

## 长喙壳菌侵染对不同抗性甘薯细胞壁的影响

赵梅慧<sup>1</sup>, 庞林江<sup>1</sup>, 成纪予<sup>1</sup>, 陆国权<sup>1</sup>, 路兴花<sup>1</sup>, 王孙杰<sup>2</sup>

(1. 浙江农林大学 食品与健康学院, 杭州 311300; 2. 绍兴市农业农村信息中心, 浙江 绍兴 312099)

**摘要:** **目的** 研究不同黑斑病抗性品种甘薯的细胞壁变化特点, 探索与抗性相关的特征。**方法** 以抗性不同的鲜食优质甘薯品种“心香”和“烟薯 25”作为供试材料, 通过接种长喙壳菌培养, 分析 2 个品种对黑斑病的抗性特征, 通过测定贮藏期间细胞壁相关指标, 分析其可能影响抗性的机理。**结果** 接种长喙壳菌后, “烟薯 25”黑斑病病斑表面直径、内部直径、综合直径、深度和腐烂指数均小于“心香”, 综合表现抗性较好。染菌甘薯病变部位呈现出硬度、原果胶含量逐渐降低, 可溶性果胶、木质素含量逐渐增加, 纤维素含量先增加后降低, 纤维素酶先降低后增加,  $\beta$ -葡萄糖苷酶呈逐渐增加趋势。“烟薯 25”的病变组织硬度, 可溶性果胶、纤维素、木质素含量和  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性显著高于“心香”的, 但原果胶含量和纤维素酶活性显著降低, 染菌后两品种间差异更大。**结论** 长喙壳菌侵染甘薯会导致病变部位硬度降低, 细胞壁结构解体。“烟薯 25”对黑斑病抗性表现优于“心香”, 其细胞壁结构组成较为完整且硬度较高。

**关键词:** 甘薯; 黑斑病; 长喙壳菌; 细胞壁

**中图分类号:** TS255.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)21-0010-07

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.21.002

## Effects of *Ceratocystis Fimbriata* Infection on Cell Wall of Different Resistant Sweet Potato

ZHAO Mei-hui<sup>1</sup>, PANG Lin-jiang<sup>1</sup>, CHENG Ji-yu<sup>1</sup>, LU Guo-quan<sup>1</sup>, LU Xing-hua<sup>1</sup>, WANG Sun-jie<sup>2</sup>

(1. College of Food and Health, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, China; 2. Shaoxing Agriculture and Rural Information Center, Zhejiang Shaoxing 312099, China)

**ABSTRACT:** The work aims to explore the relevant characteristics of resistance to black rot by studying the cell wall changes of sweet potatoes with different black spot resistance. Fresh sweet potato varieties 'Xinxiang' and 'Yanshu 25' with different resistance were used as test materials. The resistance characteristics of the two varieties to black rot were analyzed by inoculating the *Ceratocystis fimbriata* culture method. The possible mechanism of resistance was analyzed by determining relevant indexes of the cell wall during storage. After inoculation with *Ceratocystis fimbriata*, the surface diameter, internal diameter, comprehensive diameter, depth, and decay index of 'Yanshu 25' with black rot were less than those of 'Xinxiang', and its comprehensive resistance was better. The diseased region of infected sweet potato showed a gradual decrease in hardness and protopectin content, a gradual increase in soluble pectin and lignin content, a first increase and then a decrease in cellulose content, a first decrease and then an increase in cellulase, and a gradual increase in  $\beta$ -glucosidase content. Hardness, soluble pectin, cellulose, lignin content and  $\beta$ -Glucosidase activity of diseased tissue of 'Yanshu 25' were significantly higher than those of 'Xinxiang'. While its content of protopectin and cellulase activity

收稿日期: 2022-01-10

基金项目: 国家甘薯产业技术体系项目 (CARS-10); 浙江省自然科学基金 (LY19C200015)

作者简介: 赵梅慧 (1996—), 女, 硕士生, 主攻农产品贮藏与保鲜。

通信作者: 庞林江 (1977—), 男, 副教授, 主要研究方向为农产品贮藏与加工。

decreased significantly. The difference between these two varieties was greater after infection. The infection of sweet potato by *Ceratocystis fimbriata* will lead to the decrease of hardness and the disintegration of the cell wall structure. The resistance of 'Yanshu 25' to black spot was better than that of 'Xinxiang'. Its cell wall structure is more integrated, and the hardness is higher.

**KEY WORDS:** sweet potato; black rot; *Ceratocystis fimbriata*; cell wall

甘薯 [*Ipomoea batatas* (L.) Lam.] 是世界上第七大主要粮食作物, 也是一种重要的饲用和工业原料作物, 中国是世界上最大的甘薯生产国。甘薯投入低、产量高、适应性强, 对保障我国粮食安全具有重要的作用<sup>[1-2]</sup>。甘薯在栽培和贮藏过程中容易感染多种病原菌, 由甘薯长喙壳菌 (*Ceratocystis fimbriata*) 引起的黑腐病是世界范围内破坏性较强的病害之一<sup>[3-5]</sup>, 几乎没有品种可以避免染病<sup>[6]</sup>, 黑斑病对甘薯生产造成严重的损失, 且目前没有有效的杀菌剂, 无论采用何种繁殖、种植和贮藏技术, 防治甘薯黑腐病都是一项严峻的挑战<sup>[4]</sup>。甘薯受黑斑病菌侵染后, 会产生甘薯酮、甘薯宁、甘薯醇、4-薯醇等耐高温的毒素, 这些有毒物质无法通过加工处理等手段来破坏, 极易导致人畜中毒<sup>[5]</sup>。

植物细胞壁是由纤维素、半纤维素、果胶等高分子多糖和蛋白质组成高度复杂的动态网络, 也是病原菌入侵的第一道屏障, 以及寄主与病原菌相互作用的重要场所, 在植物感受和抵抗病原菌过程中起着重要作用<sup>[7-9]</sup>。植物细胞壁的完整性、重塑性一定程度可以反映出衰老和逆境响应的情况, 逆境胁迫会引起细胞壁修饰, 启动防御反应<sup>[9]</sup>。很多研究表明, 甘薯细胞壁的结构和生理特征会影响甘薯的腐烂率和耐贮性, 甘薯贮藏期间, 原果胶含量降低, 纤维素酶活性增加, 如果在贮藏中保持原果胶含量, 就可以提高甘薯的贮藏品质<sup>[10-11]</sup>, 甘薯原果胶是影响甘薯质地、衡量衰老及耐贮性的重要指标<sup>[12]</sup>, 耐贮性好的品种具有较高的纤维素含量和木质素含量, 木质素含量也是影响耐贮性的因素之一<sup>[11]</sup>。“烟薯25”和“心香”是目前常见的优质甘薯品种, 有研究认为“烟薯25”为抗病品种<sup>[13]</sup>, “心香”为感病品种<sup>[14]</sup>, 可能具有不同的抗性, 但没有直接对比2个品种抗性的相关报道。文中以2个甘薯品种为试验材料, 通过人为接种甘薯长喙壳菌, 研究不同品种甘薯贮藏期感染黑斑病后细胞壁相关变化特征, 以期阐明长喙壳菌侵染机理和甘薯贮藏病害的防治提供理论参考, 促进甘薯产业的健康发展。

## 1 实验

### 1.1 供试材料

供试甘薯品种为“心香”和“烟薯25”, 由浙江农林大学薯类研究所板桥基地种植, 统一采收后运送到实验室, 愈伤后选取大小均匀适中、无病虫害、无机械

损伤的个体, 洗净表皮泥土后用体积分数为75%酒精溶液擦拭消毒, 沥干备用。甘薯长喙壳菌 (*C. fimbriata*) 由江苏徐淮地区徐州农业科学研究所提供。

### 1.2 试剂与仪器

主要仪器设备: SW-CJ-1CU 双人水平送风净化工作台, 苏州苏洁净化设备有限公司; LDZX-50KBS 立式高压蒸汽灭菌器, 上海申安医疗器械厂; DRP-9162 型电热恒温培养箱, 上海森信实验仪器有限公司; 智能低温冷藏箱, 宁波普朗特仪器有限公司; XSZ-H 生物显微镜, 重庆光电仪器有限公司; UV-2802 紫外可见分光光度计, 尤尼柯(上海)仪器有限公司; 3K15 台式高速冷冻离心机, 德国 Sigma 公司; SU8010-冷场扫描电镜, 日本日立公司。

主要试剂: 硫酸、咪唑、多聚半乳糖醛酸、无水乙醇、3,5-二硝基水杨酸、乙酸钠、氯化钠、木聚糖、水杨苷、蒽酮、羧甲基纤维素钠 (CMC) 等均为分析纯, 葡萄糖、木糖、半乳糖醛酸均为标准品, 购于国药集团化学试剂有限公司。

### 1.3 菌种制备和接种

将病原菌在 28 °C 的 PDA 培养基上活化培养 7 d 后备用。

利用培养好的长喙壳菌分生孢子制备长喙壳菌的孢子悬浮液 ( $1 \times 10^6$  CFU/mL), 使用灭菌打孔器在甘薯赤道附近等距离制造 3 个直径为 5 mm、深度为 5 mm 的损伤, 采用无菌注射器向损伤处注射 25  $\mu$ L 菌悬液, 每个品种处理 5 个薯块, 晾干后置于温度为 28 °C、相对湿度为 80% 的环境中贮藏 15 d。将对照组 (CK) 制造相同损伤后, 向损伤处注入等量无菌水。

### 1.4 指标测定

病斑调查: 用游标卡尺逐个测量病斑表面直径、病斑内部 (表皮层下) 直径、病斑侵入深度、病斑组织腐烂量。每组处理用 5 个薯块的平均值表示其测定值, 病斑综合直径是表面直径和内部直径的平均值<sup>[15]</sup>, 单位为 mm。

腐烂指数: 依甘薯腐烂的面积划分为 0—5 级: 0 级 (无腐烂)、1 级 (腐烂的面积  $\leq 10\%$ )、2 级 (腐烂的面积介于 10%~30%)、3 级 (腐烂的面积介于 30%~50%)、4 级 (腐烂的面积介于 50%~70%)、5 级 (腐烂的面积  $\geq 70\%$ )<sup>[16]</sup>, 单位为 %。计算方法:

$$\text{腐烂指数} = \frac{\sum (\text{腐烂级别} \times \text{该级别样品数量})}{\text{最高级别} \times \text{样品总数量}} \times 100\%$$

硬度测定：采用GY-4数显水果硬度计，探头直径为8 mm，预压速度和下压速度均为2 mm/s，起始力为0.1 N，在每个甘薯赤道部分的病变部位进行测定，每组测定15次，单位为N。

果胶物质含量测定：参考曹建康等<sup>[17]</sup>的方法，以鲜基的质量分数表示，单位为%。

木质素、纤维素含量测定：参考韩敏等<sup>[18]</sup>的方法，以干基的质量分数表示，单位为%。

纤维素酶（Cx酶）、β-葡萄糖苷酶（β-Glu酶）活性测定：参考曹建康等<sup>[13]</sup>的方法，用鲜样测定表示，单位为mg/(h·g)。

## 1.5 数据处理

每个样品指标测定均重复3次。采用Excel进行统计作图，并用SPSS 22.0统计软件进行显著性分析， $P < 0.05$ 表示显著性差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 长喙壳菌侵染不同品种甘薯后黑斑病发病症状

周佳明等<sup>[15]</sup>从年度间鉴定结果的吻合率、接近度、一致性与稳定性，以及对其他方法的代表性角度，认为用病斑内部直径和病斑表面直径作指标是较好的鉴定抗性方法；从鉴定结果的稳定性，以及与其他方法的一致性看，认为用综合病斑直径分级法优于表面病斑分级法。甘薯黑斑病抗性常采用破损接种后15 d发病情况来鉴定<sup>[15, 19]</sup>，接种长喙壳菌15 d后，测定分析甘薯黑斑病发病情况（表1），甘薯品种“烟薯25”对长喙壳菌侵染抗性与“心香”对长喙壳菌侵染抗性具有较大的差异性。根据观察需要，图1进一步展示了甘薯“心香”和“烟薯25”在接种后第0、6、12和15天的病斑处横截面，可明显观察到在贮藏后期，“心香”病变程度高于“烟薯25”，其中在贮藏第15天，“心香”的腐烂指数高达86.7%，较“烟薯25”显著高出23.3%。该研究结果表明，“烟薯25”的病斑内部直径、病斑深度和腐烂指数显著低于“心香”的，且病斑表面直径和综合直径小于“心香”的。众多数据

均可以表明，甘薯品种“烟薯25”对黑斑病的抗性大于“心香”对黑斑病的抗性。

### 2.2 长喙壳菌侵染对不同抗性甘薯硬度的影响

硬度是果实非常重要的一项品质指标，细胞壁的结构组成是影响果实硬度主要因素之一<sup>[20]</sup>。果实软化会降低果实的抗病性，缩短果实的货架寿命。由图2可知，甘薯硬度变化随贮藏时间呈先升后降的变化趋势，在第3天时达到峰值。可能是由于初始甘薯愈伤，促使甘薯组织硬度增加，后期由于不断衰老和病变，硬度逐渐降低。不同抗性品种存在显著差异，贮藏期间甘薯品种“烟薯25”的硬度比“心香”的显著高出18.4%~26.2%；同时发现，染菌后“心香”甘薯硬度后期下降较快，在贮藏第15天时，相较于对照组，甘薯“心香”的硬度降低了17.5%，“烟薯25”的硬度降低了11.1%。甘薯硬度的降低表明其细胞壁正在解体，组织结构变得松散，贮藏后期“心香”硬度降低更加显著，这也可能是抗病性较弱的表现。

### 2.3 长喙壳菌侵染对不同抗性甘薯果胶含量的影响

果胶是细胞壁的重要组成物质，甘薯在贮藏期间，原果胶在果胶酶的作用下分解为可溶性果胶，细胞间失去黏结作用，甘薯组织变得松弛<sup>[10, 21]</sup>。从图3a可以看出，原果胶含量在贮藏期间呈现下降趋势，染菌处理具有加速作用，可溶性果胶质量分数则相反（图3b）。在贮藏期间，“心香”和“烟薯25”原果胶的质量分数分别降低了28.4%和23.7%；与对照组相比，甘薯“心香”染菌后原果胶质量分数的下降幅度大于“烟薯25”染菌后原果胶质量分数的下降幅度。在贮藏15 d内，“心香”的原果胶质量分数降低了0.58%，相较于对照组的降低了45.64%；而染菌后“烟薯25”的下降幅度相对平缓，原果胶质量分数贮藏期间降低了0.27%，相较于对照组降低了40.26%，在一定程度上维持了甘薯硬度。染菌后“心香”和“烟薯25”可溶性果胶的质量分数分别上升了50.0%和82.3%，染菌后“心香”的可溶性果胶质量分数在贮藏期间显著高于对照组的，“烟薯25”的可溶性果胶质量分数略高于对照组的，贮藏期间相对稳定，抗性较高<sup>[10-12]</sup>。

表1 甘薯黑斑病症状  
Tab.1 Symptoms of sweet potato with black rot

| 品种   | 表面直径/mm                | 内部直径/mm                | 综合直径/mm                | 深度/mm                  | 腐烂指数/%                 |
|------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 心香   | 16.0±1.63 <sup>a</sup> | 10.8±1.71 <sup>a</sup> | 13.4±1.67 <sup>a</sup> | 10.3±0.50 <sup>a</sup> | 86.7±3.97 <sup>a</sup> |
| 烟薯25 | 15.5±0.71 <sup>a</sup> | 8.5±0.50 <sup>b</sup>  | 12.0±0.61 <sup>a</sup> | 5.3±0.58 <sup>b</sup>  | 53.3±0.68 <sup>b</sup> |

注：同一列数字后面的小写字母不同表示具有显著差异性（ $P < 0.05$ ， $n=5$ ）

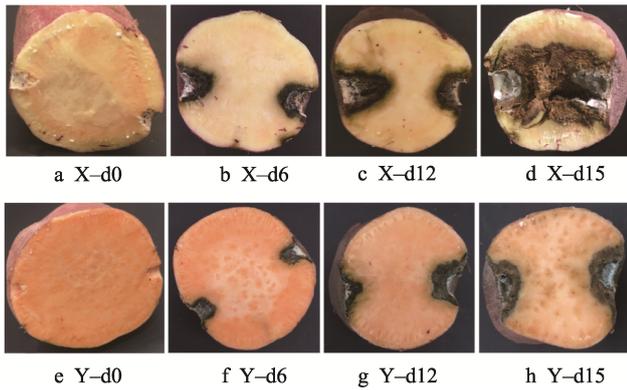


图 1 染菌后甘薯随贮藏时间的病斑变化

Fig.1 Changes of disease spots of sweet potato with storage time after infection

注: X 为心香; Y 为烟薯 25。

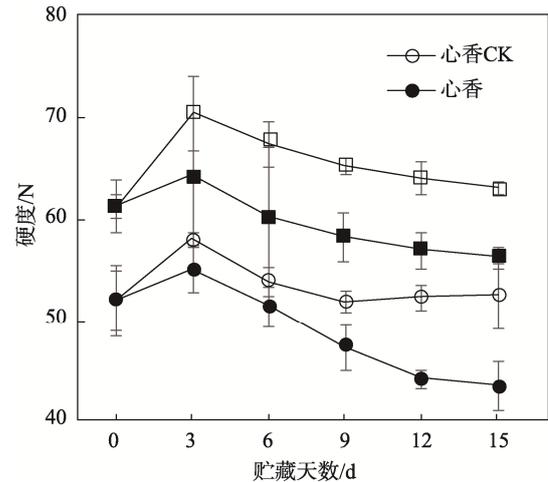


图 2 染菌后甘薯硬度的变化

Fig.2 Changes of hardness in sweet potato after infection

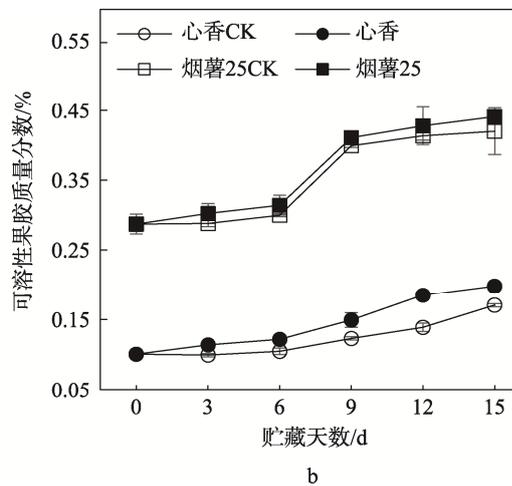
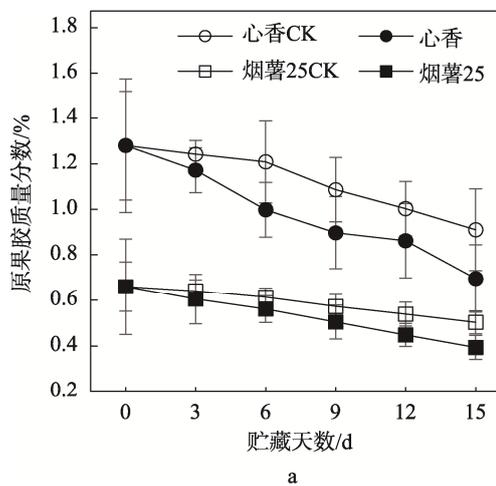


图 3 染菌后甘薯果胶物质质量分数的变化

Fig.3 Changes of pectin content in sweet potato after infection

## 2.4 长喙壳菌侵染对不同抗性甘薯纤维素和木质素含量的影响

纤维素是细胞壁的构成骨架,木质素是细胞壁的主要组成部分,诸多研究发现,果蔬中纤维素和木质素的质量分数在采后贮藏期间显著增加<sup>[22-23]</sup>。

由图 4a 可知,甘薯纤维素质量分数在贮藏期间呈先上升后下降的趋势,这可能是因病原菌侵染后,甘薯防御反应被启动<sup>[9]</sup>,纤维素质量分数开始大幅度增加,以便抵抗微生物入侵,但后期发病逐渐严重,甘薯纤维素质量分数急剧下降,细胞壁破损严重。不同黑斑病抗性甘薯品种的纤维素质量分数差异极显著,在贮藏期间,对照组和染菌组“烟薯 25”的纤维素质量分数比“心香”都显著提高;染菌后贮藏前期甘薯纤维素的质量分数显著高于对照组的,尤其是在贮藏前期 9 d 内,染菌甘薯纤维素质量分数显著提高了 13.4%~36.2%，“烟薯 25”的增加幅度较大,中后期可能由于防御系统崩溃,染菌组纤维素质量分数下降

较快,第 15 天时均低于对照组。

木质素是细胞壁的组分,具有一定抗菌作用,能将细胞相连,与富含羟脯氨酸糖蛋白协同阻挡病原菌侵入,以维持细胞壁的完整性<sup>[24]</sup>。由图 4b 可知,贮藏期间甘薯木质素质量分数呈现上升趋势,且染菌组高于对照组,贮藏期间染菌组甘薯木质素质量分数提高了 21.2%~67.0%,中后期较为显著,这可能是因为染菌诱导甘薯产生了防御反应;“烟薯 25”的木质素质量分数比“心香”的高出 4.1%~22.3%,其中染菌组中“烟薯 25”的木质素质量分数高于“心香”的,尤其是贮藏中后期差异更大,贮藏第 15 天时,接种了长喙壳菌的“烟薯 25”的木质素质量分数为 6.2%,比同处理“心香”的高了 24.8%,比对照组的高了 50.6%。木质素一般通过苯丙烷途径合成,有利于抵抗生物和非生物的胁迫<sup>[25]</sup>。“烟薯 25”的纤维素和木质素质量分数较高,表现为抗病性较强<sup>[10-11]</sup>,冬枣感染黑斑病也有类似现象<sup>[26]</sup>。

## 2.5 长喙壳菌侵染对不同抗性甘薯纤维素酶活性的影响

纤维素酶(Cx)是纤维素分解为寡糖或单糖的降解酶。由图5a可知,甘薯C<sub>x</sub>酶活性在贮藏期间呈先下降后上升的趋势,在第6天时活性最低;染菌后甘薯品种“烟薯25”的C<sub>x</sub>酶活性显著小于“心香”的,在贮藏期间“烟薯25”的酶活性降低了3.6%~50.2%,抗性表现强<sup>[10-11]</sup>;染菌后甘薯的C<sub>x</sub>酶活性显著高于对照组的,提高了4.3%~96.3%,主要是由于生物胁迫所致,染菌后“烟薯25”和“心香”的C<sub>x</sub>酶活性分别增加了2.5%~30.5%

和4.7%~186.3%。

$\beta$ -葡萄糖苷酶( $\beta$ -Glu酶)是C<sub>x</sub>中的关键组分,对纤维素的降解速率起重要作用。由图5b可知,贮藏期间甘薯 $\beta$ -Glu酶活性都呈现上升趋势,染菌后防御启动较C<sub>x</sub>快,染菌处理后上升迅速且显著增加;染菌后抗性较高品种“烟薯25”的酶活性比“心香”的增加速度和增加量都显著,随着贮藏时间差异逐渐加大,未染菌的两品种甘薯间则几乎没有差异。说明病变部位的 $\beta$ -Glu酶活性上升速度快,且长喙壳菌抗性较高的品种的 $\beta$ -Glu酶活性更高。

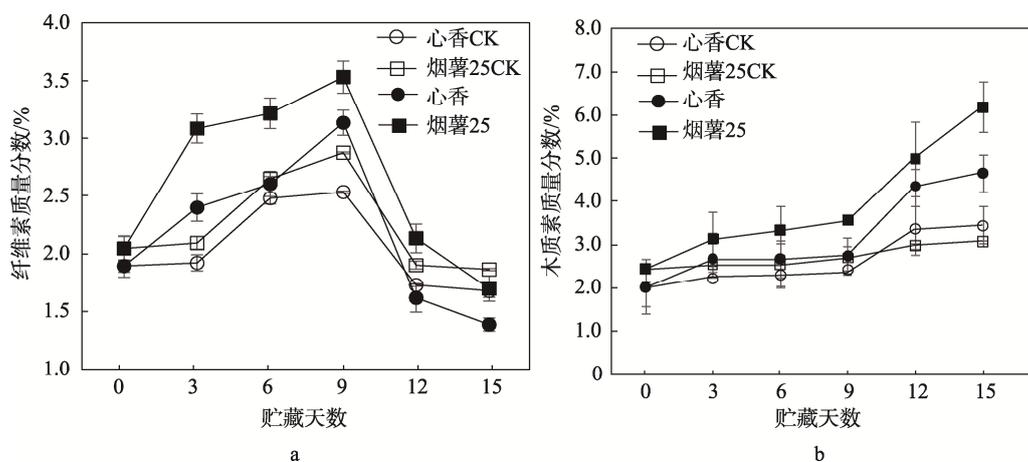


图4 染菌后甘薯纤维素和木质素质量分数变化

Fig.4 Changes of cellulose and lignin content in sweet potato after infection

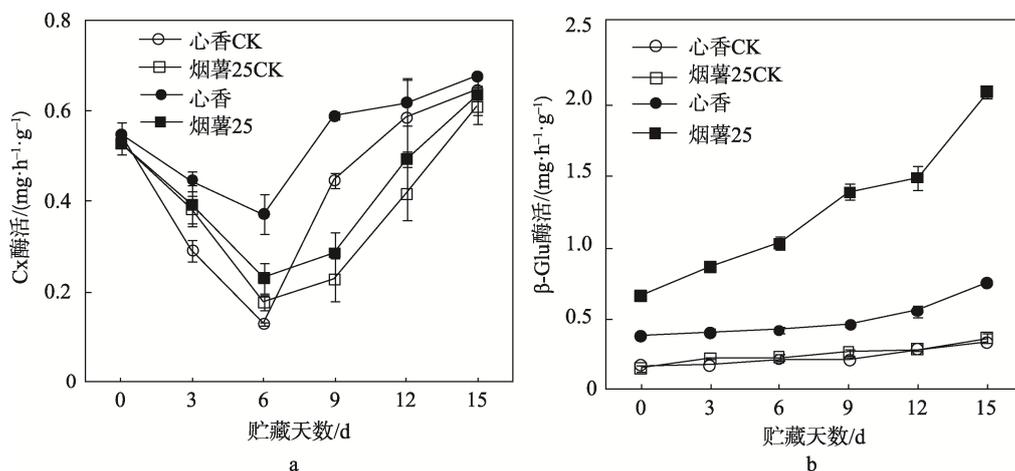


图5 染菌后甘薯纤维素酶和 $\beta$ -葡萄糖苷酶活性变化

Fig.5 Changes of cellulase and  $\beta$ -glucosidase activities in sweet potato after infection

## 3 结语

细胞壁是果蔬细胞最基本细胞骨架,其组织结构对果蔬抵抗病原菌侵染具有很大的影响。研究结果表明,接种长喙壳菌15d后,“烟薯25”的黑斑病病斑表面直径、病斑内部直径、综合直径、病斑深度和腐烂指数均不同程度小于“心香”的,尤其是病斑内部直

径、病斑深度和腐烂指数差异显著,甘薯品种“烟薯25”对长喙壳菌的抗性大于“心香”对长喙壳菌的抗性。同时发现,采后甘薯硬度逐渐下降,甘薯长喙壳菌侵染后会导致甘薯贮藏期间病变部位硬度下降,“烟薯25”的硬度显著高于“心香”的,且染菌后下降幅度较小。

果蔬硬度与细胞壁组成结构关系密切,对细胞壁

的组成成分研究表明,甘薯采后呈现出原果胶含量开始逐渐降低,可溶性果胶逐渐增加,纤维素含量先增加后降低,木质素含量逐渐增加,纤维素酶先降低后增加, $\beta$ -葡萄糖苷酶呈逐渐增加趋势。“烟薯 25”原果胶和可溶性果胶的质量分数分别显著低于和高于“心香”品种的,且染菌和未染菌的“烟薯 25”在贮藏期间的变化幅度均小于“心香”的,稳定性较好;贮藏期间,“烟薯 25”的纤维素和木质素含量较高,纤维素酶的酶活性较低和  $\beta$ -葡萄糖苷酶的酶活性较高。染菌后甘薯病变组织的纤维素、木质素含量、纤维素酶和  $\beta$ -葡萄糖苷酶均显著增加,且“烟薯 25”的纤维素、木质素含量、 $\beta$ -葡萄糖苷酶活性显著高于“心香”的,而纤维素酶活性则显著低于“心香”的。

综上所述,甘薯硬度、纤维素含量、木质素含量、果胶含量与黑斑病抗性具有正相关性,与纤维素酶活性呈负相关性。染菌后硬度、原果胶含量的稳定性对抗性也很重要,细胞壁的组成结构及其成分的具体影响规律及其调控机制还需要进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] XING Ke, LI Teng-jie, LIU Yuan-fang, et al. Antifungal and Eliciting Properties of Chitosan Against *Ceratocystis Fimbriata* in Sweet Potato[J]. *Food Chemistry*, 2018, 268: 188-195.
- [2] LIU Mei-yan, GONG Ying, SUN Hou-jun, et al. Characterization of a Novel Chitinase from Sweet Potato and Its Fungicidal Effect Against *Ceratocystis Fimbriata*[J]. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 2020, 68(29): 7591-7600.
- [3] LI Xue-zhi, LIU Man, HUANG Ting-gong, et al. Antifungal Effect of Nerol Via Transcriptome Analysis and Cell Growth Repression in Sweet Potato Spoilage Fungi *Ceratocystis Fimbriata*[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 171: 111343.
- [4] JIANG Ling-min, JEONG J C, LEE J S, et al. Potential of *Pantoea Dispersa* as an Effective Biocontrol Agent for Black Rot in Sweet Potato[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 16354.
- [5] 张小琼, 庞林江, 陆国权, 等. 电子鼻技术对甘薯储藏中喙壳菌侵染病变程度判别[J]. *传感技术学报*, 2020(11): 1564-1570.  
ZHANG Xiao-qiong, PANG Lin-jiang, LU Guo-quan, et al. Discriminate of Sweet Potato Storage Disease Infected by *Ceratocystis Fimbriata* on Electronic Nose Technology[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2020(11): 1564-1570.
- [6] SCRUGGS A C, BASAIAH T, ADAMS M L, et al. Genetic Diversity, Fungicide Sensitivity, and Host Resistance to *Ceratocystis Fimbriata* Infecting Sweetpotato in North Carolina[J]. *Plant Disease*, 2017, 101(6): 994-1001.
- [7] 陈贵华, 王萍, 石岭. 细胞壁在植物抗病反应中的能动作用研究进展[J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2021(5): 117-120.  
CHEN Gui-hua, WANG Ping, SHI Ling. Review on the Dynamic Function of Cell Walls in Plant Disease Resistance[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2021(5): 117-120.
- [8] KOZIEŁ E, OTULAK-KOZIEŁ K, BUJARSKI J J. Plant Cell Wall as a Key Player during Resistant and Susceptible Plant-Virus Interactions[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2021, 12: 656809.
- [9] POGORELKO G, LIONETTI V, BELLINCAMPI D, et al. Cell Wall Integrity: Targeted Post-Synthetic Modifications to Reveal Its Role in Plant Growth and Defense Against Pathogens[J]. *Plant Signaling & Behavior*, 2013, 8(9): 25435.
- [10] 王炜, 李鹏霞, 胡花丽, 等. 甘薯在贮藏期间细胞壁降解酶活性的变化[J]. *食品与发酵工业*, 2012(7): 186-189.  
WANG Wei, LI Peng-xia, HU Hua-li, et al. Study on the Activity of Cell Wall Degradation Enzyme of Sweet Potato in Its Storage[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2012(7): 186-189.
- [11] 曹如霞, 徐舒, 李玲, 等. 甘薯块根贮藏期间细胞壁成分及降解酶活性变化[J]. *中国农业大学学报*, 2020(5): 59-69.  
CAO Ru-xia, XU Shu, LI Ling, et al. Changes of Cell Wall Components and Degradation Enzyme Activity in Sweetpotato Storage Roots during Storage[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020(5): 59-69.
- [12] 张有林, 张润光, 王鑫腾. 甘薯采后生理、主要病害及贮藏技术研究[J]. *中国农业科学*, 2014(3): 553-563.  
ZHANG You-lin, ZHANG Run-guang, WANG Xin-teng. Study on Postharvest Physiology, Main Diseases and Storage Technology of Sweet Potato[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014(3): 553-563.
- [13] 辛国胜, 林祖军, 韩俊杰, 等. 优质高产甘薯新品种‘烟薯’选育及高产生理研究[J]. *上海农业学报*, 2015(4): 119-124.  
XIN Guo-sheng, LIN Zu-jun, HAN Jun-jie, et al. Study on the Selective Breeding and High Yield Physiology of a New High-Yield Superior Sweet Potato Variety 'Yanshu 25'[J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2015(4): 119-124.
- [14] 季志仙, 成灿土, 王忠明, 等. 早熟迷你甘薯新品种

- 心香的选育[J]. 中国蔬菜, 2008(12): 34-36.
- JI Zhi-xian, CHENG Can-tu, WANG Zhong-ming, et al. An Early Maturity Mini Sweet Potato Variety—'Xinxiang'[J]. China Vegetables, 2008(12): 34-36.
- [15] 周佳明, 刘志琼. 甘薯黑斑病抗性鉴定不同分级方法效果研究[J]. 四川师范学院学报(自然科学版), 2000(3): 270-273.
- ZHOU Jia-ming, LIU Zhi-qiong. The Study for the Effect of Resistance Appraisal to *Cercospora* Black Spot by Different Grade Methods in Sweet Potatoes[J]. Journal of Sichuan Teachers College Natural Science Edition, 2000(3): 270-273.
- [16] 狄华涛, 杨敬辉, 陈宏州, 等. 基于乙醇含量的杨梅果实腐烂指数预测模型研究[J]. 食品科学, 2012, 33(18): 290-293.
- DI Hua-tao, YANG Jing-hui, CHEN Hong-zhou, et al. Predictive Modeling of Decay Index of Chinese Bayberry Fruits Based on Ethanol Content[J]. Food Science, 2012, 33(18): 290-293.
- [17] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007: 84-87, 95-99.
- CAO Jian-kang, JIANG Wei-bo, ZHAO Yu-mei. Experimental Guidance of Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007: 84-87, 95-99.
- [18] 韩敏, 张文娟, 刘丽, 等. 贮藏期‘潍县萝卜’肉质根纤维素、木质素含量与蔗糖代谢的相关性研究[J]. 西北农业学报, 2021(5): 717-724.
- HAN Min, ZHANG Wen-juan, LIU Li, et al. Correlation between Contents of Cellulose and Lignin and Sucrose Metabolism of 'Weixian Radish' Taproot during Storage[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2021(5): 717-724.
- [19] 禹阳, 贾赵东, 马佩勇, 等. 甘薯黑斑病抗性鉴定中黑斑病菌培养方法研究[J]. 江苏农业科学, 2017(22): 120-121.
- YU Yang, JIA Zhao-dong, MA Pei-yong, et al. Study on Cultivation Method of Black Spot Pathogen in Resistance Identification of Sweet Potato Black Spot[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017(22): 120-121.
- [20] CHEN Hang-jun, CAO Shi-feng, FANG Xiang-jun, et al. Changes in Fruit Firmness, Cell Wall Composition and Cell Wall Degrading Enzymes in Postharvest Blueberries during Storage[J]. Scientia Horticulturae. 2015, 188: 44-48.
- [21] WANG D, YEATS T H, ULUISIK S, et al. Fruit Softening: Revisiting the Role of Pectin[J]. Trends in Plant Science, 2018, 23(4): 302-310.
- [22] ZENG Fang-fang, LUO Zi-sheng, XIE Jian-wei, et al. Gamma Radiation Control Quality and Lignification of Bamboo Shoots (*Phyllostachys praecox* f. *Prevernalis*.) Stored at Low Temperature[J]. Postharvest Biology and Technology, 2015, 102: 17-24.
- [23] ELHASSAN S, ABU-GOUKH A. Role of Cellulase Enzyme in Fruit Softening during Muskmelon Fruit Ripening[J]. American Journal of Scientific and Industrial Research, 2016, 7(4): 98-105.
- [24] HESSLER G, PORTHEINE S M, GERLACH E, et al. *Powdery Mildew Resistant4*-Dependent Cell Wall Deposition is a Consequence but not the Cause of Temperature-induced Autoimmunity[J]. Journal of Experimental Botany, 2021, 72(21): 7549-7563.
- [25] LEE C J, KIM S E, PARK S U, et al. Tuberous Roots of Transgenic Sweetpotato Overexpressing IbCAD1 Have Enhanced Low-Temperature Storage Phenotypes[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2021, 166: 549-557.
- [26] 常璐璐, 张乐乐, 于有伟, 等. 精氨酸处理对采后冬枣黑斑病的抗病作用[J]. 食品工业科技, 2021, 42(12): 321-326.
- CHANG Lu-lu, ZHANG Le-le, YU You-wei, et al. Effect of Arginine Treatment on Disease Resistance to *Alternaria* Rot of Postharvest Winter Jujube[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(12): 321-326.

责任编辑: 曾钰婵