DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251027004
引用格式: 张莉, 孙世英, 王瑞庆. 脱涩及 1-甲基环丙烯处理对火柿贮藏期间电学特性的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(4): 316–322.
ZHANG L, SUN SY, WANG RQ. Effects of deastringency and 1-methylcyclopropene treatment on the electrical properties of *Diospyros kaki* L. Huoshi during storage [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(4): 316–322. (in Chinese with English abstract).

脱涩及 1-甲基环丙烯处理对火柿贮藏期间电学特性的影响

张 莉[1], 孙世英[2], 王瑞庆[1*]
(1. 上饶师范学院生命科学学院, 上饶 334000; 2. 莱州市农业技术推广中心, 莱州 261400)

摘 要: 目的 明确脱涩与 1-甲基环丙烯(1-methylcyclopropene, 1-MCP)处理对火柿贮藏期间电学特性的影响。**方法** 以火柿为材料, 分别利用高浓度短时 CO_2 法进行脱涩, 用 500 nL/L 1-MCP 进行保鲜处理, 以未经处理的果实为对照(CK), 通过电感-电容-电阻(inductance-capacitance-resistance, LCR)阻抗分析仪测定室温贮藏期间各处理果实阻抗、电感、电容和电导在 0.1、1.0、10.0、100.0 和 1000.0 kHz 5 个频率下的动态变化。**结果** 火柿阻抗、电感随频率升高呈幂函数关系下降, 电导呈幂函数升高, 电容呈“先降后升”趋势; 贮藏期间, 各处理果实阻抗、电感呈线性关系下降, 电容、电导呈指数关系升高, 1.0 kHz 为果实阻抗、电感和电容变化的敏感频率。1-MCP 处理显著抑制了阻抗、电感的下降和电容、电导的升高速度, 1.0 kHz 下, 贮藏 24 d 时, 阻抗、电感分别比 CK 高 60.8%和 59.7%; 电容和电导分别为 CK 的 60.6%和 44.6%。脱涩加剧了电学参数的变化速度和幅度, 第 6 d 时, 阻抗和电感分别较 0 d 时下降了 88.9%和 88.8%; 电容和电导分别为 0 d 时的 9.2 倍和 15.4 倍。**结论** 脱涩与 1-MCP 处理仅改变火柿电学参数变化的时间与幅度, 不改变变化模式; 电学参数对两种处理响应灵敏。本研究为无损检测柿果实的脱涩效果与耐贮性及 1-MCP 的保鲜效果提供参考。

关键词: 火柿; 电学特性; 脱涩; 1-甲基环丙烯

Effects of deastringency and 1-methylcyclopropene treatment on the electrical properties of *Diospyros kaki* L. Huoshi during storage

ZHANG Li[1], SUN Shi-Ying[2], WANG Rui-Qing[1*]
(1. *College of Life Science*, *Shangrao Normal University*, *Shangrao* 334000, *China*;
2. *Laizhou Agricultural Technology Extension Center*, *Laizhou* 261400, *China*)

ABSTRACT: Objective To clarify the effects of deastringency and 1-methylcyclopropene (1-MCP) treatments on the electrical properties of *Diospyros kaki* L. Huoshi during storage. **Methods** High-concentration short-term CO_2

收稿日期: 2025-10-27
基金项目: 江西省重点研发计划-助力乡村振兴项目(20244BDH84009); 上饶市 2025 研发后补助基础研究计划一般项目(2025D013)
第一作者: 张莉(1979—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为园艺产品贮藏加工。E-mail: zhangli1979@nwsuaf.edu.cn
***通信作者:** 王瑞庆(1978—), 男, 副教授, 主要研究方向为果蔬贮藏保鲜与无损检测。E-mail: w_ruiqing@163.com

treatment was applied to *Diospyros kaki* L. Huoshi for deastringency, and 500 nL/L 1-MCP was used for preservation, respectively, with untreated fruits as the control (CK). Inductance-capacitance-resistance (LCR) impedance analyzer was employed to determine the dynamic changes of impedance, inductance, capacitance and conductance of the treated fruits at 5 frequencies (0.1, 1.0, 10.0, 100.0 and 1000.0 kHz) during room-temperature storage. **Results** The impedance and inductance of *Diospyros kaki* L. Huoshi showed a power function decrease with increasing frequency, while conductance increased in a power function pattern, and capacitance exhibited a slow decrease followed by fast increase manner. During storage, the impedance and inductance of fruits in all treatments decreased in a linear relationship, and capacitance and conductance increased in an exponential relationship. The frequency of 1.0 kHz was the sensitive frequency for changes in fruit impedance, inductance and capacitance. The 1-MCP treatment significantly inhibited the decrease rate of impedance and inductance, as well as the increase rate of capacitance and conductance. At 1.0 kHz, after 24 d of storage, the impedance and inductance of 1-MCP treated fruits were 60.8% and 59.7% higher than those of the CK, respectively; while the capacitance and conductance were 60.6% and 44.6% of those in CK, respectively. Deastringency accelerated the changing process of electrical parameters: On the 6th day, the impedance and inductance decreased by 88.9% and 88.8% compared with 0 d, respectively; the capacitance and conductance were 9.2 and 15.4 times those on 0 d, respectively. **Conclusion** Deastringency and 1-MCP treatments only alter the time and amplitude of electrical parameter variations in *Diospyros kaki* L. Huoshi persimmon, but not the pattern; the electrical parameters are sensitive to above 2 kinds of treatments. This study provides a reference for the non-destructive detection of deastringency efficiency and storability and 1-MCP preservation effect of persimmon fruits.

KEY WORDS: *Diospyros kaki* L. Huoshi; electrical properties; deastringency; 1-methylcyclopropene

0　引　言

新鲜果实内部含有大量的水分和电解质, 当其处于外加电场时, 会表现出导电、介电、极化等特性[1]。当果实内部状况发生变化, 会导致其电学性质相应改变。由于电学特性的测定具有成本低、反应灵敏、可实时监测且与果实内部品质关系密切等特点, 利用电学特性对果实品质和生理状态进行无损检测成为研究热点。

大量研究表明, 果实电学参数与硬度[2−3]、可滴定酸[4]、可溶性固形物含量[5−7]等关键品质指标存在显著相关性, 可用于成熟衰老程度判断[8−9]、品种识别[10]、病虫害诊断[11−13]、品质预测[14−15]等。不同种类和品种的果实, 对电学特性的响应存在差异, 且受温度、频率等测试条件的影响[1,16]。然而, 当前研究多聚焦于果实自身不同状态与生理阶段的电学特性变化, 针对不同商业化处理对电学特性的影响, 相关报道较为匮乏[17−18]。

柿原产于中国[19], 其产量约占全球总产量的 80%[联合国粮食与农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO), 2023], 由于采收后软化迅速, 限制了其商业化流通。柿果实的呼吸类型因品种而异, 但多数品种在成熟过程会出现乙烯高峰[20], 其衰老过程受乙烯信号转导的调控[19−20]。1-甲基环丙烯(1-methylcyclopropene, 1-MCP)是乙烯受体抑制剂, 可优先与果实内部乙烯受体结合, 进而抑制乙烯介导的成熟衰老反应[21]。由于 1-MCP 具有高效、无毒害残留、无污染的特性, 在欧美许多发达国家已批准在果品保鲜商业化生产中应用[22]。柿果实贮藏期间进行 1-MCP 处理, 可延缓衰老的速度, 延长保鲜期[23−24]。我国柿品种以涩柿为主, 需脱涩后进入市场[25], 常规进行脱涩的方法有乙烯脱涩、温水脱涩、酒精脱涩等, 但上述方法在脱涩后, 果实已软化, 难以进行产业化经营。恒温短时 CO_2 法(constant temperature short-term CO_2 deastringency, CTSD)通过高浓度 CO_2 环境诱导柿果实脱涩[24−25], 效率高、耗时短, 较其他方法更有利于硬度的保持, 是目前国际上通用的柿果实脱涩的方法。脱涩与 1-MCP 处理是否会对柿果实贮藏期间电学参数变化产生影响, 尚待明确。

本研究以火柿(*Diospyros kaki* L. Huoshi)为材料, 探讨其贮藏期间电学参数阻抗、电容、电感、电导的动态变化特点, 量化评估电学参数对脱涩与 1-MCP 处理的响应规律。研究可为利用无损检测技术探索柿果实脱涩效果与耐贮性、评估 1-MCP 处理的保鲜效果、从电学角度阐释脱涩和 1-MCP 处理的作用机制、揭示果实电学特性对衰老的响应规律提供参考。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

火柿采于西北农林科技大学果树实验站。参照张莉等[9]判断成熟度的方法, 于商业采收期, 挑选大小均匀、处于转色期的健康果实作为试验材料。

1-MCP(浓度 0.14%, 美国陶氏化学公司)。

1.2 仪器与设备

3532-50 型电感-电容-电阻(inductance-capacitance-resistance, LCR)阻抗分析仪(日本日置 HIOKI 公司); 平行板电极为自制正方形铜电极, 边长 6 cm。

1.3 实验方法

1.3.1 材料处理

果实采收当天运回实验室, 将果实分成 3 组, 分别装入聚乙烯塑料帐内, 进行如下处理: (1)脱涩处理。通过恒温短时 CO_2 法, 用浓度约 85%的 CO_2 气体密封处理[24]。(2) 1-MCP 处理。按照 1-MCP 产品技术手册, 参考王瑞庆等[26]的方法, 用 500 nL/L 的 1-MCP 进行密封。(3)对照(CK)。仅密封塑料帐, 不加入试剂。

各处理均在室温(20±2) ℃下密封 24 h, 结束后, 将 3 组果实分别装入带有塑料薄膜内衬的塑料果箱内, 掩口(但不密封)置于室温(20±2) ℃下贮藏。

1.3.2 测定方法

果实电学参数利用 LCR 阻抗分析仪测定。LCR 阻抗分析仪与平行板电极通过同轴电缆相连, 与计算机通过 RS-232C 串口连接, 利用 HIOKI 配套软件在计算机上进行参数设定与数据采集, 装置如图 1 所示。电学参数参照张莉等[9]的方法, 选择对果实成熟衰老敏感的指标阻抗、电感、电容和电导进行测定, 测试频率根据对数关系选取 0.1、1.0、10.0、100.0 和 1000.0 kHz。测定时, 将果实置于平行板电极之间, 施加 1 N 外力使果实与极板接触稳定。于采收当日(0 d)测定电学指标初始值。之后, CK 和 1-MCP 处理果实每隔 4 d 测定 1 次, 测定至 24 d; 脱涩果实每隔 2 d 测定 1 次, 测定至 6 d。每次各处理分别测定 10~12 个果实($10 \leqslant n \leqslant 12$)。电学参数在贮藏期间的变化幅度通过公式(1)计算:

$$\Delta E/\% = (E_{24\,d} - E_{0\,d}) \times 100\% / E_{0\,d} \quad (1)$$

式中: ΔE 为电学参数变化幅度, %; $E_{24\,d}$、$E_{0\,d}$ 分别为 24 d 和 0 d 时的电学参数值。

1.4 数据处理

采用 SPSS 18.0 软件进行数据统计分析。差异显著性检验采用单因素方差分析, 多重比较选用邓肯(Duncan)法; 以 $P<0.05$ 表示组间差异显著, $P<0.01$ 表示差异极显著。图中误差线为标准误(standard error, SE)。

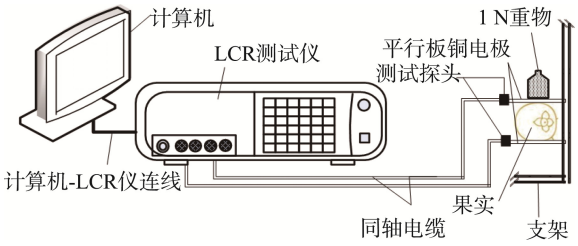


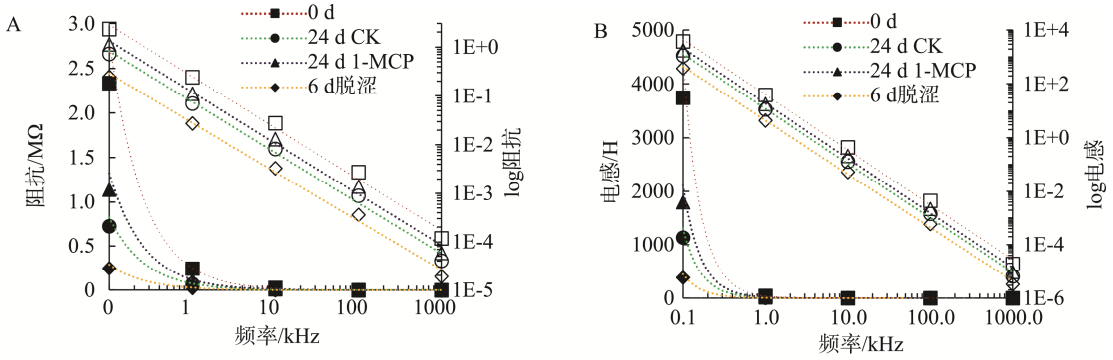
图 1 火柿电学参数测定装置

Fig.1 Electrical parameter measurement device for *Diospyros kaki* L. Huoshi

2 结果与分析

2.1 测试频率对电学参数的影响

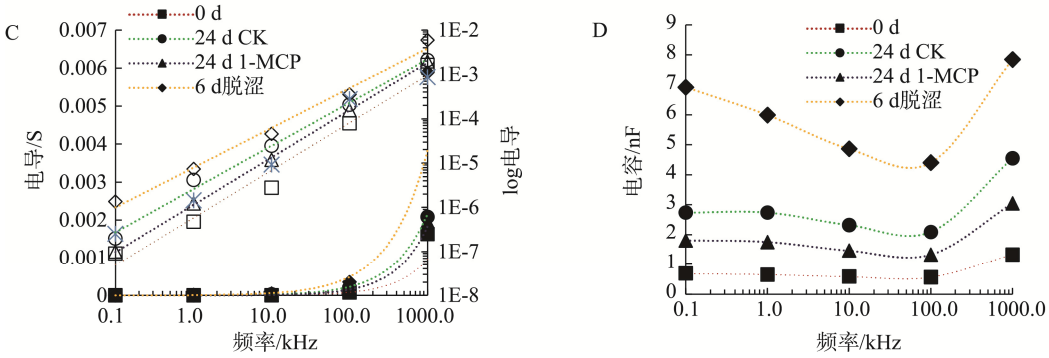
火柿果实电学参数(实心符号)及其对数值(空心符号)随测试频率的变化趋势如图 2 所示(以 0 d、脱涩 6 d、CK 与 1-MCP 处理 24 d 时的果实为例)。果实阻抗(图 2A, 表 1)和电感(图 2B, 表 1)随测试频率的升高, 呈幂函数关系($r^2 \geqslant 0.9998$, $P<0.001$)急剧下降。当频率从 0.1 kHz 升高至 1000.0 kHz, 果实阻抗从 0.25 MΩ(脱涩 6 d)~2.34 MΩ (0 d)下降至 0.02 kΩ(脱涩 6 d)~1.18 kΩ (0 d), 不足 0.1 kHz 时的万分之一; 电感由 383.9 H(脱涩 6 d)~3746.6 H (0 d)下降至 3.3 nH(脱涩 6 d)~19.1 nH (0 d), 不足 0.1 kHz 时的亿分之一, 下降幅度大于阻抗。果实电导(图 2C, 表 1)随频率的升高, 呈幂函数关系($r^2 \geqslant 0.9957$, $P<0.01$)迅速升高, 1000.0 kHz 时, 电导是 0.1 kHz 时的 4365 倍(脱涩 6 d)~17973 倍(0 d 时)。果实电容(图 2D)随频率的升高, 整体呈现先慢速下降后快速升高



注: 实心符号为电学参数值, 空心符号为对应电学参数的对数值。

图 2 阻抗(A)、电感(B)、电导(C)和电容(D)随频率的变化

Fig.2 Changes in impedance (A), inductance (B), conductance (C) and capacitance (D) with frequency



注: 实心符号为电学参数值, 空心符号为对应电学参数的对数值。

图 2(续)　阻抗(A)、电感(B)、电导(C)和电容(D)随频率的变化

Fig.2　Changes in impedance (A), inductance (B), conductance (C) and capacitance (D) with frequency

表 1　电学参数与测试频率的关系(以 0 d 果实为例)

Table 1　Relationship between electrical parameters and test frequency (taking 0 d fruits as an example)

电学参数	频率/kHz	类型	关系式	决定系数(r^2)	显著性
阻抗	0.1~1000.0	幂函数	Z=249012$f^{-1.054}$	0.9998	P<0.001
电感	0.1~1000.0	幂函数	Lp=39.944$f^{-2.052}$	1.0000	P<0.0001
电导	0.1~1000.0	幂函数	G=5.82E–7$f^{1.073}$	0.9988	P<0.01

注: Z 为阻抗, MΩ; Lp 为电感, H; G 为电导, S。

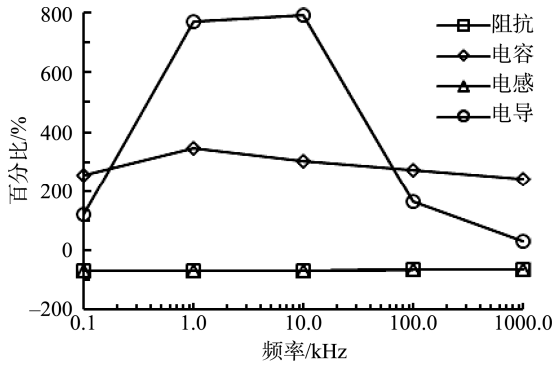
的趋势。0 d 时, 电容值相对较小, 介于 0.56 nF (100.0 kHz)~1.33 nF (1000.0 kHz)之间; 脱涩 6 d 果实电容相对较高, 在 4.40 nF (100.0 kHz)~7.84 nF (1000.0 kHz)之间; CK 和 1-MCP 处理果实 24 d 时电容值介于前二者之间, 且 CK 大于 1-MCP 处理。其他各贮藏时期 CK、脱涩及 1-MCP 处理果实的电学参数随频率的变化规律与上述趋势一致, 相关数据未列出。

2.2　贮藏期间电学参数的变化幅度

与采收时(0 d)比较, 贮藏期间, 火柿(以 CK 为例)电学参数阻抗和电感明显下降, 电容和电导明显升高, 各频率下, 电学参数变化幅度有差异(图 3)。随着频率的升高, 各电学参数变化的幅度均呈现先升高后下降的趋势, 阻抗、电感和电容变化幅度最高点在 1.0 kHz, 为其敏感频率, 变化幅度分别为–71.4%、–71.2%和 345.2%。电导在 10.0 kHz 时变化幅度最大, 为 791.8%。在 1000.0 kHz 时, 各电学参数变化幅度最小, 此时, 阻抗和电感分别下降了 65.5%和 66.0%; 电容和电导分别升高了 241.8%和 27.5%。

2.3　1-MCP 与脱涩处理对电学参数的影响

由于贮藏期间阻抗、电感和电容在 1.0 kHz 时变化幅度最明显, 电导在 1.0 kHz 时与 10.0 kHz 的变化幅度差异不明显, 均高于其他 3 个频率, 因此本研究选取 1.0 kHz 频率下的电学参数为分析对象, 探讨脱涩和 1-MCP 处理对果实电学特性的影响。



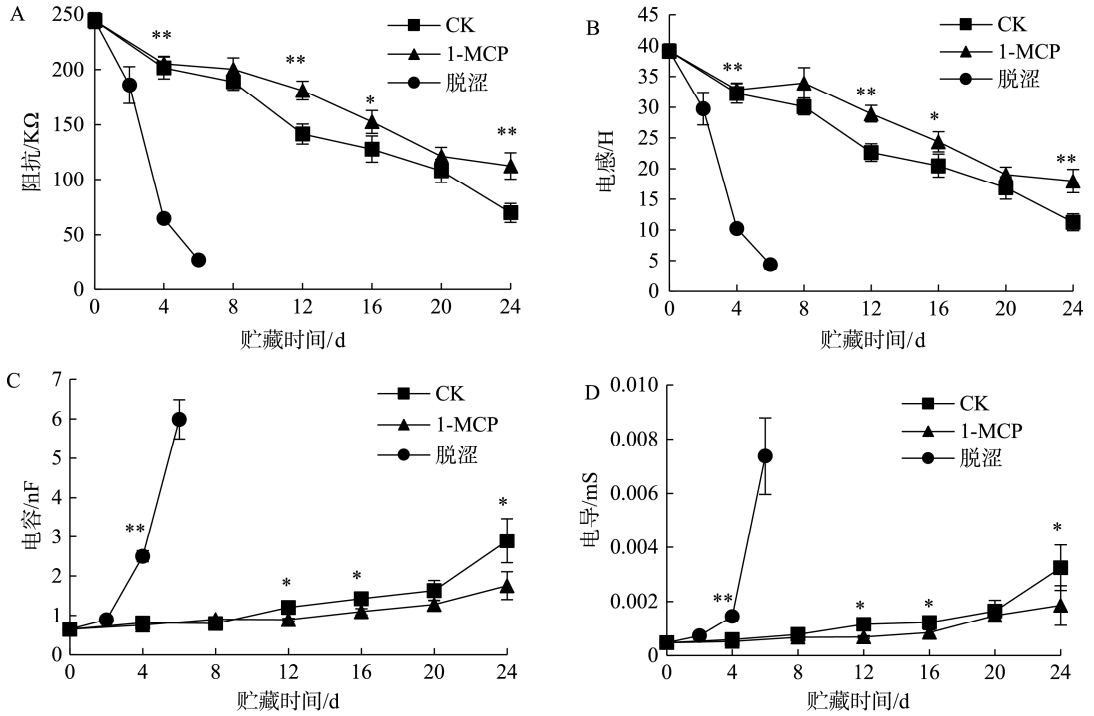
注: 正值为升高的百分数, 负值为降低的百分数。

图 3　各频率下 CK 电学参数在贮藏期间的变化幅度

Fig.3　Magnitude of change in electrical parameters of CK during storage at different frequencies

贮藏期间, 各处理果实阻抗(图 4A)和电感(图 4B)均呈线性(r>0.980, P<0.05)降低。至贮藏末期 24 d 时, CK 的阻抗和电感分别由采收时的 244.4 kΩ 和 39.1 H 下降至 69.8 kΩ 和 11.3 H, 分别下降了 71.4%和 71.2%; 1-MCP 处理可显著延缓二者下降的速率, 24 d 时, 阻抗和电感下降幅度均为 54.1%, 分别高于 CK 60.8%和 59.7%, 差异显著(P<0.05)。脱涩后, 果实阻抗和电感急剧下降, 第 6 d 时, 分别为 27.2 kΩ 和 4.38 H, 分别比采收时下降了 88.9%和 88.8%, 均低于贮藏末期(24 d)的 CK。

贮藏期间, CK、1-MCP 处理和脱涩果实的电容(图 4C)和电导(图 4D)均呈指数关系(r>0.959, P<0.01)升高, 前期升高速率相对较慢, 后期升高速率加快。1-MCP 处理可



注: *和**分别表示同一贮藏时间下, 不同处理间在 0.05 和 0.01 水平差异显著。

图 4 脱涩和 1-MCP 对贮藏期间阻抗(A)、电感(B)、电容(C)和电导(D)的影响

Fig.4 Effects of deastringency and 1-MCP on impedance (A), inductance (B), capacitance (C) and conductance (D) during storage

延缓果实电容和电导的升高, 降低升高的幅度, 而脱涩处理则大大加速该进程。CK 电容在前 8 d 升高不明显, 之后快速上升, 至 24 d 时较采收时升高了 345.2%; 1-MCP 处理果实电容自 12 d 后才出现明显上升, 24 d 时的升高幅度为 169.7%, 显著低于 CK (P<0.05), 仅为 CK 的 60.6%。脱涩后, 第 6 d 时果实电容即达到 5.99 nF, 为采收时的 9.2 倍。CK 果实电导在前 8 d 上升也较为平缓, 8 d 后快速升高, 至 24 d 时达 0.0032 mS, 为采收时的 8.7 倍; 1-MCP 处理果实的电导在贮藏前期 12 d 相对稳定, 之后升高速率加快, 24 d 时的电导值为采收时的 3.9 倍, 但明显低于 CK (P<0.05), 为 CK 的 44.6%; 脱涩后, 果实电导迅速升高, 第 6 d 时即达到 0.0074 mS, 为采收时的 15.4 倍。

3 讨 论

3.1 火柿电学参数的频率特性

随着测试频率的升高, 火柿果实阻抗、电感呈幂函数关系急剧下降, 与以往在红巴梨[3]、枸杞[27]等果实中的研究结果一致。这种变化与构成果实的组织和细胞的结构不均一性[28]、不同频率下电流的穿透能力及传播途径差异[29]、不同果实结构中离子成分和含量差异有关[30]。本研究中, 电导随频率的升高呈规则的幂函数关系急剧上升, 而在红巴梨[3]、甜柿[23]等的研究中, 电导随频率的升高, 在一些频段(如 15.8 kHz 和 1580.0 kHz 附近[23])发生“漂移”而起伏的现象, 主要由于在“漂移”频段介电损耗随频率的不规则变化引起。本研究中未出现“漂移”现象, 可能与测试频率未处在漂移频段范围有关。

果实电容随频率升高呈现波动性变化, 与不同的频率范围会形成不同类型和强度的介电弛豫现象(进而产生介电损耗)有关。在介电弛豫存在的频率范围, 介电常数随着频率的增大而减小, 电容值也相应降低; 而在非弛豫的频率区域, 介电常数变化较小[31]。本研究的频率范围, 主要存在离子传导引起的 Maxwell-Wagner 介电损耗和双电层损耗等[32]。在 0.1~100.0 kHz 范围, 弛豫现象导致介电损耗影响, 随着频率升高, 电容整体呈下降趋势。在频率大于 100.0 kHz 时, 电容快速升高, 是此频率范围形成具有较大电容的带电双离子层, 且双电层的介电损耗逐渐消失所导致[3]。电容变化趋势与在红巴梨[3]、甜柿[23]等果实的研究结果相似。

3.2 1-MCP 对果实电学特性的影响

贮藏期间, 火柿果实阻抗下降, 导电能力增强, 与在红巴梨[1,27]、枸杞[27]等果实上的研究结果一致。主要由于果实衰老过程内部自由基引起膜脂过氧化, 膜透性增加和电解质的渗出, 降低了电流阻力[30]; 而内部一些大分子不溶性的多糖、蛋白质等物质逐渐转化为可溶性的小分子物质, 进一步增加了离子浓度和导电能力。同时, 构成细胞壁的果胶物质由固态的原果胶逐渐转化为可溶性果胶, 纤维素、半纤维素等也逐渐降解为小分子物质[23,33], 果实内胶体物质和液态电解质含量与比重增大, 引起电容的升高。

1-MCP 处理后, 显著延缓了果实阻抗、电感的下降和电容、电导的升高速度, 主要与 1-MCP 可以抑制乙烯反应, 延缓果实衰老有关。在柿[23]、苹果[34]、猕猴桃[35]等多种果实中均发现, 1-MCP 处理可以保持保护酶活性, 降低自由基含量, 进而有助于保护膜的完整性, 减轻膜内离子的过度渗出。1-MCP 还可以抑制果实软化相关蛋白和细胞壁降解酶基因的表达[36], 降低了酶的活性, 延缓果实内纤维素、半纤维素等细胞壁物质的降解[23]。1-MCP 处理对果实电学参数的影响, 因果实类型差别而有差异。嘎拉苹果[17]经 1-MCP 处理后, 随着贮藏时间的延长, 阻抗、电感的下降和电容的增加被延缓, 本研究在火柿上的结果与之相同。而在猕猴桃[10]上的研究认为, 1-MCP 处理并没有引起电学参数的明显改变。差异可能与 1-MCP 对不同果实处理后的保鲜效果不同, 或果实个体间的差异过大, 掩盖了电学特性的差异有关。而脱涩急剧加速了柿果实电学参数的变化进程, 增大了电学参数的变化幅度, 说明脱涩加速了果实内细胞膜透性的增大和大分子物质的分解, 细胞结构短时间遭到破坏, 果实快速衰老。因此, 本研究中 1-MCP 和脱涩对贮藏期间柿果实电学参数变化的影响, 与其对果实衰老期间膜结构和生理生化变化的影响结果相吻合。火柿果实电学参数对脱涩和 1-MCP 处理响应灵敏, 在对两种处理进行无损检测中具有应用价值。

3.3　电学参数变化模式

本研究中, 尽管 4 个电学参数在贮藏期间都发生了明显的变化, 但变化的模式有差异。果实阻抗和电感呈线性变化, 即在贮藏期间, 二者变化的幅度和速率是均匀的, 说明此两个指标对果实衰老早期结构和成分的变化即很敏感, 可用于果实整个衰老进程量变过程的监测。而电容和电导呈指数型变化, 在贮藏早期变化不明显, 在后期变化显著, 因而此两个指标无法反应果实衰老早期成分和结构的变化, 而对后期某些生理进程的质变响应敏感, 这些进程可能是贮藏后期果胶酶与纤维素酶活性骤升导致的细胞壁快速崩解、淀粉与单宁等成分的大量分解、细胞膜完整性的快速破坏等。1-MCP 处理, 可延缓电学参数变化的时间、降低变化的幅度, 但对电学参数变化的模式没有明显改变。

4　结　论

本研究区别于以往“电学参数-品质关系”类研究, 聚焦脱涩和 1-MCP 两种商业化处理对柿果实电学特性的影响机制, 明确了电学参数变化的敏感频率, 证实电学参数对两种处理响应灵敏, 可有效区分处理效果, 得到结论如下。

(1)果实阻抗和电感随测试频率的升高, 呈幂函数关系下降, 电导呈幂函数升高, 电容呈现先下降后快速升高的趋势。脱涩与 1-MCP 处理及不同贮藏期的果实电学参数随频率的变化趋势相似。

(2)随贮藏期的延长, 果实阻抗和电感呈线性显著下降, 电容和电导呈指数关系显著升高。1-MCP 处理可以延缓电学参数的变化, 降低变化的幅度; 而 CO_2 脱涩则加速上述进程。但两个处理对果实贮藏期间电学参数变化的模式没有明显改变。1.0 kHz 为阻抗、电感、电容变化的敏感频率。

(3)火柿果实 4 种电学参数对脱涩和 1-MCP 处理响应灵敏, 在无损检测 CO_2 脱涩效果和 1-MCP 处理的保鲜效果中具有应用价值。

本研究为柿果实贮藏期间商业化处理效果的无损检测提供了理论与技术支撑。后续可基于本研究确定的敏感频率及参数变化模式, 开展脱涩、1-MCP 两种商业处理(生理生化干预)下电学参数与果实品质的相关性研究; 若要实现基于电学特性的两种处理效果的无损检测, 需进一步建立“处理干预-理化变化-电学响应”的预测模型。

参考文献

[1] 王瑞庆, 冯建华, 徐新明, 等. 果蔬电学特性的测试技术及影响因素研究进展[J]. 食品科学, 2012, 33(19): 321–325.
WANG RQ, FENG JH, XU XM, *et al*. Electrical properties of fruits and vegetables: Introduction, testing techniques and influencing factors [J]. Food Science, 2012, 33(19): 321–325.

[2] FAZAYELI A, KAMGAR S, NASSIRI SM, *et al*. Dielectric spectroscopy as a potential technique for prediction of kiwifruit quality indices during storage [J]. Information Processing in Agriculture, 2019, 6(4): 479–486.

[3] 王瑞庆, 张继澍. 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.
WANG RQ, ZHANG JS. Nondestructive determination of the quality of red bartlett pear during shelf life by electrical characteristics [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(4): 243–247.

[4] CAO M, ZENG S, WANG J, *et al*. Dielectric properties of peaches with and without skin during storage and their relationship to internal quality [J]. Postharvest Biology and Technology, 2023, 204: 112433.

[5] MOHAMMED M, MUNIR M, ALJABR A. Prediction of date fruit quality attributes during cold storage based on their electrical properties using artificial neural networks models [J]. Foods, 2022, 11(11): 1666.

[6] 黄铝文, 田旭, 任烈弘, 等. 基于电学参数的苹果可溶性固形物含量预测[J]. 农业工程学报, 2023, 39(2): 252–259.
HUANG LW, TIAN X, REN LH, *et al*. Prediction of the soluble solid contents for apple fruit using electrical parameters [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(2): 252–259.

[7] FAN L, CHEN DJ, LIU C, *et al*. Non-destructive detection of golden passion fruit quality based on dielectric characteristics [J]. Applied Sciences, 2024, 14(5): 2200.

[8] GUO W, ZHU X, NELSON SO, *et al*. Maturity effects on dielectric properties of apples from 10 to 4500 MHz [J]. LWT-Food Science and Technology, 2011, 44(1): 224–230.

[9] 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.
ZHANG L, HAN AIH, HUANG YY, *et al*. Electrical parameter variation during maturation of persimmon fruits [J]. Journal of Gansu Agricultural

University, 2019, 54(2): 199–204.

[10] 唐燕, 张继澍. 基于介电特性的猕猴桃和桃果实品种识别研究[J]. 食品科学, 2012, 33(3): 1–4.
TANG Y, ZHANG JS. Identification of kiwifruit and peach varieties based on dielectric properties [J]. Food Science, 2012, 33(3): 1–4.

[11] 罗安伟, 王丹, 梁锦, 等. 侵染青霉菌猕猴桃生理品质与电学特性相关性研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5): 332–341, 307.
LUO ANW, WANG D, LIANG J, *et al*. Relationship between postharvest physiology, quality and electrical properties of kiwifruit infected with *Penicillium expansum* [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 332–341, 307.

[12] REDDY SK, BEN-YASHAR G, JAHN YM, *et al*. Early sensing of tomato brown rugose fruit virus in tomato plants via electrical measurements [J]. IEEE Sensors Letters, 2022, 6(5): 1–4.

[13] NIU Y, WANG D, YE L, *et al*. Nondestructive detection of kiwifruit infected with *Penicillium expansum* based on electrical properties [J]. Postharvest Biology and Technology, 2023, 195: 112150.

[14] YU S, LIU Y, TANG Y, *et al*. Non-destructive quality assessment method for Korla fragrant pears based on electrical properties and adaptive neural-fuzzy inference system [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 203: 107492.

[15] KARIMI H. Intelligent dielectric method for evaluating some qualitative characteristics of date fruit [J]. Postharvest Biology and Technology, 2025, 219: 113195.

[16] 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.
WANG RQ, ZHOU YH, ZHANG JS. Effect of temperature on electrical properties for ‘Huoshi’ persimmons fruit [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(4): 269–274.

[17] 王玲. ‘嘎拉’苹果果实采后电学特性与生理特性关系的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
WANG L. Study on relationship between electrical properties and physiological characteristics of postharvest ‘Gala’ apple fruit [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2009.

[18] 唐燕, 杜光源, 张继澍. 1-MCP 对不同成熟度猕猴桃电特性的影响[J]. 食品科学, 2012, 33(4): 238–242.
TANG Y, DU GY, ZHANG JS. Influence of 1-MCP on dielectric properties of kiwifruit at different maturities [J]. Food Science, 2012, 33(4): 238–242.

[19] DORTA T, ONOUE N, HSIANG TF, *et al*. Phenotypic and gene expression analysis of fruit development of ‘Rojo Brillante’ and ‘Fuyu’ persimmon (*Diospyros kaki* L.) cultivars in two different locations [J]. Agronomy, 2024, 14(7): 1555.

[20] DORTA T, GIL-MUÑOZ F, CARRASCO F, *et al*. Physiological changes and transcriptomic analysis throughout on-tree fruit ripening process in persimmon (*Diospyros kaki* L.) [J]. Plants, 2023, 12(16): 2895.

[21] 王瑞庆, 魏雯雯, 徐新明, 等. 1-MCP 处理和气调包装对枸杞鲜果低温贮藏品质的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(19): 287–292.
WANG RQ, WEI WW, XU XM, *et al*. Effect of 1-methylcyclopropene and modified atmosphere packaging on quality retention during cold-temperature storage of *Lycium barbarum* fruit [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(19): 287–292.

[22] 王瑞庆, 冯建华, 魏雯雯, 等. 1-MCP 处理和气调贮藏对赛买提杏冷藏效果的影响[J]. 食品科学, 2013, 34(20): 287–290.
WANG RQ, FENG JH, WEI WW, *et al.* Effect of 1-MCP and controlled atmosphere storage on preservation of apricot (*Prunus armeniaca* L. cv. Saimaiti) [J]. Food Science, 2013, 34(20): 287–290.

[23] 胡芳. 甜柿果实采后生理变化对 1-MCP 处理的响应机制及电学特性变化的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
HU F. Study on the changes of postharvest physiological, response mechanism of the 1-MCP treatment and the changes of electrical properties of persimmon fruit [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010.

[24] 王瑞庆, 韩爱华, 闻静, 等. 脱涩与 1-MCP 处理对柿果实生理生化特性的影响[J]. 西北农业学报, 2019, 28(2): 213–218.
WANG RQ, HAN AIH, WEN J, *et al*. Effects of deastringency and 1-MCP treatments on physio-biochemical characteristics of persimmon fruits [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2019, 28(2): 213–218.

[25] SALVADOR A, ARNAL L, BESADA C, *et al*. Physiological and structural changes during ripening and deastringency treatment of persimmon fruit cv. ‘Rojo Brillante’ [J]. Postharvest Biology and Technology, 2007, 46(2): 181–188.

[26] 王瑞庆, 马书尚, 武春林, 等. ‘嘎拉’苹果对不同浓度 1-MCP 处理的反应[J]. 西北植物学报, 2005, 25(2): 256–261.
WANG RQ, MA SS, WU CL, *et al*. Response of ‘Gala’ apples to different concentration of 1-MCP [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalis Sinica, 2005, 25(2): 256–261.

[27] 张伟伟. 枸杞鲜果损伤及贮藏期的电学特性检测研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2023.
ZHANG WW. Detection of electrical characteristics of fresh wolfberries damage and storage period [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2023.

[28] WOOLLEY JT. Maintenance of air in intercellular spaces of plants [J]. Plant Physiology, 1983, 72(4): 989–991.

[29] HARKER FR, MAINDONALD JH. Ripening of nectarine fruit: Changes in the cell wall, vacuole, and membranes detected using electrical impedance measurements [J]. Plant Physiology, 1994, 106(1): 165–171.

[30] 叶力瑕. 电子束与 X 射线辐照对猕猴桃品质和电学特性的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2024.
YE LX. Effects of electron beam and X-ray irradiation on quality and electrical properties of kiwifruit [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2024.

[31] NELSON SO. Frequency and temperature-dependent permittivities of fresh fruits and vegetables from 0.01 to 1.8 GHz [J]. Transactions of the ASAE, 2003, 46(2): 567–576.

[32] DE-LOOR GP. Dielectric properties of heterogeneous mixtures containing water [J]. Journal of Microwave Power, 1968, 3(2): 67–73.

[33] 李金歌, 黄桂丽. 多组学技术在果蔬保鲜领域的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(18): 145–151.
LI JG, HUANG GL. Research progress on multi-omics technology in fruit and vegetable preservation [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(18): 145–151.

[34] LV J, TAI R, CAO Y, *et al*. Genome-wide identification and comparative expression analysis of ascorbate peroxidase (APX) gene family in apple fruit under 1-methylcyclopropene (1-MCP) and ethephon treatments during ripening [J]. Scientia Horticulturae, 2024, 329: 113016.

[35] MA H, LIU N, XIE G, *et al*. Postharvest ripening combined with 1-MCP keeps the shelf quality of kiwifruit after cold storage by regulating the antioxidant system and defense enzymes [J]. Postharvest Biology and Technology, 2025, 222: 113370.

[36] MWANIKI MW, MATHOOKO FM, MATSUZAKI M, *et al*. Expression characteristics of seven members of the *β*-galactosidase gene family in ‘La France’ pear (*Pyrus communis* L.) fruit during growth and their regulation by 1-methylcyclopropene during postharvest ripening [J]. Postharvest Biology and Technology, 2005, 36(3): 253–263.

(责任编辑: 安香玉 韩晓红)