

基于阻抗特性和神经网络的鸡胸肉冻融次数鉴别方法

李伟明, 王 鹏, 陈天浩, 徐幸莲^{*}, 周光宏

(南京农业大学国家肉品质量安全控制工程技术研究中心; 食品安全与营养协同创新中心, 南京 210095)

摘 要: 为了探究利用肉的介电特性检测冷冻肉品质的可能性, 研究了新鲜鸡胸肉和不同冻融次数的鸡胸肉的品质以及阻抗的幅值和相位角变化状况。在 0.05~200 kHz 频率范围内, 选择了 16 个不同的频率点进行阻抗特性分析。试验结果表明: 鸡胸肉阻抗的幅值会随着频率上升而下降, 相位角则相反。冷鲜肉与冷冻肉高频段相位角相差一个数量级, 低频段阻抗的幅值差异也极显著 ($P < 0.01$)。多次冻融处理后, 解冻损失、丙二醛含量上升显著 ($P < 0.05$), pH 值变化不明显 ($P > 0.05$)。反复冻融后低频段阻抗幅值降低 ($P < 0.05$), 大于 50 kHz 时, 相位角有增大的趋势 ($P < 0.05$), 这与正常 1 次冻结-解冻肉的相位角变化趋势相反。利用径向基函数 (radial basis function, RBF) 神经网络提取阻抗和幅值信息建立判别模型可以对不同冻融次数的肉进行较为准确的分类。研究结果表明, 阻抗测量作为一种冷冻肉快速无损检测方法具有很大的发展潜力。

关键词: 神经网络; 介电特性; 品质控制; 冻融; 阻抗; 鸡胸肉

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.07.030

中图分类号: TS251.5⁺5

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2014)-07-0250-08

李伟明, 王 鹏, 陈天浩, 等. 基于阻抗特性和神经网络的鸡胸肉冻融次数鉴别方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 250-257.

Li Weiming, Wang Peng, Chen Tianhao, et al. Classification of chicken breasts with different freezing-thawing cycles by impedance properties and artificial neural networks[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(7): 250-257. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

低温冷冻及冻藏作为肉及肉制品的基本保藏方法之一, 具有经济简便、保藏效果好的特点, 已经广泛应用于现代食品工业的方方面面。但是冻结及储藏过程中水的重结晶、蛋白质脱水、变性、脂肪氧化酸败等都直接影响肉制品的品质, 长时间储藏及反复冻融等都会使肉的品质大幅度下降, 严重的甚至使肉制品失去食用价值^[1]。

多年来, 研究人员通过诸多方法, 利用持水力、质构特性、蛋白质溶解度、微观结构、挥发性盐基氮及脂肪蛋白氧化等指标来评定冷冻肉制品的品质, 可是仍然存在准确度欠佳, 操作繁琐等缺点^[2], 目前对反复冻融过的肉还没有较好的辨别方法。生物组织复杂的介电特性的测量作为一种肉类新鲜度、成熟度的检测方法已经被研究了很多年, 并且

取得了一定的成果^[3-5]。早在 20 世纪 70 年代, 研究人员就发现解冻肉具有更好的导电性^[6], 而将生物阻抗技术作为冷冻肉品质的一种检测方法, 相关的研究近些年才开始出现。已有的相关研究显示, 冷冻肉因温度波动或冻融多次而造成的结构改变可以通过阻抗测量反映出来^[7-10]。

Kent 等^[7]通过对冷冻鳕鱼的高频阻抗谱测量实现了对鱼肉冻藏时间、冻藏温度的预测。Zhang 等^[8]对新鲜和冻融过的草鱼低频阻抗谱测量发现冻融草鱼各个频点的阻抗幅值对比新鲜草鱼都出现了显著的下降, Vidacek 等^[9]研究发现, 不同冻藏时间和不同冻融次数处理的鲈鱼高频段阻抗相位角差异显著。Yu 等^[10]对冷冻蛋清和猪肉的阻抗特性研究发现冻结对组织造成的损伤会引起组织阻抗特性出现显著改变。

生物阻抗测量是借助置于生物组织表面的驱动电极向检测对象输入微小的交变电流 (或电压) 信号, 同时通过电极测量组织表面的电压 (或电流) 信号, 由所测信号计算出相应阻抗, 然后根据不同的应用目的, 获取相关的生理和病理学信息^[11]。生物组织一般由细胞构成, 根据细胞的电特性, 20 世纪 30 年代, Fricke 将生物组织简化为 R_s (细胞内液等效电阻)、 C_s (细胞膜等效电容) 和 R_p (细胞外液等效电阻) 三元件的等效电路模型, 简化模型的

收稿日期: 2013-11-06 修订日期: 2014-02-26

基金项目: 国家现代农业产业技术体系 (CARS-42); 公益性行业 (农业) 科研专项经费 (201303082-2); 国家自然科学基金 (31101308)

作者简介: 李伟明 (1988-), 男, 江苏连云港人。主要从事畜产品加工与质量控制研究。南京 南京农业大学国家肉品质量安全控制工程技术研究中心, 210095。Email: 2011108037@njau.edu.cn

^{*}通信作者: 徐幸莲 (1962-), 女, 江苏吴江人, 教授, 从事肉品加工与质量控制研究。南京 南京农业大学国家肉品质量安全控制工程技术研究中心, 210095。Email: xlxu@njau.edu.cn

R_s 、 R_p 、 C_s 代表的是整个生物组织的等效内外液电阻和膜电容。这些基本理论的发展是生物阻抗检测技术发展的基础^[12-13]。当输入低频或直流电流时，由于细胞膜在低频时更接近于绝缘体，所以电流必须绕过细胞膜流过，阻抗相对较高；而在高频时，细胞膜的电容特性允许电流直接流入细胞，增大了细胞载流的能力，阻抗相对较小。因此生物组织的阻抗特性和其组织结构的变化密切相关^[3,12]。

在中国及世界范围内，大量的禽肉都是以冷冻的方式在市场流通的。不当储藏、运输、出售条件常造成肉的反复冻融，市场上存在以冷冻肉充当冰鲜肉销售的现象^[14]。为此确立一种快速便捷的冷冻禽肉冻融次数检测方法具有重要意义。已有的相关阻抗检测方法判定规则复杂，有效信息提取不够精炼，没有建立完整的分类鉴定模型，判定规则多达十几条，也无法对多次冻融的肉进行区分，存在一定的缺陷^[14]。人工神经网络（artificial neural networks, ANN）可以从已知数据中进行自动归纳，获得这些数据的内在规律，具有很强的非线性映射能力。它经过近十几年的发展，在控制与优化、模式识别、人工智能等应用领域取得了许多成就^[15]。径向基函数神经网络（radial basis function neural networks, RBFNN），是神经网络中一种典型前向网络，它以径向基函数作为隐单元的‘基’构成隐含层空间，隐含层对输入矢量进行变换将低维的模式输入数据变换到高维空间内，使得在低维线性不可分问题变成在高维空间内线性可分。具有学习速度快，收敛性好，能任意精度逼近非线性函数等特点^[15-16]，非常适用于阻抗数据的处理。

本文通过对不同冻融次数和新鲜鸡胸肉阻抗特性和鸡胸肉在冻融过程中几个关键品质指标变化情况进行研究，建立了基于鸡胸肉阻抗特性的径向基函数神经网络分类模型，对新鲜肉及不同冻融次数的肉进行鉴别，分析了电阻抗法分类鉴别新鲜肉与不同冻融次数肉的可能性及可能存在的问题。

1 材料与方法

1.1 试验材料及试剂

样品为江苏盐城悦达禽业公司按照标准常规程序屠宰的 45 日龄白羽肉鸡的鸡胸肉（胸大肌），在 -40°C 条件下托盘吹风冷冻后真空包装，于 -20°C 冻藏。经过试验设计的冻藏处理后测量相关指标。对照的不冻藏样品经正常程序屠宰后放入 $0\sim 4^{\circ}\text{C}$ 保温箱运回，运输途中冰袋降温。

1.2 试验仪器

AUY120 分析天平（日本岛津公司）；SIM-F124 制冰机（日本三洋公司）；Spectra Max M2e 型酶

标仪（美国 Molecular Devices 公司）；Ultra Tur-rax T25 BASIS 高速匀浆器（德国 IKA 公司）；Beckman Avanti J-E 冷冻离心机（美国 Beckman Coulter 公司）；ZKSY-600 智能恒温水浴锅（南京科尔仪器设备有限公司）；AT-2816B 精密 LCR 数字电桥（常州安柏精密仪器有限公司）；Testo 105 温度计（德国 Testo AG 公司）；Orion 3-Star pH 计（美国 Thermo Fisher 公司）。

1.3 试验方法

1.3.1 样品反复冻融处理

反复冻融处理参照戚军^[17]的方法稍作修改，每隔 15 d 将 1 组冻鸡胸肉置于 4°C 的条件下解冻 1 次，解冻期间将插入式温度计插至样品中心位置，解冻至中心温度大于 0°C ，解冻完放入 -40°C 速冻后，再置于 -20°C 冰箱冻藏，之后以相同方式再次解冻，最大冻融次数为 3 次。每个处理组取 20 块鸡胸肉。

1.3.2 阻抗测量

阻抗测量采用目前主流的针式四电极法^[3]，电极材料为紫铜，电极长度 1.5 cm，电极间距 1.5 cm。测量温度 4°C ，具体测量位置如图 1 所示，在龙骨突前部外侧，顺肌纤维方向，通过高精度 LCR 数字电桥从 $0.05\sim 200\text{ kHz}$ 取 16 个频点（50、60、80、100、120、150、200、250、400、800 Hz，1.5、5、15、50、100、200 kHz），频率由低到高，测量每块鸡胸肉 16 个频点的阻抗幅值和相位角特性。每组中，每个频点幅值和相位角的值为 20 块样品的平均值。

1.3.3 解冻汁液流失率测定

对每块冷冻样品解冻前进行称量，得到解冻前质量 m_0 ，解冻后再次称量，得到质量 m_1 。解冻汁液流失率 $W=(m_0-m_1)/m_0\times 100\%$ 。每组样品解冻损失为 20 个样品的平均值。

1.3.4 蒸煮损失

每块鸡胸肉中切下 2 块大小为 $4\text{ cm}\times 2\text{ cm}\times 2\text{ cm}$ 肉块质量 $(20\pm 2)\text{ g}$ ，蒸煮前称得样品质量 n_0 ，将测温探头插至样品中间位置，置于 75°C 水浴蒸煮至中心温度 70°C 。再次称量得到蒸煮后质量 n_1 ，每个鸡胸肉取样的部位相同。蒸煮损失率 $Y=(n_0-n_1)/n_0\times 100\%$ 。每个样品的蒸煮损失为其 2 个肉块蒸煮损失的平均值，每组样品蒸煮损失为 20 个样品的平均值。

1.3.5 pH 值测量

在 pH 计测量电极上安装好金属保护探头，直接将测量电极插入到鸡胸肉中进行测量，测量温度控制在 4°C 左右，在鸡胸肉前部靠近翅根处选取 3 个间隔 $1\sim 2\text{ cm}$ 左右的测量点测量，插入深度约 2 cm，每个样品的 pH 值取 3 次测量平均值，每组样品 pH 值为 20 个样品的平均值。具体测量位置如

图 1 所示,保持每一块鸡胸肉测量的位置基本一致。

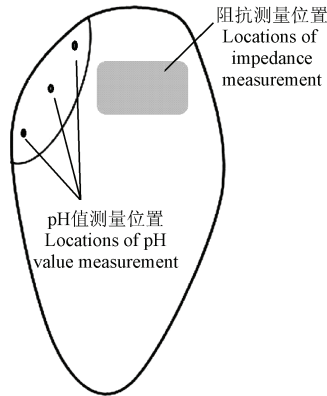


图 1 鸡胸肉 pH 值及阻抗测量位置示意图

Fig.1 Location schematic diagram of chicken breasts pH value and impedance measuring

1.3.6 硫代巴比妥酸反应物 (TBARS) 值

脂肪氧化是肉在冻藏期间出现油脂酸败味道(哈啦味)及肉表面褐变的主要原因。丙二醛是油脂氧化过程中的中间产物,其含量是油脂败坏程度的重要标志。硫代巴比妥酸反应物(thiobarbituric acid reactive substances, TBARS)是硫代巴比妥酸和丙二醛(malonaldehyde, MDA)生成的化合物。通过 TBARS 值衡量体系中丙二醛含量可反映体系中脂肪氧化状况^[17]。TBARS 值测量利用丙二醛测定试剂盒(南京建成生物技术研究所)实现。测试过程按照试剂盒说明书进行操作,取样后每块鸡胸肉样品测 3 次,取平均值, TBARS 值用每 kg 肌肉组织中丙二醛的毫克数表示。

1.4 统计分析

试验数据采用 SAS 9.2 软件统计分析,对各组处理数据进行基于 Duncan's 多重比较的方差分析,对阻抗指标和品质指标进行相关性分析($P < 0.05$)。利用 SPSS 20.0 软件对阻抗数据进行 RBF 神经网络建模分析。

2 结果与分析

2.1 冻藏期间反复冻融鸡胸肉品质变化状况

保水性是冷冻肉品质评价的重要指标,本试验以和生产加工关系紧密的解冻损失和蒸煮损失来衡量。由表 1 可以看出,随着冻融次数增加,解冻损失显著上升($P < 0.05$),蒸煮损失呈先上升后下降的趋势,但是冻融 2 次和冻融 3 次处理的蒸煮损失之间差异不显著($P > 0.05$),pH 值变化趋势不明显,只有冻融 2 次肉 pH 值显著大于新鲜肉($P < 0.05$),可能与反复冻融过程组织破坏及蛋白变性改变了组织内离子环境有关。解冻损失的变化最直接地显示出冻融会对肉的保水性

产生不利影响。冻融 3 次处理组鸡胸肉的解冻损失最大,保水性最差。过多的解冻损失导致了肌肉组织内的大部分可以自由流动的组织液和细胞液的流失,这可能是冻融 2 次和 3 次的蒸煮损失无显著差异的原因。随着冻融次数增加, TBARS 值显著增加($P < 0.05$),与牛力等^[18]对鸡胸肉冻藏期间脂肪氧化状况研究的结果基本一致。相关研究也表明,尽管冻藏期间温度较低,但脂肪氧化反应还是在缓慢的进行。由于脂肪氧化产物总体含量较低,并不会对肉的感官品质造成明显影响^[19]。韩敏义等^[20]对反复冻融鸡肉品质变化的研究结果与本试验的结果类似,随着冻融次数增加鸡胸肉的保水性变差, pH 值变化不明显。Boonsumrej 等^[21]研究结果表明,随着冷冻-解冻次数的增加,虾肉的脂肪氧化值、剪切力增加、肌肉蛋白盐溶性减小、肌纤维间隙增大、肌纤维弯曲甚至断裂。威军^[17]的研究结果表明,反复冻融的羊肉解冻损失、蒸煮损失、TBARS 值随着冻融次数增加而上升,与本试验结果类似。由于反复冻融伴随着水分的反复结晶使横向肌纤维之间出现空隙,肌内膜破裂,纤维直径变短,纵向上使肌节框架结构发生变化,肌原纤维的 M 线消失,加速了组织结构的破坏和组织内各部分液体的迁移^[21],严重破坏肉的质构和保水性。溶解期间的较高温度也会加剧蛋白质、脂肪的氧化,微生物也可能在此期间大量生长,因此反复冻融对冷冻肉类的品质影响极为明显,也更加突出了对反复冻融肉类进行分类鉴别的必要性和意义。

表 1 不同冻融次数鸡胸肉品质变化状况

Table 1 Quality characters of frozen chicken breasts with different freezing-thawing cycles

冻融次数 freezing- thawing circle/ times	解冻损失 Thawing loss/%	蒸煮损失 Cooking loss/%	pH 值 pH Value	硫代巴比妥酸 反应物值 TBARS/ (mg·kg ⁻¹)
0	/	13.3±1.6 ^a	5.77±0.11 ^a	0.16±0.04 ^a
1	3.7±1.0 ^a	16.8±2.4 ^b	5.83±0.11 ^{ab}	0.19±0.05 ^a
2	8.8±1.8 ^b	19.2±3.0 ^c	5.95±0.19 ^b	0.35±0.13 ^b
3	11.2±3.2 ^c	18.1±3.2 ^{bc}	5.87±0.09 ^{ab}	0.58±0.12 ^c

注:同一列不同字母表(a, b, c)示不同处理组差异显著, $P < 0.05$, ($n=20$)。Note: Different letters (a, b, c) in the same column show significant difference ($P < 0.05$) between the different treatments groups. ($n = 20$).

2.2 反复冻融鸡胸肉阻抗特性变化状况

反复冻融组的阻抗特性如图 2 所示,随着检测频率的增加,阻抗的幅值呈现逐渐下降的趋势。这是由于细胞膜会在电路中表现为带有一定的容抗特性电阻原件,低频交流电场施加在生物组织上时,细胞膜的容抗较大,因此低频电流会绕过细胞膜,流经具有更好导电性的细胞外液。当电流的频率上升时,细胞膜的容抗减小,部分电流将会直接穿过细胞膜,流经细胞内液。此时整个生物组织呈

现出较低的阻抗幅值。阻抗幅值随着频率从低频到高频逐渐下降的现象是生物组织细胞膜电容特性的一个反映^[8,22-23]。

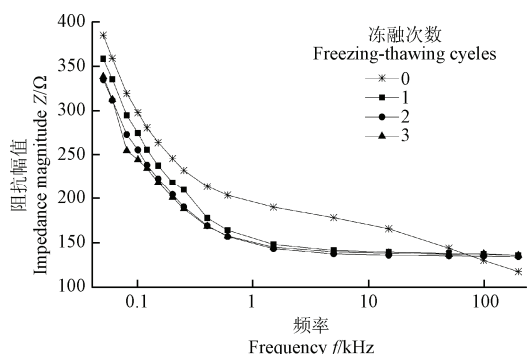


图 2 不同冻融次数鸡胸肉阻抗幅值变化情况

Fig.2 Impedance magnitude (Z) of different freezing - thawing cycles chicken breasts

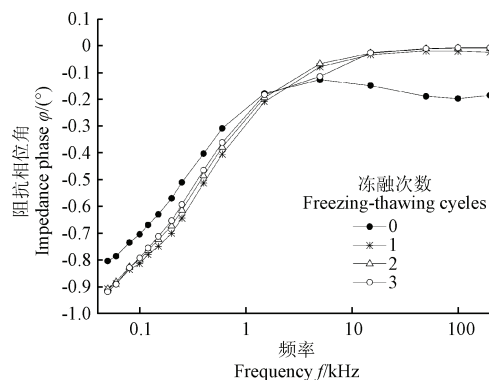
由图 2 可以看出，冻藏组阻抗幅值在频率超过 1 kHz 时趋于稳定，而未冻藏组随着频率上升持续下降，说明冻藏对肉组织结构和细胞膜的破坏使其导电能力增强，细胞膜电阻和电容降低，使得冻藏组织在高频电流下更倾向于 1 个容抗恒定的导体，而新鲜肉较高的膜电容使得阻抗幅值随着频率上升而下降^[9]。在小于 1 kHz 频段，与只有 1 次冻融的处理组相比，多次冻融组阻抗幅值有更低的阻抗幅值 ($P < 0.05$)，但是冻融 2 次和冻融 3 次之间的差异并不明显 ($P > 0.05$)。造成这种现象的原因可能是由于反复冻融过程造成较高汁液流失带走了组织内大量液体和导电离子，使得解冻后的肉含水率降低，进而导致多次冻融后阻抗差异不明显。由此可以看出，低频段阻抗幅值信息可以区分出新鲜肉、冷冻肉及反复冻融肉，但无法对反复冻融肉做进一步的细分。

2.3 反复冻融鸡胸肉阻抗相位角变化状况

由图 3a 可以看出，随着频率的上升，冷冻肉阻抗相位角一直呈现上升的趋势，低频段上升幅度较大，高频段趋于平稳。新鲜肉阻抗相位角在低频范围变化趋势同冷冻肉类似，但在频率超过 5 kHz 后呈现小幅波动变化的趋势。Fuentes 等^[24]通过对冷冻和未冷冻的海鲷的相位角变化研究，也发现了和本试验研究结果类似的变化趋势。

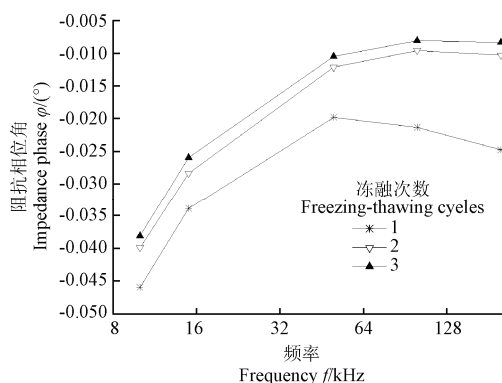
高频段电流可以穿过细胞膜，直接流过整个肌肉组织，因此反映的是整个组织的导电状况。新鲜肉由于具有相对完整细胞膜和组织结构，在高频段其细胞膜电容比冷冻肉更加稳定，因此总能使电压和电流之间产生一定的相角。而冷冻肉组织结构的破坏，细胞液与组织液的交互渗透导致细胞膜的电容特性被破坏，组织整体的导电性能增加，因此高

频段冷冻肉阻抗相位角显著大于新鲜肉 ($P < 0.01$)。



a. 全部频段

a. Whole frequencies range



b. 高频段

b. High frequencies range

图 3 不同冻融次数鸡胸肉阻抗相位角(φ)变化情况

Fig.3 Impedance phase (φ) of different freezing-thawing cycles chicken breasts

低频段冻融 2 次和冻融 3 次处理组之间的相位差异并不显著 ($P > 0.05$)。虽然随着频率上升，相位角在逐渐增大，但从 10~200 kHz 的高频段放大图像，图 3b 可以看出，在高频段，多次冻融处理的样品的相位角要显著高于只冻融 1 次的样品 ($P < 0.05$)。且在频率大于 50 kHz 时，冻融 1 次处理组的相位角呈现下降的趋势，而多次冻融样品的相位角随着频率的上升趋于平稳，这些变化应该是由反复冻融对肌肉组织及细胞膜结构产生破坏造成的，但具体的变化机制还需更深入的研究。Vidacek 等^[9]对反复冻融的海鲑鱼的相位角研究也发现：低频段不同冻融次数鱼肉相位角差异并不显著，在大于 200 kHz 的频段时，反复冻融鱼肉同 1 次冻融鱼肉的相位角差异有继续增大的现象，因此 Vidacek 也指出对冷冻肉阻抗特性进一步的研究重点应放在高频段相位角上。

2.4 基于径向基函数 (RBF) 的神经网络鸡胸肉冻融次数预测模型建立

将各个处理组的数据进行相关性分析后，不同

处理组肉样的品质指标与阻抗参数的相关性关系并不统一,说明单纯依靠阻抗信息对品质参数定量表示还存在一定难度。从图 2 和图 3 可以看出,无论是低频段还是高频段,无论是阻抗的幅值还是相位角,不同冻融次数的肉样呈现出不同的阻抗特性。高频段阻抗相位角变化特征可以区分不同冻融次数鸡胸肉,单纯以某几个特征频点的幅值或者阻抗信息为判断依据虽然可以达到分类的目的,但会丢失大量差异化数据,导致预准确度、测稳定性降低。因此为了构建更加可靠、稳定的分类预测模型,可以通过多个特征频点阻抗幅值和相位角信息差异的提取,将新鲜、冷冻及反复冻融后的肉进行区分。随着冻融次数增加,不同处理组在不同频段的阻抗特性变化方式多样并且呈非线性的特点。RBF 神经网络具有很强的非线性映射能力,具有学习速度快,收敛性好等特点^[16],非常适用于阻抗数据的综合处理和不同冻融次数肉的分类判别。

距离相近的频点包含的信息具有一定重复性。而神经网络模型变量个数的减少有利于减少模型判断时间,在实际检测中提高检测效率,因此模型选取的输入变量对不同处理组之间的差异应有代表性。经过多次建模尝试后发现:50 Hz~200 kHz 范围内,在低频、中频、高频段分别选取 50、120、400 Hz, 5、50、200 kHz 的阻抗幅值和相位角信息作为输入变量可以维持模型的鉴别效果和相对少的输入变量。Softmax 回归学习对给定已知样本数据,样本有 n 个特征量,分为 k 种类别,通过对样本特征量的学习得到分类的估计函数,通过估计函数计算新数据所对应不同类别的概率,得到每个样本属于类别 i 的概率为 iP ,则概率最大的所属类别即为该样本的分类类别,是 Logistic 回归在多元分类问题上的推广,适用本文冻融次数的判别^[25]。故激活函数选择 Softmax。

利用 SPSS 20.0 软件,从低频到高频分别选此 6 个数频点相位角和幅值的信息作为输入层变量。冻融次数作为输出层因变量,共分 4 种类型,82 组数据中(新鲜肉数据 22 组,不同冻融次数处理组各 20 组数据),65%数据随机分配至训练样本,35%的数据随机分配至验证样本进行径向基函数神经网络构建。由模型检验数据产生错误最小单位确定了隐藏单元的个数为 8。构建模型样本组成及训练效果如表 2 所示。建立好的 RBF 神经网络模型通过 SPSS 评分向导模块调用后即可对未知类型的新数据进行分类判别。

模型结果分类表如表 2 所示。可以由表中的结果看出,在样本量偏少的限制条件下,训练整体错误预测率为 9.4%,测试错误预测率为 10.3%,整体

在可接受范围之内,不同冻融次数的鸡胸肉得到了较好的区分。其中新鲜肉训练样本和测试样本的准确率都达到了 100%,冻融 1 次和冻融 2 次、3 次的样本也有较高的区分准确度。由于 2 次冻融和 3 次冻融的鸡胸肉的阻抗特性相对类似,反复冻融的样本冻融次数误判的概率会更大。更进一步准确的预测冷冻的冻融次数,需要在广泛收集大量数据的基础上建立一个可靠的数据库并依靠这个数据库建立更加全面,精确的分类判别模型。

表 2 基于 RBF 神经网络的不同冻融次数鸡胸肉分类模型训练及测试结果

Table 2 Classification of chicken breasts with different F-T cycles by radial basis function neural networks

样本 Samples	冻融次数 Freezing- Thawing Cycles	样本数 Number	已预测 Predicted			正确率 Percent correct/%	
			82	0	1		2
训练 Training	0	13	13	0	0	0	100
	1	14	0	14	0	0	100
	2	13	0	0	11	2	84.6
	3	13	0	0	3	10	76.9
测试 Testing	0	8	8	0	0	0	100
	1	7	0	6	1	0	87.5
	2	6	0	0	5	1	83.3
	3	8	0	0	1	7	87.5

为了检验模型的实际检测能力,进行了 2 次验证试验。验证采用样品来自江苏盐城悦达禽业公司(江苏东台)和河南大用禽业集团有限公司(河南周口)常规标准程序屠宰、分割得到的 45 日龄白羽肉鸡鸡胸肉。每个工厂每个处理组验证 20 块鸡胸肉,2 次验证结果类似,都实现了对不同冻融次数处理组鸡胸肉的准确区分。基于江苏东台工厂分类结果如表 3 所示。

表 3 基于径向基神经网络判别模型的不同冻融次数鸡胸肉分类验证结果

Table 3 Classification results of chicken breasts with different Freezing-Thawing cycles verified by Radial Basis Function Neural Networks

冻融次数 Freezing-Thawing Cycles	样本总数 Number of Sample	正确个数 Number of Correct	正确率 Percent correct/%
0	20	20	100
1	20	18	90
2	20	15	75
3	20	16	80

注:验证鸡胸样品为江苏东台悦达禽业公司按照标准常规程序生产的 45 日龄白羽鸡冷冻鸡胸肉。

Note: Verification experiment samples were 45 days frozen white chicken breasts produced according the standard procedure by Dongtai Yueda poultry company.

3 讨论

阻抗测量样品无需复杂前处理, 操作简单, 可以在几十秒内对 1 个样品完成检测, 对样品检测基本无损, 无需使用特殊或高昂的仪器设备, 非常易于基层的推广应用。对于不同种类, 不同部位的肉, 都可以通过一定的检测数据建立适用于自身的检测分类模型。同时在实际检测过程中, 新获取的数据可以对判别模型不断修正, 使其预测结果更加准确。总体而言, 通过阻抗检测对冷冻肉分类鉴别是一种极具发展潜力的技术。

但同时需要指出的是, 本试验采用的样品为规范企业按照标准工艺生产得到的冷冻鸡胸肉。新鲜肉冻结之前的成熟时间、冻藏温度、冻藏期间温度波动、冷冻储藏时间、反复冻融等诸多因素会对冷冻肉的品质产生影响进而可能影响其阻抗特性^[26-27]。此外现实生产中冻结工艺也可能存在差异, 速冻与慢冻对冷冻肉品质也有着显著影响^[28]。而这些复杂多变的影响因素对冷冻肉品质和阻抗特性的具体影响目前还没有准确的数据。因此将来的研究工作需要在大样本量数据采集的基础上, 综合考虑冻藏时间、冻结工艺对肉类阻抗特性的影响, 建立合适的数据分析方法及更全面的冷冻肉品质判别模型^[29], 以进一步提高阻抗检测对冷冻肉品质测定的适用性及其检测的准确性。

4 结论

1) 在 0.05~200 kHz 范围内, 随着频率上升, 新鲜鸡胸肉和解冻鸡胸肉阻抗的幅值呈下降趋势, 中低频段冷鲜肉比冷冻肉有更高的幅值($P < 0.05$), 多次冻融处理后低频段阻抗幅值显著降低($P < 0.05$)。这些变化是区分新鲜肉和冷冻肉的重要依据。在 0.05~200 kHz 范围内, 随着频率上升, 阻抗的相位角呈上升趋势。低频段冷鲜肉比冷冻肉有更高的相位角($P < 0.05$), 高频段冷鲜肉比冷冻肉有更低的相位角($P < 0.05$), 大于 50 kHz 时, 多次冻融处理组相位角有增大的趋势($P < 0.05$)。与冻融 1 次鸡胸肉的相位角变化趋势相反。这些变化可以区分新鲜、1 次冻融和反复冻融的鸡胸肉。

2) 难以单纯依靠阻抗参数对肉的品质直接预测。根据数据特点, 利用特征频点幅值和相位角信息建立的径向基函数神经网络模型尝试对不同冻融次数的鸡胸肉进行分类判断, 所建模型新鲜肉测试样本预测正确率达到 100%, 冻融 1 次的鸡胸肉与反复冻融处理组也有较高区分度, 模型整体训练结果良好。

3) 初步验证结果显示, 阻抗检测可以较为准确预测出肉的冻融次数, 并对新鲜肉与冷冻肉有着极强的分类鉴别能力。对于新鲜肉与冷冻肉的区分及冷冻肉的冻融次数判断而言, 基于阻抗信息的径向基函数神经网络(radial basis function neural networks, RBFNN)模型分类判别是一种便捷、高效的检测方法。但对于复杂冻藏条件对检测结果的影响还需更多试验补充。

[参 考 文 献]

- [1] 周光宏. 肉品加工学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008: 91-94.
Zhou Guanghong. Meat Science and Technology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2008: 91-94.
- [2] Ballin N Z, Lametsch R. Analytical methods for authentication of fresh vs. thawed meat: A review[J]. Meat Science, 2008, 80(2): 151-158.
- [3] Damez J L, Clerjon S, Abouelkaram S, et al. Beef meat electrical impedance spectroscopy and anisotropy sensing for non-invasive early assessment of meat ageing[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 85(1): 116-122.
- [4] Rizo A, Fuentes A, Segovia I F, et al. Development of a new salmon salting-smoking method and process monitoring by impedance spectroscopy[J]. LWT - Food Science and Technology, 2013, 51(1): 218-224.
- [5] Damez J L, Clerjon S. Quantifying and predicting meat and meat products quality attributes using electromagnetic waves: An overview[J]. Meat Science, 2013, 95(4): 879-896.
- [6] Sale P. Instrument for detecting frozen meat by electrical conductance[J]. Revue Generale du Froid, 1974, 65(4): 343-348.
- [7] Kent M, Oehlenschlager J, Mierke-klemeyer S, et al. Estimation of the quality of frozen cod using a new instrumental method[J]. European Food Research and Technology, 2004, 219(5): 540-544.
- [8] Zhang L, Shen H, Luo Y. Study on the electric conduction properties of fresh and frozen-thawed grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) and tilapia (*Oreochromis niloticus*)[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2010, 45(12): 2560-2564.
- [9] Vidacek S, Janci T. Differencing sea bass (*Dicentrarchus labrax*) fillets frozen in different conditions by impedance measurements[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2012, 47(8): 1757-1764.
- [10] Yu Tianhua, Liu Jing, Zhou Yixin. Using electrical impedance detection to evaluate the viability of biomaterials subject to freezing or thermal injury[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2004, 378(7): 1793-1800.

- [11] Heymsfield S B, Gallagher D. Upper extremity skeletal muscle mass: Potential of measurement with single frequency bio-impedance analysis[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 1998, 49(5): 473—474.
- [12] Fricke H. A mathematical treatment of the electrical conductivity and capacity of disperse systems I. The electric conductivity of a suspension of homogeneous spheroids[J]. *Physical Review*, 1924, 24(5): 575—587.
- [13] Damez J L, Clerjon S, Abouelkaram S, et al. Dielectric behavior of beef meat in the 1-1500 kHz range: Simulation with the Fricke/Cole-Cole model[J]. *Meat Science*, 2007, 77(4): 512—519.
- [14] 黄岚, 丁强, 王忠义, 等. 基于阻抗谱的解冻肉与鲜肉识别方法[P]. 中国专利: 101949876A, 2011-01-19. Huang Lan, Ding Qiang, Wang Zhongyi, et al. Thawed and fresh meat identification method based on impedance spectroscopy[P]. China Patent: 101949876A, 2011-01-19. (in Chinese with English abstract)
- [15] 汪小芳. 基于神经网络利用机械特性检测苹果品质的方法[D]. 武汉: 华中农业大学, 2006. Wang Xiaofang. Research on Examining Apple Quality Using the Mechanical Property Base on Artificial Neural Network[D]. Wuhan: Huazhong Agriculture University, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [16] 张顶学, 刘新芝, 关治洪. RBF神经网络算法及其应用[J]. *石油化工高等学校学报*, 2007, 20(3): 86—88. Zhang Dingxue, Liu Xinzhi, Guan Zhihong. Radial basis function neural network algorithm and its application[J]. *Journal of Petrochemical Universities*, 2007, 20(3): 86—88. (in Chinese with English abstract)
- [17] 戚军. 反复冻融对羊肉品质的影响研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2009. Qi Jun. Effect of Repeated Freeze-Thaw Cycles on Goat Quality[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [18] 牛力, 陈景宜, 黄明, 等. 不同冻藏温度和时间对鸡胸肉食用品质的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2012, 35(4): 115—120. Niu Li, Chen Jingyi, Huang Ming, et al. Effect of different frozen storage temperature and time on the eating quality of chicken breast meat[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2012, 35(4): 115—120. (in Chinese with English abstract)
- [19] Aubourg S P. Lipid damage detection during the frozen storage of an underutilized species[J]. *Food Research International*, 1999, 32(7): 497—502.
- [20] 韩敏义, 刘志勤, 刘岳, 等. 反复冻融对鸡肉品质的影响[J]. *江苏农业学报*, 2013, 29(1): 167—171. Han Minyi, Liu Zhiqin, Liu Yue, et al. Effect of repeated freezing and thawing cycles on quality of chicken[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2013, 29(1): 167—171. (in Chinese with English abstract)
- [21] Boonsumrej S, Chaiwanichsiri S, Tantratian S, et al. Effects of freezing and thawing on the quality changes of tiger shrimp (*Penaeus monodon*) frozen by air-blast and cryogenic freezing[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 80(1): 292—299.
- [22] Pliquett U. Bioimpedance: A Review for Food Processing[J]. *Food Engineering Review*, 2010, 2(2): 74—94.
- [23] Kuson P, Terdwongworakul A. Minimally-destructive evaluation of durian maturity based on electrical impedance measurement[J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 116(1): 50—56.
- [24] Fuentes A, Masot R, Fernández-segovia I. Differentiation between fresh and frozen-thawed sea bream (*Sparus aurata*) using impedance spectroscopy techniques[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2013, 19: 210—217.
- [25] 付鹏, 姚建刚, 龚磊. 利用红外特征和 Softmax 回归识别绝缘子污秽等级[J]. *计算机工程与应用*, doi:10.3778/j.issn.1002—8331.1307—0311. Fu Peng, Yao Jiangan, Gong Lei. Contamination grades recognition of insulators using infrared features and softmax regression[J]. *Computer Engineering and Applications*. doi:10.3778/j.issn.1002—8331.1307—0311. (in Chinese with English abstract)
- [26] Chevalier D, Sequeira-Munoz A, Le Bail A, et al. Effect of freezing conditions and storage on ice crystals and drip volume in turbot (*Scophthalmus maximus*), evaluation of pressure shift freezing vs. air-blast freezing[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2001, 1(3): 193—201.
- [27] Vieira C, Diaz M T, Martínez B, et al. Effect of frozen storage conditions (temperature and length of storage) on microbiological and sensory quality of rustic crossbred beef at different states of aging[J]. *Meat Science*, 2009, 83(3): 398—404.
- [28] Ngapo T M, Babare I H, Reynolds J, et al. Freezing rate and frozen storage effects on the ultrastructure of samples of pork[J]. *Meat Science*, 1999, 53(3): 159—168.
- [29] Yang Y, Wang Z Y, Ding Q, et al. Moisture content prediction of porcine meat by bioelectrical impedance spectroscopy[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2013, 58(3): 819—825.

Classification of chicken breasts with different freezing-thawing cycles by impedance properties and artificial neural networks

Li Weiming, Wang Peng, Chen Tianhao, Xu Xinglian^{*}, Zhou Guanghong

(National Centre of Meat Quality and Safety Control; Synergetic Innovation Center of Food Safety and Nutrition, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Electric impedance properties of biological tissue closely relate with their tissue structure. A few published investigations have shown that electric impedance has a rapid detection capability to meat quality. To explore the impedance detection ability for frozen-thawed meat, electric impedance magnitude and phase properties of unfrozen and frozen-thawed chicken breasts subjected to different thawing times were studied. The maximum freezing-thawing cycle was three times. Sixteen different frequencies from 50 Hz to 200 kHz and quality parameters like thawing loss, cooking loss, pH value, and TBARS (Thiobarbituric acid reactive substances) of 20 samples of each group were investigated.

The impedance of the samples was measured by an LCR electronic bridge at the voltage of 3 V. Copper needle electrodes with a length up to 15 mm and a distance of 15 mm between two electrodes were used. The temperature of the meat was kept within 0-4°C during the measurement. The location of each test was the same and measurement time was 1-2 sec at every frequency.

The experimental results showed that changes in the tissue structure caused by freezing and thawing could be reflected by the impedance magnitude and phase. The impedance magnitude of both fresh and frozen-thawed meat would decrease as the frequencies increased and the impedance magnitude of fresh meat was significantly higher ($P < 0.01$) than frozen-thawed meat in the low-frequency range, while the opposite trend was found in the high-frequency range. Those changing trends of impedance are indicators for capacitance characteristics of cell remembrance. Biological tissues are composed of cells that are surrounded by extracellular liquid. The main current flows through the extracellular fluid and the cells are bypassed when low-frequency current is applied to the tissue. The cell membrane acts as an insulator at low frequencies. With the current frequency increases, a part of the current will flow through intracellular fluid through the cell membrane. So, low-frequency impedance of biological tissue is larger than high-frequency impedance.

The impedance phase angle of both fresh and frozen-thawed meat would increase as the frequencies increase. Compared with frozen-thawed meat, fresh meat had a higher ($P < 0.05$) impedance phase angle in the low-frequency range but a lower ($P < 0.05$) value in the high-frequency range. So, the significant difference ($P < 0.05$) of high-frequency phase angle and low-frequency impedance magnitude between fresh and frozen-thawed meat would be an ideal index to distinguish those two kinds of meat.

After freezing-thawing cycles, low-frequency impedance magnitude would decrease significantly ($P < 0.05$), but the difference between two and three times freezing-thawing cycle was not significant ($P > 0.05$). High-frequency phase angle would increase ($P < 0.05$) which is different with normal frozen processing groups, especially at levels higher than 50 kHz. This impedance phase property of meat with more than one freezing-thawing cycle gives a clear distinction between them and meat with one freezing-thawing cycle. These changes of impedance properties demonstrate that freezing-thawing cycles have a remarkable influence on the structure of cell membrane and lead to a decline of cell membrane capacitance.

From the quality aspect, the increasing of freezing-thawing cycles lead to inevitable decline in meat quality. More thawing loss, cooking loss and higher TBARS value are found after freezing-thawing cycles. The precise calculation of the quality by impedance measurement could not be obtained for no accordant significant correlation ($P > 0.05$) was found between impedance properties and quality parameters in different groups.

Radial Basis Function (RBF) Neural Networks that are built up based on impedance magnitude and phase angle of specific frequencies from 50 Hz to 200 kHz (Total 12 frequencies) could give a solution to estimate the freezing-thawing cycles of meat without complex mathematics modeling, and the prediction accuracy satisfies the requirement. Accuracy of the testing samples of fresh chicken meat was up to 100 percent, one time freezing-thawing cycle samples also had a high degree of distinction from two and three times. These results reflect that electrical impedance measurement is a simple innocuous tool for frozen meat characterization. For improving the measurement accuracy, a database with a big enough data volume needs to be built in future work.

Key words: neural networks; dielectric properties; quality control; freezing-thawing; electric impedance; chicken breasts

(责任编辑: 郭海枫)