

◆ 药效与应用 ◆

## 牡丹皮乙醇提取物对黄瓜枯萎病菌的 活性抑制及作用机制

吴文慧, 田雨纯, 牛吉祥, 何 瑞\*

(晋中信息学院食品与环境学院, 山西晋中 030805)

**摘要:**为探究牡丹皮对黄瓜枯萎病菌(*Fusarium oxysporum* f.sp. *cucumerinum*)的抑菌活性,通过用不同浓度的牡丹皮乙醇提取物处理黄瓜枯萎病菌,测定其对枯萎病菌的菌丝生长抑制率、胞外电导率、 $A_{260\text{ nm}}$ 与 $A_{280\text{ nm}}$ 的变化,使用光学显微镜观察处理后的菌丝形态变化。结果表明:牡丹皮乙醇提取物处理后的黄瓜枯萎病菌胞外电导率、 $A_{260\text{ nm}}$ 和 $A_{280\text{ nm}}$ 显著上升,菌丝出现膨胀畸变等现象;其中质量浓度为25.0 mg/mL的牡丹皮乙醇提取物可显著降低黄瓜枯萎病菌的生长速度,处理48 h后抑菌率可达到92.08%;进一步研究认为,牡丹皮通过破坏黄瓜枯萎病菌的细胞膜结构,使胞内物质渗出,造成菌丝形态结构畸变,进而抑制了菌体细胞的生长与繁殖。

**关键词:**黄瓜枯萎病菌;牡丹皮;乙醇提取物;活性抑制;抑菌机理

中图分类号:S 436 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1671-5284.2023.06.015

### Inhibitory Activity and Mechanism of Ethanol Extract of Moutan Bark on *Fusarium oxysporum* f.sp. *Cucumerinum* Causing *Fusarium* Wilt of Cucumber

WU Wenhui, TIAN Yuhui, NIU Jixiang, HE Rui\*

(Jinzhong College of Information, Jinzhong 030805, China)

**Abstract:** In order to explore the inhibitory activity of Moutan Cortex on *Fusarium oxysporum* f.sp. *cucumerinum*, in this experiment the different concentrations of Moutan Cortex ethanol extract was used to treat *F. oxysporum* f.sp. *cucumerinum*, and its mycelial growth inhibition rate, extracellular conductivity,  $A_{260\text{ nm}}$  and  $A_{280\text{ nm}}$  changes of *F. oxysporum* f.sp. *cucumerinum* were determined and the morphological changes of the treated mycelium were observed under optical microscope. The results showed that the extracellular conductivity,  $A_{260\text{ nm}}$  and  $A_{280\text{ nm}}$  of *F. oxysporum* f.sp. *cucumerinum* treated with ethanol extract of Moutan Cortex increased significantly. The hyphae of *F. oxysporum* f.sp. *cucumerinum* treated with ethanol extract of peony bark showed swelling and distortion. The ethanol extract of Moutan Cortex with mass concentration of 25.0 mg/mL could significantly reduce the growth rate of *F. oxysporum* f.sp. *cucumerinum*, and the inhibition rate could reach 92.08% after 48 h of treatment. Therefore, Moutan Cortex could destroy the cell membrane structure of *F. oxysporum* f.sp. *cucumerinum*, resulting in exudatio of intracellular substances, distortion of mycelial morphology, and then inhibition of the growth and reproduction of pathogen cells.

**Key words:** *Fusarium oxysporum* f.sp. *cucumerinum*; Moutan bark; ethanol extract; inhibitory activity; inhibitory mechanism

收稿日期:2023-07-21

基金项目:山西省高等学校大学生创新创业训练项目(20221629)

作者简介:吴文慧(2001—),女,山西太原人,主要从事生物科学研究。E-mail:2479063411@qq.com

通信作者:何瑞(1980—),女,山西襄垣人,博士,讲师,主要从事植物学、微生物学研究。E-mail:herui302@163.com

黄瓜枯萎病菌(*Fusarium oxysporum* f.sp.cucumerinum)为尖孢镰孢菌黄瓜专化型病原菌,通过土壤传播,侵染植物维管组织,是黄瓜在生产过程中具有毁灭性的病原之一<sup>[1]</sup>。该菌为白色气生菌丝,色泽呈淡青紫色或淡褐色。小型分生孢子长椭圆形,无色,单孢或偶尔双孢;大型分生孢子纺锤形,无色,多为3个隔膜,顶端细胞较长<sup>[2]</sup>。

黄瓜枯萎病发生在黄瓜的整个生长期,开花期与结果期发病最为严重,导致黄瓜植株部分或全部枯萎<sup>[3]</sup>。我国共有100多个黄瓜品种受害,每年损失高达100亿元。生产上防治黄瓜枯萎病的方法主要有轮作倒茬、种植抗性品种、与抗性品种砧木嫁接及施用化学药剂等,虽然取得了一定的防治效果,但也存在着优质抗性品种资源缺乏、嫁接育苗成本较高、化学药剂污染环境及防治效果差等诸多弊端<sup>[4-6]</sup>。使用农药虽然可以有效地防控作物病虫害,提升作物的产量和品质,但同时也可能造成严重的有害生物抗药性发生、化学农药残留超标和病虫害再猖獗等“3R”问题。近年来,随着对食品与环境安全领域的重视,植物源杀菌剂的研究引起了相关学者的高度重视。植物源杀菌剂的成分主要来源于植物,具有高效、无毒或低毒、无抗药性、杀菌谱广、与环境相容等优点<sup>[7]</sup>。Meena等<sup>[8]</sup>发现紫茎泽兰叶提取物对番茄早疫病菌具有抑制作用;孟雅君<sup>[9]</sup>发现蒲公英甲醇萃取物对黄瓜枯萎病菌具有较好的抑制效果,这些研究都为植物源杀菌剂的开发提供了良好的理论基础。

牡丹皮又称为牡丹根皮、丹皮、丹根,是毛茛科植物(*Paeonia suffruticosa* Andr.)牡丹的干燥根皮,主要产自湖南、湖北、安徽、四川、甘肃、陕西等地,其中以湖南、安徽产量最大。牡丹皮呈圆筒状或半筒状,外表为灰褐色或黄褐色,有较多的横长皮孔和细根痕,质硬而脆<sup>[10]</sup>。牡丹皮中含有单萜类、酚及酚苷类、三萜及甾体类和有机酸及有机酸酯类等化合物<sup>[11]</sup>,主要成分包括丹皮酚、丹皮酚苷、芍药苷、丹皮酚原苷等,其药理作用表现在抗肿瘤、增强免疫力、抗菌作用、抗心律失常与改善机体微循环等方面<sup>[12]</sup>。朱立成等<sup>[13]</sup>以5种植物病原菌为供试对象,测定了牡丹皮等16种中草药的抑菌作用,发现牡丹皮丙酮提取物对所有供试的植物病原菌菌丝生长都有抑制效果,且抑菌率最高为100%,表明牡丹皮对植物病原菌的抑制作用具有广谱性。

本文以牡丹皮为材料,利用乙醇提取抑菌活性成分,并对黄瓜枯萎病菌的活性抑制和机理进行初

步探讨,以为开发新型农药提供参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

试验所用牡丹皮购自陕西省商洛市千草行农副产品有限公司;黄瓜枯萎病菌(尖孢镰孢菌黄瓜专化型*Fusarium oxysporum* f.sp. *Cucumerinum*)由山西农业大学植物保护学院植物病理实验室提供。

### 1.2 试剂和仪器

(1) 试剂:95%乙醇、葡萄糖、琼脂粉。

(2) 其他耗材:马铃薯、滤纸、纱布。

(3) 仪器:酒精灯、MC-CLC2202电磁炉,广东美的生活电器电磁炉制造有限公司;打孔器、镊子、BSA224S电子分析天平,赛多利斯科学仪器有限公司;RE-52AA真空旋转蒸发仪,上海亚荣生化仪器厂;DI-离子交换机纯水系统,上海和泰仪器有限公司;SW-CJ-2F洁净工作台、BGZ-146电热鼓风干燥箱、BGZ-250光照培养箱、YXQ-70A立式压力蒸汽灭菌器,上海博迅医疗生物仪器股份有限公司;100~1 000  $\mu$ L移液枪,济南鑫贝西生物技术有限公司;CX31-32C02光学显微镜,奥林巴斯;DDS-11A电导率仪,成都世纪方舟科技有限公司;752N紫外可见分光光度计,上海精密科学仪器有限公司;SC-3610低速台式离心机,安徽中科中佳科学仪器;HZQ-QX全温振荡器,哈尔滨市东联电子技术开发有限公司;SXT-02索氏提取器,上海洪纪仪器设备有限公司;XA-1固体样品粉碎机,金坛区亿通电子有限公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 制备牡丹皮乙醇提取物浓缩液

将牡丹皮经粉碎机磨碎过150目筛,称取14 g牡丹皮粉末与210 mL 75%乙醇溶液按体积比1:15分别装入索氏提取器内,开启电热套,加热烧瓶至乙醇沸腾,提取2 h,得到初提液,置于旋转蒸发仪中60℃进行浓缩,浓缩液置于蒸发皿中用酒精灯加热,待出现黏稠膏状物即得到乙醇提取物,对提取物进行标记后放于冰箱内保存备用。

#### 1.3.2 菌种活化

黄瓜枯萎病菌在4℃冰箱中保存。抑菌效果测定前,在无菌操作条件下,使用接种环从保存在试管中马铃薯葡萄糖琼脂培养基(PDA)斜面上挑取菌种的菌丝,接种于PDA平板上进行28℃黑暗培养,活化菌种。

#### 1.3.3 培养基的制备

马铃薯葡萄糖水培养基(PDB):称取200 g马

铃薯去皮洗净,切成小块,放入烧杯中加水1 000 mL,在电磁炉上加热20~30 min煮烂(至薯块能被玻璃棒戳破即可),用4层纱布过滤,稍冷却后补足水分至1 000 mL,加入20 g葡萄糖并溶解。

PDA:在含20 g葡萄糖的PDB培养基中加入15 g琼脂。

全部混匀后分装至250 mL的三角瓶内,包扎封口。121℃、0.1 MPa下高压灭菌20 min。

1.3.4 加药培养基的制备

取等量的牡丹皮乙醇提取物浓缩液,加水稀释至100、125、150、200、250 mg/mL得到药液并装入试管保存。用移液枪吸取1 mL不同质量浓度的药液转移至灭菌的培养皿中,再向培养皿中加入9 mL融

化的PDA培养基,得到质量浓度为10、12.5、15、20、25 mg/mL的加药PDA培养基,每组设置3次重复,对照组为1 mL无菌水和9 mL融化的PDA培养基。

1.3.5 牡丹皮乙醇提取物对黄瓜枯萎病菌的抑菌活性测定

采用菌丝生长速率法,利用打孔器从长势良好的病原菌菌落边缘取直径为5 mm菌饼,放置在加药PDA培养基平板中央,以无菌水等量添加的PDA培养基平板作为对照,每个质量浓度重复3次,对应3皿PDA培养基平板,在恒温培养箱中28℃分别黑暗培养48 h和72 h后,用游标卡尺十字交叉法测量PDA培养基平板上菌落直径,计算牡丹皮乙醇提取物每个质量浓度处理对菌丝生长的抑制率:

$$\text{菌丝生长抑制率}/\%=\frac{\text{对照菌落直径}-\text{处理菌落直径}}{\text{对照菌落直径}-0.5\text{ cm}}\times 100$$

(1)

1.3.6 黄瓜枯萎病菌菌丝体细胞膜完整性

1.3.6.1 电导率的测定

改进孟雅君<sup>[9]</sup>的方法,测定黄瓜枯萎病菌菌丝体的胞外电导率。使用打孔器取直径为5 mm的菌饼接种于50 mL PDB培养基中,在26℃转速120 r/min下培养5 d,使用镊子将湿菌丝取出,用蒸馏水冲洗2~3次后放于培养皿中,80℃干燥箱烘干。取等量的牡丹皮乙醇提取物浓缩液,加无菌水稀释至10、12.5、15、20、25 mg/mL,将1.5 g烘干的菌丝和10 mL稀释液共同置于20 mL离心管内,对照添加等量的无菌水,每个质量浓度设3次重复,置于恒温培养箱中26℃下黑暗培养0、1、2、3、12、24、48 h,用电导率仪测定培养0、1、2、3、12、24、48 h各处理组液体的胞外电导率。

1.3.6.2 核酸与蛋白质泄漏水平测定

改进翁甜等<sup>[14]</sup>的方法,黄瓜枯菌病菌菌丝体在28℃的恒温培养箱中黑暗培养6 h后,取10 mL液体放入离心管中,以6 000 r/min的速度离心5 min,取上清液采用紫外分光光度计分别测定260 nm、280 nm波长的吸光度( $A_{260\text{ nm}}$ 、 $A_{280\text{ nm}}$ ),以表征菌丝体核酸与蛋白质的泄漏情况。

2 结果与分析

2.1 牡丹皮乙醇提取物浓缩液对黄瓜枯萎病菌的活性抑制

从表1可知,黄瓜枯萎病菌在加了牡丹皮乙醇提取物的PDA培养基平板上培养48 h后,牡丹皮的乙醇提取物对供试病原菌表现出一定的抑菌效果,随着质量浓度的增加,病原菌菌落直径逐渐减小,

其抑菌效果逐渐增加,当质量浓度为10.0 mg/mL时病原菌菌落直径为1.60 cm,抑菌率为54.17%,抑菌效果最差;当质量浓度为25.0 mg/mL时,病原菌菌落直径为0.69 cm,抑菌率为92.08%,抑菌效果最好。当黄瓜枯萎病菌在加了牡丹皮乙醇提取物的PDA培养基平板上培养72 h后,牡丹皮乙醇提取物表现出的抑菌效果与培养48 h的抑菌效果一致,各处理组的病原菌菌落直径均有增加,表明牡丹皮乙醇提取液质量浓度为25.0 mg/mL时对黄瓜枯萎病病原菌抑制效果最好。此外,不同质量浓度的牡丹皮乙醇提取液对黄瓜枯萎病菌均有抑制作用,随着乙醇提取物浓缩液质量浓度的增加,抑制率越高,抑菌效果越好。

表 1 牡丹皮乙醇提取物对黄瓜枯萎病菌的活性抑制

| 质量浓度/<br>(mg/mL) | 菌落直径/cm      |             | 抑菌率/%  |        |
|------------------|--------------|-------------|--------|--------|
|                  | 培养48 h       | 培养72 h      | 培养48 h | 培养72 h |
| 10.0             | 1.60±0.17 b  | 2.74±0.12 b | 54.17  | 39.46  |
| 12.5             | 1.34±0.15 c  | 2.14±0.15 c | 65.00  | 55.68  |
| 15.0             | 1.27±0.15 cd | 2.03±0.14 c | 67.92  | 58.65  |
| 20.0             | 1.05±0.10 d  | 1.71±0.10 d | 77.08  | 67.30  |
| 25.0             | 0.69±0.08 e  | 1.12±0.09 e | 92.08  | 83.24  |
| 对照组              | 2.90±0.10 a  | 4.20±0.09 a |        |        |

注:表中数据均为3次重复的平均值,同列数据后不同小写字母表示LSD多重处理比较在 $\alpha=0.05$ 水平上有显著差异。

2.2 牡丹皮乙醇提物对黄瓜枯萎病菌菌丝细胞膜透性的影响

2.2.1 电导率变化

如表2所示,经不同质量浓度的牡丹皮乙醇提



取物浓缩液处理后,黄瓜枯萎病菌菌丝的电导率随处理时间的延长而呈上升趋势。处理3 h后,对照组与处理组之间存在显著差异( $P<0.05$ )。随着处理时间的延长,牡丹皮乙醇提取物质量浓度越高,黄瓜枯萎病菌菌丝体电导率越高,表明牡丹皮乙醇提取物对黄瓜枯萎病菌细胞膜的破坏作用越大。

表 2 不同牡丹皮乙醇提取物浓缩液质量浓度对黄瓜枯萎病菌菌丝体电导率的影响

| 时间/h | 电导率/(s/m) |          |          |            |          |       |
|------|-----------|----------|----------|------------|----------|-------|
|      | 25 mg/mL  | 20 mg/mL | 15 mg/mL | 12.5 mg/mL | 10 mg/mL | 对照组   |
| 0    | 0.578     | 0.464    | 0.357    | 0.308      | 0.241    | 0.005 |
| 1    | 0.587     | 0.472    | 0.379    | 0.339      | 0.236    | 0.16  |
| 2    | 0.619     | 0.499    | 0.481    | 0.387      | 0.322    | 0.271 |
| 3    | 0.653     | 0.539    | 0.513    | 0.424      | 0.384    | 0.306 |
| 12   | 0.662     | 0.566    | 0.515    | 0.435      | 0.403    | 0.324 |
| 24   | 0.691     | 0.585    | 0.516    | 0.452      | 0.412    | 0.393 |
| 48   | 0.713     | 0.604    | 0.558    | 0.477      | 0.443    | 0.430 |

2.2.2 核酸和蛋白质泄露水平

(1) 核酸。如图1所示,牡丹皮乙醇提取物会导致黄瓜枯萎病菌菌丝体核酸的泄露。处理6 h,对照组核酸无明显泄露,而经牡丹皮乙醇提取物处理的菌丝体核酸泄露量明显上升,始终高于对照组。牡丹皮乙醇提取物浓缩液质量浓度为25 mg/mL时泄露量最高,表明牡丹皮乙醇提取物破坏了菌丝体细胞膜,促进了菌丝体内核酸的外泄,且随着质量浓度的上升,泄露量逐渐升高。

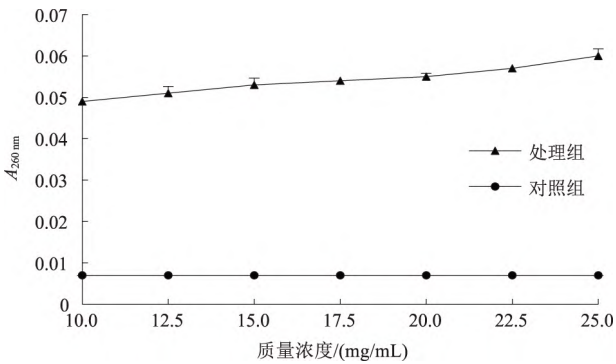


图 1 牡丹皮乙醇提取物对黄瓜枯萎病菌菌丝体核酸泄露的影响

(2) 蛋白质。如图2所示,牡丹皮乙醇提取物会导致黄瓜枯萎病菌菌丝体蛋白质的泄露。在牡丹皮乙醇提取物接触黄瓜枯萎病菌菌丝体6 h时,对照组蛋白质无明显泄露,而经牡丹皮乙醇提取物处理的菌丝体蛋白质泄露量明显上升,始终高于对照组。牡丹皮乙醇提取物浓缩液质量浓度为25 mg/mL时蛋白质泄露量最高,表明牡丹皮乙醇提取物破坏了菌丝体的细胞膜,促进了菌丝体内蛋白质的外泄,且随着牡丹皮乙醇提取物浓缩液质量浓度的上升,泄露量逐渐升高。

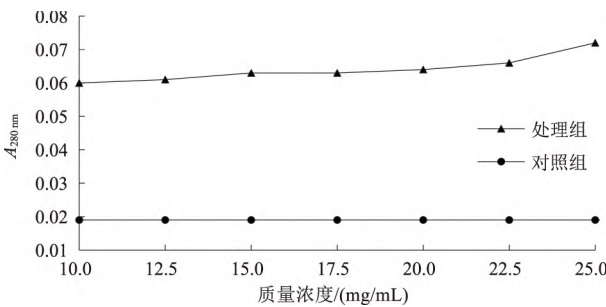


图 2 牡丹皮乙醇提取物对黄瓜枯萎病菌菌丝体蛋白质泄露的影响

2.3 菌丝形态

质量浓度为10.0 mg/mL的牡丹皮乙醇提取物浓缩液培养4 d之后,在40倍显微镜下观察菌丝形态(图3),发现处理组中的菌丝生长出现了膨胀畸变等现象(图3(a)),对照组的菌丝则生长正常,菌丝体细长且分枝较多,整体呈现光滑状态(图3(b)),说明处理组中药物对菌丝生长抑制作用较为明显。

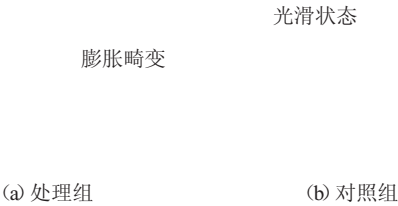


图 3 10.0 mg/mL 的牡丹皮提取物浓缩液对黄瓜枯萎病菌菌丝形态的影响(40 倍显微镜)

3 结语

本文研究了牡丹皮乙醇提取物对黄瓜枯萎病菌的活性抑制和机制。牡丹皮乙醇提取物在质量浓

度为10~25 mg/mL时,对黄瓜枯萎病菌具有不同程度的抑制作用,且随着质量浓度的升高抑菌作用不断增强,最小抑菌质量浓度为10.0 mg/mL。经质量浓度为25.0 mg/mL的牡丹皮乙醇提取物处理,黄瓜枯萎病菌菌落直径显著降低,48 h后其抑菌率为92.08%。通过光学显微镜观察发现,牡丹皮乙醇提取物处理后的黄瓜枯萎病菌菌丝体的形态和结构发生了褶皱、肿大畸形、断裂等现象,而空白对照组则是菌丝形态正常,生长旺盛,进一步证明了牡丹皮乙醇提取物对黄瓜枯萎病菌的抑制作用。

细胞膜是真菌组织结构的一部分,是细胞与周围环境进行物质交换和信息传递的通道和屏障,其通透性和完整性在细胞进行正常生理活动中具有重要的作用,细胞膜也是常见的抗真菌剂的重要作用靶标<sup>[15-16]</sup>。大量研究表明,真菌细胞膜是植物活性物质(活性物质不止包括抑菌活性物质,还可能包括其他)的重要作用靶位,植物抑菌活性物质能改变菌体细胞膜的稳定性,导致细胞膜结构受损,内含物外渗,从而达到杀菌或抑菌的效果<sup>[17-19]</sup>。

牡丹皮乙醇提取物对黄瓜枯萎病菌菌丝体的细胞膜有破坏作用,不同浓度牡丹皮乙醇提取物对黄瓜枯萎病菌电导率的上升幅度处理组比空白组大,可以推断牡丹皮乙醇提取物破坏了细胞膜结构的完整性,使得细胞膜通透性加大,且随着浓度的升高,细胞质离子稳态遭到破坏,电解质泄漏,电导率上升,细胞质膜的屏障损坏,造成内部一些重要的离子流出,并导致一些重要的酶失去作用,从而影响菌体的物质代谢和繁殖<sup>[20-21]</sup>。

260 nm和280 nm分别是核酸和蛋白质的特征波长,在处理6 h后,随着牡丹皮乙醇提取物浓缩液质量浓度的升高与作用时间的延长, $A_{260\text{ nm}}$ 、 $A_{280\text{ nm}}$ 显著升高,说明牡丹皮乙醇提取物与菌体细胞膜结合后,改变了细胞膜的结构,导致细胞质流失,引起细胞内核酸和蛋白质的泄露。

近年来,各种化学杀菌剂的大量使用,造成植物病原菌的抗药性增强且土壤板结、土壤盐碱化等诸多污染问题,绿色环保、安全高效的植物源性杀菌剂的开发逐渐成为植物保护领域研究的重点。

综上所述,牡丹皮乙醇提取物具备成为植物源杀菌剂的潜力。而对于牡丹皮其他溶剂提取物的抑菌活性、牡丹皮乙醇提取物对于不同作物病原菌是否具有更高的抑菌活性、牡丹其他部位的乙醇提取物抗菌活性效果以及在田间应用性等方面均有待进一步研究。

## 参考文献

- [1] JIN X, SHI Y J, WU F Z, et al. Inter-cropping of wheat changed cucumber rhizosphere bacterial community composition and inhibited cucumber Fusarium wilt disease[J]. Scientia Agricola, 2020, 77(5): 1-9.
- [2] 林中正, 魏润洁, 盛云泽, 等. 黄瓜枯萎病研究概述[J]. 北京农业, 2011(30): 91-92.
- [3] 杨侃侃, 刘晓虹, 陈宸, 等. 黄瓜枯萎病研究进展[J]. 湖南农业科学, 2019(6): 121-124.
- [4] 赵帅, 杜春梅, 田长彦. 黄瓜枯萎病综合防治技术研究进展[J]. 中国农学通报, 2014, 30(7): 254-259.
- [5] 梁祖珍, 潘玲华, 赵兵, 等. 3种砧木春季嫁接对黄瓜生长、品质与抗枯萎病的影响[J]. 南方园艺, 2014, 25(1): 7-8.
- [6] HAN L J, WANG Z Y, LI N, et al. Bacillus amyloliquefaciens B1408 suppresses Fusarium wilt in cucumber by regulating the rhizosphere microbial community[J]. Applied Soil Ecology, 2019, 136: 55-66.
- [7] 李晓菲, 徐政. 植物源杀菌剂研究进展[J]. 南方农业, 2018, 12(13): 40-42.
- [8] MEENA R B, MEENA S, CHITTORA D, et al. Antifungal efficacy of Thevetia peruviana leaf extract against Alternaria solani and characterization of novel inhibitory compounds by gas Chromatography-Mass Spectrometry analysis[J]. Biochemistry and Biophysics Reports, 2021, 25: DOI: 10.1016/j.bbrep.2021.100914.
- [9] 孟雅君. 蒲公英提取物对黄瓜枯萎病菌的抑制作用及抑菌机理研究[D]. 太原: 山西农业大学, 2013.
- [10] 朱秀荣, 王凤芝. 牡丹皮与云南赤丹皮的鉴别[J]. 中医药学报, 1993(3): 31.
- [11] 姜志虎. 牡丹皮的化学成分研究[D]. 沈阳: 沈阳药科大学, 2009.
- [12] 杨建宇, 李少荣, 范竹雯. 道地药材牡丹皮的研究近况[J]. 光明中医, 2020, 35(12): 1939-1942.
- [13] 朱立成, 王祥胜, 刘文, 等. 牡丹皮等16种中草药提取物抑制植物病原菌的研究[J]. 植物保护, 2007, 33(3): 83-86.
- [14] 翁甜, 王昱晴, 龙超安. 香叶醇对柑橘酸腐病菌的抑菌机制[J]. 食品科学, 2023, 44(1): 14-21.
- [15] 周梦娇, 万春鹏, 陈金印. 柑橘绿霉病中草药高效抑菌剂的筛选及抑菌机理研究[J]. 现代食品科技, 2014, 30(3): 144-149.
- [16] 曾志红, 陈玲苗, 黄秋蓉. 丁香提取物对枝孢霉菌的抑菌效果及抑菌机理[J]. 森林与环境学报, 2019, 39(1): 77-81.
- [17] MELZER M, EYKYN S J, GRANSDEN W R, et al. Is methicillin-resistant Staphylococcus aureus more virulent than methicillin susceptible S. aureus? A comparative cohort study of British patients with nosocomial infection and bacteremia [J]. Clinical Infectious Diseases, 2003, 37: 1453-1460.
- [18] KNIGHT G C, NICOL R S, McMEEKIN T A. Temperature step changes: a novel approach to control biofilms of Streptococcus thermophilus in a pilot plant-scale cheese-milk pasteurisation plant [J]. International Journal of Food Microbiology, 2004, 93: 305-318.
- [19] GUNDUZ G T, TUNCEL G. Biofilm formation in an ice cream plant [J]. International Journal of Food Microbiology, 2006, 89: 329-336.
- [20] 吴方丽. 丙烷脒对番茄灰霉病菌的抑菌机理初探[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2008.
- [21] 肖媛, 兆平, 春晓, 等.  $\epsilon$ -聚赖氨酸对柑橘酸腐菌的抑菌活性及作用机制[J]. 食品科学, 2020, 41(19): 221-229.

(责任编辑:胡新宇)