

## 不同部位籽瓜果皮电学特性分析

黄晓鹏<sup>1\*</sup>, 熊世磊<sup>1</sup>, 王启慧<sup>2</sup>, 孙晨歌<sup>3</sup>, 万芳新<sup>1</sup>

(1. 甘肃农业大学机电工程学院, 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学食品与科学工程学院, 兰州 730070;

3. 甘肃农业大学生命科学技术学院, 兰州 730070)

**摘要:** 为探究不同部位籽瓜果皮电学特性的变化规律及其相关性, 以甘肃靖远 1 号籽瓜为试材, 利用平行极板检测法测定了不同部位籽瓜果皮的 8 个电学特性, 分析其随频率的变化规律及其相关性, 建立了各电学特性随频率变化的数学模型并验证。结果表明: 随着频率的增加, 不同部位籽瓜果皮电学特性之间存在显著差异,  $G$ 、 $X$  均呈单调递增趋势变化,  $R_p$ 、 $C_p$ 、 $Z$ 、 $Q$  均呈单调递减趋势变化; 除瓜梗部外, 其他部位果皮  $D$  均呈单调递增趋势变化; 瓜梗部和赤道部果皮的  $Z$  与  $G$ 、 $L_p$ 、 $X$  之间均呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ ), 与  $Q$ 、 $C_p$ 、 $R_p$  之间均呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 而与  $D$  之间的相关性有显著不同。回归结果表明, 随着频率的变化, 瓜梗部与赤道部果皮的  $Z$ 、 $G$ 、 $C_p$ 、 $R_p$ 、 $X$  和  $D$  的值均呈 Polynomial 模型分布 ( $R^2 > 0.83$ )。模型验证得出在频率 163.28 ~ 8 000 kHz 范围内, 瓜梗部和赤道部果皮  $Z$ 、 $L_p$  试验值与模型预测值的一致性较好。因此, 基于平行极板检测法区分籽瓜不同部位的果皮电学特性变化规律是可行的, 该结果为籽瓜果皮电学检测提供理论依据。

**关键词:** 籽瓜果皮; 不同部位; 电学特性; 相关性; 回归模型

中图分类号: TS201.7

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X(2022)03-0514-07

### Analysis of electrical characteristics of seed melon pericarp in different parts

HUANG Xiaopeng<sup>1</sup>, XIONG Shilei<sup>1</sup>, WANG Qihui<sup>2</sup>, SUN Chengge<sup>3</sup>, WAN Fangxin<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070;

2. College of Food Science and Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070;

3. College of Life Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070)

**Abstract:** In order to investigate the variation of electrical properties of seed melon rind in different parts and their correlation, eight electrical properties of seed melon rind in different parts were measured by parallel polar plate detection method using Gansu Jingyuan No.1 seed melon as the test material, the variation of electrical properties with frequency and correlation were analyzed, and mathematical models of the variation of electrical properties with frequency were established and verified. The results showed that there were significant differences between the electrical properties of seed melon pericarp in different parts with increasing frequency, with  $G$  and  $X$  showing monotonically increasing trend, and  $R_p$ ,  $C_p$ ,  $Z$  and  $Q$  showing monotonically decreasing trend; except for the peduncle part, the pericarp  $D$  in other parts showed monotonically increasing trend; there were highly significant negative correlations ( $P < 0.01$ ) between  $Z$  and  $G$ ,  $L_p$  and  $X$  in the peduncle part and equatorial part, and between  $Z$  and  $Q$ ,  $C_p$  and  $R_p$  in the peduncle part and equatorial part. The regression results showed that the values of  $Z$ ,  $G$ ,  $C_p$ ,  $R_p$ ,  $X$  and  $D$  of melon peduncle and equatorial pericarp presented a Polynomial model distribution ( $R^2 > 0.83$ ) with the change of frequency; the model validation concluded that the values of  $Z$ ,  $G$ ,  $C_p$ ,  $R_p$ ,  $X$  and  $D$  of melon peduncle, and the equatorial pericarp showed a Polynomial model distribution ( $R^2 > 0.83$ ) with the change of frequency from 163.28 to 8 000 kHz. The model validation showed that the experimental values of  $Z$  and  $L_p$  in the pedicel and equatorial parts of the fruit skin were in good agreement with the model predictions in the frequency range of 163.28 - 8 000 kHz. Therefore, it is feasible to distinguish the electrical characteristics of different parts of the seed melon pericarp based on the parallel plate detection method. This result provides a theoretical basis for the electrical detection of the seed melon pericarp.

收稿日期: 2021-08-07

基金项目: 国家自然科学基金 (51765002) 和甘肃农业大学 SRTP 项目 (202006065) 共同资助。

共同第一作者: 黄晓鹏, 博士, 教授。E-mail: huangxp@gsau.edu.cn 熊世磊, 本科生。E-mail: 2715833368@qq.com

\* 通信作者: 黄晓鹏, 博士, 教授。E-mail: huangxp@gsau.edu.cn

**Key words:** seed melon pericarp; different parts; electrical properties; correlation; regression model

籽瓜[*Citrullus lanatus* ssp. *vulgaris* var. *Megalaspermus*]是我国西北地区种植面积较广的瓜类作物之一,为葫芦科一年生草本植物<sup>[1-2]</sup>。其长势较弱,生长期较长,喜温喜光,瓜蔓较细,分枝多;瓜叶多为掌状,叶片呈灰绿色,表层多刺毛;果实多为中小型偏圆,表皮较硬;果肉一般为白色或淡黄色,柔软顺滑,粘性好,水分足<sup>[3-4]</sup>。研究发现:籽瓜果皮含有丰富的果胶和矿物质<sup>[5]</sup>,瓜皮提取物具有抑制细菌和抵制细胞癌变的作用<sup>[6-7]</sup>。长期以来,籽瓜果皮的益处却鲜为人知,经常在整瓜破碎取籽后被遗弃在田间地头,不仅造成了资源浪费,又严重污染环境<sup>[8-10]</sup>。电学特性是果蔬类物质的一种特有属性,近年来对籽瓜的研究主要针对机械化收获、破碎取籽和遗传育种等方面,有关籽瓜果皮电学特性的研究却鲜有报道。

电学检测与其他检测手段相比,具有迅速、灵敏、操作简单等优点<sup>[11]</sup>,目前,农产品电学特性测定最常用的方法有同轴探头检测技术、平行极板检测技术、传输线检测技术、谐振腔检测技术以及自由空间检测技术等,其中平行极板检测技术使用最为广泛<sup>[12]</sup>。边红霞等<sup>[13]</sup>研究了 50 Hz~1 MHz 频率范围内不同等级的兰州百合的电学特性,得出复阻抗、相对介电常数和电导可作为判断百合等级的指示参数;张莉等<sup>[14]</sup>研究了柿果实频率特性及电学参数随果实成熟度变化的规律,得出了在 100 Hz~5 MHz 范围内,随着测试频率升高,果实阻抗和电感呈幂函数下降,低频电导呈幂函数迅速升高,电容呈缓慢下降、快速升高、急剧下降的波动性变化;杜光源等<sup>[15]</sup>研究了桃果实电学特性的频率变化,得出了除了品质因子  $Q$  随频率变化无规律,其余 13 个电参数都随频率呈有规律的变化。文献检索发现,现有的瓜类果实主要以电学检测研究内部品质特性为主,而对果皮电学特性的研究却鲜有提及。

本研究利用平行极板检测技术对不同部位籽瓜果皮电学特性进行测定和分析,旨在明确不同部位籽瓜果皮各电学特性随频率的变化规律,探究不同部位果皮各电学特性之间的相关性,以期对籽瓜果皮电学检测提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

试验于 2020 年 9 月在甘肃农业大学农产品加工实验室进行。供试材料为靖远 1 号,于甘肃省靖远

县某农户瓜园中收获。随机选取外观一致、大小均一、品质良好、无病虫害的籽瓜 150 个作为试验材料。收获后,当日包装处理好运回实验室进行低温贮藏,以备待用。

### 1.2 试验设备

IM3536 型 LCR 测试仪,频率范围 4 Hz ~ 8 MHz,9140-10 型四终端探头,日本日置(上海)贸易有限公司;平行铜板电容器(自制);电子游标卡尺,分辨率 0.01 mm,日本三丰 Mitutoyo 公司;圆柱形取样器(自制);小刀。

### 1.3 试验方法

**1.3.1 测试样品制备** 设计 45 个试验组,每 3 个待测籽瓜为 1 组,依次标号。制备样本前 1 天,将待测籽瓜进行回温处理,随后使用清水将其表面清洗干净,晾干水分后进行样本制备。利用自制的圆柱形取样器(直径为 4 cm)分别从瓜梗部、中上部、赤道部、中下部和瓜尾部籽瓜果皮进行取样,再使用小刀进行修整,直至修为直径为 3 cm、厚度为 1.5 cm 左右的圆柱体样品,每个部位重复取样 3 次,电子游标卡尺进行测量。

**1.3.2 测定指标和方法** 参照郭文川等<sup>[16]</sup>测定西瓜和蜜瓜介电特性方法并予以改进。本次试验分 5 次进行,室温 25 °C 下进行试验,当日完成同批次试验组的检测。测试频率( $f$ )设定为 163.28 ~ 8 000 kHz,频率点选取 49 个。将所制备的籽瓜果皮样品晾去表面果汁后,水平置于自制的平行铜板电容器之间,施加 2 N 夹持力使之接触稳定。测试前,将 LCR 测试仪与计算机、平行极板电容器相连,同时进行开路 and 短路校正,预热 2 h,进行手动调零。分别测定籽瓜果皮瓜梗部、中上部、赤道部、中下部和瓜尾部 5 个部位的阻抗  $Z$ 、电抗  $X$ 、并联等效电阻  $R_p$ 、并联等效电感  $L_p$ 、并联等效电容  $C_p$ 、损耗因子  $D$ 、电导  $G$ 、品质因数  $Q$  等 8 个电学参数,每个测试样品检测 3 次,取平均值。

阻抗  $Z$  可以反映交流电电压和电流之间的关系,是由电容、电阻和电感组成的生物体等效复合电路中的电阻和电抗组成,常表示为复数,即  $Z=R_p+jX$ ;电容  $C_p$  是指当外加电场存在电势差时,电容器能够储存电荷的能力;电感  $L_p$  指交流电场中磁通量与产生此磁通的电流之比;电导  $G$  指果实的导电能力;品质因数  $Q$  用来衡量果蔬品质的电参数。

### 1.4 数据统计与分析

采用 WPS 2019 进行数据处理,SPSS 19.0 软件

进行皮尔逊相关性分析 (pearson correlation analysis), Origin 2019b 软件进行图像绘制和回归分析。

### 2 结果与分析

#### 2.1 不同部位籽瓜果皮电学特性的频率变化

频率是影响果蔬电学参数的主要因素,图1表示不同部位籽瓜果皮电学特性随频率的变化。从图1(a)可以看出,随着频率的增大,籽瓜5个部位果皮的电导G均呈单调递增的趋势,但瓜梗部的上升趋势比较缓慢。除瓜梗部外,其余4个部位果皮G值比较相近,随着频率的增大,差异逐渐减小。在489.81~3265.3kHz范围内,5个部位果皮G值大小关系为:

赤道部>中上部>中下部>瓜尾部>瓜梗部;在3428.6~4571.4kHz范围内,5个部位果皮G值大小关系为:赤道部>中上部>瓜尾部>中下部>瓜梗部;在4734.7~8000kHz范围内,5个部位果皮G值大小关系为:赤道部>瓜尾部>中上部>中下部>瓜梗部。由图1(b)可知:随着频率的增大,除瓜梗部外,其他4个部位果皮的损耗因子D均呈单调递增的趋势。在163.28~816.34kHz范围内,5个部位果皮D值大小关系为:瓜梗部>中上部>中下部>赤道部>瓜尾部;在1469.4~8000kHz范围内,5个部位果皮D值大小关系为:中上部>中下部>赤道部>瓜尾部>瓜梗部。

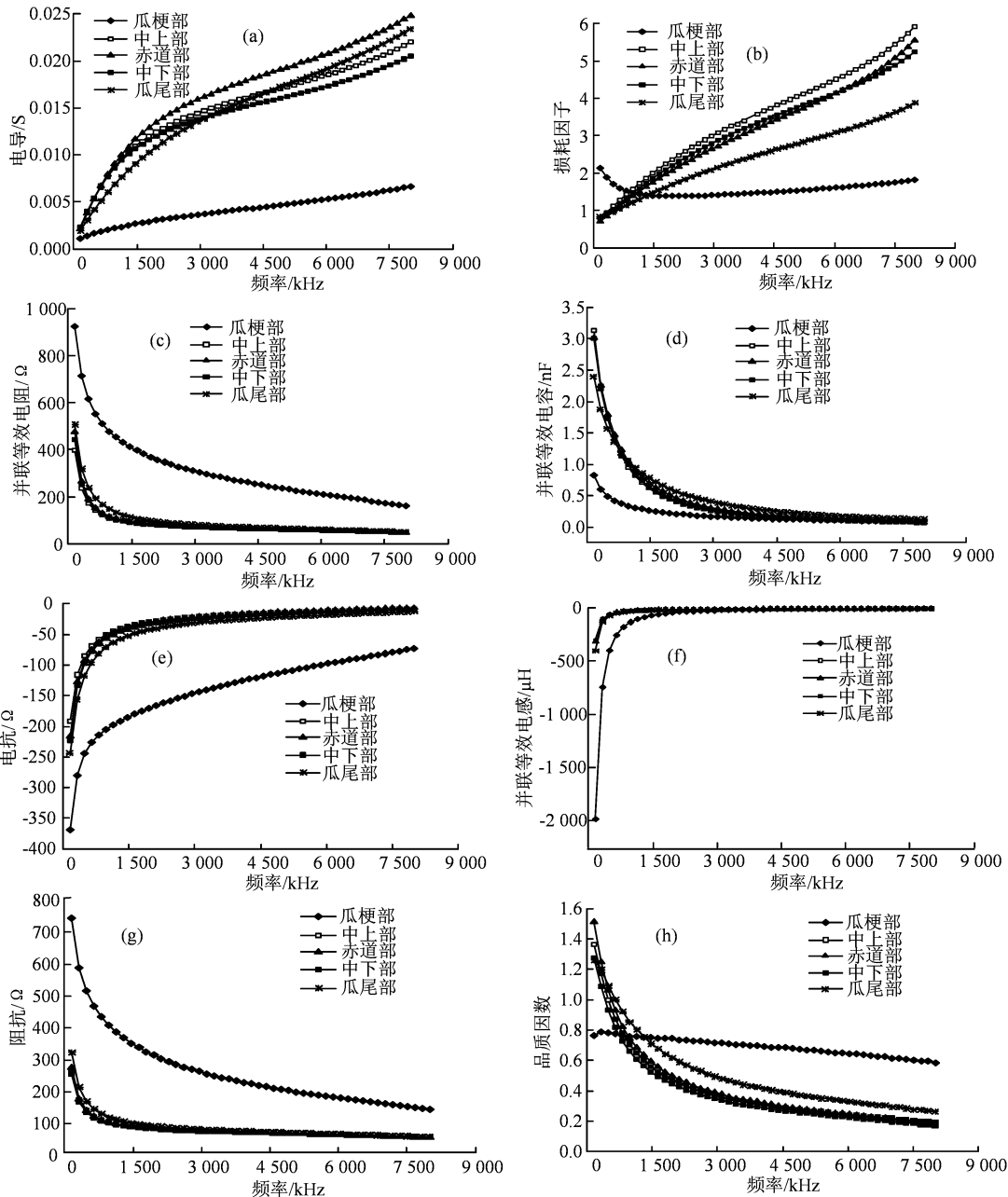


图1 不同部位籽瓜果皮电学特性的频率变化

Figure 1 Frequency variation of electrical properties of seed melon pericarp in different parts

由图 1(c)和 1(d)可知: 随着频率的增大, 籽瓜 5 个部位果皮的并联等效电阻  $R_p$ 、并联等效电容  $C_p$  均呈单调递减的趋势, 其中瓜梗部果皮  $R_p$  值显著高于其他 4 个部位, 但随着频率的增大, 差异逐渐减小。在 163.28 ~ 653.07 kHz 范围内, 随着频率的增大, 5 个部位果皮  $R_p$  值和  $C_p$  值下降趋势均较快, 而在 816.34 ~ 8 000 kHz 范围内, 随着频率的增大, 下降趋势逐渐缓慢。

由图 1(e)可知: 随着频率的增大, 籽瓜 5 个部

位果皮的电抗  $X$  均呈单调递增的趋势。低频阶段, 5 个部位果皮  $X$  值均上升趋势均较快, 高频阶段, 瓜梗部  $X$  值上升趋势显著高于其他 4 个部位。由图 1(f)可知: 随着频率的增大, 籽瓜 5 个部位果皮的并联等效电感  $L_p$  均呈单调递增的趋势, 但上升趋势均逐渐变慢, 差异逐渐减小。在 163.28 ~ 7 020.4 kHz 范围内, 5 个部位果皮  $L_p$  值大小关系为: 瓜尾部 > 赤道部 > 中下部 > 中上部 > 瓜梗部。

表 1 瓜梗部果皮电学特性之间的相关性

Table 1 Correlation between electrical properties of the pericarp of the melon stem part

相关性	Z	D	G	Q	Cp	Lp	Rp	X
Z	1							
D	0.142	1						
G	-0.910**	0.276	1					
Q	0.838**	-0.410**	-0.988**	1				
Cp	0.988**	0.294*	-0.836**	0.745**	1			
Lp	-0.796**	-0.581**	0.523**	-0.399**	-0.743**	1		
Rp	0.999**	0.158	-0.903**	0.830**	0.701**	-0.814**	1	
X	-0.994**	-0.060	0.937**	-0.875**	0.313*	0.778**	-0.994**	1

“\*”表示显著相关 ( $P < 0.05$ ), “\*\*”表示极显著相关 ( $P < 0.01$ ), 下同。

表 2 赤道部果皮电学特性之间的相关性

Table 2 Correlation between electrical properties of the pericarp of the equatorial part

相关性	Z	D	G	Q	Cp	Lp	Rp	X
Z	1							
D	-0.705**	1						
G	-0.825**	0.973**	1					
Q	0.945**	-0.849**	-0.946**	1				
Cp	0.969**	-0.769**	-0.892**	0.990**	1			
Lp	-0.949**	0.482**	0.619**	-0.797**	-0.854**	1		
Rp	0.995**	-0.633**	-0.767**	0.913**	0.950**	-0.972**	1	
X	-0.998**	0.712**	0.837**	-0.958**	-0.981*	0.935**	-0.991**	1

表 3 瓜梗部果皮电学特性函数拟合结果

Table 3 Fitting results of electric characteristic function of melon stem pericarp

电学特性	频率/kHz	模型	回归方程	相关系数
Z/ $\Omega$	163.28 ~ 8 000	Polynomial	$Z=709.86-0.4018f-1.29 \times 10^{-4}f^2-1.856 \times 10^{-8}f^3+9.515 \times 10^{-13}f^4$	0.976 3
G/S			$G=9.2196 \times 10^{-4}+1.55 \times 10^{-6}f-3.04 \times 10^{-10}f^2+3.59 \times 10^{-14}f^3-1.37 \times 10^{-18}f^4$	0.999 7
Cp/nF			$C_p=0.7775-5.768 \times 10^{-4}f+1.9435 \times 10^{-7}f^2-2.823 \times 10^{-11}f^3+1.456 \times 10^{-15}f^4$	0.960 8
Rp/ $\Omega$			$R_p=880.56-0.522f+1.7338 \times 10^{-4}f^2-2.54 \times 10^{-8}f^3+1.3137 \times 10^{-12}f^4$	0.968 4
X/ $\Omega$			$X=-340.24+0.1728f-5.6937 \times 10^{-5}f^2+8.484 \times 10^{-9}f^3-4.456 \times 10^{-13}f^4$	0.961 0
D			$D=2.1152-8.8965 \times 10^{-4}f+3.4466 \times 10^{-7}f^2-5.144 \times 10^{-11}f^3+2.7212 \times 10^{-15}f^4$	0.938 2
Q			Linear	$Q=0.78834-2.421 \times 10^{-5}f$
Lp/ $\mu$ H	Expassoc	$L_p=-6438.18+5863.77 \times (1-e^{\frac{-f}{121.56}})+563.949 \times (1-e^{\frac{-f}{666.66}})$	0.999 7	

由图 1(g)可知: 随着频率的增大, 籽瓜 5 个部位果皮的阻抗  $Z$  均呈单调递减的趋势, 其中瓜梗部果皮  $Z$  值显著高于其他 4 个部位, 但随着频率的增

大, 差异逐渐减小。在 163.28 ~ 816.34 kHz 范围内, 随着频率的增大, 5 个部位果皮  $Z$  值下降趋势较快, 而在 979.6 ~ 8 000 kHz 范围内, 随着频率的增大,

下降趋势逐渐缓慢。由图 1(h)可知：随着频率的增大，籽瓜 5 个部位果皮的品质因数  $Q$  均呈单调递减的趋势。除瓜梗部外，其余 4 个部位果皮  $Q$  值比较相近。在 1 469.4 ~ 8 000 kHz 范围内，5 个部位果皮  $Q$  值大小关系为：瓜梗部 > 瓜尾部 > 赤道部 > 中下部 > 中上部。

### 2.2 不同部位籽瓜果皮电学特性相关性分析

由 2.1 分析可知，除瓜梗部外，其他 4 个部位果皮电学特性差异较小，因此，这里以瓜梗部和赤道部果皮为例，探究果皮电学特性之间的相关性。从表 1 和表 2 中可以看出，瓜梗部和赤道部果皮的  $Z$  与  $G$ 、 $L_p$ 、 $X$  之间均呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ )，与  $Q$ 、 $C_p$ 、 $R_p$  之间均呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ )，

而与  $D$  之间的相关性有明显差异； $D$  与  $Q$  之间均呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ )，而与其他电学特性之间的相关性存在明显不同； $G$  与  $Q$ 、 $C_p$ 、 $R_p$  之间均呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ )，与  $L_p$ 、 $X$  之间均呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ )； $Q$  与  $L_p$ 、 $X$  之间均呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ )，与  $C_p$ 、 $R_p$  之间均呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ )； $C_p$  与  $L_p$  之间均呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ )，与  $R_p$  之间均呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ )，而与  $X$  之间的相关性存在明显差异； $L_p$  与  $R_p$  之间均呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ )，与  $X$  之间均呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ )； $R_p$  与  $X$  之间均呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ )。由此可知，瓜梗部果皮电学特性之间的相关性与赤道部存在显著差异。

表 4 赤道部果皮电学特性函数拟合结果

Table 4 Fitting results of electric characteristic function of equatorial part pericarp

电学特性	频率/kHz	模型	回归方程	相关系数
$Z/\Omega$	163.28 ~ 8 000	Polynomial	$Z = 232.2 - 0.18272f + 6.816 \times 10^{-5}f^2 - 1.041 \times 10^{-8}f^3 + 5.505 \times 10^{-13}f^4$	0.867 3
$G/S$			$G = 7.23 \times 10^{-4} + 1.064 \times 10^{-5}f - 2.717 \times 10^{-9}f^2 + 3.39 \times 10^{-13}f^3 - 1.4886 \times 10^{-17}f^4$	0.999 5
$C_p/nF$			$C_p = 3.007 - 0.001f + 3.317 \times 10^{-7}f^2 - 4.678 \times 10^{-11}f^3 + 2.356 \times 10^{-15}f^4$	0.972 8
$R_p/\Omega$			$R_p = 398.34 - 0.3739f + 1.4177 \times 10^{-4}f^2 - 2.1766 \times 10^{-8}f^3 + 1.1564 \times 10^{-12}f^4$	0.831 8
$X/\Omega$			$X = -188.45 + 0.1774f - 6.4684 \times 10^{-5}f^2 + 9.7559 \times 10^{-9}f^3 - 5.135 \times 10^{-13}f^4$	0.894 4
$D$			$D = 0.5637 + 8.7615 \times 10^{-4}f - 5.1738 \times 10^{-8}f^2 - 4.8515 \times 10^{-12}f^3 + 9.1343 \times 10^{-16}f^4$	0.999 9
$Q$			$Q = 1.5366 - 0.001f + 3.3171 \times 10^{-7}f^2 - 4.6779 \times 10^{-11}f^3 + 2.3564 \times 10^{-15}f^4$	0.985 4
$L_p/\mu H$	Expdec1	$L_p = -801.8648 \times e^{\left(\frac{-f}{167.648}\right)} - 10.0474$	0.981 7	

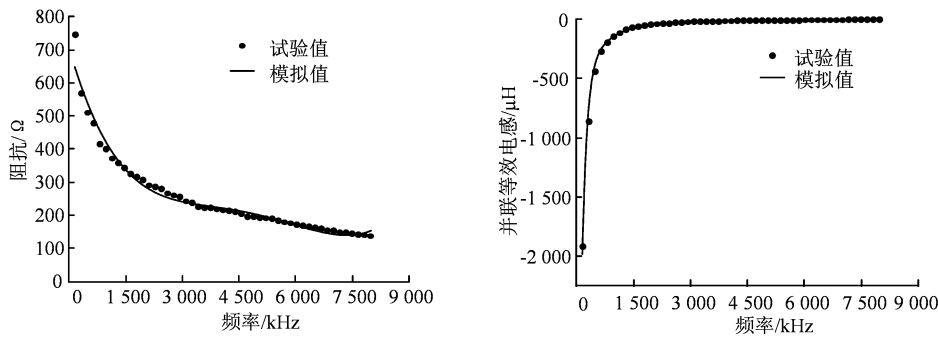


图 2 瓜梗部籽瓜果皮  $Z$ 、 $L_p$  回归模型验证

Figure 2 Validation of  $Z$  and  $L_p$  regression model of stem seed pericarp

### 2.3 不同部位籽瓜果皮电学特性回归分析

由表 3 和表 4 可知：随着测试频率的变化，瓜梗部与赤道部果皮的  $Z$ 、 $G$ 、 $C_p$ 、 $R_p$ 、 $X$  和  $D$  的值均呈 Polynomial 模型分布，且相关系数均在 0.83 以上，回归结果可靠；瓜梗部果皮的  $Q$  值随频率的变化呈 Linear 模型分布，相关系数为 0.991 9，而赤道部的  $Q$  值随频率的变化却呈 Polynomial 模型分布 ( $R^2 = 0.985 4$ )；瓜梗部果皮的  $L_p$  值随频率的变化呈

Expassoc 模型分布，相关系数为 0.999 7，而赤道部的  $L_p$  值随频率的变化却呈 Expdec1 模型分布 ( $R^2 = 0.985 4$ )。可见随着测试频率的变化，不同部位籽瓜果皮电学特性各自呈特定的函数模型分布。该结果指明了不同部位籽瓜果皮电学特性与频率之间的关系，可为籽瓜果皮电学检测提供理论依据。

### 2.4 不同部位籽瓜果皮电学特性回归模型的验证

鉴于所使用的回归方法相同，这里以瓜梗部、

赤道部果皮的  $Z$  和  $L_p$  为例, 进行回归模型验证。瓜梗部和赤道部籽瓜果皮  $Z$ 、 $L_p$  回归模型验证结果(图 2 和图 3) 显示, 在频率范围为 163.28 ~ 8 000 kHz 范围内, 试验值与模型预测值的一致性较好。因此, 利用 Polynomial 模型可较好地反映瓜梗部和

赤道部籽瓜果皮  $Z$  值随频率变化而变化的规律, 利用 Expassoc 模型可准确反映瓜梗部籽瓜果皮  $L_p$  值随频率变化而变化的规律, 利用 Expdec1 模型可准确反映赤道部籽瓜果皮  $L_p$  值随频率变化而变化的规律。

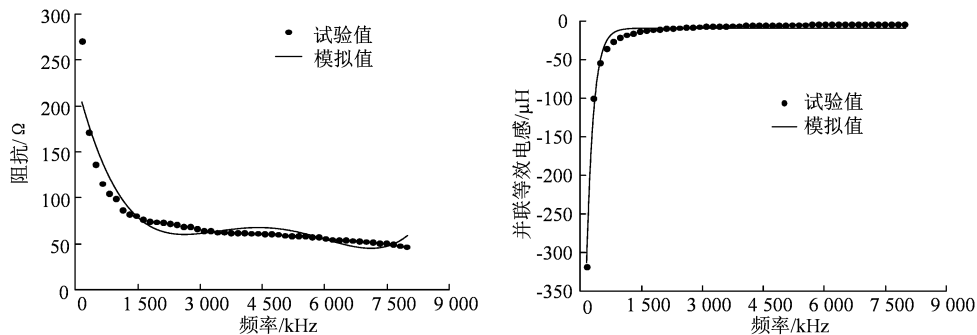


图 3 赤道部籽瓜果皮  $Z$ 、 $L_p$  回归模型验证

Figure 3 Validation of  $Z$  and  $L_p$  regression model of equatorial part pericarp

### 3 讨论与结论

相比其他电学检测方法而言, 基于平行极板法检测果品组分电学特性变化是比较普遍的, 如苹果<sup>[17]</sup>、葡萄<sup>[18]</sup>、桃<sup>[15]</sup>等果品中均有应用。籽瓜作为一种营养丰富的瓜种, 其电学特性研究基本空白, 而现有的瓜类电学检测中, 仅有郭文川等<sup>[16]</sup>对西瓜、蜜瓜的研究, 对于籽瓜果皮电学特性的探讨相对较少。因此, 本研究采用平行极板法对不同部位籽瓜果皮电学特性进行检测, 参考郭文川等<sup>[16]</sup>检测西瓜的方法并作改进, 对籽瓜果皮 8 个电学参数之间的变化规律进行探究, 以弥补这方面的不足。

果品的电学特性与测试频率之间有密切关系, 这是由于当分子周围存在电场时, 由于不同的极化作用而产生极化子、偶极子、离子等, 进一步直接影响到果品的电学特性<sup>[19-20]</sup>。本研究发现, 籽瓜果皮在电场中的电学特性与所测试的电学频率密切相关, 检测频率的高低对籽瓜果实采后的电学参数有明显影响。果皮组织结构存在不均匀性, 而果皮组织一般是由不同的细胞间隙和薄壁细胞所组成, 其中细胞间隙称作胞外, 存在少量的液体和大量的气体, 而薄壁细胞内部贮存了大量的细胞液及离子, 细胞膜的电阻及电容相对较大, 细胞液的电阻较小, 因此, 造成样品在低电学频率检测下, 测试电流不能通过细胞膜和细胞内部的液泡膜, 只能经过细胞外, 测试电流的阻力也比较大<sup>[21-22]</sup>。当在高电学频率检测下, 测试电流不仅可以穿过细胞间隙, 也可以穿过细胞膜经过细胞质进行传输, 并且此时测试电流阻力变小。从本研究结果可以看出, 在 163.82 ~

8 000 kHz 范围内, 随着频率的增加, 籽瓜果皮  $Z$  值下降、 $G$  值升高, 与茄子<sup>[23]</sup>、红巴梨<sup>[24]</sup>、兰州百合<sup>[13]</sup>、西红柿<sup>[25-26]</sup>等果品研究结果相似, 这一结果表明果蔬类的电学特性的频率特性变化相似。

果品的检测部位不同, 其电学特性之间存在显著差异。本研究中, 随着测试频率的变化, 瓜梗部籽瓜果皮电学特性与其他部位之间存在显著差异, 而其他部位果皮电学特性差异程度较小, 该结果的产生可能是由于瓜梗部皮质较为紧凑, 先于其他部位获取瓜藤所带来的养分和光照情况不同所导致的。与此同时, 不同部位籽瓜果皮各电学特性随频率变化均呈特定模型分布, 瓜梗部的  $Q$  值回归分析结果呈 Linear 模型与其他部位明显不同, 进一步验证了以上结果产生的可能性。

本研究利用平行极板检测技术对不同部位籽瓜果皮电学特性进行了测定和分析, 区分了不同部位籽瓜果皮各电学特性随频率的变化规律, 明确了不同部位果皮各电学特性之间的相关性。该结果可为籽瓜果皮电学检测提供理论依据。

### 参考文献:

- [1] 王恒炜. 从文献分析看我国籽瓜科研生产的方向[J]. 甘肃农业科技, 2019(6): 62-72.
- [2] 熊世磊, 万芳新, 黄晓鹏. 籽瓜破碎取籽分离机破碎齿辊的有限元分析[J]. 林业机械与木工设备, 2020, 48(7): 29-33.
- [3] 曾艺. 甘肃靖远瓢籽兼用籽瓜[J]. 青海农技推广, 2018(1): 40-41, 43.
- [4] 王旭辉, 王卉, 山其米克, 等. 我国籽瓜的开发现状与研究进展[J]. 北方园艺, 2018(6): 149-153.

- [5] 梁琪, 蒋玉梅, 张盛贵, 等. 甘肃省不同产地籽瓜瓤皮成分分析[J]. 甘肃农业大学学报, 1999, 34(1): 79-83.
- [6] 张义晖, 田丽萍, 薛琳, 等. 籽瓜干皮的体外抑菌及急性毒性实验研究[J]. 食品与发酵科技, 2015, 51(2): 46-48.
- [7] 湛园园, 田丽萍, 王金辉, 等. 籽瓜皮提取物对肝纤维化小鼠肝组织细胞因子表达的影响[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2016, 34(6): 739-745.
- [8] 熊世磊, 丁赛飞, 王启慧, 等. 籽瓜破碎取籽分离机机架的有限元分析及优化[J]. 森林工程, 2021, 37(2): 86-94
- [9] 张志强, 黄晓鹏, 万芳新, 等. 籽瓜破碎取籽分离机的试验研究[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(6): 88-92.
- [10] 朱宗光, 吴劲锋, 黄晓鹏, 等. 籽瓜破碎取籽分离装置试验研究[J]. 南京农业大学学报, 2014, 37(5): 159-166.
- [11] 唐燕, 杜光源, 张继澍. 桃的介电特性和品质关系[J]. 食品科学, 2012, 33(9): 68-71.
- [12] 桑田. 基于介电特性的低糖黑莓果脯的微波渗糖工艺研究[D]. 无锡: 江南大学, 2017.
- [13] 边红霞, 屠鹏, 张小平. 不同等级兰州百合的电学特性[J]. 食品科学, 2013, 34(3): 105-108.
- [14] 张莉, 韩爱华, 黄云钰, 等. 柿果实成熟期间电学参数变化[J]. 甘肃农业大学学报, 2019, 54(2): 199-204.
- [15] 杜光源, 唐燕, 郭嵩光, 等. 桃果实电特性的频率变化[J]. 食品科学, 2013, 34(7): 11-15.
- [16] 郭文川, NELSON S O, TRABELSI S, 等. 蜜瓜和西瓜果汁的射频介电特性及其与糖度的关系[J]. 农业工程学报, 2008(5): 289-292.
- [17] 沈江洁, 黄森, 张院民. 新红星苹果果实采后电学特性研究[J]. 北方园艺, 2011(6): 9-11.
- [18] 蒋宝. 红提葡萄采后品质的电学特性研究[J]. 陕西农业科学, 2019, 65(3): 24-27.
- [19] 王瑞庆, 周永洪, 张继澍. 温度对火柿电学特性的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4): 269-274.
- [20] 刘亚平, 刘兴华, 李红波. 葡萄冷藏中电学参数与质地特性变化规律[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 343-348.
- [21] 屠鹏, 边红霞. 静压力对苹果介电特性和胞内水分的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(20): 30-34, 43.
- [22] 屠鹏, 边红霞. 基于电学参数的鲜切苹果品质检测[J]. 食品工业科技, 2018, 39(3): 265-269, 275.
- [23] WU L, OGAWA Y, TAGAWA A. Electrical impedance spectroscopy analysis of eggplant pulp and effects of drying and freezing-thawing treatments on its impedance characteristics[J]. J Food Eng, 2008, 87(2): 274-280.
- [24] 王瑞庆, 张继澍, 马书尚. 基于电学参数的货架期红巴梨无损检测[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 243-247.
- [25] 郭文川, 朱新华, 周闯鹏, 等. 西红柿成熟度与电学特性关系的无损检测研究[J]. 农业现代化研究, 2002, 23(6): 458-460.
- [26] 陈志远, 张继澍, 刘亚龙, 等. 番茄成熟度与其电学参数关系的研究[J]. 西北植物学报, 2008, 28(4): 4826-4830.