鸭蛋快速腌制过程中蛋清的介电特性

昝沛清[1,2,3]，邱伟强[1,2,3]，冯宇辉[4]，杨远华[5]，金银哲[*1,2,3]

(1. 上海海洋大学 食品学院，上海 201306；2. 上海海洋大学 食品热加工工程中心，上海 201306；3. 上海海洋大学 食品科学与工程国家级实验教学示范中心，上海 201306；4. 吉林烟草工业有限责任公司，吉林 延吉 133000；5. 微山县远华湖产食品有限公司，山东 济宁 277600)

摘要：为探究鸭蛋在快速腌制过程中蛋清介电特性的变化，将鸭蛋分别进行直接腌制、在醋浸泡液(乙酸体积分数为 1.45%)或酒浸泡液(乙醇体积分数为 3.22%)中浸泡 20 min 后再进行腌制，采用同轴探针技术在 0.3~3.0 GHz 下测定了不同腌制方法下分别腌制 5、10、15、20、25 d 时蛋清的介电特性，在 915 MHz 与 2 450 MHz 下分析其介电特性、穿透深度与蛋清含盐率之间的关系。结果表明，经过乙酸与乙醇的浸泡，鸭蛋腌制速度提高，醋浸泡组腌制速率较对照组(直接腌制)可加快 40%(P<0.05)。随着频率增加，蛋清介电常数与介电损耗均下降，二者在低频时(0.3~1.0 GHz)下降速率均高于高频(1.0~3.0 GHz)。腌制过程中，随着含盐率的增加，介电损耗呈现出升高的趋势；相同腌制时间，醋浸泡组介电损耗高于对照组与酒浸泡组。在 915 MHz 与 2 450 MHz 时，酒浸泡组的介电常数随含盐率上升呈现下降趋势，对照组与醋浸泡组则相反。随着腌制时间的延长，蛋清穿透深度在 915 MHz 与 2 450 MHz 时逐渐下降，915 MHz 的穿透深度大于 2 450 MHz。将穿透深度与蛋清含盐率之间的相关性进行多项式拟合，酒浸泡组中二者具有良好的相关性(R^2>0.900 0)。

关键词：咸鸭蛋；快速腌制；介电特性；穿透深度；多项式拟合

中图分类号：TS 253.4+6　**文章编号**：1673-1689(2023)05-0012-08　DOI：10.3969/j.issn. 1673-1689.2023.05.002

Study on Dielectric Properties of Duck Egg White During Quick Pickling Process

ZAN Peiqing[1,2,3]，*QIU Weiqiang*[1,2,3]，*FENG Yuhui*[4]，*YANG Yuanhua*[5]，*JIN Yinzhe*[*1,2,3]

(1. College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Engineering Research Center of Food Thermal-Processing Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. National Experimental Teaching Demonstration Center for Food Science and Engineering, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 4. Jilin Tobacco Industry Co., Ltd., Yanji 133000, China; 5. Weishan Yuanhua Lake Food Co., Ltd., Jining 277600, China)

Abstract: To investigate the changes in dielectric properties of duck egg white during rapid pickling, duck eggs were pickled directly, or soaked in vinegar (with acetic acid volume fraction of 1.45%) or wine (with ethanol volume fraction of 3.22%) for 20 minutes before pickling. The dielectric properties of the egg white were measured using coaxial probe technology at frequencies

收稿日期：2021-10-04

基金项目：国家“十三五”重点研发计划项目(2020YFD0900905)。

* **通信作者**：金银哲(1977—)，男，博士，副教授，硕士研究生导师，主要从事食品热加工研究。E-mail：yzjin@shou.edu.cn

from 0.3 to 3.0 GHz after being pickled by different methods for 5, 10, 15, 20, and 25 days. The relationship between the dielectric properties, penetration depth, and salt content of the egg white was analyzed at frequencies of 915 MHz and 2 450 MHz. The results showed that the pickling rate of duck eggs increased after soaking in acetic acid and wine, and the pickling rate of the vinegar-soaked group could be accelerated by 40% compared with the control group (direct pickling) (P<0.05). As the frequency increased, the dielectric constant and dielectric loss of egg white decreased. However, the rate of decrease was higher at low frequencies (0.3~1.0 GHz) compared to that at high frequencies (1.0~3.0 GHz). During the pickling process, the dielectric loss increased with the increase of salt content. Moreover, the vinegar-soaked group exhibited higher dielectric loss than both the control group and the wine-soaked group, for the same pickling duration. At 915 MHz and 2 450 MHz, the dielectric constant of the wine-soaked group showed a decreasing trend as the salt content increased, while the control group and vinegar-soaked group showed an opposite trend. As the pickling time increased, the penetration depth of egg white gradually decreased at both 915 MHz and 2 450 MHz. Additionally, the penetration depth at 915 MHz was greater than that at 2 450 MHz. The correlation between penetration depth and salt content in egg whites was fitted with a polynomial equation, and a good correlation (R^2>0.900 0) was found between the two in the wine-soaked group.

Keywords: salted duck eggs, rapid pickling,dielectric properties, penetration depth, polynomial fit

咸鸭蛋是我国一种特色蛋类加工制品,因其风味独特,氨基酸比例平衡,易被人体吸收,而深受消费者喜爱。目前市场上腌制咸鸭蛋周期较长,夏季30 d左右,春秋两季为40~50 d[1],缩短制作周期现在已成为国内学者关注的主要问题。关于快速腌制咸鸭蛋,当前研究通常从以下几个方面考虑:改变蛋壳及壳膜结构,减少蛋壳厚度;添加香辛料[2]、酸碱添加剂[3]等至腌制液;改变腌制温度、压力[4]等外界条件;利用超声波[5]、循环水[6]等技术。近年来咸鸭蛋的研究主要集中在咸蛋清、蛋壳[7]的综合利用,腌制过程中蛋清和蛋黄的蛋白质结构、功能特性[8]、风味[9-10]、抗氧化性等方面。在鸭蛋加工领域,新型加工方式与产品越来越多,射频与微波技术也逐渐应用到蛋类加工上。Kannan等利用射频加热对鸡蛋进行巴氏杀菌,在基本不影响其物理特性的情况下,确定了加热工艺参数[11];Guo等研究了贮藏过程中鸡蛋在10~1 800 MHz时介电特性的变化,发现贮藏过程中蛋内物质化学结构、生物变化复杂,间接影响鸡蛋的介电特性[12]。

介电特性是决定电磁能量与物质相互作用的内在特性,很大程度上,这一性质还决定了物质在高频或者微波电场作用下的行为[12],主要考察2个参数,介电常数ε'(反映物质贮存电磁能的能力)和介电损耗ε''(反映电磁能转化为热能的能力)。在微波介质加热应用(加工或烹饪)和介质加热设备的设计中,了解物质介电特性相当重要。介电特性会受到食物成分(水分、盐分、脂肪、蛋白质等)、频率、温度等的影响。近年来,关于谷物、水果、蔬菜、奶制品、饮料等食品介电特性的研究取得了很大进展。Boreddy等研究含水量与温度对蛋清粉介电特性的影响,计算了不同频率下的穿透深度,使用多项式拟合探索介电特性与含水量和温度的相关性[13]。

目前关于鸭蛋在腌制过程中介电特性变化的研究甚少,了解鸭蛋的介电特性对鸭蛋及其加工产品的加热和质量检测很有帮助。作者以鸭蛋蛋清为主要研究对象,使用不同处理方法,研究鸭蛋在腌制过程中蛋清含盐率的变化情况,蛋清介电特性以及穿透深度与蛋清含盐率的相关性,为鸭蛋腌制及蛋清产物的加工提供一定的基础数据和参考价值。

1 材料与方法

1.1 实验原料与试剂

新鲜鸭蛋:微山县远华湖产食品有限公司产品;食用盐:中国盐业股份有限公司产品;香料(花椒、香叶、桂片、八角、姜片):北京市邦味调味品有限公司产品;30°醋精:上海宝鼎酿造有限公司产品;56°白酒:北京顺鑫农业股份有限公司产品。

硝酸银标准溶液(0.1 mol/L)、正己烷、异丙醇(均为国产分析纯):上海麦克林生化科技股份有限公司产品;铬酸钾指示剂:上海吉至生化科技有限公司产品。

1.2 主要仪器与设备

BS224S 分析天平:赛多利斯科学仪器有限公司产品;W2-100SP 旋转蒸发器:上海申生科技有限公司产品;H1850R 高速冷冻离心机:美国贝克曼仪器有限公司产品;ULTRATURRAX 均质机:广州仪科实验室技术有限公司产品;PNA-L 网络分析仪:美国安捷伦公司产品;MesoMR23-060H-1 型低场核磁共振仪:上海纽迈电子科技有限公司产品;日立 SU5000 热场发射扫描电镜:日本高新技术公司产品。

1.3 实验方法

1.3.1 鸭蛋处理与实验分组

1)鸭蛋前处理 用毛刷将鸭蛋清洗干净,自然风干,剔除裂蛋、污染蛋等。

2)浸泡液的制备 醋浸泡液:取 30°醋精(乙酸体积分数为 30%)91.5 mL, 溶于 1 800 mL 自来水中, 制成乙酸体积分数为 1.45%的浸泡液。酒浸泡液:取 56°白酒(乙醇体积分数为 56%)110 mL,溶于 1 800 mL 自来水中,制成乙醇体积分数为 3.22%的浸泡液。腌制液:实验室用水 2 L,食盐 500 g,香辛料 31 g(花椒 5 g、香叶 2 g、桂片 8 g、八角 6 g、姜片 10 g),将混合物煮开晾凉,加 56°的白酒 100 mL,制成腌制液。

3)腌制 每 18 个蛋放置于 3 L 的腌制缸中,腌制液倒入缸中,室温下腌制 25 d,每隔 5 d 测定鸭蛋含盐率以及介电特性等指标。不同实验组的腌制方法见表 1。

表 1 不同实验组腌制方法

Table 1 Pickling methods of different experimental groups

腌制组别	腌制工艺
对照组(直接腌制)	将鸭蛋直接浸泡在腌制液中,腌制 25 d 后出缸
醋浸泡组	将鸭蛋在醋浸泡液中浸泡 20 min, 取出洗净晾干,再在腌制液中腌制 25 d 后出缸
酒浸泡组	将鸭蛋在酒浸泡液中浸泡 20 min, 取出洗净晾干,再在腌制液中腌制 25 d 后出缸

1.3.2 蛋清含盐率测定

参考文献[14]中的方法并略加修改。将 1 g 蛋清溶解在含有 20 mL 蒸馏水的烧杯中,用均质机搅拌均匀。之后,加入 5~6 滴质量浓度为 5 g/dL 的铬酸钾指示剂, 用 0.1 mol/L 硝酸银标准溶液滴定混合物,直到其由白色变成永久性砖红色,即为滴定终点,记录消耗的硝酸银标准溶液体积。含盐率通过式(1)计算:

$$I=\frac{0.058\ 44\times c_N\times V}{m}\times 100\% \quad (1)$$

式中:I 为含盐率,%;m 为蛋清的质量,g;V 为消耗的硝酸银标准溶液的体积,mL;c_N 为硝酸银标准溶液的浓度,mol/L;0.058 44 为 NaCl 的当量。

1.3.3 蛋清介电特性的测量

采用同轴探针连接网络分析仪来测量不同腌制阶段蛋清的介电特性,如图 1 所示。测量之前仪器预热 1 h 以获得稳定的测量结果,依次使用空气、短接块、去离子水对仪器进行校准,通过测量去离子水的介电特性检验校准效果。本实验中测定频率为 0.3~3.0 GHz (仪器每 5 MHz 采集一个数据点),每 100 MHz 取一个点,共 28 个频率点。测量时将蛋清与蛋黄完全分离,倒入 50 mL 的烧杯中,搅拌混匀,探针从液体表面插入约 1.5 cm,测量温度为室温。在腌制期间内,每隔 5 d 测定蛋清的介电特性,每组平行测定 3 次。

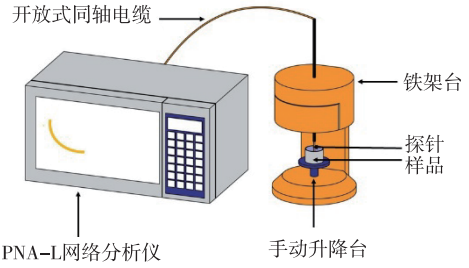


图 1 介电特性测量系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of dielectric characteristic measurement system

1.3.4 穿透深度的计算

穿透深度(penetration depth,d_p)是指微波能从介电材料表面穿透到其初始值 1/e(e=2.718)位置时的距离[15],在评估特定电磁场频率是否可以均匀的加热某一样品时,穿透深度是介电加热过程中一个重要的概念。食物中射频和微波能量的穿透深度可以通过式(2)计算:

$$d_p=\frac{c}{2\pi f\sqrt{2\varepsilon'\left[\sqrt{1+\left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2}-1\right]}} \quad (2)$$

式中:d_p 为食物中射频和微波能量的穿透深度,m;c 为光在真空中的传播速度,3×10^8 m/s;f 为频率,Hz;ε'为样品的介电常数;ε''为样品的介电损耗。

1.4 数据处理

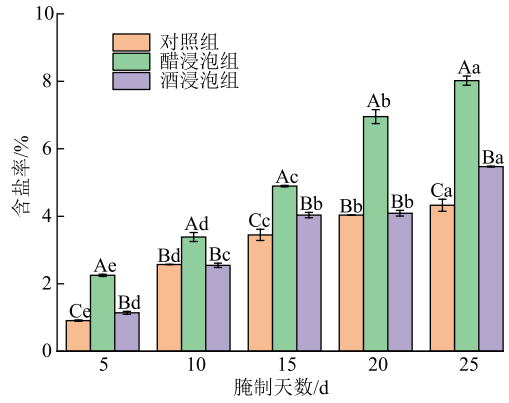
本实验中所有数据至少进行 3 次平行测量,结

果以平均值±标准差表示。使用 Excel 2010 处理数据和 OriginPro 2021 软件绘图。采用 SPSS 26.0 分析数据间的差异性。

2 结果与分析

2.1 腌制过程中蛋清含盐率的变化

腌制鸭蛋时，食盐依次透过蛋壳上的气孔、蛋壳膜进入蛋内进行渗透和扩散。如图 2 所示,在腌制期间各组蛋清含盐率均呈现上升的趋势。与对照组相比,腌制前经过醋与酒浸泡过的鸭蛋含盐率增长速率较快，在腌制 15 d 时与对照组腌制 25 d 含盐率相当,效率提高了 40%(P<0.05),这表明乙酸与乙醇对鸭蛋蛋壳及蛋壳内膜结构起到一定作用,加快了盐分在蛋清中的渗透和扩散速率。刘良忠等在研究中也发现酸在缩短咸鸭蛋成熟时间上有明显作用[16]。在整个腌制阶段,醋浸泡组含盐率均高于酒浸泡组,在第 25 天其含盐率(8.02%)高出酒浸泡组(5.47%)46.62%,这可能是由于乙酸作用于蛋壳,溶解部分蛋壳的无机物成分[17],使蛋壳厚度变薄,气孔增大,而乙醇则透过蛋壳上的气孔与蛋壳内膜发生反应,其作用效果弱导致腌制液渗透效率低,因此使用乙酸处理蛋壳的效果更为明显。



图中不同字母表示差异显著(P<0.05)。

图 2 腌制过程中蛋清含盐率的变化

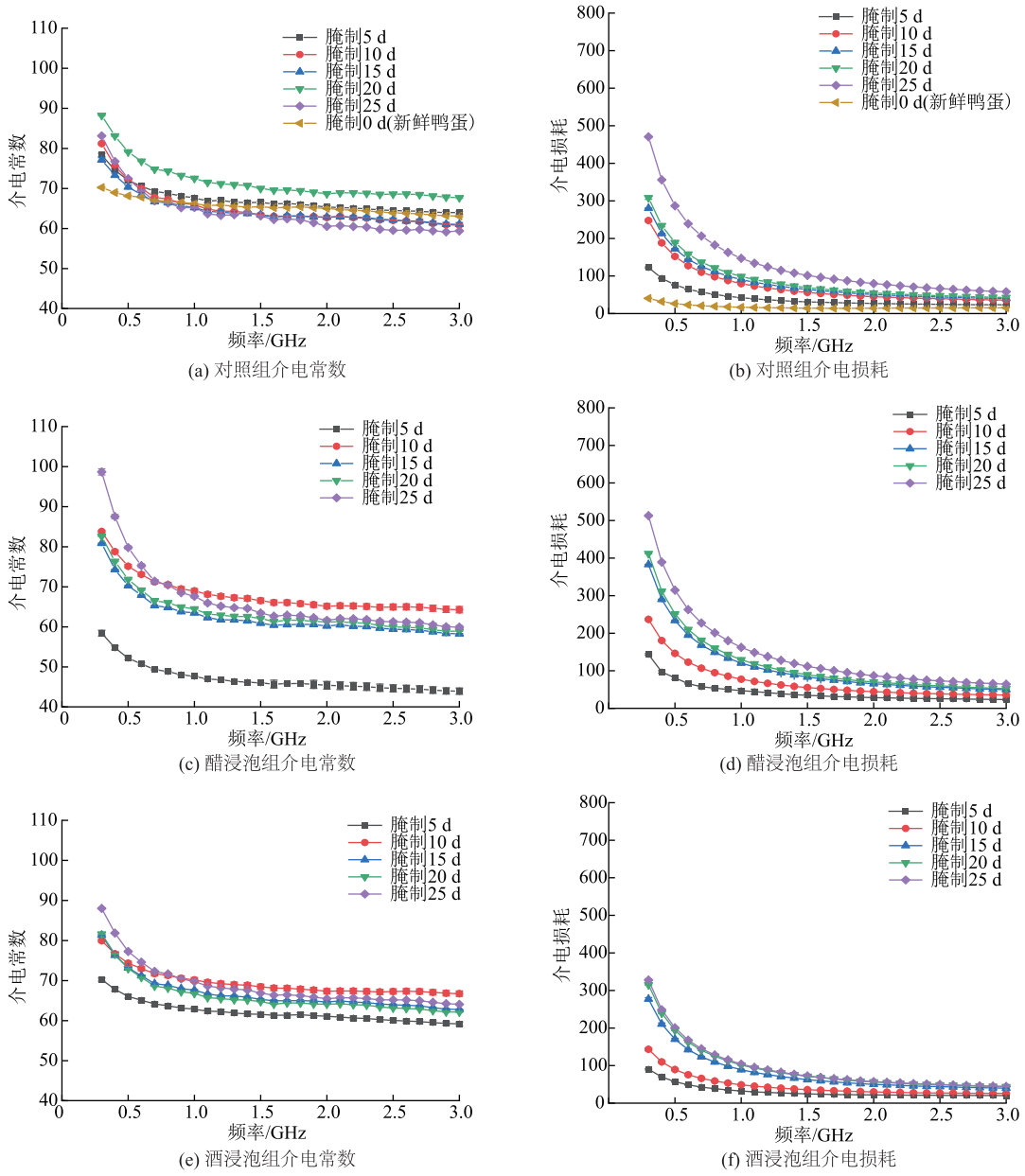
Fig. 2 Changes in the salt content of egg white during pickling

2.2 频率对不同处理组蛋清介电特性的影响

介电特性的影响机制通常包括生物材料的偶极效应,电子、原子的极化以及 Maxwell-Wager 效应[18]。这些机制体现在带电离子在自由溶液或者植物、动物组织中的振荡迁移,极性分子如水和醇的旋转，以及蛋白质侧链和结合水从 1 MHz 到 30 GHz 大范围频谱上的弛豫。在射频和微波频率下对食品的工业介电加热具有实际重要性的主要损耗机制是离子传导和偶极旋转[19]。

2.2.1 介电常数 食物的介电特性受许多因素的影响,包括频率、温度、水分含量和其他食物成分,特别是盐分和脂肪含量[20]。蛋清的介电特性主要依赖于水、电解质和蛋白质,如卵白蛋白和伴清蛋白。在 0.3~3.0 GHz 时，不同处理组蛋清溶液的介电常数变化趋势如图 3 所示,在 0.3~1.0 GHz 时,蛋清介电常数随频率的增大变化趋势显著,1.0~3.0 GHz 时呈平缓下降的趋势,宋春芳等在测定芋头和馒头的介电特性时也发现同样的规律[21-22]。在图 3(a)中,当频率小于 1.0 GHz 时，新鲜鸭蛋蛋清的介电常数与对照组腌制 5 d 时存在显著差异,0.3 GHz 时新鲜鸭蛋蛋清的介电常数为 70.24±0.18，腌制 5 d 后增长为 78.36±0.38,当频率大于 1.0 GHz 时,二者的介电常数曲线几乎重合,这可能是由于在低频下介电常数的大小主要由离子传导决定。腌制 5 d 的蛋清 NaCl 含量升高,介电常数随之升高,随着频率逐渐增大,主导机制从离子传导机制过渡为偶极旋转机制,而此时由于过高的频率导致偶极子在磁场中旋转滞后,取向极化停止,因此介电常数降低[23]。由图 3(c)可知,醋浸泡组腌制 5 d 时,介电常数小于其他两组，可能是因为经过乙酸浸泡的蛋壳被软化,大量乙酸分子进入蛋内,在腌制初期偶极子极化效应高于离子传导效应(乙酸属极性分子),同时 NaCl 含量迅速提高也导致蛋清内水分的流失,使其对电磁能的吸收减弱，影响了介电常数的升高[24]。腌制至 25 d 时,醋浸泡组介电常数在0.3 GHz 下高达 98.69±0.76，显著高于酒浸泡组 88.01±0.70 与对照组 83.14±0.04,随着频率增加,各处理组介电常数间差距减小,此时醋浸泡组含盐率为 8.02%,大量 NaCl 进入蛋内,Na^+与蛋清蛋白的羧基等带负电荷的基团相结合,Cl^-与氨基等带正电的基团相结合,蛋清中亲水基团减少,因此黏度降低,偶极旋转阻力减小,较易达到极化,同时离子传导作用增强,从而导致醋浸泡组介电常数增大。如图 3(a)、图 3(c)、图 3(e)所示,腌制 25 d 时 3 个实验组在 0.3~3.0 GHz 介电常数变化幅度均高于腌制前期,可以说明当鸭蛋腌制到一定阶段时,低频范围下(频率低于 1.0 GHz)，离子传导是影响蛋制品介电特性的主要因素,而偶极旋转随着微波频率的增加发挥着越来

越大的作用,这导致了介电常数在机制过渡频率范围内发生剧烈下降。



(a) 对照组介电常数　(b) 对照组介电损耗

(c) 醋浸泡组介电常数　(d) 醋浸泡组介电损耗

(e) 酒浸泡组介电常数　(f) 酒浸泡组介电损耗

图 3　频率对不同实验组蛋清介电特性的影响

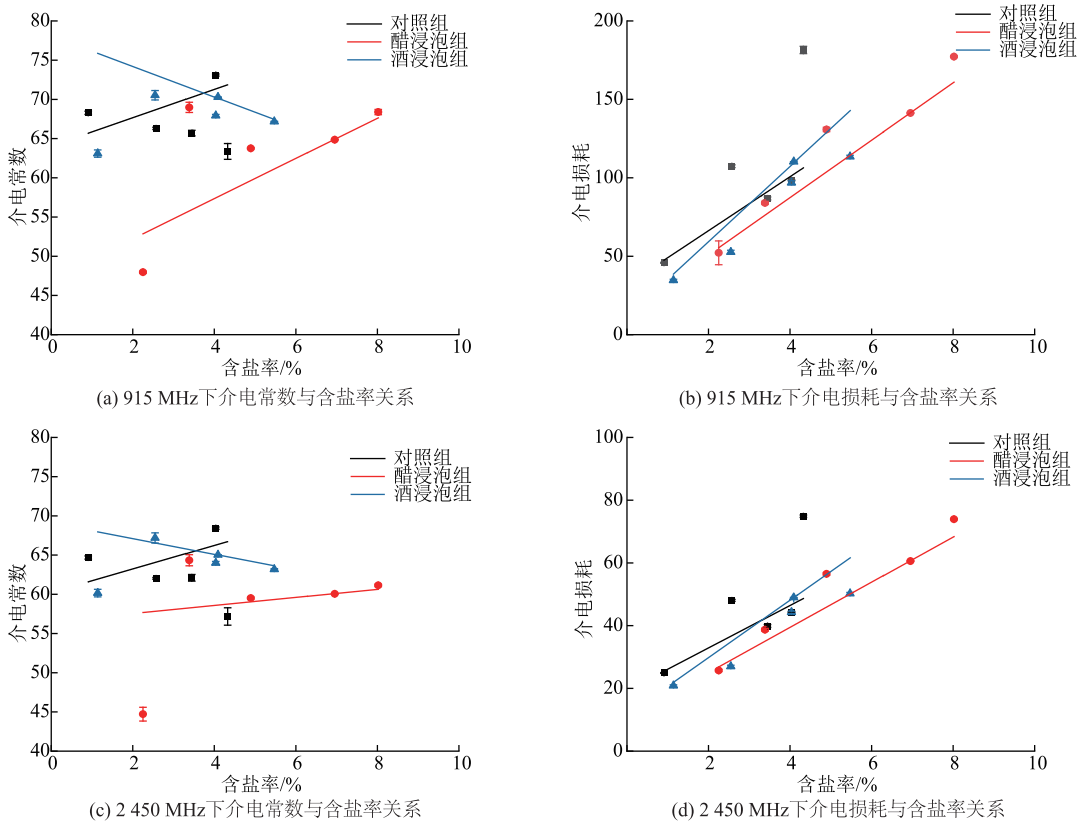
Fig. 3　Effect of frequency on dielectric properties of egg white in different experimental groups

2.2.2　介电损耗　离子传导和极性分子的偶极旋转支配着微波频率下样品介电损耗的频率特性。由图 3 可知,3 个实验组蛋清的介电损耗均随着频率的增大呈现下降的趋势,在腌制阶段,蛋清含水率降低[25],损失系数降低,脱水食品将电磁能量转化为热能的能力也随之减弱。随着腌制时间的延长,各组蛋清的介电损耗呈现上升趋势,但在相同腌制时间,醋浸泡组的介电损耗在 0.3~3.0 GHz 时高于同频率下酒浸泡组和对照组,这是因为在低频时(频率低于 1.0 GHz),离子传导为影响介电特性的主要机制,盐分的提高可以影响鸭蛋蛋清的介电损耗,醋浸泡组NaCl 含量最高,故在低频阶段介电特性最高。另外,此时食盐对蛋白质与水的结合方式产生了一定影响[3],蛋清蛋白的氢质子流动性增加,鸭蛋蛋清逐渐变稀,在高频条件下(频率高于 1.0 GHz),蛋内极性分子旋转阻力变小使分子较易达到极化,这也是在大于 2.0 GHz 时醋浸泡组高于其他两组的原因。Yang 等发现在同一温度条件下,增加盐含量

可以提高虾肉糜的解冻速率,盐的添加可使物料中产生更多的自由水,样品中离子和偶极子含量增加使介电损耗增加[20]。如图 3(b)和图 3(f)所示,酒浸泡组在高频下(频率高于 1.0 GHz)的介电损耗低于对照组,可能是因为乙醇大分子进入蛋清内,分子质量的增加使偶极子在旋转时遭受更大的阻力,从而导致介电损耗降低。

2.3 特定频率下介电特性与不同处理组蛋清含盐率的关系

在微波加热领域,915 MHz 和 2 450 MHz 分别用于商业应用和家庭应用[13]。图 4 为 915 MHz 和 2 450 MHz 下介电常数和介电损耗与含盐率之间的关系。对照组与醋浸泡组在两个特定的频率下,介电常数随着蛋清含盐率的增长而增长,而酒浸泡组则呈现相反的趋势。3 个处理组介电特性在 915 MHz 时增长或降低的速率均大于 2 450 MHz。在图 4(b)和图 4(d)中,随着含盐率的增加,介电损耗在两个频率下呈现出升高的趋势,在 2 450 MHz 时介电损耗小于 915 MHz,而酒浸泡组介电损耗的增长较其他两组更快,这可能与酒浸泡后蛋清内容物的成分有关。



(a) 915 MHz下介电常数与含盐率关系　(b) 915 MHz下介电损耗与含盐率关系

(c) 2 450 MHz下介电常数与含盐率关系　(d) 2 450 MHz下介电损耗与含盐率关系

图 4　915 MHz 与 2 450 MHz 下蛋清介电特性与不同实验组含盐率的关系

Fig. 4　Relationship between dielectric properties of egg white and salt content of different experimental groups at 915 MHz and 2 450 MHz

2.4 穿透深度

穿透深度是一类特殊的介电特性参数,对于研发和实际运用微波处理工艺有重大现实意义。穿透深度与频率成反比,即短波电磁波比长波电磁波穿透能力更弱。表 2 是不同腌制工艺在腌制过程中的穿透深度。如表 2 所示,相同的腌制时间,同一处理组穿透深度在 915 MHz 下高于 2 450 MHz。随着腌制时间的延长,各处理组穿透深度呈现减小的趋势,对照组在 915 MHz 下腌制 25 d 穿透深度降低 67.30%,酒浸泡组降低 62.95%,醋浸泡组降低 56.88%,这可能是因为腌制 25 d 时样品介电损耗增强,介电常数和介电损耗相对较高时,电磁波不能深入渗透到高水分含量及高含盐率的物料中,此时各组蛋清含盐率均提高,因此穿透深度下降。Lin 等在咸蛋清粉中增加盐含量也发现此规律[26]。

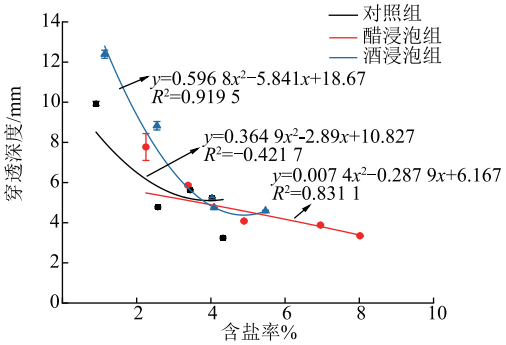
表 2　915 MHz 与 2 450 MHz 下不同实验组在腌制期间的穿透深度

Table 2　Penetration depth of different experimental groups at 915 MHz and 2 450 MHz during pickling

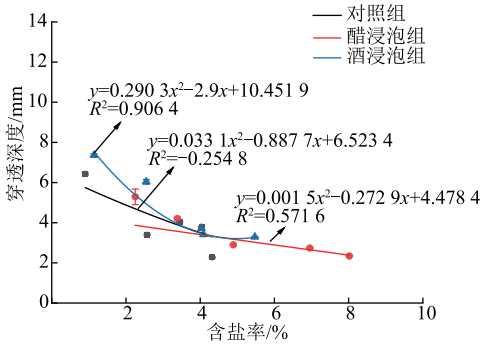
组别	腌制时间/d	穿透深度/mm	
		915 MHz	2 450 MHz
对照组	5	9.94±0.10	6.43±0.05
	10	4.77±0.04	3.40±0.03
	15	5.62±0.00	4.03±0.03
	20	5.25±0.01	3.81±0.00
	25	3.25±0.04	2.27±0.02
醋浸泡组	5	7.77±0.67	5.29±0.39
	10	5.86±0.06	4.21±0.05
	15	4.08±0.03	2.90±0.02
	20	3.88±0.01	2.74±0.00
	25	3.35±0.01	2.34±0.01
酒浸泡组	5	12.39±0.2	7.36±0.07
	10	8.83±0.21	6.04±0.11
	15	5.20±0.06	3.71±0.03
	20	4.75±0.01	3.41±0.01
	25	4.59±0.03	3.29±0.02

2.5　穿透深度与不同处理组蛋清含盐率的相关性

在 915 MHz 和 2 450 MHz 下，对蛋清含盐率与其穿透深度进行多项式拟合，二者的相关性如图 5 所示。随着含盐率的提高，两个频率下蛋清的穿透深度均呈现下降的趋势。915 MHz 下，对照组的拟合系数 R^2 为−0.421 7，2 450 MHz 下的 R^2 系数为−0.254 8，这表明多项式拟合对于对照组含盐率与其穿透深度的相关性并不能做出良好预测。醋浸泡组在 915 MHz 下 R^2 为 0.831 1，说明此时蛋清含盐率与穿透深度具有一定的相关性，而 2 450 MHz 下该组 R^2 降低，该拟合方程不能预测穿透深度与含盐率关系。对于酒浸泡组，拟合系数 R^2>0.900 0，这表明经过酒浸泡后的鸭蛋内环境蛋清介电系统可以使用多项式拟合出的方程来很好地预测含盐率与穿透深度的关系。Xiang 等使用多项式拟合探究南极磷虾酶解液与葡萄糖的美拉德反应产物的颜色值（L^*、a^* 和 b^*）与介电常数和介电损耗之间的相关性，并用该方法对美拉德反应的过程进行监测和控制[27]。



(a) 915 MHz下穿透深度与含盐率相关性



(b) 2 450 MHz下穿透深度与含盐率相关性

图 5　不同实验组蛋清含盐率与其穿透深度之间的相关性

Fig. 5　Correlation between salt content and penetration depth of egg white in different experimental groups

3　结　语

通过使用乙酸和乙醇改变鸭蛋蛋壳和壳膜的通透性，增强腌制液的渗透以达到快速腌制的目的。使用醋与酒浸泡的处理组，蛋清含盐率均高于对照组，其中醋浸泡组腌制速率更快。在此基础上，测定蛋清的介电常数与介电损耗，考察介电特性、穿透深度与蛋清含盐率之间的关系。随着腌制时间的延长，蛋清介电损耗与介电常数呈现上升的趋势，而其微波穿透深度则逐渐降低，且在 2 450 MHz 下穿透深度小于 915 MHz。蛋清介电特性频率依赖性较强，同一种处理方式下，介电损耗与介电常数均随频率的增大而减小。在特定频率下（915 MHz 和 2 450 MHz），当对照组与醋浸泡组含盐率增大，介电常数与介电损耗随之提高，而酒浸泡组介电常数则随含盐率增大而下降。通过对含盐率与特定频率下的穿透深度进行多项式拟合，酒浸泡组拟合系数 R^2>0.900 0，通过含盐率可以很好地预测蛋清穿透深度。本研究为鸭蛋在不同腌制阶段、不同处理方式下介电特性的变化提供了基础数据，并探索了穿透深度与含盐率的相关性，为鸭蛋的腌制及蛋清产品加工提供参考。

参考文献:

[1] WANG S Q,WANG S C,ZHANG Y P,et al. Research on quick salting duck egg with pulsed pressure and water cycle technology[J]. **Information Engineering for Mechanics and Materials Research**,2013,422:94-99.
[2] HARLINA P W,SHAHZAD R,MA M,et al. Effects of galangal extract on lipid oxidation,antioxidant activity and fatty acid profiles of salted duck eggs[J]. **Journal of Food Measurement and Characterization**,2019,13(3):1820-1830.
[3] HUANG X L,LI J H,CHANG C H,et al. Effects of NaOH/NaCl pickling on heat-induced gelation behaviour of egg white[J]. **Food Chemistry**,2019,297:124-131.
[4] YUAN L,ZHANG J,WU J,et al. The effect on quality of pickled salted duck eggs using the novel method of pulsed pressure osmotic dehydration[J]. **Journal of Food Processing and Preservation**,2018,42(4):111-124.
[5] 王石泉,王树才,张益鹏,等. 超声波-脉动压联用快速腌制咸鸭蛋的工艺参数优化[J]. 农业工程学报,2013,29(23):286-292.
[6] 訾沛清,程裕东,金银哲. 咸鸭蛋快速腌制工艺及咸蛋清综合利用研究进展[J]. 食品与机械,2020,36(10):210-214.
[7] WAHEEDA M,YOUSAFB M,SHEHZADC A,et al. Channelling eggshell waste to valuable and utilizable products:a comprehensive review[J]. **Trends in Food Science and Technology**,2020,106:78-90.
[8] VENKATACHALAM K. Influence of prolonged salting on the physicochemical properties of duck egg white[J]. **Brazilian Archives of Biology and Technology**,2018,61:1590-1678.
[9] CAO D H,FENG F,XIONG C H,et al. Changes in lipid properties of duck egg yolks under extreme processing conditions[J]. **Poultry Science**,2021,100(7):101-113.
[10] SURETNO N D,NOVITASARI E,RIVAIE A. The fat content and the preferences of salted duck egg enriched with black and white pepper[J]. **IOP Conference Series:Earth and Environmental Science**,2021,653(1):12-19.
[11] KANNAN S,DEVSR S,GARIEPY Y,et al. Effect of radiofrequency heating on the dielectric and physical properties of eggs[J]. **Progress in Electromagnetics Research B**,2013,51:207-226.
[12] GUO W,TRABELS S,NELSON S,et al. Storage effects on dielectric properties of eggs from 10 to 1 800 MHz[J]. **Journal of Food Science**,2007,72(5):335-340.
[13] BOREDDY S R,SUBBIAH J. Temperature and moisture dependent dielectric properties of egg white powder[J]. **Journal of Food Engineering**,2016,168:60-67.
[14] WANG X Y,HUANG Y,ZHOU B,et al. Improvement of quality and flavor of salted egg yolks by ultrasonic assisted cooking[J]. **Ultrasonics Sonochemistry**,2021,75(7):105-117.
[15] ZHANG W,LUAN D,TANG J,et al. Dielectric properties and other physical properties of low-acyl gellan gel as relevant to microwave assisted pasteurization process[J]. **Journal of Food Engineering**,2015,149:195-203.
[16] 刘良忠,姜春杰,文友先,等. 缩短咸蛋加工时间及改善咸蛋品质的研究[J]. 食品科技,2003,28(1):36-37.
[17] YI R,CHAO W N,VAURS L P,et al. Wasted salted duck eggshells as an alternative adsorbent for phosphorus removal[J]. **Journal of Environmental Chemical Engineering**,2019,7(6):103-116.
[18] 向萍,邱伟强,金英善,等. 微波加热下10种不同氨基酸溶液的介电特性[J]. 上海海洋大学学报,2022,31(2):574-585.
[19] RYYNANEN S. The electromagnetic properties of food materials:a review of the basic principles[J]. **Journal of Food Engineering**,1995,26(4):409-429.
[20] YANG L X,QIU W Q,YIN Y Z,et al. Dielectric properties of Antarctic krill (*Euphausia superba*) and white shrimp (*Penaeus vannamei*) during microwave thawing and heating[J]. **Journal of Microwave Power & Electromagnetic Energy**,2017,51(1):3-30.
[21] 宋春芳,袁冬明,王燕,等. 芋头的介电特性[J]. 食品与生物技术学报,2018,37(2):153-158.
[22] 宋春芳,王燕,张翰之,等. 基于微波加热的馒头介电特性的分析与研究[J]. 食品与生物技术学报,2017,36(5):466-472.
[23] 郭文川,王东阳,孔繁荣,等. 基于介电特性的豆浆固形物含量检测[J]. 农业机械学报,2016,47(7):239-245.
[24] 张毛赛,许静怡,祝易,等. 蔗糖和葡萄糖对南极磷虾虾肉糜介电特性的影响[J]. 食品工业科技,2017,38(24):58-64.
[25] CHENG S,ZHANG T,WANG X,et al. Influence of salting processes on water and lipid dynamics,physicochemical and microstructure of duck egg[J]. **LWT–Food Science and Technology**,2018,95:143-149.
[26] LIN W,ZHANG M,FANG Z X,et al. Effect of salt and sucrose content on the dielectric properties of salted duck egg white protein relevant to radio frequency drying[J]. **Drying Technology**,2014,32(15):1777-1784.
[27] XIANG P,QIU W Q,ZHENG R L,et al. Dielectric properties of maillard reaction solutions formed between different amino acids and glucose under microwave heating[J]. **Food and Bioprocess Technology**,2021,14(7):1-19.