

侵染青霉菌猕猴桃生理品质与电学特性相关性研究

罗安伟 王 丹 梁 锦 黄天姿 张 璐

(西北农林科技大学食品与工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为了完善猕猴桃品质无损检测的途径,并为猕猴桃青霉病无损检测提供新方法,以红阳猕猴桃为实验材料,注射 15 μL 菌体浓度为 1×10^6 CFU/mL 的扩展青霉孢子悬浮液,对照组果实注射等体积的无菌水,对贮藏期内两组猕猴桃的品质、生理指标以及 100 Hz ~ 3.98 MHz 频率范围内的相关电学参数进行测定,通过主成分分析和相关性分析筛选出特征频率和敏感电参数,建立了数学模型。结果表明:无菌水对照组和青霉侵染组果实的特征频率分别为 3 956.5 kHz 和 251 Hz,敏感电参数分别为等效串联电阻 R_s 和等效串联电容 C_s ,其中,无菌水对照组中 β -1,3-葡聚糖酶 (GLU) 活性与 R_s 有较高的相关性,而青霉侵染组中可滴定酸 (TA) 含量与 C_s 呈极显著相关 ($P < 0.01$),并分别建立了 GLU 活性与 R_s 、TA 质量分数与 C_s 之间的数学回归方程。电学参数可以较好地反映猕猴桃品质,通过测定电学参数即可计算出 GLU 活性或 TA 含量,从而判断果实是否被青霉菌侵染。

关键词: 猕猴桃; 青霉菌; 生理品质; 电学参数; 相关性分析

中图分类号: TS255.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)05-0332-10 OSID: 

Relationship between Postharvest Physiology, Quality and Electrical Properties of Kiwifruit Infected with *Penicillium expansum*

LUO Anwei WANG Dan LIANG Jin HUANG Tianzi ZHANG Lu

(College of Food Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to improve the way of nondestructive detection of kiwifruit and provide a new method to investigate whether the kiwifruits is infected with *Penicillium expansum* (*P. expansum*), the quality, physiological indicators and the relevant electrical parameters within the frequency range of 100 Hz ~ 3.98 MHz of Hongyang kiwifruit which were infected with 15 μL 1×10^6 CFU/mL *P. expansum* spore suspension in the storage period were measured, while the control group was infected with sterile water. The characteristic frequency and sensitive electrical parameters were screened out through principal component analysis and correlation analysis, and the mathematical models were further established. The results showed that the characteristic frequency of control group treated with sterile water and the inoculated group treated with *P. expansum* was 3 956.5 kHz and 251 Hz, respectively, the sensitive electrical parameters were equivalent series resistance R_s and equivalent series capacitance C_s , respectively. As for the control group, β -1, 3-glucanase (GLU) activity was highly correlated with R_s , and as for inoculated group, the titratable acid TA content was significantly correlated with C_s ($P < 0.01$). The mathematical regression equations were also established, which indicated that the electrical parameters can better reflect the quality of kiwifruit. As long as the measurement of electrical parameters, the value of GLU activity or TA content can be calculated to determine whether the kiwifruit was infected with *P. expansum*. The study provided a theoretical basis for the nondestructive detection of kiwifruit penicilliosis.

Key words: kiwifruit; *Penicillium expansum*; physiological quality; electrical parameters; correlation analysis

收稿日期: 2020-08-19 修回日期: 2020-09-13

基金项目: 陕西省重点研发计划农业领域重点项目(2018ZDXM-NY-056)、杨凌示范区产学研用协同创新重大项目(2018CXY-04)和杨凌示范区农业科技示范推广项目(2018-GG-21)

作者简介: 罗安伟(1971—),男,副教授,博士生导师,主要从事果蔬贮藏与加工研究,E-mail: lawnwau@163.com

0 引言

我国是猕猴桃生产大国,主要分为美味、中华和软枣猕猴桃三大品系^[1]。其中,中华系中的红阳猕猴桃口感独特、风味鲜美,且富含维生素 C、蛋白质、氨基酸、糖类、有机酸等多种有机物以及人体所必需的多种矿物质^[2-4],具有极高的药用价值和保健功能,深受大众喜爱^[5]。但是,由于其多汁浆果的属性,在运输和贮藏过程中极易发生机械损伤,从而引起霉菌侵染^[6]。青霉病是猕猴桃贮藏期最常见的微生物病害之一^[7],猕猴桃感染扩展青霉菌后会产生有毒且具有致畸、致癌、致突变等毒理作用^[8]的次级代谢产物展青霉素,这严重威胁消费者的健康,对猕猴桃品质管控也提出了更高要求。

果实内部是一个由大量带电粒子形成的生物电场^[9]。果实采收后,随着组织细胞代谢活动的继续进行,各类化学物质所带电荷量和电荷的空间分布随之发生变化,生物电场的分布和强度也随之改变^[10]。因此,在果实贮藏过程中除了发生生化反应,还会引发宏观电学特性的改变,这为利用电学特性对果实品质进行无损检测奠定了理论基础。电学检测由于具有快速、灵敏、无损,且操作简便、费用低等特点,而成为新的研究热点。近年来,国内外已有苹果^[11]、芒果^[12]、枣类^[13]、猕猴桃^[14]等生理特性和电学特性的相关性研究。文献[15]研究了梨的介电特性、生理特性以及内部品质的相关性,并建立了数学回归方程,证明介电常数可以反映果实的品质。文献[16]通过测定葡萄贮藏期间的电学参数与质地特性,建立了电学参数与品质特性之间的数学模型,证明了利用电学特性反映果实生理特性的可行性。目前,利用电学特性对果实病害进行无损检测的研究还较少,文献[17]基于电学特性进行了苹果水心病的无损检测,但是关于侵染青霉菌猕猴桃果实的电学特性和品质特性的相关性研究尚未见报道。

本文以陕西省主栽品种红阳猕猴桃为实验材料,研究贮藏期内侵染青霉菌后的猕猴桃生理、品质指标的变化规律及其与电学参数的相关性,建立品质、生理指标与电参数之间的数学模型,以期为基于电学特性的猕猴桃青霉病无损检测提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

实验材料为红阳猕猴桃,于 2019 年 9 月 10 日采收于陕西省眉县猕猴桃基地(北纬 34°29′,东经 107°76′)。可溶性固形物质量分数(SSC)6.5%~

6.8%,果实单果质量为(85±10)g。挑选出 600 个形状相近、大小均匀、无病虫害和机械损伤的果实。采收后置于阴凉处 24 h 散去田间热备用。

扩展青霉菌:从感染青霉病的腐烂猕猴桃上分离并且经过分子生物学鉴定得到,于马铃薯琼脂培养基上纯化、扩培,孢子用 15 mL 无菌水收集后,用血球计数板计数,制成菌体浓度为 1×10⁶ CFU/mL 的孢子悬浮液^[18]。

氢氧化钠、偏磷酸、乙二胺四乙酸(EDTA)、L-抗坏血酸、L-苯丙氨酸、三氯乙酸、硫代巴比妥酸(广东省化学试剂工程技术研究开发中心);维生素 C 标准品(纯度 98% 以上,上海阿拉丁生化科技股份有限公司)。

1.2 仪器与设备

IM 3536 型 LCR 仪(日本 HIOKI 公司)、TA.XT PLUS/50 型物性测定仪(英国 Stable Micro Systems 公司)、LC-20A 型高效液相色谱仪(岛津企业管理中国有限公司)、N6000 型双光束紫外分光光度计(上海佑科仪器仪表有限公司)、HC-3018R 高速冷冻离心机(安徽中佳科学仪器有限公司)、PAL-1 型数显糖度计(日本 ATAGO 公司)。

1.3 方法

1.3.1 样品预处理

红阳猕猴桃散去田间热后,用质量分数为 1% 的次氯酸钠溶液浸泡 2 min,用无菌水清洗 3 次,自然条件下晾干。晾干后的猕猴桃分成对照组和青霉侵染组,每组 300 个猕猴桃。两组猕猴桃均用直径 1 mm 的消毒牙签在猕猴桃赤道部位均匀扎 4 个深度为 4 mm 的小孔^[19]。

对照组在小孔中注射 15 μL 无菌水;青霉侵染组注射 15 μL 菌体浓度为 1×10⁶ CFU/mL 的扩展青霉孢子悬浮液,模拟果实受到扩展青霉侵染,注射完成后自然晾干。用厚度为 0.03 mm 的聚乙烯包装袋装好后放入塑料筐中,于 0~1℃、相对湿度 90%~95% 的冷库中贮藏。贮藏过程中每 15 d 取样进行测定。

对照组猕猴桃果实贮藏时间为 135 d;青霉侵染组猕猴桃由于霉菌侵染加快了果实软化腐烂,贮藏期为 75 d。

1.3.2 品质指标测定

质量损失率:无菌水对照组和青霉侵染组分别固定 20 个猕猴桃果实,相同条件下贮藏。每 15 d 进行称量,计算质量损失率。

硬度:每组随机取 5 个猕猴桃果实,沿果实赤道部位 120°等距离取 3 点,均匀地削去果皮。采用 TA.XT PLUS/50 型物性测定仪在 TPA 模式下,使用

P2 型探头进行穿刺测试,测试速率为 1 mm/s^[20],单位为 kg/cm²。

可溶性固形物含量(SSC):随机取 5 个猕猴桃,削皮去芯后榨汁,4 层纱布过滤后取汁,用数显糖度计进行测定,每个果实重复测定 3 次^[21]。

可滴定酸(TA)含量:采用酸碱滴定法测定。称取 10 g 猕猴桃果肉,置于研钵中研磨至匀浆,蒸馏水定容至 100 mL,8 000 r/min 转速下离心 10 min 后,取 10 mL 上清液用 0.1 mol/L 的 NaOH 进行滴定。折算系数以柠檬酸计算^[22]。

维生素 C 含量:采用高效液相色谱法,色谱柱条件:Inertsil/Wondasil C18 柱(4.6 mm × 150 mm, 5 μm);流动相为 0.1% 偏磷酸溶液与甲醇(体积比 96:4);流速 1.0 mL/min;样品体积 10 μL;检测波长 243 nm^[23]。随机挑选 9 个猕猴桃,任意 3 个猕猴桃果肉混匀作为一份样品。取 20 g 混匀的果肉并加入 20 mL 0.1% 的偏磷酸溶液用匀浆机打成匀浆,在 10 000 r/min 的条件下离心 15 min,取 5 mL 上清液于 25 mL 容量瓶中用 0.1% 的偏磷酸溶液定容,摇匀后用孔径 0.22 μm 的微孔滤膜过滤至样品瓶中待用。标准溶液的制备:准确称取维生素 C 标准品 0.1 g 于烧杯中,用 0.1% 偏磷酸溶液溶解,转移至 100 mL 棕色容量瓶中并定容至刻度,得到质量浓度为 1 000 μg/mL 的标准储备液。测试前再用标准储备液配制质量浓度分别为 10、20、50、100、200、400、800 μg/mL 的维生素 C 标准溶液。

1.3.3 生理指标测定

酶提取液制备:取 3 g 猕猴桃果肉置于经过预冷的研钵中,加入 3 mL 提取缓冲液后研磨至匀浆。将匀浆转移至离心管中,4℃、12 000 g 离心 30 min,离心后的上清液即为酶提取液。

β-1,3-葡聚糖酶(GLU)活性:100 μL 酶液加入 100 μL 昆布多糖溶液,置于 37℃ 恒温水浴锅中保温 40 min,保温结束后加入 1.8 mL 蒸馏水和 1.5 mL 3,5-二硝基水杨酸(DNS)试剂,再沸水浴 3 min,用蒸馏水稀释至 25 mL,测定在 540 nm 处的吸光度。以同等体积煮沸的酶液作为对照^[24]。

过氧化氢酶(CAT)活性:0.1 mL 酶提取液混入 2.9 mL H₂O₂ 溶液,以蒸馏水为参比,在反应 15 s 时开始记录反应液在 240 nm 波长处的吸光度作为初始值,每隔 30 s 记录一次,获取 6 个点的数据^[25]。

苯丙氨酸解氨酶(PAL)活性:0.5 mL 酶提取液中加入 3 mL 50 mmol/L 硼酸缓冲液和 0.5 mL 20 mmol/L L-苯丙氨酸溶液。置于 37℃ 水浴锅保温 60 min,保温结束后立即加入 0.1 mL 6 mol/L 的盐酸终止反应,在波长为 290 nm 处测定吸光度。

丙二醛(MDA)含量:2.0 mL 提取液加入 2.0 mL 0.67% 的硫代巴比妥酸溶液后沸水浴 20 min,再分别于 450、532、600 nm 波长处测定吸光度^[26-27]。

每个指标平行测定 3 个样本,每个样本重复测定 3 次。各品质、生理指标测定时,均选取果实病斑外 1 cm 处果肉进行测定。

1.3.4 发病率及病情指数测定

发病率:根据十字交叉法,使用游标卡尺测定果实病斑直径,当果实病斑直径大于 0.50 mm 时判定为发病果实,发病果实个数占果实总个数的百分比即为发病率。

病情指数计算公式为

$$A = \frac{100 \sum cn}{NC}$$

式中 c ——染病级数
 n ——该级病果数
 N ——接种总果数
 C ——最高染病级数

对猕猴桃的染病程度进行分级,无发病症状果实的染病级数为 0;病斑面积占全果面积的 1/3 以下果实的染病级数为 1;病斑面积占全果面积的 1/3 ~ 1/2 果实的染病级数为 3;病斑面积占全果面积的 1/2 ~ 3/4 果实的染病级数为 5;病斑面积占全果面积的 3/4 以上果实的染病级数为 7。

1.3.5 电学参数测定

采用 IM 3536 型 LCR 仪,在 100 Hz ~ 3.98 MHz 频率范围内连续测量了 193 个频率点(193 个频率点的选取为 LCR 仪在设定的频率范围内自动连续测定的频率点)下的阻抗 Z 、阻抗相位角 θ 、等效串联电阻 R_s 、等效串联电容 C_s 、损耗系数 D 、电导 G 、电抗 X 、等效串联电感 L_s 、等效并联电感 L_p 、介电常数 ε 共 10 个电学参数。测试前通过开路补偿和短路补偿的方式对测量仪器进行校准,电压为 1 V,两个平行电极板间压力为 0.5 N,探头采用 L2001 型 4 端子探头。对照组和处理组猕猴桃每 15 d 分别随机取样 30 个果实,待测猕猴桃果实从冷库中取出后,放置于实验室内平衡至室温(25℃ 左右)。温度平衡结束后,将猕猴桃果实置于平行电极板间,在果实赤道部位 120° 等距离测定 3 次,测试时上下电极板接触果面应避免病斑。

1.4 数据处理

采用 Origin 8.5 软件制图,并用 SPSS 18.0 软件进行方差分析、相关性分析和主成分分析,实验结果表示为平均值 ± 标准差。 $P < 0.05$ 表示差异性显著。

2 结果与分析

2.1 贮藏期猕猴桃品质指标、生理指标的变化

图1为猕猴桃贮藏期间各品质、生理指标的变化规律。

如图1所示,猕猴桃的质量损失率随贮藏期的延长呈现逐渐增加的趋势,贮藏末期青霉侵染组果实质量损失率达到了6.90%,而此时对照组质量损失率为4.90%。水分是猕猴桃中最重要的组成成

分,占比高达80%以上,果肉组织中的水分通常分为游离水和束缚水两种形态^[28],其中游离水主要参与各类生理化学反应而容易消耗,也是影响电学参数变化的主要因素之一。青霉侵染组的失水速率明显高于无菌水对照组,主要是由于青霉菌的侵染和繁殖加快了果实内部的营养物质消耗和蒸腾作用等代谢活动^[29],也可能是由于青霉菌破坏了细胞结构,导致细胞内部胶体微粒周围的束缚水变成游离水而丧失。

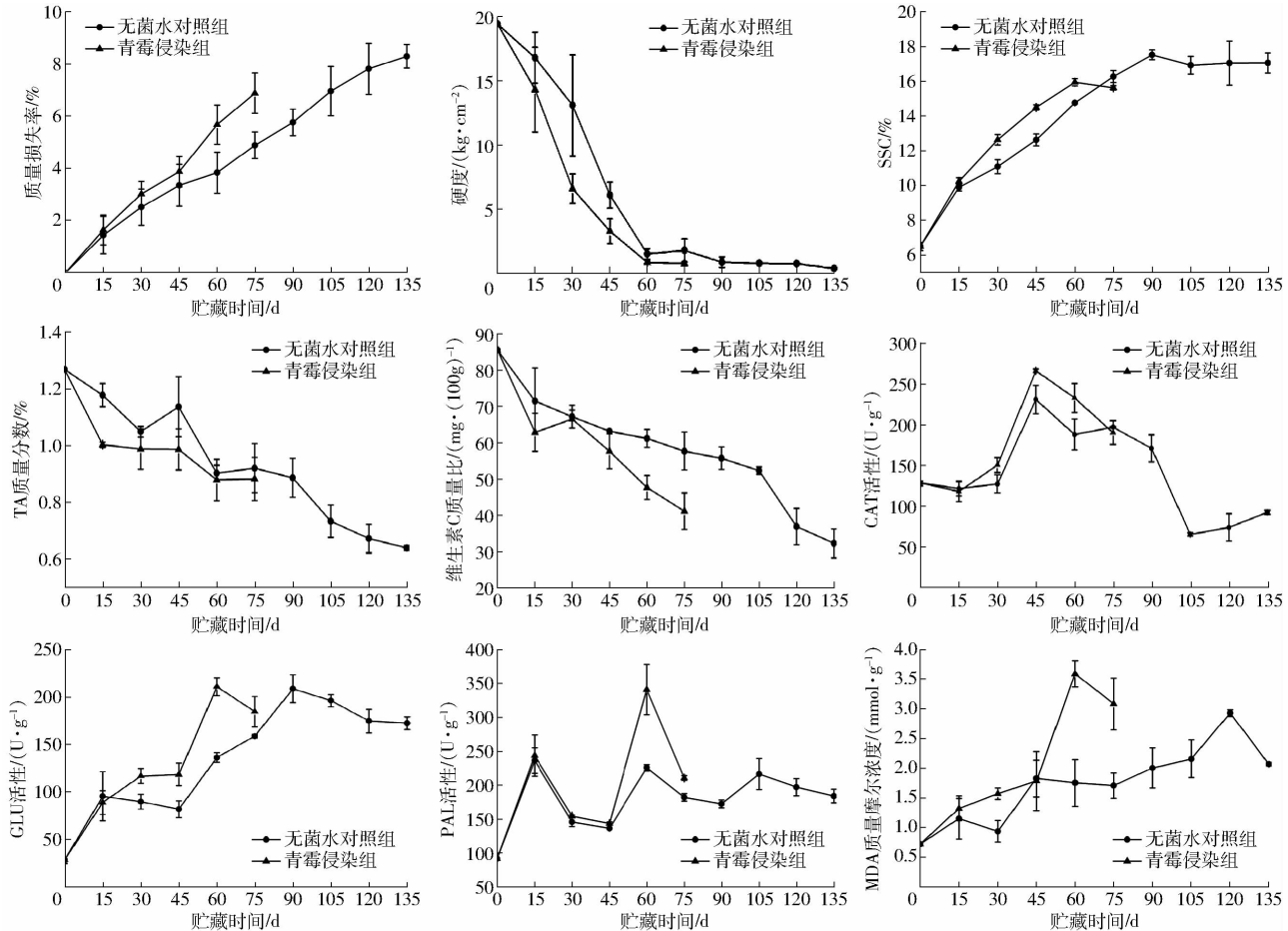


图1 猕猴桃贮藏期内质量损失率、硬度、SSC、TA含量、维生素C含量、CAT活性、GLU活性、PAL活性、MDA含量的变化规律

Fig.1 Variations of weight loss rate, firmness, SSC, TA content, vitamin C content, CAT activity, GLU activity, PAL activity and MDA content of kiwifruit during storage period

贮藏期内,猕猴桃果实硬度均呈逐渐下降的趋势,60 d以后趋于稳定,且青霉侵染组的硬度明显低于无菌水对照组,在30 d时差异显著($P < 0.05$)。果实硬度是衡量果实新鲜度的重要指标之一,主要与细胞壁构成成分、细胞内组成、细胞间结合度等多种因素密切相关。猕猴桃侵染扩展青霉菌后硬度下降加快主要是由于细胞壁酶引起的细胞壁和中胶层果胶水解加快^[30],细胞内各组分和结构发生显著变化,从而导致生物电场的变化,最终表现为宏观电学特性的改变。

果实的SSC呈现先逐渐上升后稍有下降的趋势。侵染青霉菌的猕猴桃果实变化速率较快,在60 d时SSC达到最高值15.92%后稍有下降,而对照组果实在60 d时SSC为14.73%。SSC能直接地反映果实的成熟状态和品质。果实采后,淀粉酶等糖转化酶活性增强,不断地将淀粉转化为可溶性糖^[31],因此SSC逐渐升高。但是伴随着这种转化的发生,果实后熟加快,后期转化的可溶性糖不足以补充呼吸消耗,从而导致SSC在贮藏末期呈降低的趋势。

猕猴桃果实中 TA 含量均呈现逐渐下降的趋势。在 75 d 时,无菌水对照组和青霉侵染组分别降低了 0.35% 和 0.39%,青霉侵染组 TA 含量明显低于对照组。果实的糖酸比是衡量果实风味的重要指标,因此可滴定酸含量可以反映果实品质。有机酸作为呼吸代谢的底物之一^[32],随着果实的成熟衰老,有机酸逐渐被消耗。

在猕猴桃贮藏期间维生素 C 含量呈现出不断下降的趋势。在 75 d 时,无菌水对照组果实维生素 C 含量在贮藏期内从质量比 85.65 mg/(100g)降低至 59.63 mg/(100g),而青霉侵染组果实维生素 C 含量在贮藏末期降低至质量比 41.21 mg/(100g)。维生素 C 是猕猴桃最重要的营养物质之一,因此是衡量其品质的主要指标。维生素 C 含量降低主要是由于酶的分解以及自然条件下的氧化分解作用^[33]。猕猴桃侵染青霉菌后,各种代谢反应的加剧导致维生素 C 损失速率更快。

无菌水对照组和青霉侵染组果实的 CAT 活性均呈现出先逐渐上升后下降的趋势,且同时在 45 d 时达到峰值,分别为 231.60 U/g 和 266.97 U/g。整个贮藏期间,侵染青霉菌的猕猴桃果实 CAT 活性明显高于未发病果实($P < 0.05$)。CAT 是属于一种可以催化植物体内过氧化氢分解为水和分子氧的血红蛋白酶^[34],所以其活性高低也会引起内部组织成分的变化而引起果实电学特性的变化。

贮藏期内无菌水对照组和青霉侵染组猕猴桃果实的 GLU 活性逐渐上升后稍有下降,分别在 90 d 和 60 d 达到峰值,分别为 209.7 U/g 和 211.9 U/g。30 d 以后,青霉侵染组的 GLU 活性显著高于对照组($P < 0.05$)。GLU 能破坏真菌的细胞壁,从而增强果实的抗病性,因此在被真菌侵染以后其含量会显著提高。

贮藏期内无菌水对照组和青霉侵染组猕猴桃果实的 PAL 活性变化趋势一致,同时在 15 d 和 60 d 时达到两个峰值,其中侵染青霉果实的 PAL 活性最高,达 342.01 U/g,但是只在 60 d 时有显著差异($P < 0.05$)。PAL 是苯丙烷代谢的关键酶,与植物的抗病性密切相关,因此在发病严重时显著升高。

无菌水对照组和青霉侵染组的 MDA 含量在贮藏期内都呈现逐渐上升后稍有下降的趋势,分别在 120 d 和 60 d 达到峰值。贮藏后期,感染青霉菌的猕猴桃丙二醛含量显著高于对照组($P < 0.05$)。丙二醛是在果实成熟衰老过程中膜脂氧化的主要产物^[35],影响细胞膜的通透性,所以也是可以间接反映果实品质的指标。

2.2 贮藏期发病率及病情指数的变化

如图 2 所示,随着贮藏期的延长,无菌水对照组和青霉侵染组果实均在 15 d 时开始发病,且发病率呈逐渐升高的趋势,青霉侵染组的发病率显著高于无菌水对照组($P < 0.05$)。无菌水对照组在 15 d 时发病率仅为 10%,在 90 d 时全部发病;青霉侵染组在 15 d 时发病率为 30%,在 30 d 时全部发病。无菌水对照组和青霉侵染组果实病情指数也随着贮藏期延长而逐渐增大,且青霉侵染组的病情指数显著高于无菌水对照组($P < 0.05$)。青霉侵染组猕猴桃果实在 75 d 时病情指数达到最大,最大值为 74.29,发病程度较重,此时无菌水对照组病情指数为 13.81。

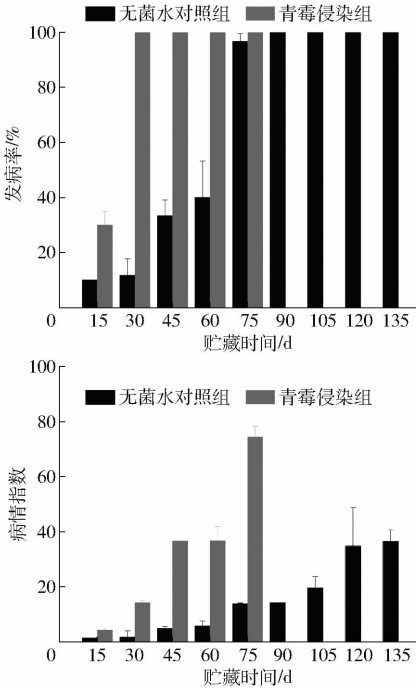


图 2 猕猴桃贮藏期内发病率和病情指数的变化规律
Fig. 2 Variations of disease incidence and disease index of kiwifruit during storage period

2.3 猕猴桃品质指标、生理指标和电参数的相关性

如图 3 所示,随着频率的增大,无菌水对照组果实的 Z 与质量损失率、SSC、GLU 活性、PAL 活性、MDA 质量摩尔浓度呈现出由正相关变为负相关的变化趋势,与硬度、TA 质量分数、维生素 C 质量比则相反,与 CAT 活性则一直呈正相关。 L_p 、 X 、 L_s 与质量损失率、SSC、GLU 活性、PAL 活性、MDA 质量摩尔浓度呈现出先负相关后正相关的变化趋势,与硬度、TA 质量分数、维生素 C 质量比则相反,与 CAT 活性一直呈负相关。 C_s 与质量损失率、PAL 活性、MDA 质量摩尔浓度先呈负相关后变为正相关,与 TA 质量分数、维生素 C 质量比则呈现先正相关后负相关的趋势,与硬度一直呈正相关,和 SSC、CAT 活性、GLU 活性则相反。 R_s 、 ε 、 θ 、 G 、 D 与硬度、TA 质量分数、维生

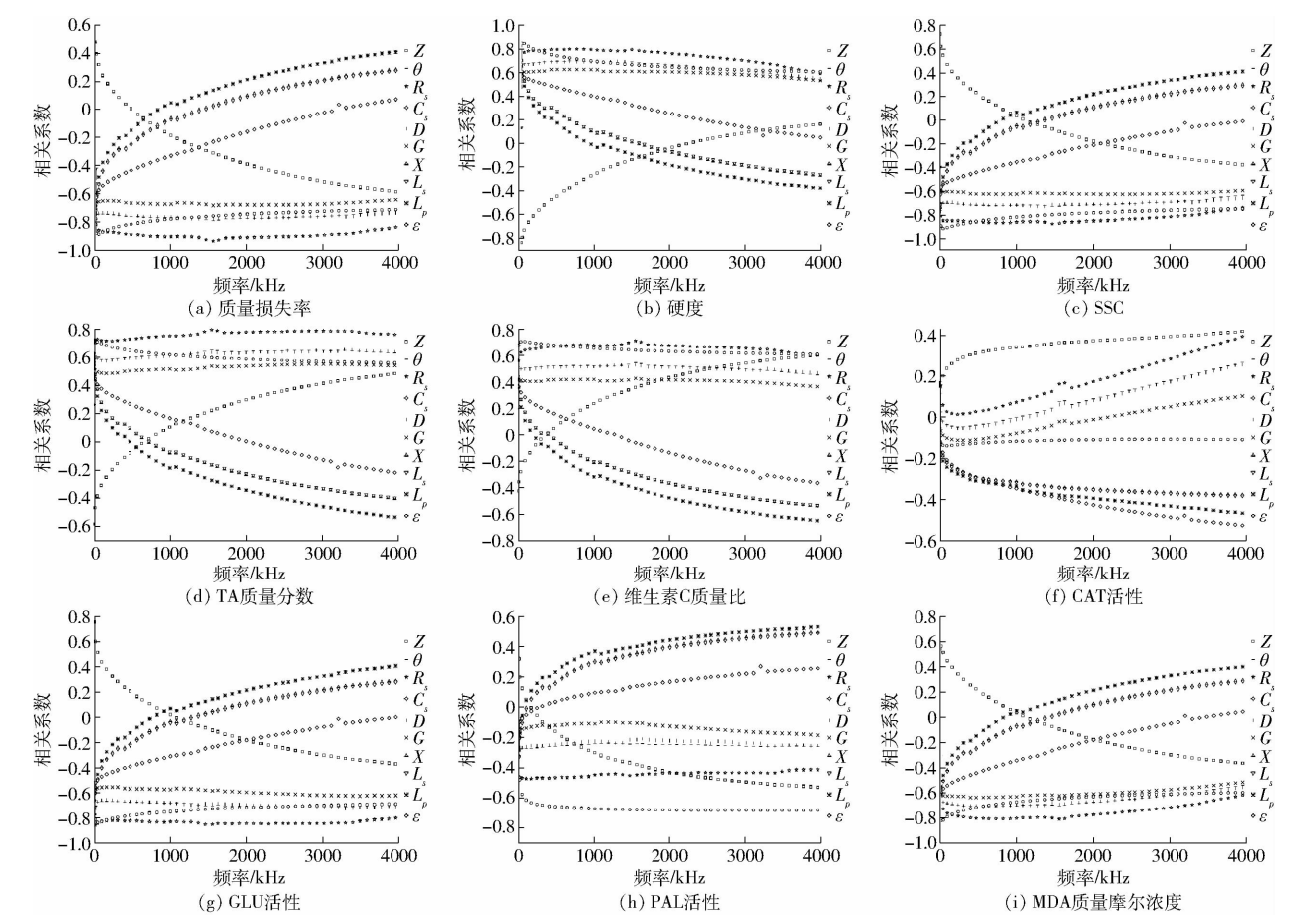


图3 无菌水对照组质量损失率、硬度、SSC、TA含量、维生素C含量、CAT活性、GLU活性、PAL活性、MDA含量与电学参数的相关性

Fig.3 Correlations between weight loss rate, firmness, SSC, TA content, vitamin C content, CAT activity, GLU activity, PAL activity, MDA content and electrical parameters of control group kiwifruits

素C质量比一直呈正相关,与质量损失率、SSC、GLU活性、PAL活性、MDA质量摩尔浓度呈现出负相关。综合分析, R_s 与TA质量分数、GLU活性在频率3956.5 kHz处呈极显著相关($P<0.01$),绝对值最大的相关系数分别为0.7623和-0.802。

如图4所示,随着频率的增大,青霉侵染组果实的Z与质量损失率、CAT活性一直呈正相关关系,与硬度、TA质量分数、维生素C质量比的相关性呈现先负后正的变化趋势,与SSC、GLU活性、PAL活性、MDA质量摩尔浓度的相关性则呈现出先正后负的变化趋势。 L_s 、 L_p 、 X 与硬度、维生素C质量比先呈正相关后变为负相关,与SSC、CAT活性、GLU活性、MDA质量摩尔浓度先呈负相关后呈正相关,与PAL活性一直呈正相关。 D 、 ϵ 、 G 与硬度呈先负后正的相关性,和SSC、PAL活性则相反。 θ 、 R_s 与质量损失率、SSC、GLU活性、MDA质量摩尔浓度一直呈负相关,与硬度、维生素C质量比则一直呈正相关。 C_s 与质量损失率、CAT活性、GLU活性、PAL活性、MDA质量摩尔浓度呈现先正后负的相关性,与维生素C质量比则相反,与硬度、TA质量分数则一

直呈负相关,与SSC一直呈正相关。综合比较,GLU活性、PAL活性、MDA质量摩尔浓度、维生素C质量比在251 Hz处与 C_s 呈显著相关($P<0.05$),TA质量分数在251 Hz处与 C_s 呈极显著相关($P<0.01$),绝对值最大的相关系数为-0.9251。

2.4 特征频率的筛选

采用主成分分析法,将无菌水对照组和青霉侵染组猕猴桃在100 Hz~3.98 MHz所有频率点下电参数与品质及生理指标构成的相关系数矩阵进行综合分析,筛选出特征频率。结果发现,无菌水对照组猕猴桃质量损失率、SSC与电参数相关性指数最大的频率点均在3980 kHz处,TA含量、CAT活性与电参数相关指数最大的频率点为100 Hz,GLU活性、MDA含量与电参数相关指数最大的频率点为3956.5 kHz,硬度、维生素C含量、PAL活性与电参数相关指数最大均出现在频率点158 Hz处。青霉侵染组猕猴桃质量损失率、CAT活性与电参数相关性最强的频率点为3932.9 kHz,硬度、TA含量与电参数相关性最强的频率点为3250 kHz,GLU活性、PAL活性、MDA含量与电参数相关性最强的频率点

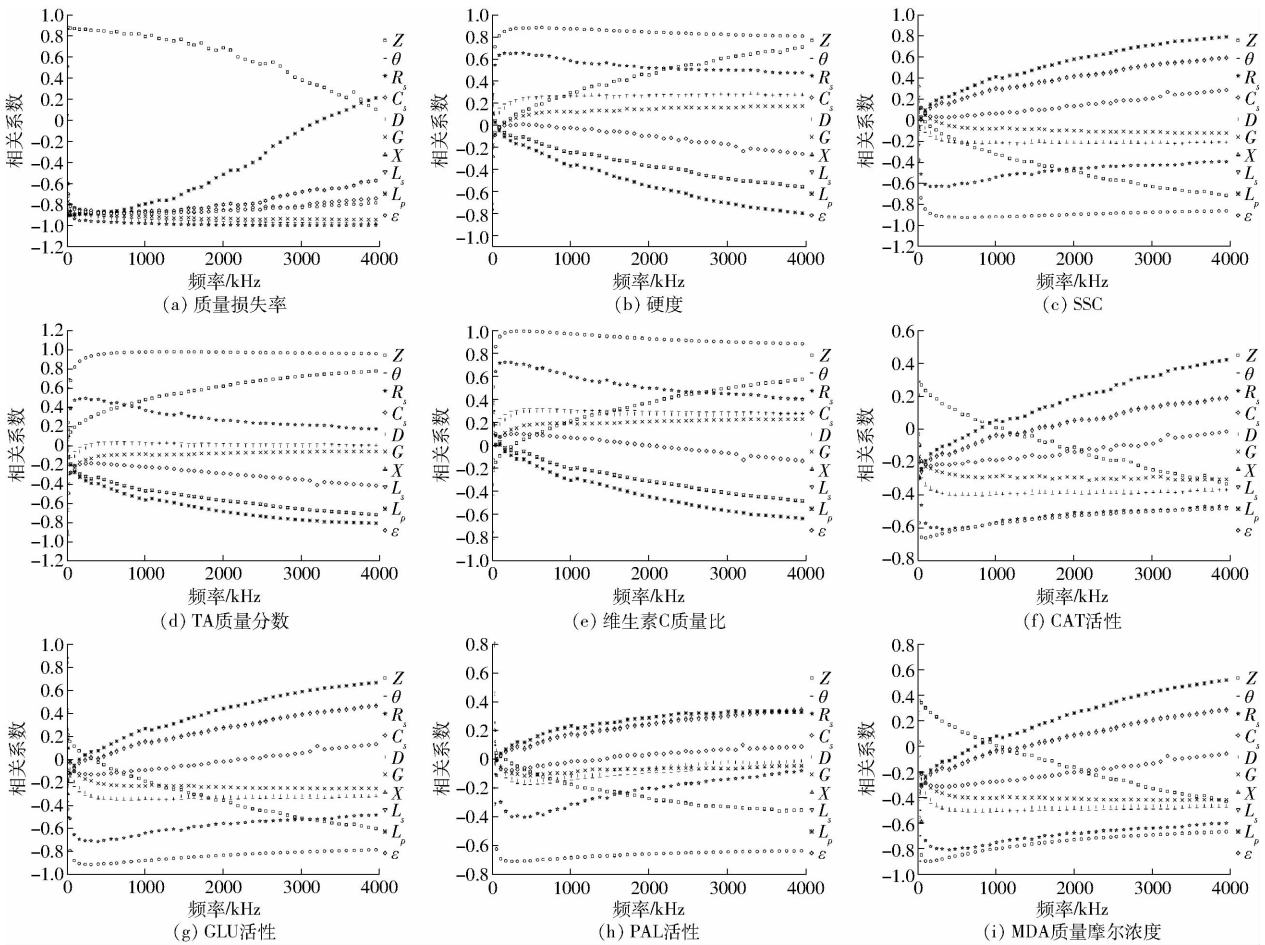


图4 青霉侵染组果实质量损失率、硬度、SSC、TA 含量、维生素 C 含量、CAT 活性、GLU 活性、PAL 活性、MDA 含量与电学参数的相关性

Fig.4 Correlations between weight loss rate, firmness, SSC, TA content, vitamin content, CAT activity, GLU activity, PAL activity, MDA content and electrical parameters of kiwifruits inoculated with *P. expansum*

均为 251 Hz,SSC、维生素 C 含量与电参数相关性最强的频率点分别为 398 Hz、141.4 kHz。主成分分析的结果表明,各品质、生理指标与电参数相关性最好的点已经找到,但是最佳测试频率并未统一。因此,将各品质和生理参数与电参数形成的相关指数矩阵进一步进行主成分分析,根据主成分因子得分,并计算其综合相关指数 (ICI)。如表 1 和表 2 所示,无菌水对照组猕猴桃在 3 956.5 kHz 处综合相关指数排名第一,而青霉侵染组猕猴桃在 251 Hz 处综合相关指数最高,所以其特征频率分别为 3 956.5 kHz 和 251 Hz。

2.5 敏感电参数的筛选

敏感电参数是指在筛选出的特征频率下,将各品质、生理指标与电参数进行相关分析,进一步筛选出两者间相关性最强的电学参数,即可作为无损检测猕猴桃青霉病的电学指标。

如表 3 所示,在特征频率 3 956.5 kHz 下,无菌水对照组猕猴桃的 θ 与 SSC、TA 质量分数、GLU 活性分别呈显著相关; D 与硬度、SSC、TA 质量分数、GLU 活性呈显著相关; ε 与硬度、SSC、GLU 活性、

表 1 无菌水对照组猕猴桃在不同频率下电参数与品质、生理指标综合相关指数排名

Tab.1 Ranking of comprehensive correlation coefficient between electrical parameters and quality, physiological indicators of control group kiwifruit at different frequencies

频率/kHz	综合相关指数	排名	频率/kHz	综合相关指数	排名
3 956.5	1.192 7	1	3 509.0	0.973 7	21
3 932.9	1.186 9	2	3 532.6	0.970 1	22
3 909.4	1.162 9	3	3 461.9	0.964 6	23
3 862.3	1.153 1	4	3 438.4	0.944 7	24
3 980.0	1.144 6	5	3 391.3	0.918 5	25
3 838.7	1.129 9	6	3 202.9	0.918 2	26
3 885.8	1.122 6	7	3 414.8	0.901 2	27
3 791.6	1.112 9	8	3 367.7	0.885 0	28
3 768.1	1.110 7	9	3 297.1	0.881 5	29
3 815.0	1.105 9	10	3 179.3	0.861 9	30
3 721.0	1.069 0	11	3 273.5	0.859 5	31
3 697.4	1.060 8	12	3 344.2	0.859 4	32
3 744.5	1.053 4	13	3 320.6	0.843 6	33
3 650.3	1.051 9	14	3 132.2	0.843 1	34
3 673.9	1.049 6	15	3 085.1	0.839 5	35
3 556.1	1.019 0	16	3 108.7	0.830 9	36
3 579.7	1.004 2	17	3 038.0	0.820 4	37
3 626.8	0.989 9	18	3 250.0	0.801 7	38
3 485.5	0.984 4	19	3 061.6	0.796 4	39
3 603.2	0.976 2	20	3 155.8	0.795 0	40

表 2 青霉侵染组猕猴桃在不同频率下电参数与品质、生理指标综合相关指数排名

Tab.2 Ranking of comprehensive correlation coefficient between electrical parameters and quality, physiological indicators of inoculated group kiwifruit at different frequencies

频率/kHz	综合相关指数	排名	频率/kHz	综合相关指数	排名
0.251 00	3.263 1	1	3 815.2	0.479 6	21
0.100 00	3.065 0	2	3 791.6	0.471 3	22
0.158 00	3.040 5	3	3 768.1	0.470 3	23
0.398 00	2.863 0	4	25.100	0.469 4	24
0.631 00	2.695 2	5	3 721.0	0.456 3	25
1.000 0	2.551 6	6	3 744.5	0.450 2	26
1.580 0	2.380 6	7	3 697.4	0.448 2	27
2.510 0	2.173 4	8	3 673.9	0.427 9	28
3.980 0	1.883 4	9	3 650.3	0.417 1	29
6.310 0	1.544 9	10	3 626.8	0.404 0	30
10.000	1.172 0	11	3 603.2	0.391 8	31
15.800	0.810 1	12	3 579.7	0.373 2	32
3 980.0	0.525 1	13	3 556.1	0.370 3	33
3 956.5	0.513 1	14	3 532.6	0.350 2	34
3 909.4	0.505 1	15	3 485.5	0.346 4	35
3 932.9	0.504 1	16	3 509.0	0.338 9	36
23.650	0.502 7	17	3 461.9	0.338 6	37
3 885.8	0.491 5	18	3 438.4	0.327 1	38
3 838.7	0.485 8	19	3 414.8	0.305 1	39
3 862.3	0.485 7	20	3 391.3	0.304 3	40

表 3 无菌水对照组猕猴桃在特征频率下品质、生理指标与电参数的相关性

Tab.3 Correlation between quality, physiological indicators and electrical parameters of control group kiwifruit at characteristic frequencies

品质指标	相关系数									
	Z	θ	R_s	C_s	D	G	X	L_s	L_p	ε
质量损失率	-0.473 5	-0.602 0	-0.725 2 *	0.183 3	-0.621 7	-0.527 4	0.394 3	0.386 7	0.520 5	-0.600 2
硬度	0.255 4	0.625 5	0.687 4 *	0.142 2	0.646 1 *	0.627 9	-0.181 8	-0.170 2	-0.286 1	0.703 1 *
SSC	-0.380 2	-0.636 0 *	-0.740 1 *	-0.008 8	-0.660 1 *	-0.594 7	0.301 2	0.290 1	0.413 3	-0.750 5 *
TA 质量分数	0.482 7	0.631 5 *	0.762 3 **	-0.214 6	0.642 3 *	0.539 7	-0.401 0	-0.394 2	-0.531 3	0.559 0
维生素 C 质量比	0.605 4	0.453 7	0.603 3	-0.362 4	0.471 3	0.365 6	-0.538 2	-0.531 9	-0.647 0 *	0.610 3
CAT 活性	0.417 8	0.266 2	0.392 9	-0.525 3	0.253 9	0.101 5	-0.376 4	-0.382	-0.465 3	-0.108 6
GLU	-0.370 6	-0.688 9 *	-0.802 0 **	0.003 0	-0.711 2 *	-0.618 8	0.287 3	0.277 4	0.405 4	-0.689 1 *
PAL	-0.532 1	-0.262 4	-0.413 6	0.256 7	-0.254 2	-0.184 2	0.495 5	0.488 5	0.531 5	-0.685 6 *
MDA 质量摩尔浓度	-0.362 0	-0.536 0	-0.616 1	0.048 1	-0.553 0	-0.512 8	0.295 6	0.285 8	0.401 3	-0.594 0

注：**表示达 0.01 显著水平,* 表示达 0.05 显著水平,下同。

表 4 青霉侵染组猕猴桃在特征频率下品质与电参数的相关性

Tab.4 Correlation between quality, physiological indicators and electrical parameters of inoculated group kiwifruit at characteristic frequencies

品质指标	相关系数									
	Z	θ	R_s	C_s	D	G	X	L_s	L_p	ε
质量损失率	0.874 3	-0.904 4 *	0.051 7	0.514 5	-0.921 0 *	-0.600 6	-0.880 8 *	-0.880 8 *	-0.891 4 *	0.409 5
硬度	-0.211 3	0.228 4	0.374 7	-0.763 3	-0.039 1	-0.414 4	0.236 9	0.248 9	0.178 3	-0.710 5
SSC	0.170 6	-0.183 9	-0.402 3	0.806 1	0.101 8	0.467 3	-0.194 8	-0.207 5	-0.134	0.750 5
TA 质量分数	-0.050 1	0.053 6	0.601 4	-0.925 1 **	-0.295 9	-0.667 7	0.080 0	0.094 0	-0.008	-0.885 6 *
维生素 C 质量比	-0.343 2	0.342 9	0.503 4	-0.813 4 *	-0.003 3	-0.419 0	0.366 2	0.379 2	0.290 8	-0.756 3
CAT 活性	0.177 9	-0.196 8	0.205 3	0.296 3	-0.147 5	-0.028 0	-0.170 1	-0.177 1	-0.202 8	0.211 2
GLU 活性	0.262 3	-0.285 3	-0.368 4	0.888 9 *	0.009 8	0.429 1	-0.289 6	-0.301 2	-0.226 7	0.846 3 *
PAL 活性	-0.023 9	0.005 4	-0.197 2	0.813 1 *	0.226 4	0.457 7	0.011 3	0.002 6	0.045 7	0.787 4
MDA 质量摩尔浓度	0.396 2	-0.422 9	-0.238 6	0.813 4 *	-0.158 9	0.262 9	-0.418 3	-0.428 2	-0.371 5	0.767 0

PAL 活性呈显著相关; R_s 与质量损失率、硬度、SSC 呈显著相关,与 TA 质量分数、GLU 活性呈极显著相关($P<0.01$),绝对值最大的相关系数为-0.802 0,综合分析比较,选取 R_s 作为其敏感电参数,将 GLU 活性与特征频率下的 R_s 进行多元回归,回归方程为

$$Y_{GLU} = -3.287\,4R_s + 250.32 \quad (R^2 = 0.820\,3)$$

如表 4 所示,在特征频率 251 Hz 下,青霉侵染组猕猴桃 θ 与质量损失率呈极显著相关($P<0.01$),相关系数为-0.904 4; ε 分别与 TA 质量分数、GLU 活性呈显著相关; D 、 X 、 L_s 、 L_p 均与质量损失率呈显著相关, C_s 分别与维生素 C 质量比、GLU 活性、PAL 活性和 MDA 质量摩尔浓度呈显著相关,与 TA 质量分数呈极显著相关,绝对值最大的相关系数为-0.925 1,综合分析,选取 C_s 作为其敏感电参数,将 TA 质量分数与特征频率下的 C_s 进行多元回归,回归方程为

$$Y_{TA} = -5 \times 10^7 C_s + 1.264\,3 \quad (R^2 = 0.855\,8)$$

通过标准化残差分析,残差值均在(-2,2)之间,说明可以用 C_s 预测红阳猕猴桃采后贮藏期青霉病果实的 TA 含量,从而预测其果实品质。根据实际测得的 TA 含量,贮藏期在 15~45 d 的果实,无菌水对照组 TA 质量分数范围为 1.27%~1.14%,对应的

C_s 为 $1.66 \times 10^{-9} \sim 2.49 \times 10^{-9}$ F, 青霉侵染组 TA 质量分数范围为 0.99% ~ 1.27%, 对应的 C_s 为 $5.15 \times 10^{-9} \sim 5.49 \times 10^{-9}$ F; 贮藏期在 45 ~ 75 d 的果实, 无菌水对照组 TA 质量分数范围为 0.92% ~ 1.14%, 对应的 C_s 为 $2.49 \times 10^{-9} \sim 6.80 \times 10^{-9}$ F。青霉侵染组 TA 质量分数范围为 0.89% ~ 0.99%, 对应的 C_s 为 $5.49 \times 10^{-9} \sim 7.55 \times 10^{-9}$ F。由此可知, 可将其分为 2 个检测基准, 贮藏期为 0 ~ 45 d 时, C_s 大于 5.15×10^{-9} F 时判定为青霉病果实, 选取 30 个正常果实和 30 个发病果实进行验证实验, 在特征频率下测定其 C_s , 结果显示识别率达 83%; 贮藏期为 45 ~ 75 d 时, 无菌水对照组和青霉侵染组的 C_s 范围出现部分重叠, 差异不够显著, 若界定 C_s 大于 6.80×10^{-9} F 时判定为青霉病果实, 选取 30 个正常果实和 30 个发病果实进行验证实验, 结果显示识别率只有 72%。

3 讨论

果实作为植物的器官之一, 采后仍然是一个生命体, 其本身属于电介质。猕猴桃果实的电学特性与其内部组分以及结构两方面紧密相关^[36], 但是由于果实中大部分是自由水, 而水又在果实成熟衰老过程中参与绝大部分生化反应, 因此也与果实中自由水含量和亚细胞结构息息相关。随着贮藏期延长, 一方面由于果实的呼吸和蒸腾作用导致自由水渐渐减少, 另一方面, 细胞自溶作用的发生会导致内部细胞结构逐渐解体, 以及不溶性物质比如淀粉等逐渐转化为可溶性糖, 也会明显引起果实结构和电学特性的变化。由于感染青霉病果实的 TA 含量和 SSC 降低明显较多, 电解质虽然会减少, 但是由于抗性相关酶活性显著增强, 标志细胞膜降解、膜透性增大的 MDA 含量快速上升, 电解质会大量向细胞外渗透, 使得组织内部疏松程度比正常果实更高, 而且细胞衰亡的速度也快于正常果实, 结果表现为电导性反而增强, 这与文献[37]的研究结论一致。正常果实和侵染青霉菌果实的电特性的差异, 也证明了可以利用电学特性对侵染青霉菌猕猴桃果实进行无损检测的可行性。

结合果实生理变化的过程, 揭示了果实物理变化的内在机理, 这对猕猴桃采后生理的研究以及病害防控都具有重要理论意义。但是, 本研究只是对侵染青霉菌猕猴桃生理、品质特性与电学特性相关性进行初步理论研究, 只是为实现电学特性的猕猴桃青霉病无损检测提供前期的理论依据, 也为其他果实的病害电学无损检测研究打开了新思路。在此贮藏期间, 猕猴桃果实虽已表现出发病症状, 但是由于本实验中是采用人为刺伤接种的方式, 所以发病程度会表现得比果实在自然情况下发病更为严重, 自然情况下发病时间会相对较晚, 所以该方法仍然具有区分发病果实和健康果实的潜在应用价值。但是, 在 45 d 后识别效果不佳, 并且也有研究结果表示使用电学参数表征单一的相关品质或者生理指标不具有普遍性^[17], 若能同时找到与电参数相关性较强的多个品质或生理指标, 才能更好地实现基于电学检测猕猴桃青霉病果实的实际应用。因此, 建立准确性更高的一元多次线性方程, 是未来研究的方向, 在生产中具有广阔的应用前景。

4 结论

- (1) 猕猴桃果实在贮藏期间的质量损失率、SSC 呈逐渐上升的趋势, 硬度、TA 含量、维生素 C 含量呈逐渐下降的趋势, 抗性相关酶活性也呈逐渐上升后稍有下降的趋势。与无菌水对照组相比, 青霉侵染组猕猴桃品质指标的下降速度明显高于对照组, 果实内抗性相关酶活性也明显高于对照组。
- (2) 通过分析品质、生理指标和电参数之间的相关性, 筛选出对照组和青霉菌侵染组猕猴桃果实的特征频率分别为 3 956.5 kHz 和 251 Hz, 敏感电参数分别为 R_s 和 C_s , 数学回归方程分别为 $Y_{GLU} = -3.287 4 R_s + 250.32$ 、 $Y_{TA} = -5 \times 10^7 C_s + 1.264 3$, 完善了可用于表征猕猴桃果实品质以及病害检测的特征频率和敏感电参数体系。所得数学模型在贮藏期为 15 ~ 45 d 时准确度较高, 验证试验显示识别率可达 83%, 45 d 后的识别率只有 72%。

参 考 文 献

[1] 方金豹, 钟彩虹. 新中国果树科学研究 70 年——猕猴桃[J]. 果树学报, 2019, 36(10): 1352 – 1359. FANG Jinbao, ZHONG Caihong. Fruit scientific research in New China in the past 70 years: kiwifruit[J]. Journal of Fruit Science, 2019, 36(10): 1352 – 1359. (in Chinese)

[2] BAL E, KOK D. Effects of different calcium carbide doses on some quality criteria of kiwifruit [J]. Journal of Tekirdag Agricultural Faculty, 2006, 3(2): 213 – 219.

[3] RICHARDSON D P, ANSELL J, DRUMMOND L N. The nutritional and health attributes of kiwifruit; a review [J]. European Journal of Nutrition, 2018, 57(8): 2659 – 2676.

[4] MA T, SUN X, ZHAO J, et al. Nutrient compositions and antioxidant capacity of kiwifruit (*Actinidia*) and their relationship with flesh color and commercial value [J]. Food Chemistry, 2017, 218(2): 294 – 304.

[5] MA T, LAN T, JU Y, et al. Comparison on the nutritional properties and biological activities of kiwifruit (*Actinidia*) and their different forms products: how to make kiwifruit more nutritious and functional [J]. Food & Function, 2019, 10(3): 1317 –

1329.

[6] WANG C W, AI J, LV H Y, et al. First report of *Penicillium expansum* causing postharvest decay on stored kiwifruit (*Actinidia arguta*) in China [J]. Plant Disease, 2015, 99(7): 1037.

[7] ZHU Y, YU J, BRECHT J K, et al. Preharvest application of oxalic acid increases quality and resistance to *Penicillium expansum* in kiwifruit during postharvest storage[J]. Food Chemistry, 2016, 190: 537 – 543.

[8] 朱玉燕, 邬波龙, 姜天甲, 等. 外源草酸对猕猴桃采后果实扩展青霉生长及展青霉素积累的影响[J]. 果树学报, 2015, 32(2): 298 – 303.

ZHU Yuyan, WU Bolong, JIANG Tianjia, et al. Effects of exogenous oxalic acid on *Penicillium expansum* growth and patulin accumulation in harvest kiwifruit[J]. Journal of Fruit Science, 2015, 32(2): 298 – 303. (in Chinese)

[9] 李琳, 罗安伟, 苏苗, 等. 氯吡苯脲处理和质量损失对猕猴桃品质和电学特性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(17): 241 – 247.

LI Lin, LUO Anwei, SU Miao, et al. Effects of 1-(2-chloropyridin-4-yl)-3-phenylurea treatment and mass loss on the quality and electrical properties of kiwifruits [J]. Food Science, 2018, 39(17): 241 – 247. (in Chinese)

[10] BIAN H X, TU P, HUA-LI X, et al. Quality predictions for bruised apples based on dielectric properties [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2019, 43(8): e14006.

[11] 冯慧敏, 郭玉明, 武新慧. 果蔬介电特性与生物力学性质相关性试验研究[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2015, 35(1): 496 – 500.

FENG Huimin, GUO Yuming, WU Xinghui. Correlation experiment study between dielectric properties and biomechanical properties of fruits and vegetables [J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2015, 35(1): 496 – 500. (in Chinese)

[12] YULANA L, SHAOJIEA W, HAIDEB Z, et al. Effect on dielectric properties of maturity and decay of mango[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 11: 174 – 177.

[13] 李子文, 张海红, 马雪莲, 等. 灵武氏枣的成熟度与其电学特性关系研究[J]. 食品科技, 2015, 36(10): 286 – 290.

LI Ziwen, ZHANG Haihong, MA Xuelian, et al. Relationships between Ling-Wu long jujube maturity and dielectric properties [J]. Food Science and Technology, 2015, 36(10): 286 – 290. (in Chinese)

[14] 李琳, 罗安伟, 李圆圆, 等. 氯吡苯脲和 O₃ 处理‘秦美’猕猴桃采后生理品质与电学特性的关系[J]. 食品科学, 2019, 40(5): 258 – 266.

LI Lin, LUO Anwei, LI Yuanyuan, et al. Relationship between postharvest physiology, quality and electrical properties of kiwifruit treated preharvest with 1-(2-chloropyridin-4-yl)-3-phenylurea and postharvest with ozone[J]. Food Science, 2019, 40(5): 258 – 266. (in Chinese)

[15] 郭文川, 孔繁荣, 王转卫, 等. 梨生长发育后期介电特性、生理特性和内部品质的关系[J]. 现代食品科技, 2015, 31(11): 56 – 61.

GUO Wenchuan, KONG Fanrong, WANG Zhuangwei, et al. Relationship between dielectric properties, physiological properties, and internal qualities of pears during the late growth stage[J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 31(11): 56 – 61. (in Chinese)

[16] 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.

LIU Yaping, LIU Xinghua, LI Hongbo. Law of dielectric parameters and texture properties for grape during cold storage[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(10): 343 – 348. (in Chinese)

[17] 王若琳, 王栋, 任小林, 等. 基于电学特征的苹果水心病无损检测[J]. 农业工程学报, 2018, 34(5): 129 – 136.

WANG Ruolin, WANG Dong, REN Xiaolin, et al. Nondestructive detection of apple watercore disease based on electric features[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(5): 129 – 136. (in Chinese)

[18] LUO A, BAI J, LI R, et al. Effects of ozone treatment on the quality of kiwifruit during postharvest storage affected by *Botrytis cinerea* and *Penicillium expansum*[J]. Journal of Phytopathology, 2019, 167(7 – 8): 470 – 478.

[19] LUO A, BAI J, LI R, et al. Difference of resistance to postharvest blue mold between Hongyang and Qihong kiwifruits [J]. Food Chemistry, 2019, 285: 389 – 396.

[20] 袁沙, 李华佳, 朱永清, 等. ‘红阳’猕猴桃乙烯催熟特性[J]. 食品科学, 2018, 39(9): 244 – 251.

YUAN Sha, LI Huajia, ZHU Yongqing, et al. Ripening characteristics of ‘Hongyang’ kiwifruits following postharvest ethylene treatment[J]. Food Science, 2018, 39(9): 244 – 251. (in Chinese)

[21] GUO W, ZHU X, NELSO S O, et al. Maturity effects on dielectric properties of apples from 10 to 4500 MHz[J]. LWT Food Science & Technology, 2011, 44(1): 224 – 230.

[22] 李腾飞. ‘亚特’猕猴桃果实采后电学特性的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.

LI Tengfei. ‘Yate’ kiwifruit electrical properties of post-harvest [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2011. (in Chinese)

[23] 李国秀, 刘小宁, 李劼. 高效液相色谱法测定猕猴桃中的 VC 含量[J]. 保鲜与加工, 2016, 16(5): 89 – 93.

LI Guoxiu, LIU Xiaoning, LI Jie. Determination of VC content in kiwifruit by high performance liquid chromatography [J]. Storage and Process, 2016, 16(5): 89 – 93. (in Chinese)

[24] NISHA S, REVATHI K, CHANDRASEKARAN R, et al. Effect of plant compounds on induced activities of defense-related enzymes and pathogenesis related protein in bacterial blight disease susceptible rice plant[J]. Physiological and Molecular Plant Pathology, 2012, 80(5): 1 – 9.

[25] 李靖, 涂美艳, 钟程操, 等. 6 个猕猴桃品种抗溃疡病差异及生理机制研究[J]. 西南农业学报, 2019, 32(11): 2579 – 2585.

LI Jing, TU Meiyang, ZHONG Chengcao, et al. Study on difference of canker-resistance and physiological mechanism of six kiwifruit varieties[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2019, 32(11): 2579 – 2585. (in Chinese)

[26] KAMDEE C, KETSA S, DOORN W G V. Effect of heat treatment on ripening and early peel spotting in cv. Sucrier banana [J]. Postharvest Biology and Technology, 2009, 52(3): 288 – 293.

[27] 马超, 曹森, 李玲, 等. 基于贮藏寿命及后熟品质的红阳猕猴桃的组合保鲜剂使用研究[J]. 食品科技, 2019, 44(1): 50 – 58.

MA Chao, CAO Sen, LI Ling, et al. Effect of combined preservative based on storage life and postripening quality of Hongyang kiwifruit[J]. Food Science and Technology, 2019, 44(1): 50 – 58. (in Chinese)

[28] 郭红利. 猕猴桃的电学特性与无损检测技术的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2004.

GUO Hongli. Research on the Gooseberries’ electric characteristic & the non-destructive determination technology [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2004. (in Chinese)

参 考 文 献

[1] LUO Y H, JIANG P, XIE K, et al. Research on optimal predicting model for the grading detection of rice blast [J]. Optical Review, 2019, 26: 118 – 123.

[2] MITTAL S, DUTTA M K, ISSAC A. Non-destructive image processing based system for assessment of rice quality and defects for classification according to inferred commercial value [J]. Measurement, 2019, 148:106969.

[3] 安红周,陈会会,薛义博,等. 不同碾磨时间对粳糙米加工特性的影响研究[J]. 食品科技,2019,44(8):169 – 173.

[4] LIU Y, LI N, ZHANG Z T, et al. The central trend in crop yields under climate change in China: a systematic review [J]. Science of the Total Environment, 2020, 704: 135355.

[5] WENG S Z, TANG P P, YUAN H C, et al. Hyperspectral imaging for accurate determination of rice variety using a deep learning network with multi-feature fusion[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2020, 234:118237.

[6] 胥保文,蔡健荣,张文松,等. 稻米加工装备工艺控制系统设计[J]. 食品工业,2018,39(2):225 – 228.

[7] KARLEKAR A, SEAL A. SoyNet: soybean leaf diseases classification[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 172:105342.

[8] QUAN Q, WANG J X, LIU L L. An effective convolutional neural network for classifying red blood cells in malaria diseases [J]. Interdisciplinary Sciences-Computational Life Sciences, 2020, 12: 217 – 225.

[9] SHIM J, KANG S, CHO S. Active learning of convolutional neural network for cost-effective wafer map pattern classification [J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 2020, 33(2): 258 – 266.

[10] XIE W, MA G N, ZHAO F, et al. Poisar image classification via a novel semi-supervised recurrent complex-valued convolution neural network[J]. Neurocomputing, 2020, 388: 255 – 268.

[11] KUO T Y, CHUNG C L, CHEN S Y, et al. Identifying rice grains using image analysis and sparse-representation-based classification[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 127: 716 – 725.

[12] DEVI T G, NEELAMEGAM P, SUDHA S, et al. Machine vision based quality analysis of rice grains[C] // 2017 IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering. New York: IEEE, 2017.

[13] SINGH K R, CHAUDHURY S. Efficient technique for rice grain classification using back-propagation neural network and wavelet decomposition[J]. IET Computer Vision, 2016, 10(8): 780 – 787.

[14] KRISHNASWAMY R, ARAVIN D, RAJA P. Disease classification in eggplant using pre-trained VGG16 and MSVM[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 1 – 11.

[15] KRISTIANI E, YANG C T, HUANG C Y. ISEC: an optimized deep learning model for image classification on edge computing [J]. IEEE Access, 2020, 8: 27267 – 27276.

[16] RAGHU S, SRIRAM N, TEMEL Y, et al. Eeg based multi-class seizure type classification using convolutional neural network and transfer learning[J]. Neural Networks,2020, 124: 202 – 212.

[17] VALAN M, MAKONYI K, MAKI A, et al. Automated taxonomic identification of insects with expert-level accuracy using effective feature transfer from convolutional networks[J]. Systematic Biology, 2020, 68(6): 876 – 895.

[18] WANG S D, DONG L Y, WANG X. Classification of pathological types of lung cancer from CT images by deep residual neural networks with transfer learning strategy[J]. Open Medicine, 2020, 15: 190 – 197.

[19] TOGACAR M, COMERT Z, ERGEN B, et al. Classification of brain MRI using hyper column technique with convolutional neural network and feature selection method[J]. Expert Systems with Applications, 2020, 149:113274.

[20] 徐俊波,周国祥,沈铁杰,等. NCEP 震前异常增温数据插值及可视化方法[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2019, 42(9):1199 – 1204,1257.

[21] KAUR K, PATIL N. A fast and novel approach based on grouping and weighted MRMR for feature selection and classification of protein sequence data[J]. International Journal of Data Mining and Bioinformatics, 2020, 23: 47 – 61.

[22] GU X Y, GUO J C, XIAO L J, et al. A feature selection algorithm based on equal interval division and minimal-redundancy-maximal-relevance[J]. Neural Processing Letters, 2020, 51: 1237 – 1263.

~~~~~

(上接第 341 页)

[29] 郭文川,朱新华,郭康权. 采后苹果电特性与生理特性的关系及其应用[J]. 农业工程学报, 2005,21(7): 143 – 146.

GUO Wenchuan, ZHU Xinhua, GUO Kangquan. Relationship between electrical properties and physiological properties of postharvest apples and its application[J]. Transactions of the CSAE, 2005,21(7): 143 – 146. (in Chinese)

[30] 李明霞,韩建群,王琦,等. 低强度微波处理对猕猴桃细胞壁降解酶活性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2015, 41(11): 52 – 58.

LI Mingxia, HAN Jianqun, WANG Qi, et al. Effect of low intensity microwave on cell wall degradation enzymes activity of kiwifruit[J]. Food and Fermentation Industries, 2015, 41(11): 52 – 58. (in Chinese)

[31] ZOLFAGHARI M, SAHARI M A, BARZEGARR M, et al. Physicochemical and enzymatic properties of five kiwifruit cultivars during cold storage [J]. Food & Bioprocess Technology, 2010, 3(2):239 – 246.

[32] 秦海容,徐丹,刘琴. 壳聚糖复合涂膜的微观形貌变化及其对红桔的保鲜效果[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(2): 233 – 239.

QIN Hairong, XU Dan, LIU Qin. Morphologies changes of chitosan composite coating and effects on preservation of tangerine [J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(2): 233 – 239. (in Chinese)

[33] DA Y, DONGLI L, WENCAI X, et al. Effects of packaging design with dual function films on quality of wax apples stored at ambient temperatures [J]. Food & Bioprocess Technology, 2018, 11(10): 1904 – 1910.

[34] LIU Y, YANG X, ZHU S, et al. Postharvest application of MeJA and NO reduced chilling injury in cucumber (*Cucumis sativus*) through inhibition of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> accumulation [J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 119: 77 – 83.

[35] 盘柳依,赵显阳,陈明,等. 外源茉莉酸甲酯处理对采后猕猴桃果实品质和抗氧化酶活性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(9): 190 – 196.

PAN Liuyi, ZHAO Xianyang, CHEN Ming, et al. Effects of exogenous methyl jasmonate on fruit qualities and antioxidants activities of postharvest kiwifruits[J]. Food and Fermentation Industries, 2019,45(9): 190 – 196. (in Chinese)

[36] VIJAY R, SHARMA K S. Investigation of dielectric properties of some varieties of apple and their correlation with nutrients [J]. Journal of Pure Applied and Industrial Physics, 2017,7(10): 383 – 390.

[37] 李芳,蔡骋,马惠玲,等. 基于生物阻抗特性分析的苹果霉心病无损检测[J]. 食品科学, 2013,34(18): 206 – 211.

LI Fang, CAI Cheng, MA Huiling, et al. Nondestructive detection of apple mouldy core based on bioimpedance properties [J]. Food Science, 2013,34(18): 206 – 211. (in Chinese)