# 苹果汁电导率及介电损耗因子影响因素的研究

王云阳，李站龙，杨绍龙，董宇
（西北农林科技大学食品科学与工程学院，陕西杨凌 712100）

**摘要：**本文研究了苹果汁的电导率与可溶性固形物含量、温度、粘度和 NaCl 浓度等因素的关系，并通过电导率与介电损耗因子的关系，确定不同频率下与离子介导相关的苹果汁的介电损耗因子。结果表明，苹果汁的电导率随可溶性固形物含量的增加呈先增大后减小的抛物线趋势，随温度线性增大，粘度大小对电导率的影响很小，添加少量 NaCl 苹果汁电导率成倍增大。借助 SPASS 数据分析软件，得出电导率同可溶性固形物含量、温度的非线性回归方程：$\sigma$=-28.69$C^2$+17.292$C$+0.02$T$+0.135，$R^2$ 为 0.974，拟合度良好。通过计算获得苹果汁在不同频率下（13.56、27.12、40.68 MHz）与离子介导相关的介电损耗因子。这些结果和数据，可为欧姆和射频加热技术用于苹果汁生产提供基础数据支持。

**关键词：**苹果汁；电导率；介电损耗因子；欧姆加热；射频加热

**文章篇号：**1673-9078(2013)12-2810-2815

# Influencing Factors of Conductivity and Dielectric Loss Factor in Apple Juice

**WANG Yun-yang, LI Zhan-long, YANG Shao-long, DONG Yu**
(College of Food Science and Engineering, Northwest Agriculture and Forest University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** The relationship between electrical conductivity and factors such as soluble solids content, temperature, viscosity and NaCl concentration was studied. Dielectric loss factors interrelated to ionic conductivity of apple juice under different frequencies was calculated according to the equation of electrical conductivity and dielectric loss factors. The results showed that electrical conductivity appeared paracurve trend which increased first and then decreased with the increase of soluble solids content of the apple juice; it was increased linearly with temperature and remarkably increased with adding little of NaCl; viscosity had little effect on electrical conductivity. Using statistical package social sciences (SPSS) data analysis software, non-linear regression equation of temperature-concentration dependent electrical conductivity for apple juice was obtained, which was $\sigma$=-28.69$C^2$+17.292$C$+0.02$T$+0.135 with $R^2$ of 0.974, showing quite high fitting degree. The results provide basic data for the application of ohmic and radio frequency heating in industrial manufacturing of apple juice.

**Key words:** apple juice; electrical conductivity; dielectric loss factor; ohmic heating; radio frequency heating

浓缩苹果汁是仅次于橙汁的世界第二大果汁消费品，是我国农副产品加工在国际市场具有绝对竞争力的产品之一，也是世界最主要的苹果加工产品[1]。在苹果汁加热、杀菌过程中，大多采用传统的加热法，采用热媒以换热的形式传热，耗能大、传热不均匀，表面易结垢而使传热效果变差，时间长导致营养损失。与传统加热相比，欧姆和射频加热技术具有显著的优势[2~3]。

欧姆加热（Ohmic heating，OH）利用物料的电导特性进行加热，有升温迅速、均匀、操作简便等优点。可迅速钝化酶，延长保质期，能源利用率高、营养损失少[2]。射频（Radio frequency，RF）是一种高频交流电磁波，其频率范围3 MHz~300 MHz，能穿透到物料内部而使带电离子振荡迁移，产生热量，达到加热目的。射频技术在我国也早有应用，但仅限于轻工业、医药行业[3]。Wang等[4]报道射频加热技术可用于高质量、货架稳定的民用和军用食品的生产。在射频杀菌技术代替传统的技术，实现商业化生产之前，潜在需要解决的问题还很多，如介电击穿和加热失控等。

食品物料的电导特性是欧姆加热的重要参数，指在物料的两端施加电场时，物料表现出来的电阻或电阻抗特性[5]。其主要影响因素有物料质量、形状、水含量、化学成分、温度和频率等。物料的电导特性常用电导率来表示，电导率是影响食品欧姆加热的关键因素[3,5,8]。对于介电加热，物料的介电特性是最为重要的

收稿日期：2013-08-07
基金项目：国家自然科学基金资助项目（31171761）；中央高校基本科研业务费专项资金重点项目（ZD2013016）
作者简介：王云阳（1969-），男，博士，副教授，主要从事食品与农产品射频加工与安全控制技术研究

参数[6]。物料的介电特性可用相对介电常数和介电损耗因子来表示。相对介电常数指材料在电场中储存能量的能力，相对介电损耗因子指材料在电场中耗散能量的能力，导致热量产生。水是射频加热中重要因素之一，是永久偶极性分子。离子传导是另一种损耗机制，射频加热更是如此[7~8]。由离子传导所引起的介电损耗可由物料的电导率通过公式计算[9]。Icier和Ilicali[10]研究了苹果和酸樱桃浓缩汁电导率与温度、电压梯度和浓度间的关系，温度和浓度对其电导率影响显著。目前，关于浓缩果汁电导率随固形物含量、温度、粘度和含盐量的变化关系研究很少，因此进行浓缩果汁电导率影响因素的研究，为欧姆和射频加热技术应用提供基础数据显得十分重要。

本文拟对苹果汁电导率和介电损耗因子的影响因素进行研究，掌握电导率和介电损耗因子随温度、可溶性固形物含量、粘度以及含盐量等因素变化的趋势，为欧姆和射频加热及杀菌在苹果汁工业生产的应用提供基础依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 仪器与设备

电子天平，ES-1200HA，上海方瑞仪器有限公司；超级恒温循环器，YT-10A，北京亚泰科隆实验科技开发中心；旋转蒸发仪，R-200，步琪实验室设备贸易（上海）有限公司；组织捣碎机，JYL-A110，九阳股份有限公司；循环水式多用真空泵，SBH-III，郑州长城工贸有限公司；品氏粘度计，0.4~2.0 mm，沈阳市华侨玻璃仪器厂；电导率仪，FE30，上海精密仪器有限公司。

### 1.2 苹果汁制备

市场上购买新鲜的红富士苹果，按如下工艺制作苹果原汁及浓缩汁。

原料选择→清洗→破碎→榨汁→杀菌（95~100 ℃下30 s）→粗滤→浊汁→加入果胶酶澄清→灭酶→硅藻土过滤→苹果原汁→真空浓缩→苹果浓缩汁

酶解澄清过程中，加酶量为1.5 g/L 苹果汁，在50 ℃下处理2 h。取原汁进行各指标参数的测定。其中，可溶性固形物采用手持糖度计法；透光率用分光光度计法；pH 值的检测采用 pH 计法；总酸和总糖的测定，依据 GB/T 12456-2008和 GB/T 15038-2006步骤进行[11]。苹果汁的各成分见表1。

利用旋转蒸发仪，在真空度0.09 MPa、温度50 ℃、转速70 r/min 下浓缩至固形物含量为70%，于4 ℃下保存备用。

表 1 苹果汁的理化指标

**Table 1 The physical and chemical compositions of apple juice**

| 成分 | 可溶性固形物/% | 透光率/% | pH 值 | 总酸/($10^{-2}$g/g) | 原汁总糖/($10^{-2}$g/g) |
|---|---|---|---|---|---|
| 含量 | 13.84±0.12 | 91.90±0.33 | 3.87±0.02 | 3.42±0.03 | 13.80±0.02 |

### 1.3 添加黄原胶后苹果汁的粘度和电导率

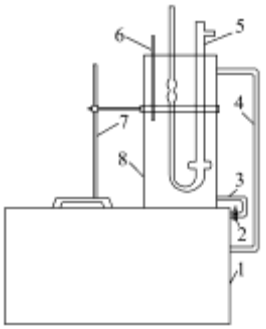



图1 粘度测定装置图

**Fig.1 Schematic of the viscosity measurement setup**

注：1-超级恒温循环器，2-阀门，3-进水管，4-回水管，5-粘度计，6-温度计，7-铁架台，8-玻璃容器。

采用品氏粘度计测定苹果汁的粘度，为了控制果汁温度，设计了如图1所示的装置。将容积为1000 mL的玻璃容器置于超级恒温循环器上方，用铁架台将容器固定，水经恒温循环器自带的循环泵加压后由玻璃容器的底部注入容器，由回水管将水回流，这样形成了一个循环控温系统。通过调节恒温循环器内工作水的温度来控制玻璃容器内水的温度。品氏粘度计悬浮于容器的水中，用夹具固定，用水银温度计测定容器内水的温度。

取可溶性固形物为20%的苹果汁5份，每份100 mL于烧杯中，分别加入0、0.10、0.16、0.22、0.28和0.34 g黄原胶，搅拌5 min 混匀，注入品氏粘度计中，静置30 min 使其温度升至指定温度并保持稳定，分别在温度为30 ℃、40 ℃、50 ℃、60 ℃和70 ℃下测定粘度，重复三次，取平均值。接着用电导率仪测定各温度下的电导率，重复三次，取平均值。

### 1.4 不同可溶性固形物含量苹果汁的电导率

将浓缩苹果汁配制成可溶性固形物含量为10%、20%、30%、40%、50%的浓度，每份100 mL，置于超级恒温循环器中，静置30 min 使其温度升至指定温度并保持稳定，分别在30 ℃、40 ℃、50 ℃、60 ℃、70 ℃下测定电导率，重复三次，取平均值。

### 1.5 加氯化钠后苹果汁的电导率

取可溶性固形物为20%的苹果汁5份于烧杯中，每份100 mL，分别加入一定量的NaCl，使NaCl浓度为0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%，置于超级恒温循环器中，静置30 min使其温度升至指定温度并保持稳定，在30℃、40 ℃、50 ℃、60 ℃、70 ℃下测定电导率，重复三次，取平均值。

### 1.6 苹果汁的与离子介导相关的介电损耗因子的计算

介电特性是指生物分子中的束缚电荷对外加电场的响应特性，物质的介电特性通常由复数相对电容率（ε，相对于真空电容而言）来描述：

$$\varepsilon=\varepsilon'-j\varepsilon'' \quad (1)$$

其中，$j=\sqrt{-1}$，$\varepsilon'$表示相对介电常数(通常简称为介电常数)，反映物质存储电场能量的能力；$\varepsilon''$表示相对介电损耗因子（通常简称为介电损耗因子），反映物质消耗电场能量的能力，通常导致热量的产生。

在微波及射频频率下，离子介导和偶极子旋转为主要的损耗机制[7,9]，如式（2）所示：

$$\varepsilon'=\varepsilon_d''+\varepsilon_\sigma''=\varepsilon_d''+\frac{\sigma}{2\pi f\varepsilon_0} \quad (2)$$

其中，下角标$d$和$\sigma$分别代表与偶极子旋转和离子介导有关（$S\cdot m^{-1}$）；$f$是电磁波频率，单位为Hz；$\varepsilon_0$是真空下的介电常数（$8.854\times10^{-12}\ F\cdot m^{-1}$）；$\sigma$表示电导率（$S\cdot m^{-1}$）。在测得电导率后，可由公式（2）计算不同可溶性固形物含量、不同温度下，苹果汁与离子介导有关的介电损耗因子$\varepsilon_\sigma''$[5]。

### 1.7 数据分析

试验测定中，进行三次平行试验，采用Excel-2003对数据进行方差分析，求得标准差。对苹果汁电导率与可溶性固性物含量和温度的关系，采用数据分析软件SPSS for Windows（Version 16.0，SPSS，Inc.），进行非线性回归分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 苹果汁电导率与可溶性固形物含量的关系

苹果汁电导率与可溶性固形物含量的关系试验结果见图2所示。在同一温度下，苹果汁电导率随着可溶性固形物含量的增加，先增大然后减小，呈现抛物线的走势。可溶性固形物的含量一定时，随着温度升高，溶液的电导率变大；Palaniappan等[12]发现番茄汁和橙汁的电导率随可溶性固形物的增大而减小，李修渠等[13]研究发现豆浆的电导率会随可溶性固形物的含量增加而增大。但他们的研究都没有峰值的出现。电导率表示溶液传导电流的能力，在苹果汁中起到传导电流作用的主要是苹果酸、柠檬酸解离出的带电离子，这些有机酸都是弱酸，在可溶性固形物含量较低时，酸的解离程度大，随果汁固形物浓度逐渐增加，酸的解离程度逐渐降低，但离子浓度呈增加趋势，当可溶性固形物为30%时离子浓度达到最大值，果汁浓度再增大时，酸的解离程度降低速度超过由于果汁浓度增加而使其离子浓度增加的速度，因此苹果汁电导率开始下降，从而苹果汁的电导率呈现抛物线变化趋势。同时较高浓度的苹果汁其中可溶性糖含量大，水分含量小，有机酸和矿物质电解质电离程度降低，溶液的黏度大，离子运动的阻力变大，使电电导率降低。

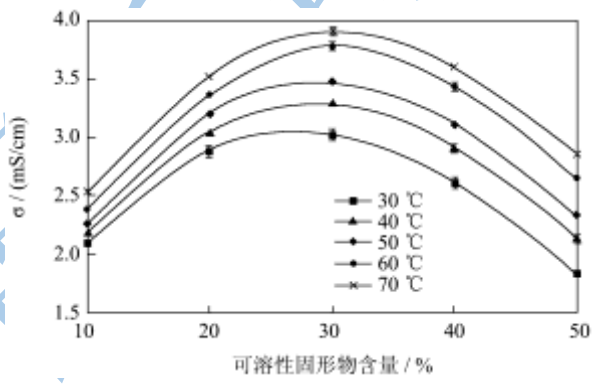



图2 电导率与可溶性固形物含量的关系

**Fig.2 The relationship between electrical conductivity and soluble solids content**

### 2.2 苹果汁电导率与温度的关系

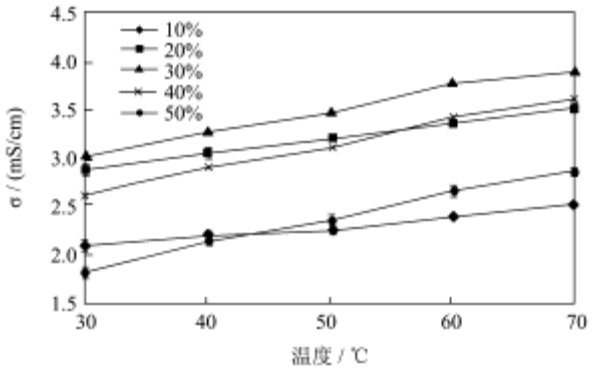



图3 苹果汁电导率与温度的关系

**Fig.3 The relationship between electrical conductivity and temperature of apple juice**

图3表示苹果汁电导率随温度的变化关系。苹果汁的电导率随温度的升高逐渐变大，这与耿敬章等[14]报道的苹果汁电导率-温度曲线走势相同。当温度升高时，溶液的粘度下降，溶液中的离子迁移速度加快，

有利于苹果汁内有机酸和矿物盐等电解质的电离，所以表现出来电导率增大的趋势。Icier 和 Ilicali[15]研究表明苹果和酸樱桃浓缩汁电导率与温度呈线性升高趋势。Palaniappan 和 Sastry[12]的研究表明，番茄汁和橘子汁的电导率随温度的升高而线性增大。Sarang 等[16]研究了六种不同水果（红苹果、黄苹果、桃、梨、菠萝、草莓）和三种不同处理的肉制品（鸡肉、猪肉和牛肉），从室温到灭菌温度（25~140 ℃）电导率的变化，结果表明电导率随温度呈线性增加趋势，水果的电导率高于肉类。李法德[17]等研究了豆浆在流动状态下的电导率与温度的关系，二者呈线性关系，随着温度的升高，豆浆的电导率增大。

## 2.3 苹果汁电导率非线性回归方程

由图 2 和图 3 以看出，苹果汁电导率与可溶性固性物含量呈抛物线关系，与温度呈线性关系，因此可以用方程式（3）表示苹果汁电导率与可溶性固性物含量和温度的关系。

$$\sigma=AC^2+BC+DT+E \quad (3)$$

对试验所得关于（$\sigma$，$C$，$T$）的数据系列，采用数据分析软件SPSS for Windows（Version 16.0，SPSS，Inc.），进行非线性回归分析。将试验获得的数据系列代入式（3）的模型中进行拟合，通过统计分析求得模型常数$A$、$B$、$D$、$E$的数值，结果如表2。代入模型常数，得到拟合模型方程如式（4）。该拟合方程的$R^2$的为0.974，在试验的可溶性固性物浓度和温度范围内拟合效果很好。

$$\sigma=-28.69C^2+17.292C+0.02T+0.135 \quad (4)$$

表2 苹果汁电导率−浓度温度模型拟合参数

**Table 2 Values of model parameters of the temperature-concentration dependent electrical conductivity equation for apple juice**

| 参数 | $A$ | $B$ | $D$ | $E$ | $R^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 拟合值 | -28.690 | 17.292 | 0.020 | 0.135 | 0.974 |

## 2.4 苹果汁电导率与粘度的关系

黄原胶是由假黄单胞菌属发酵产生的单孢多糖，不含盐类成分，是食品工业中常用的增稠剂。用黄原胶来调节苹果汁的粘度，研究粘度对苹果汁的电导率是否有明显作用。对试验所得数据进行分析，由图4可以看出，随着粘度的增大，苹果汁的电导率变化不是很明显，在30 ℃和40 ℃条件下，苹果汁的电导率几乎没有变化，在温度较高的情况下增大稍微明显，但整体看来，在加入黄原胶后的苹果汁电导率没有发生明显变化。

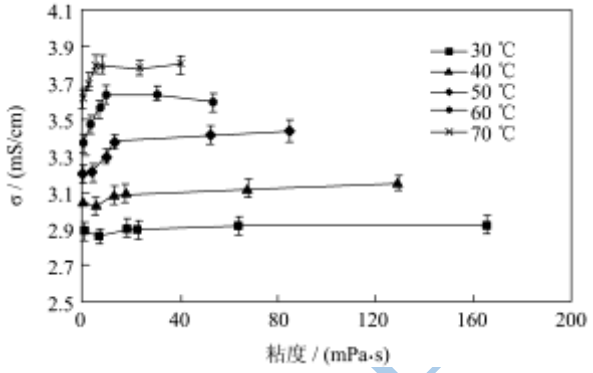



图4 不同温度下苹果汁电导率与粘度的关系

**Fig.4 The relationship between apple juice electrical conductivity and viscosity at different temperatures**

## 2.5 NaCl 浓度对苹果汁电导率的影响

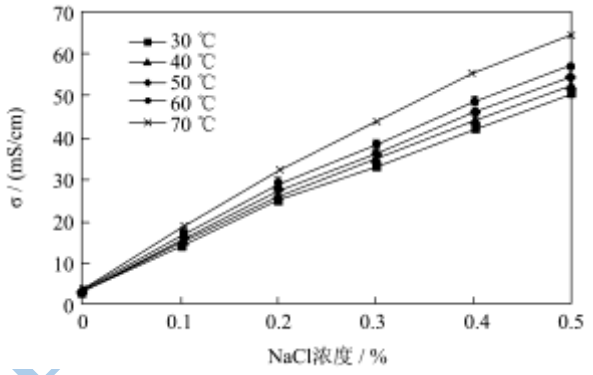



图5 不同温度下苹果汁电导率与氯化钠浓度的关系

**Fig.5 Relationship between electrical conductivity and NaCl concentration of apple juice at different temperatures**

NaCl 属于强电解质，在水中能迅速电离，增强溶液的离子强度。通过加入不同量的 NaCl，调节溶液的离子强度，对试验所得数据进行分析如图5所示。随着 NaCl 浓度的增大，苹果汁的电导率也迅速增大，且增大的幅度比较大，氯化钠浓度由1%增到5%，苹果汁的电导率增大近60倍。NaCl 浓度一定时，电导率随着温度的升高而增大。

## 2.6 不同可溶性固形物、温度和频率下苹果汁与离子介导相关的介电损耗因子

不同可溶性固形物、温度和频率下苹果汁与离子介导有关的介电损耗因子见表 3 所示。因在固定频率下，与离子介导有关的介电损耗因子与电导率呈线性关系，因此苹果汁介电损耗因子与可溶性固形物、温度的关系，与电导率和可溶性固形物、温度的关系相同。在三个频率下，苹果汁介电损耗因子与可溶性固形物的关系见图 6 所示，可见介电损耗因子随可溶性固形物含量的增加，先增加到顶峰后减小。随温度的

升高介电损耗因子呈线性升高趋势。在确定的可溶性固形物和温度下，介电损耗因子损耗因子与频率成反比关系，13.56 MHz 下的介电损耗因子要大于其它两个频率下的介电损耗因子。本文得到的苹果汁在 30 ℃、27.12 MHz 下的介电损耗因子与 Kaewrawang 等[18]在 25 ℃、20 MHz 下得到的苹果汁的介电损耗因子接近，与 Zhu 等[19]的研究结果也很接近。

表3 苹果汁在不同可溶性固形物含量和温度下的介电损耗因子平均值和标准差的比较

**Table 3 Dielectric loss factor (mean±SD) of apple juice at different soluble solids contents and temperatures**

| Frequency /MHz | Temperature /℃ | Soluble solid content/% | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
| 13.56 | 30 | 277.98±8.06 | 381.78±5.78 | 400.74±6.12 | 346.39±6.89 | 242.45±3.75 |
| | 40 | 288.99±0.00 | 403.39±0.77 | 435.20±3.06 | 385.36±1.53 | 283.29±2.76 |
| | 50 | 298.27±1.33 | 424.20±3.98 | 459.99±2.30 | 412.27±0.00 | 309.80±0.77 |
| | 60 | 315.90±0.77 | 445.41±0.00 | 500.16±4.26 | 454.29±2.76 | 351.69±0.77 |
| | 70 | 335.38±0.77 | 466.22±1.53 | 518.32±3.51 | 477.23±1.33 | 377.80±3.51 |
| 27.12 | 30 | 138.99±4.03 | 190.89±2.89 | 200.37±3.06 | 173.19±3.44 | 121.23±1.88 |
| | 40 | 144.49±0.00 | 201.69±0.38 | 217.60±1.53 | 192.68±0.77 | 141.64±1.38 |
| | 50 | 149.13±0.66 | 212.10±1.99 | 230.00±1.15 | 206.13±0.00 | 154.90±0.38 |
| | 60 | 157.95±0.38 | 222.71±0.00 | 250.08±2.13 | 227.15±1.38 | 175.84±0.38 |
| | 70 | 167.69±0.38 | 233.11±0.77 | 259.16±1.75 | 238.61±0.66 | 188.90±1.75 |
| 40.68 | 30 | 92.66±2.69 | 127.26±1.93 | 133.58±2.04 | 115.46±2.30 | 80.82±1.25 |
| | 40 | 96.33±0.00 | 134.46±0.26 | 145.07±1.02 | 128.45±0.51 | 94.43±0.92 |
| | 50 | 99.42±0.44 | 141.40±1.33 | 153.33±0.77 | 137.420.00 | 103.27±0.26 |
| | 60 | 105.30±0.26 | 148.47±0.00 | 166.72±1.42 | 151.43±0.92 | 117.23±0.26 |
| | 70 | 111.79±0.26 | 155.40±0.51 | 172.77±1.17 | 159.08±0.44 | 125.93±1.17 |

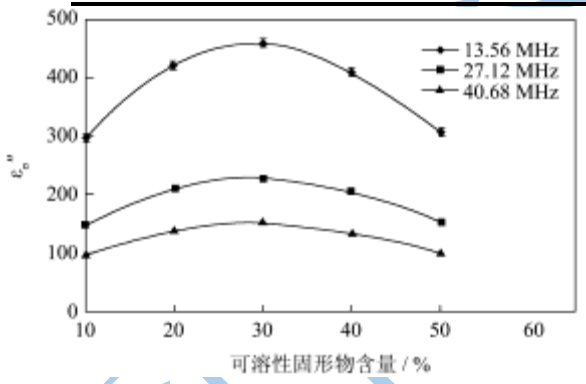



图 6 在 50 ℃时，苹果汁在不同频率的介电损耗因子与可溶性固形物含量的关系

**Fig.6 Relationship between soluble solids contents and dielectric loss factors of apple juice at 50 ℃ with different frequencies and**

## 3 结论

3.1 对苹果汁电导率和介电损耗因子的影响因素进行了研究。苹果汁电导率受粘度影响很小；添加少量的氯化钠苹果汁的电导率成倍增大；温度升高有利于苹果汁内电解质的电离，电导率呈线性增大；随着可溶性固形物含量的增加，苹果汁的电导率出现了类似抛物线的走势。添加增稠剂对苹果汁电导率影响很小；苹果汁介电损耗因子和电导率与可溶性固形物含量、温度具有相同的关系。

3.2 本试验确定的电导率和介电损耗因子等相关数据，对欧姆和射频加热技术在苹果浓缩汁及其饮料生产中的开发应用和基于电导率和介电特性的物质成分检测技术的研发具有重要的意义。

## 参考文献

[1] 李官浩,崔泰华,韩美兰,等.关于浓缩苹果汁的发展与前景[J].食品科技,2008,6:59-60
Li Guan-hao, Cui Tai-hua, Han Mei-lan, et al. Development and prospect of concentration cider [J]. Food Science and Technology, 2008, 6: 59-60

[2] Evrendilek G A, Baysal T, Icier F, et al. Processing of fruits and fruit juices by novel electrotechnologies [J]. Food Engineering Reviews, 2012, 4(1): 68-87

[3] 刘嫣红,杨宝玲,毛志怀.射频技术在农产品和食品加工中的应用[J].农业机械学报,2010,8:115-120
Liu Yan-hong, Yang Bao-ling, Mao Zhi-huai. Radio frequency technology and its application in agro-product and food processing [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 8: 115-120

[4] Wang Y, Wig T D, Tang J, et al. Sterilization of foodstuffs using radio frequency heating [J]. Journal of Food Science, 2003, 68(2): 539-54

[5] 李里特. 食品物性学[M].北京:中国农业出版社,2010
Li Li-te. Physical properties of food [M]. Beijing: Chinese Agricultural Press, 2010

[6] Sosa-Morales M E, Valerio-Junco L, Lopez-Malo A, et al. Dielectric properties of foods: Reported data in the 21st Century and their potential applications [J]. LWT - Food Science and Technology, 2010, 43(8): 1169-1179

[7] Wang Y, Li Y, Wang S, et al. Review of dielectric drying of foods and agricultural products [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2011, 4(1): 1-19

[8] Wang Y, Zhang L, Gao M, et al. Temperature- and moisture-dependent dielectric properties of macadamia nut kernels [J]. Food and Bioprocess Technology, 2013, 6: 2165-2176

[9] Wang Y F, Wig T D, Tang J M, et al. Dielectric properties of foods relevant to RF and microwave pasteurization and sterilization [J]. Journal of Food Engineering, 2003, 57(3): 257-268

[10] Icier F, Yildiz H, Baysal T. Peroxidase inactivation and colour changes during ohmic blanching of pea puree [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 74: 424-429

[11] 李凤玉,梁文珍.食品分析与检验[M].北京:中国农业大学出版社,2009
Li Feng-yu, Liang Wen-zhen. Food analysis and inspection [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2009

[12] Palaniappan S, Sastry S K. Electrical conductivity of selected juices: influences of temperature, solids content, applied voltage, and particle size [J]. Journal of Food Process Engineering, 1991, 14: 247-260

[13] 李修渠,李里特,辰巳英三.豆浆的电导率[J].中国农业大学学报,1999,2:103-106
Li Xiu-qu, Li Li-te, Eizo Tatsumi. Study on electrical conductivity of soybean milk [J]. Journal of China Agricultural University, 1999, 2: 103-106

[14] 耿敬章,仇农学.苹果汁的欧姆加热研究[J].食品工业科技,2007, 28(6): 77-79
Geng Jing-zhang, Qiu Nong-xue. Study on ohmic heating of apple juice [J]. Science and Technology of Food Industry, 2007, 28(6): 77-79

[15] Icier F, Ilicali C. Temperature dependent electrical conductivities of fruit purees during ohmic heating [J]. Food Research International, 2005, 38(10): 1135-1142

[16] Sarang S, Sastry S K, Knipe L. Electrical conductivity of fruits and meats during ohmic heating [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 87(3): 351-356

[17] 李法德,孙玉利,李陆星.连续通电加热条件下豆浆的电导率[J].农业工程学报,2008,24(12):275-278
Li Fa-de, Sun Yu-li, Li Lu-xing. Electrical conductivity of soybean milk during cooking with continuous ohmic heating device [J]. Transactions of the CSAE, 2008,24(12): 275-278

[18] Kaewrawang A, Swatdiponphallop S, Siritaratiwat A. Study on complex permittivity of tropical Thai fruits [J]. Journal of Applied Sciences, 2007, 7: 1009-1012

[19] Zhu X, Guo W, Wu X. Frequency- and temperature-dependent dielectric properties of fruit juices associated with pasteurization by dielectric heating [J]. Journal of Food Engineering, 2012, 109: 258-266