水(M<sub>23</sub>)组分比例小,白度(L\*)和红度(a\*)值低,同时结合水组分比例(M<sub>21</sub>)高、硬度、胶黏性、咀嚼性和回复性高;80℃拉伸的纤丝干酪样品主要理化指标含量较佳。

3.2 拉伸温度对纤丝干酪弹性、黄度(b\*)和饱和度(C)影响不显著。运用主成分分析建立了拉伸温度与纤丝干酪理化指标的主成分综合评估模型为: $Y=0.873X_1+0.710X_2+0.877X_3+0.873X_4-0.905X_5+0.910X_6+0.538X_7-0.909X_8-0.901X_9-0.899X_{10}-0.848X_{11}+0.894X_{12}+0.869X_{13}$ 。结合主成分评分,拉伸温度为80℃螺杆转速为45 r/min时,纤丝干酪能获得较佳的理化性质。

### 参考文献

- [1] 苗颖,赵征.拉伸温度对纤丝干酪流变学特性及微观结构的影响[J].现代食品科技,2013,29(10):2358-2362  
MIAO Ying, ZHAO Zheng. Effect of stretching temperature on rheological characteristics and microstructure of string cheese [J]. Modern Food Science and Technology, 2013, 29(10): 2358-2362
- [2] Kuo M I, Gunasekaran S, Johnson M, Chen C. Nuclear magnetic resonance study of water mobility in pasta filata and non-pasta filata Mozzarella [J]. Journal of Dairy Science, 2001, 84(9): 1950-1958
- [3] Taneya S, Izutsu T, Kimura T, Shioa T. Structure and rheology of string cheese [J]. Food Structure. 1992, 11: 61-65
- [4] Luyten H T, Van vliet, Walstra P. Characterization of the consistency of Gouda cheese: rheological properties [J]. Netherlands Milk and Dairy Journal, 1991, 45: 33-42
- [5] 罗杰,王芳,任发政,等.乳化盐对Mozzarella干酪功能特性的影响[J].农业机械学报,2011,42(8):138-142  
LUO Jie, WANG Fang, REN Fa-zheng, et al. Effects of emulsifying salts on functionality of mozzarella cheese [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8): 138-142
- [6] 郭媛,郭慧媛,王芳,等.堆叠pH值对Mozzarella干酪熔化特性的影响[J].农业机械学报,2011,42(3):156-160  
GUO Yuan, GUO Hui-yuan, WANG Fang, et al. Effect of milling pH value on mozzarella cheese meltability [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 156-160
- [7] 燕雯,张正茂.不同麦胚含量馒头香气物质的主成分分析[J].中国食品学报,2013,13(2):211-215  
YAN Wen, ZHANG Zheng-mao. Principal component analysis of flavor compositions in steamed bread [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2013, 13(2): 211-215
- [8] Coker C J, Crawford R, Johnston K A, et al. Towards the classification of cheese variety and maturity on the basis of statistical analysis of proteolysis data-A review [J]. International Dairy Journal, 2005, 15: 631-643
- [9] S T Martin-del-Campo, D Picquea, R Cosio-Ramirez, et al. Middle infrared spectroscopy characterization of ripening stages of Camembert-type cheeses [J]. International Dairy Journal, 2007, 17: 835-845
- [10] Joseph Yun, David M Barbano, Paul S Kindstedt. Mozzarella cheese: impact of pH on chemical composition and proteolysis [J]. Journal of Dairy Science, 1993, 76(12): 3629-3638
- [11] M I Kuo, S Gunasekaran, M Johnson, et al. Nuclear magnetic resonance study of water mobility in pasta filata and non-pasta filata Mozzarella [J]. Journal of Dairy Science, 2001, 84(9): 1950-1958
- [12] 邵小龙,李云飞.用低场核磁研究烫漂对甜玉米水分和状态影响[J].农业工程学报,2009,25(10):302-306  
SHAO Xiao-long, LI Yun-fei. Effects of blanching on water distribution and water status in sweet corn investigated by using MRI and NMR [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(10): 302-306
- [13] 韩敏义,费英,徐幸莲,等.低场NMR研究pH对肌原纤维蛋白热诱导凝胶的影响[J].中国农业科学,2009,42(6):2098-2014  
HAN Min-yi, FEI Ying, XU Xing-lian, et al. Heat-induced gelation of myofibrillar proteins as affected by pH-a low field NMR study [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(6): 2098-2014
- [14] 刘小玲,唐辉,李全阳,等.干酪的质构与其成分的相关性初探[J].广西大学学报自然科学版,2009,34(3):372-376.LIU Xiao-ling, TANG Hui, LI Quan-yang, et al. Exploring

- correlation of texture and its composition of cheese [J]. Journal of Guangxi University :Nat Sci Ed, 2009, 34(3): 372-376
- Nessa Noronha, E Dolores O'Riordan, Michael O'Sullivan. Influence of processing parameters on the texture and microstructure of imitate on cheese [J]. Eur Food Res Technol, 2008, (226): 385-393
- [15] A Picon, R Alonso, K H M Van Wely, M Nunez. Microstructural, textural and colour characteristics during ripening of hispánico cheese made using high-pressure-treated ovine milk curd [J]. Food Bioprocess Technol., 2013, 6: 3056-3067
- [16] 范丽芳, 王维克. 比萨干酪工艺及其功能特性分子基础[J]. 中国乳品工业, 2010, 38(6): 30-35. FAN Li-fang, WANG Wei-ke. Molecular basis of pizza cheese technology and its functionality [J]. Dairy Industry, 2010, 38(6): 30-35
- [17] Aylin Altan, Mecit H Oztop, Kathryn L McCarthy, et al. Monitoring changes in feta cheese during brining by magnetic resonance imaging and NMR relaxometry [J]. Journal of Food Engineering, 2011, 107(2): 200-207
- [18] 文旭娟, 孟德勇, 李永青, 等. 脂肪质量分数对低脂Mozzarella干酪微观结构的影响 [J], 中国乳品工业, 2009, 37(9): 11-13. WEN Xu-juan, MENG De-yong, LI Yong-qing, et al. Influence of fat contents on microstructure of low-fat Mozzarella cheese [J]. China Dairy Industry, 2009, 37(9): 11-13
- [19] Saldo J, McSweeney P L H, Sendra E, Kelly A L, Guamis B. Proteolysis in caprine milk cheese treated by high pressure to accelerate cheese ripening [J]. International Dairy Journal, 2002, 12: 35-44

现代食品科技