

# 生物杀菌剂对火龙果采后4株致病菌的防控研究

罗冬兰<sup>1</sup>, 王小岗<sup>2</sup>, 瞿光凡<sup>2</sup>, 赵治兵<sup>2</sup>, 巴良杰<sup>2\*</sup>

(1. 贵阳学院生物与环境工程学院, 贵州贵阳 550005) (2. 贵阳学院食品科学与工程学院, 贵州贵阳 550005)

**摘要:** 为明确生物杀菌剂对火龙果采后致病菌的防控作用, 通过测定苦参碱、中生菌素、春雷霉素、多抗霉素和井冈霉素5种生物源杀菌剂对火龙果4种致病菌[球黑孢菌(*Nigrospora sphaerica*)、尖孢镰刀菌(*Fusarium oxysporum*)、黑附球菌(*Epicoccum nigrum*)和新暗色柱节孢菌(*Neoscytalidium dimidiatum*)]的菌丝生长抑制率, 室内毒力、菌丝电导率和核酸泄露, 并进一步开展碘化丙啶染液(Propidium Iodide, PI)试验以探究生物药剂对致病菌细胞膜的损伤作用。结果表明: 生物杀菌剂质量浓度为3.00 g/L时, 中生菌素对火龙果黑附球菌菌丝生长抑制率为100%, 半最大效应浓度(Concentration for 50% of Maximal Effect, EC<sub>50</sub>)为0.59 g/L; 苦参碱对火龙果尖孢镰刀菌、球黑孢菌和新暗色柱节孢菌菌丝生长抑制率分别为90.93%、84.17%和87.80%, 其EC<sub>50</sub>值分别为0.94、0.71和0.62 g/L。经过PI染色试验表明, 5种生物试剂均对火龙果采后致病菌菌丝体细胞膜具有一定损伤作用。中生菌素和苦参碱对火龙果采后致病菌具有较好的抑制作用, 可作为火龙果采后致病菌生物防控药剂。该研究可为火龙果采后病害防治及田间生物药剂筛选提供一定理论依据。

**关键词:** 火龙果; 生物杀菌剂; 致病菌; 毒力测定

文章编号: 1673-9078(2024)12-119-133

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.12.1324

## Prevention and Control of Biofungicides on Four Postharvest Pathogenic Fungal Strains in Dragon Fruit

LUO Donglan<sup>1</sup>, WANG Xiaogang<sup>2</sup>, QU Guangfan<sup>2</sup>, ZHAO Zhibing<sup>2</sup>, BA Liangjie<sup>2\*</sup>

(1. College of Biology and Engineering of Environment, Guiyang University, Guiyang 550005, China)

(2. School of Food Science and Engineering, Guiyang University, Guiyang 550005, China)

**Abstract:** To clarify the prevention and control effect of five biofungicides (matrine, zhongshengmycin, kasugamycin, polymyxin, and validamycin) on postharvest pathogenic fungi of dragon fruit (*Hylocereus undatus*), this study aimed to determine the mycelial growth inhibition, laboratory virulence, mycelial conductivity, and nucleic acid leakage of four postharvest pathogenic fungal strains in dragon fruit (*Nigrospora sphaerica*, *Fusarium oxysporum*, *Epicoccum nigrum*, and *Neoscytalidium dimidiatum*) after treatment with the five biofungicides. In addition, propidium iodide (PI) staining test was conducted to investigate the damaging effect of biofungicides on the cell membranes of pathogenic fungi. The results showed that the inhibition rate of zhongshengmycin on the mycelial growth of *E. nigrum* was 100% at 3.00 g/L, and the

引文格式:

罗冬兰,王小岗,瞿光凡,等.生物杀菌剂对火龙果采后4株致病菌的防控研究[J].现代食品科技,2024,40(12):119-133.

LUO Donglan, WANG Xiaogang, QU Guangfan, et al. Prevention and control of biofungicides on four postharvest pathogenic fungal strains in dragon fruit [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(12): 119-133.

收稿日期: 2023-11-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(32160595); 贵州省科技成果应用及产业化计划项目[黔科中引地(2022)4051]; 贵州省第六批“千”层次创新型人才项目[筑科合同-GCC[2022]008]

作者简介: 罗冬兰(1991-),女,硕士,副教授,研究方向:食品科学与工程, E-mail: luodonglan1991@163.com

通讯作者: 巴良杰(1988-),男,博士,教授,研究方向:农产品贮藏与加工, E-mail: baliangjie@163.com

corresponding concentration for 50% of maximal effect ( $EC_{50}$ ) was 0.59 g/L. The inhibition rates of Picrasidine on the mycelial growth of *F. oxysporum*, *N. sphaerica*, and *N. dimidiatum* were 90.93, 84.17, and 87.80%, respectively, and the corresponding  $EC_{50}$  values were 0.94, 0.71 and 0.62 g/L, respectively. The PI staining test showed that the five biofungicides damaged the cell membranes of the mycelia of the pathogenic fungi in the postharvest *H. undatus*. Zhongshengmycin and Picrasidine had good inhibitory effects, making them adequate biofungicides for postharvest pathogenic fungi of dragon fruit. This study provides a theoretical basis for the prevention and control of postharvest diseases of *H. undatus* and the screening of biofungicides applicable to field production.

**Key words:** dragon fruit (*Hylocereus undatus*); biofungicide; pathogenic fungus; virulence determination

火龙果 (*Hylocereus undatus*) 又名红龙果、芝麻果、长寿吉祥果、青龙果、仙蜜果等, 是近年来广泛关注的一种新兴热带亚热带水果, 原产于中美洲热带沙漠地区, 属仙人掌科 (Cactaceae) 量天尺属 (*Hylocereus*) 和蛇鞭柱属 (*Seleniurus*) 植物<sup>[1,2]</sup>。火龙果作为典型的南方热带水果, 其外形独特, 果肉含有甜菜素、花青素、水溶性膳食纤维、酚类、黄酮和微量元素等, 具有一定的抗氧化能力, 深受消费者喜爱<sup>[1,3,4]</sup>。近年来, 随着火龙果种植面积的不断增长和种植年限增长, 其病害种类存在不断增多的现象, 严重影响果实的商品品质, 抑制了火龙果产业的健康发展<sup>[5]</sup>。火龙果采后贮藏易被病原菌侵染导致果实发病, 如串珠镰刀菌 (*Fusarium verticillioides*) 引起的火龙果软腐病<sup>[6]</sup>, 新暗色柱节孢菌 (*Neoscytalidium dimidiatum*) 引起火龙果溃疡病<sup>[7]</sup>, 镰刀菌 (*Fusarium*) 引发火龙果茎腐病及果腐病且被感染组织逐渐褐变软化, 果实表面凹陷, 严重时溃烂不堪<sup>[8]</sup>, 而乳白色菌落黑孢霉 (*Nigrospora lacticola*) 和球黑孢菌 (*Nigrospora sphaerica*) 主要导致火龙果发生赤斑病<sup>[9]</sup>。罗冬兰等<sup>[10]</sup>研究表明, 尖孢镰刀菌引起火龙果采后腐烂, Mohd 等<sup>[11]</sup>研究表明尖孢镰刀菌还引起火龙果植株枯萎病。当前, 火龙果作为贵州当地农民脱贫致富重要的经济作物, 是一种市场潜力巨大且经济效益好的新型水果<sup>[12]</sup>。软腐病、溃疡病、果腐病和赤斑病是火龙果采后主要病害且病害的发生致使火龙果经济效益大幅度下滑, 找寻绿色防控药剂迫在眉睫。

目前, 火龙果致病菌的防治主要有物理防治<sup>[13]</sup>、化学防治<sup>[14]</sup>、生物防治<sup>[15]</sup>和天然产物防治<sup>[16]</sup>等技术。化学防治技术是控制果蔬采后品质劣变、延长货架期的有效方法<sup>[17]</sup>, 因其高效、快速、方便等特点往往被高频使用, 但长期使用化学农药可能导致作物发生药害, 使人畜中毒, 误伤有益微生物, 诱导作物病原物产生抗药性<sup>[18]</sup>, 防治效果不佳且化学农药

停留时间长, 降解能力低、农残和环境污染等问题日益严重<sup>[19]</sup>。因此, 寻找一种绿色、安全、环保的生物防治方法尤为重要<sup>[20]</sup>。生物源杀菌剂是从生物活体产生的天然活性物质或由生物体代谢产物制成, 根据产生方式不同, 可分为生化生物农药、植物生物农药和微生物生物农药<sup>[21]</sup>。生物源杀菌剂相比化学农药, 大部分生物农药具有广谱性、在自然环境条件下能够降解 (有毒生物来源的除外)、低毒、低残留和不易产生抗药性等特点更加安全, 而且对生态环境的负面影响更小<sup>[22,23]</sup>。

本研究采用 5 种生物源杀菌剂对火龙果采后 4 种致病菌 [ 球黑孢菌 (*Nigrospora sphaerica*)、尖孢镰刀菌 (*Fusarium oxysporum*)、黑附球菌 (*Epicoccum nigrum*) 和新暗色柱节孢菌 (*Neoscytalidium dimidiatum*) ] 菌丝生长进行抑制, 并明确 5 种生物源杀菌剂对火龙果采后致病菌的毒力, 旨在为火龙果采后致病菌防治提供一定的理论参考和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

供试菌株: 课题组前期对贵州省罗甸县火龙果病果采用组织分离法进行病原菌分离、鉴定, 得出 4 种主要的致病菌为球黑孢菌 (*N. sphaerica*)、尖孢镰刀菌 (*F. oxysporum*)、黑附球菌 (*E. nigrum*) 和新暗色柱节孢菌 (*N. dimidiatum*)<sup>[10]</sup>。

马铃薯葡萄糖琼脂培养基 (Potato Dextrose Agar, PDA), 上海博微生物科技有限公司; 碘化丙啶染液 (Propidium Iodide, PI), 翌圣生物科技 (上海) 股份有限公司; 马铃薯葡萄糖琼脂培养基 (Potato Dextrose Broth, PDB)、磷酸二氢钾、磷酸氢二钾、磷酸缓冲溶液 (Phosphate Buffer Saline, PBS, pH 值 7.0) 缓冲液, 上海博微生物科技有限公司。

本研究所用的药剂种类 0.5 wt.% 苦参碱水剂,

北京三浦百草绿色植物制剂有限公司；3 wt.% 中生菌素可湿性粉剂，福建凯立生物制品有限公司；4 wt.% 春雷霉素水剂，陕西麦可罗生物科技有限公司；10 wt.% 多抗霉素可湿性粉剂，日本科研制药株式会社；28 wt.% 井冈霉素可溶粉剂，汉科诺生物科技股份有限公司。药剂质量浓度均为1.00、1.50、2.00、2.50和3.00 g/L。

## 1.2 仪器设备

SW-CJ-1D 超净工作台，上海苏净实业有限公司；YM50 压力蒸汽灭菌锅，上海三申医疗器械有限公司；LRH-250F 生化培养箱，上海一恒科学仪器有限公司。

## 1.3 实验方法

### 1.3.1 菌丝生长速率

供试菌株提前一周活化培养备用。采用菌丝生长速率法<sup>[24]</sup>测定生物杀菌剂对火龙果采后4种致病菌（球黑孢菌、尖孢镰刀菌、黑附球菌和新暗色柱节孢菌）的菌丝生长抑制率。将仪器（100 mL 锥形瓶、接种针、5 mm 的打孔器）和含培养基的溶液经过120℃高温灭菌20 min后于恒温箱（55~60℃）保存备用。称取不同质量的供试药剂装入15 mL离心管，待培养基灭菌结束后将药剂溶入培养基中，水平震荡数次制成不同质量浓度的含药培养基，同时制成不含药剂的空白对照（CK），每个培养皿中倒入约20 mL培养基溶液，室温冷却凝固，每个质量浓度重复3次。将已经培养好的菌株用5 mm打孔器取若干菌饼，分别接种到不同质量浓度的含药培养皿正中央，包括对照（CK），重复3次。接种好的4株供试菌株置于（27±0.5）℃恒温培养箱中培养，待对照（CK）长满时，采用交叉法测量菌落直径，抑菌率计算如公式（1）。

$$A = \frac{M - M_1}{M} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

A——抑制率，%；

M——对照菌落直径；

M<sub>1</sub>——处理菌落直径。

### 1.3.2 生物药剂对4种病原菌细胞膜完整性和通透性的影响

#### 1.3.2.1 PI荧光染色

将菌饼接种于20 mL PDB 液体培养基中，于（27±0.5）℃的恒温振荡培养箱中培养12 h后，将

不同质量浓度的生物试剂（0、1.50、3.00 g/L）加入培养基中继续培养。在8 h后取适量菌丝体于新玻璃培养皿中，用PBS磷酸缓冲液清洗菌丝3次，随后，滴加20 μL的PI染液在室温黑暗条件下进行菌丝染色（10 min）。最后，取少量菌丝体于新的载玻片上用PBS缓冲溶液清洗多余PI染料，盖上盖玻片，置于荧光显微镜下观察。

#### 1.3.2.2 电导率测定

将活化后的菌制成菌饼接种于PDB液体培养基中，在摇床中以150 r/min的转速（27±0.5）℃恒温振荡培养12 h（菌丝生长旺盛）。在液体培养基中加入不同质量浓度的生物试剂（0、1.50、3.00 g/L）继续培养。分别于0、4、8 h收集菌丝体于含无菌水10 mL的50 mL离心管中，涡旋振荡数次至充分摇匀，电导率用电导率仪测定。无菌水标记为空白对照。每组平行测定三次。

#### 1.3.2.3 菌核酸泄露测定

将菌种活化24 h后制成菌饼接种于PDB液体培养基中，并在摇床中（27±0.5）℃，150 r/min条件下振荡培养至对数生长期（12 h）。处理组用药剂处理，使其质量浓度分别为0、1.50和3.00 g/L。分别于0、4和8 h收集菌丝制成菌丝浑浊液，用涡旋仪震荡数次，再用离心机在6 000 r/min，4℃条件下离心10 min，弃沉淀，取离心管中上清液3 mL，用紫外分光光度计测定上清液在260 nm处的OD<sub>260</sub>值。

## 1.4 数据处理

利用Excel 2021软件将药剂质量浓度对数（以10为底的对数）作为自变量X，抑菌率对应的几率值作为因变量Y，求出毒力方程。根据毒力方程计算出半最大效应浓度（Concentration for 50% of Maximal Effect, EC<sub>50</sub>）值。利用GraphPad prism 8软件对抑制率进行显著性差异检验。GraphPad prism 8对数据进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 5种生物源杀菌剂对火龙果球黑孢菌的抑制作用

由表1可知，0.5 wt.% 苦参碱质量浓度为1.00~3.00 g/L时，对火龙果球黑孢菌的抑菌率为61.60%~84.17%；3 wt.% 中生菌素质量浓度为1.00~3.00 g/L时，抑菌率为43.59%~79.76%；4 wt.% 春雷霉素质量浓度为1.00~3.00 g/L时，抑菌率为41.85%~81.22%；10 wt.% 多抗霉素质量浓度为1.00~3.00 g/L时，抑菌率为

37.1%~79.76%；28 wt% 井冈霉素质量浓度为 1.00~3.00 g/L 时，抑菌率为 15.67%~77.64%。0.5 wt% 苦参碱质量浓度为 3.00 g/L 时对火龙果球黑孢菌菌丝生长抑制效果最好；4 wt% 春雷霉素、3 wt% 中生菌素和 10 wt% 多抗霉素对其抑制效果次之；28 wt% 井冈霉素对火龙果球黑孢菌的抑制效果最差。研究发现，内生芽孢杆菌 (*Bacillus* spp) 的 *B. cereus* GUCC4 和 *B. cereus* GUCC3 可以抑制球黑孢菌的生长并显著降低球黑孢菌引起百香果叶枯病的发病率，分别降低了 32.69%、36.16%<sup>[25]</sup>。本试验中，球黑孢菌抑制率随着生物杀菌剂质量浓度呈现浓度依赖性，苦参碱和春雷霉素均对球黑孢菌达到明显抑制效果（见图 1）。结果说明，球黑孢菌对生物杀菌剂敏感，生物杀菌剂能够发挥较好作用，从而起到抑菌作用。

表 1 5 种生物杀菌剂对火龙果球黑孢菌的抑制效果

Table 1 Inhibition effects of 5 kinds of biological fungicides on *Hylocereus undatus* fruit *N. sphaerica*

生物杀菌剂	质量浓度/(g/L)	菌落直径/mm	抑菌率/%
0.5% 苦参碱水剂	1.00	35.72 ± 1.00	61.60 ± 1.25
	1.50	31.33 ± 1.28	67.09 ± 1.60
	2.00	28.64 ± 2.07	70.45 ± 2.59
	2.50	20.33 ± 1.13	80.84 ± 1.41
	3.00	17.66 ± 0.50	84.17 ± 0.63
3% 中生菌素可湿性粉剂	1.00	50.13 ± 1.90	43.59 ± 2.37
	1.50	42.53 ± 1.49	53.09 ± 1.86
	2.00	40.85 ± 2.08	55.19 ± 2.60
	2.50	27.15 ± 0.39	72.31 ± 0.49
4% 春雷霉素水剂	1.00	51.52 ± 7.70	41.85 ± 9.62
	1.50	37.76 ± 4.77	59.05 ± 5.96
	2.00	33.10 ± 3.35	65.20 ± 3.02
	2.50	23.53 ± 0.76	76.84 ± 0.95
10% 多抗霉素可湿性粉剂	1.00	20.02 ± 1.67	81.22 ± 2.09
	1.50	55.32 ± 1.23	37.10 ± 1.53
	1.50	43.53 ± 1.18	51.84 ± 1.48
	2.00	39.11 ± 1.52	57.37 ± 1.90
28% 井冈霉素可溶性粉剂	2.50	22.94 ± 1.53	77.58 ± 1.92
	3.00	21.19 ± 0.09	79.76 ± 0.11
	1.00	72.47 ± 0.38	15.67 ± 0.47
	1.50	70.03 ± 0.43	18.71 ± 0.54
CK	2.00	60.56 ± 9.15	30.55 ± 11.43
	2.50	36.81 ± 3.41	60.24 ± 4.26
	3.00	22.89 ± 1.47	77.64 ± 1.84
CK	85		

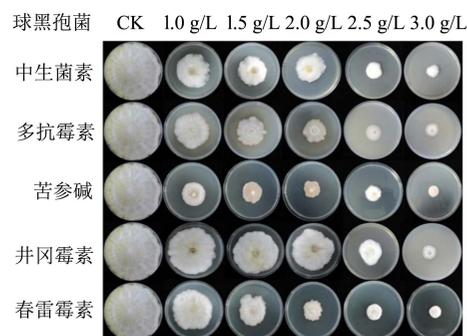


图 1 生物杀菌剂对火龙果球黑孢菌的抑制效果

Fig.1 Inhibition effect of biofungicides on *N. sphaerica* of *Hylocereus undatus* fruit

## 2.2 5 种生物源杀菌剂对火龙果尖孢镰刀菌的抑制作用

表 2 5 种生物杀菌剂对火龙果尖孢镰刀菌的抑制效果

Table 2 Inhibition effects of 5 kinds of biological fungicides on *Hylocereus undatus* fruit *F. oxysporum*

生物杀菌剂	质量浓度/(g/L)	菌落直径/mm	抑菌率/%
0.5% 苦参碱水剂	1.00	37.18 ± 1.69	59.77 ± 2.12
	1.50	33.00 ± 0.51	65.00 ± 0.64
	2.00	32.66 ± 0.60	65.43 ± 0.75
	2.50	14.34 ± 1.28	88.32 ± 1.60
	3.00	12.26 ± 0.23	90.93 ± 0.29
3% 中生菌素可湿性粉剂	1.00	42.73 ± 6.77	52.83 ± 8.47
	1.50	40.71 ± 0.97	55.36 ± 1.21
	2.00	33.45 ± 1.24	64.43 ± 1.54
	2.50	8.58 ± 0.36	95.53 ± 0.46
4% 春雷霉素水剂	3.00	6.89 ± 0.25	97.63 ± 0.31
	1.00	70.15 ± 4.39	18.57 ± 5.48
	1.50	57.24 ± 8.86	34.71 ± 11.07
	2.00	45.72 ± 1.91	49.11 ± 2.39
10% 多抗霉素可湿性粉剂	2.50	26.70 ± 1.12	72.87 ± 1.39
	3.00	23.14 ± 0.64	77.32 ± 0.80
	1.00	65.46 ± 1.74	24.42 ± 2.17
	1.50	59.20 ± 5.45	32.25 ± 6.81
28% 井冈霉素可溶性粉剂	2.00	55.61 ± 5.85	36.74 ± 7.31
	2.50	17.13 ± 0.17	84.84 ± 0.22
	3.00	15.29 ± 0.23	87.13 ± 0.29
	1.00	75.50 ± 1.90	11.88 ± 2.38
CK	1.50	74.35 ± 0.00	13.31 ± 0.00
	2.00	65.57 ± 3.38	24.29 ± 4.23
	2.50	25.10 ± 0.66	74.88 ± 0.82
3.00	19.74 ± 2.20	81.58 ± 2.75	
CK	85		

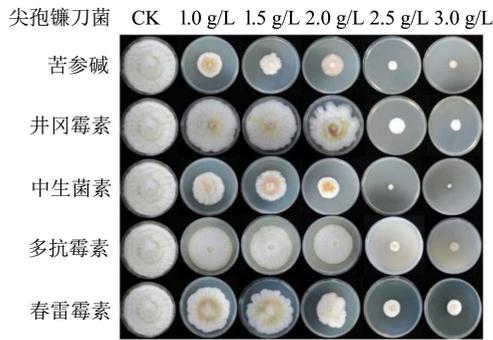


图2 生物杀菌剂对火龙果尖孢镰刀菌的抑制效果  
Fig.2 Inhibition effect of biofungicides on *F. oxysporum* of *Hylocereus undatus* fruit

由表2可知, 0.5% 苦参碱质量浓度为 1.00~3.00 g/L 时, 对火龙果尖孢镰刀菌抑菌率为 56.26%~85.58%; 3% 中生菌素质量浓度为 1.00~3.00 g/L 时, 抑菌率为 52.83%~97.63%; 4% 春雷霉素质量浓度为 1.00~3.00 g/L 时, 抑菌率为 18.57%~77.32%; 10% 多抗霉素质量浓度为 1.00~3.00 g/L 时, 抑菌率为 24.42%~87.13%; 28% 井冈霉素质量浓度为 1.00~3.00 g/L 时, 抑菌率为 11.88%~81.58%。3% 中生菌素质量浓度为 3.00 g/L 时对火龙果尖孢镰刀菌菌丝生长抑制效果最好; 10% 多抗霉素, 0.5% 苦参碱和 28% 井冈霉素对其抑制效果次之; 4% 春雷霉素对火龙果尖孢镰刀菌的抑制效果最差(见图2)。王帅<sup>[26]</sup>研究6种生物杀菌剂对苹果腐烂致病菌苹果黑腐皮壳属真菌(*Valsa mali*)的抑制作用, 结果表明中生菌素能较好地抑制苹果腐烂病菌 *Valsa mali* 菌丝生长。随后开展了包含中生菌素在内10种生物杀菌剂对苹果 *Valsa mali* 的毒力测定, 表明中生菌素具有明显的防控效果, 与本研究所得结果一致<sup>[27]</sup>。目前, 镰刀菌属所引起火龙果果腐病的生物防治鲜见报道<sup>[28]</sup>。

### 2.3 5种生物源杀菌剂对火龙果黑附球菌的抑制作用

由表3可知, 0.5% 苦参碱质量浓度为 1.00~3.00 g/L 时, 对火龙果黑附球菌抑菌率为 56.17%~85.48%; 3% 中生菌素质量浓度为 1.00~3.00 g/L 时, 抑菌率为 90.89%~100%; 4% 春雷霉素质量浓度为 1.00~3.00 g/L 时, 抑菌率为 32.96%~63.88%; 10% 多抗霉素质量浓度为 1.00~3.00 g/L 时, 抑菌率为 18.72%~78.19%; 28% 井冈霉素质量浓度为 1.00~3.00 g/L 时, 抑菌率为 6.35%~60.58%。3% 中生菌素质量浓度为 3.00 g/L 时对火龙果黑附球菌菌丝生长抑制效果最好; 0.5% 苦参碱、10% 多抗霉素和 4% 春雷霉素对其抑制效

果次之; 28% 井冈霉素对火龙果黑附球菌的抑制效果最差(见图3)。黑附球菌的生物防治措施鲜见相关报道。

表3 5种生物杀菌剂对火龙果黑附球菌的抑制效果  
Table 3 Inhibition effects of 5 kinds of biological fungicides on *Hylocereus undatus* fruit *E. nigrum*

生物杀菌剂	质量浓度/(g/L)	菌落直/mm	抑菌率/%
0.5% 苦参碱水剂	1.00	40.07 ± 1.02	56.17 ± 1.28
	1.50	37.12 ± 1.23	59.85 ± 1.54
	2.00	35.41 ± 0.46	61.99 ± 0.58
	2.50	17.16 ± 0.38	84.80 ± 0.48
	3.00	16.62 ± 0.09	85.48 ± 0.11
3% 中生菌素可湿性粉剂	1.00	12.29 ± 0.03	90.89 ± 0.03
	1.50	9.58 ± 1.63	94.28 ± 2.03
	2.00	8.37 ± 4.46	95.78 ± 1.82
	2.50	6.01 ± 0.04	98.74 ± 0.05
4% 春雷霉素水剂	1.00	58.63 ± 1.63	32.96 ± 2.04
	1.50	56.23 ± 0.43	35.96 ± 0.53
	2.00	52.06 ± 0.78	41.17 ± 0.97
	2.50	35.92 ± 1.20	61.35 ± 1.50
10% 多抗霉素可湿性粉剂	1.00	33.90 ± 0.32	63.88 ± 0.41
	1.50	70.03 ± 1.92	18.72 ± 2.40
	1.50	68.61 ± 1.62	20.49 ± 2.03
	2.00	65.52 ± 1.11	24.36 ± 1.39
28% 井冈霉素可溶粉剂	2.50	27.35 ± 0.91	72.06 ± 1.14
	3.00	22.45 ± 0.38	78.19 ± 0.48
	1.00	79.92 ± 0.42	6.35 ± 0.53
	1.50	78.49 ± 0.39	8.14 ± 0.48
28% 井冈霉素可溶粉剂	2.00	75.28 ± 0.16	12.15 ± 0.20
	2.50	39.24 ± 0.88	57.20 ± 1.10
	3.00	36.53 ± 0.35	60.58 ± 0.43
CK		85	

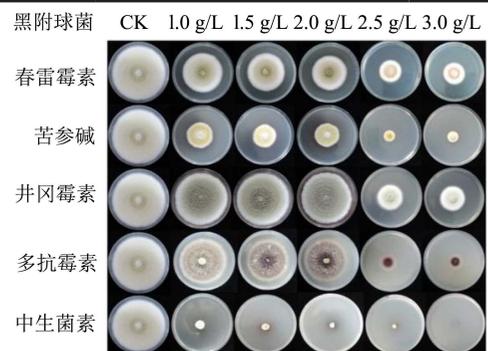


图3 生物杀菌剂对火龙果黑附球菌的抑制效果  
Fig. 3 Inhibition effect of biofungicides on *E. nigrum* of *Hylocereus undatus* fruit

### 2.4 5种生物源杀菌剂对火龙果新暗色柱节孢菌的抑制作用

表 4 5种生物杀菌剂对火龙果新暗色柱节孢菌的抑制效果  
Table 4 Inhibition effects of 5 kinds of biological fungicides on *Hylocereus undatus* fruit *N. dimidiatum*

生物杀菌剂	质量浓度/(g/L)	菌落直径/mm	抑菌率/%
0.5% 苦参碱水剂	1.00	31.45 ± 1.05	66.94 ± 1.31
	1.50	30.94 ± 4.32	67.58 ± 5.40
	2.00	27.50 ± 1.11	71.87 ± 1.39
	2.50	19.94 ± 0.59	81.33 ± 0.74
	3.00	14.76 ± 0.57	87.80 ± 0.71
3% 中生菌素可湿性粉剂	1.00	12.28 ± 0.00	90.90 ± 0.00
	1.50	8.44 ± 1.16	95.70 ± 1.45
	2.00	5.66 ± 0.41	99.17 ± 0.51
	2.50	5.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00
4% 春雷霉素水剂	1.00	72.56 ± 1.53	15.55 ± 1.91
	1.50	69.27 ± 1.66	19.66 ± 2.07
	2.00	62.84 ± 2.38	27.70 ± 2.98
	2.50	58.11 ± 1.34	33.61 ± 1.68
10% 多抗霉素可湿性粉剂	3.00	53.78 ± 0.74	39.02 ± 0.93
	1.00	59.62 ± 4.07	31.73 ± 5.09
	1.50	50.18 ± 2.73	43.53 ± 3.41
	2.00	46.06 ± 1.39	48.68 ± 1.74
28% 井冈霉素可溶性粉剂	2.50	32.05 ± 1.37	66.19 ± 1.72
	3.00	23.65 ± 1.98	76.69 ± 2.47
	1.00	85.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
	1.50	85.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
28% 井冈霉素可溶性粉剂	2.00	85.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
	2.50	85.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
	3.00	85.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
CK		85	

注：CK（85）表示对照组接种的菌落直径已经长满培养皿，培养皿直径为 85 mm。

由表 4 可知，0.5% 苦参碱质量浓度为 1.00~3.00 g/L 时，对火龙果新暗色柱节孢菌抑菌率为 66.94%~87.80%；3% 中生菌素质量浓度为 1.00~3.00 g/L 时，抑菌率为 90.90%~100%；4% 春雷霉素质量浓度为 1.00~3.00 g/L 时，抑菌率为 15.55%~39.02%；10% 多抗霉素质量浓度为 1.00~3.00 g/L 时，抑菌率为 31.73%~76.69%；28% 井冈霉素质量浓度为 1.00~3.00 g/L 时，抑菌率为 0。3% 中生菌素质量浓度为 3.00 g/L 时对火龙果新暗色柱节孢菌菌丝生长抑制效果最好；0.5% 苦

参碱、10% 多抗霉素和 4% 春雷霉素对其抑制效果次之；28% 井冈霉素对火龙果新暗色柱节孢菌的抑制效果最差，并且在 1.00~3.00 g/L 的质量浓度梯度之间无法抑制火龙果新暗色柱节孢菌菌丝生长，说明该菌对 28% 井冈霉素极不敏感（见图 4）。目前，针对新暗色柱节孢菌防控主要采取苯醚甲环唑、咪鲜胺、苯甲丙环唑、克菌戊唑醇、吡唑醚菌酯和甲基硫菌灵等化学剂进行防控<sup>[29]</sup>。鲜见相关生物药剂的防控研究。

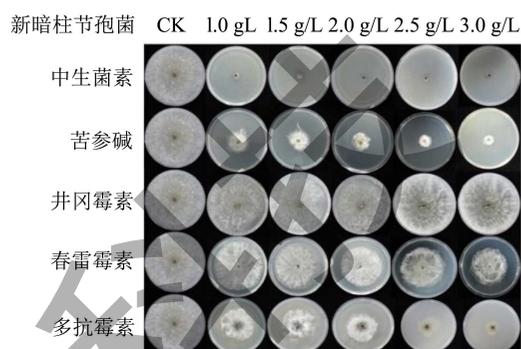


图 4 生物杀菌剂对火龙果新暗色柱节孢菌的抑制效果

Fig.4 Inhibition effect of biofungicides on *N. dimidiatum* of *Hylocereus undatus* fruit

### 2.5 生物杀菌剂对火龙果采后致病菌的抑制效果

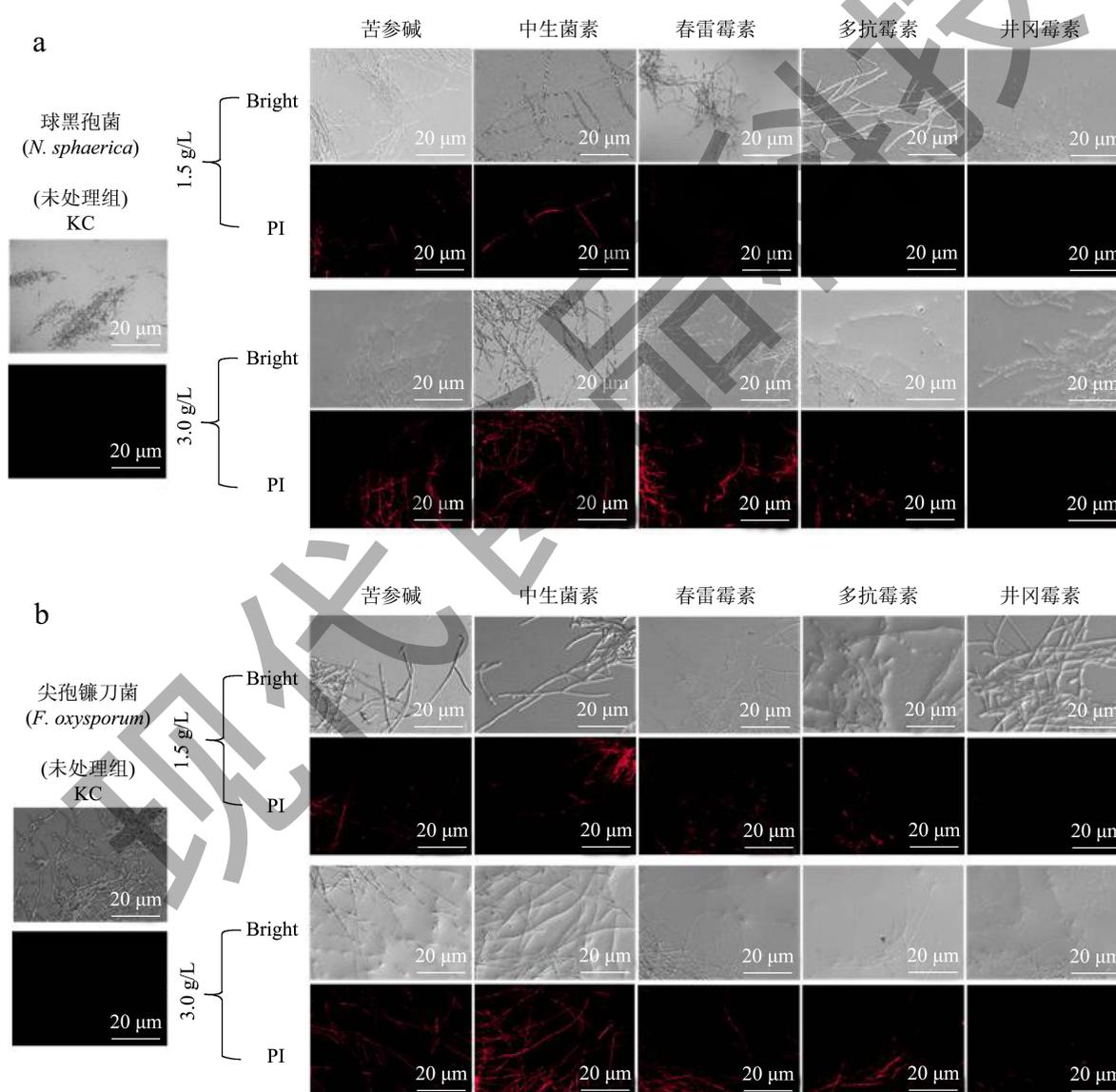
表 5 为 5 种生物源杀菌剂（质量浓度均为 3.00 g/L）对火龙果采后 4 种致病菌菌丝生长抑制率，其中中生菌素对火龙果采后 4 种致病菌的抑制效果显著于其他供试药剂（ $P < 0.05$ ），其对火龙果黑附球菌和新暗色柱节孢菌的抑制率为 100%；其次是对尖孢镰刀菌的抑制率为 97.63%，抑制效果明显低于前者；中生菌素对火龙果球黑孢菌的抑制效果最差，抑制率为 79.76%。苦参碱对火龙果尖孢镰刀菌、新暗色柱节孢菌，黑附球菌和球黑孢菌的抑制率分别为 90.93%、87.80%，85.48% 和 84.17%；多抗霉素对火龙果尖孢镰刀菌、球黑孢菌、黑附球菌和新暗色柱节孢菌致病菌的抑制效果依次为 87.13%、79.76%、78.19% 和 76.69%，对尖孢镰刀菌抑制效果较好；春雷霉素对火龙果球黑孢菌、尖孢镰刀菌、黑附球菌和新暗色柱节孢菌致病菌的抑制率分别为 81.22%、77.32%、63.88 和 39.02%，其中对火龙果新暗色柱节孢菌的抑制效果最差。井冈霉素对火龙果采后致病菌尖孢镰刀菌的抑制效果最好，抑制率为 81.58%；对火龙果新暗色柱节孢菌抑制效果最差且在该浓度梯度之下，井冈霉素无法抑制该菌菌丝生长。

表 5 生物杀菌剂对火龙果采后致病菌的抑制率 (%)

Table 5 Inhibitory rates of biofungicides against postharvest pathogenic fungi of *Hylocereus undatus* fruit (%)

生物杀菌剂	球黑孢菌	尖孢镰刀菌	黑附球菌	新暗色柱节孢菌
0.5% 苦参碱水剂	84.17 ± 0.63 <sup>a</sup>	90.93 ± 0.29 <sup>b</sup>	85.48 ± 0.11 <sup>b</sup>	87.80 ± 0.71 <sup>b</sup>
3% 中生菌素可湿性粉剂	79.76 ± 2.58 <sup>a</sup>	97.63 ± 0.31 <sup>a</sup>	100.00 ± 0.00 <sup>a</sup>	100.00 ± 0.00 <sup>a</sup>
4% 春雷霉素水剂	81.22 ± 2.09 <sup>a</sup>	77.32 ± 0.80 <sup>c</sup>	63.88 ± 0.41 <sup>d</sup>	39.02 ± 0.93 <sup>d</sup>
10% 多抗霉素可湿性粉剂	79.76 ± 0.11 <sup>a</sup>	87.13 ± 0.29 <sup>c</sup>	78.19 ± 0.48 <sup>c</sup>	76.69 ± 2.47 <sup>c</sup>
28% 井冈霉素可溶粉剂	77.64 ± 1.84 <sup>b</sup>	81.58 ± 2.75 <sup>d</sup>	60.58 ± 0.43 <sup>c</sup>	0.00 ± 0.00 <sup>c</sup>

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。



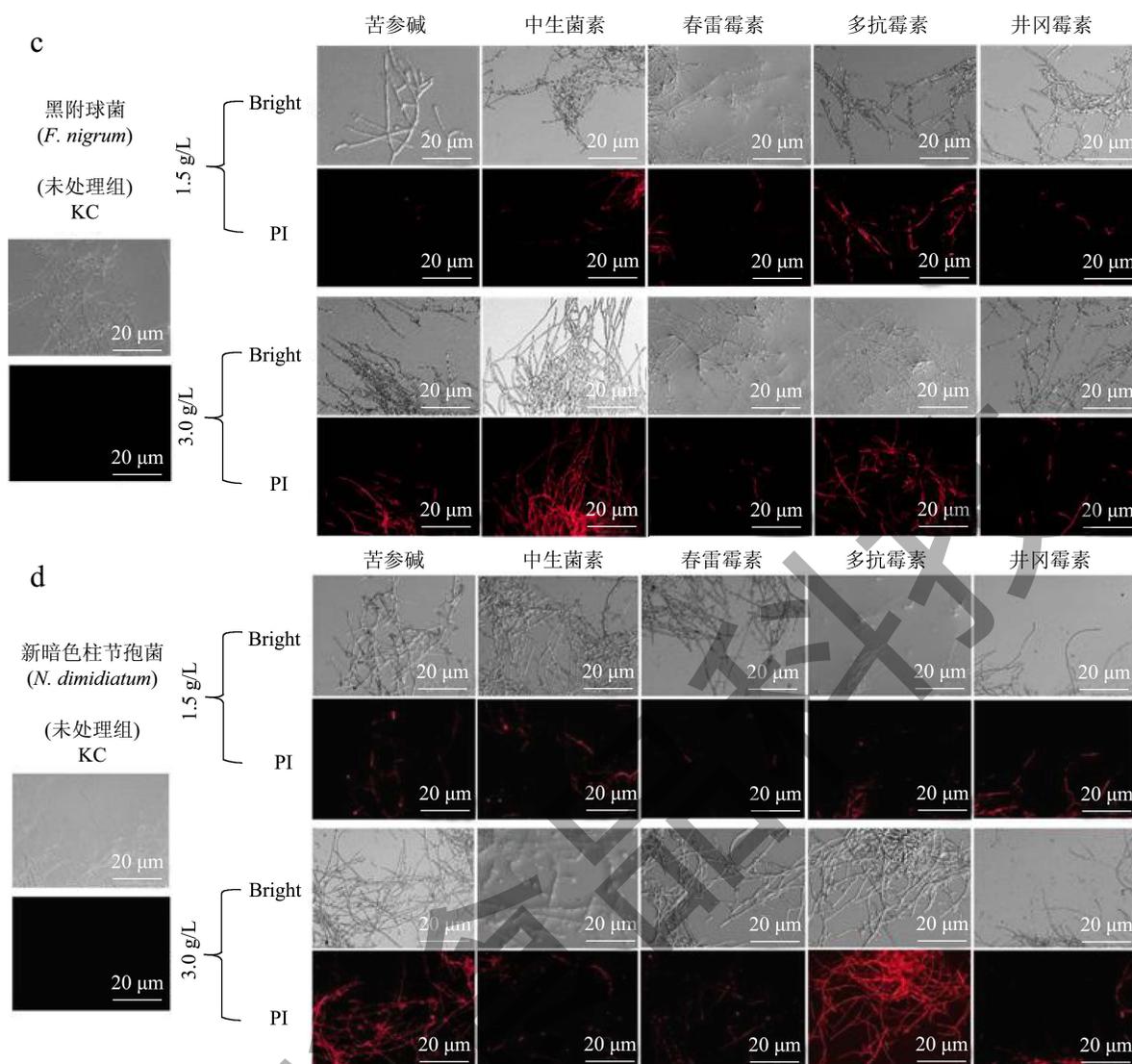


图5 生物药剂处理4株致病菌的荧光显微镜观察(40×)

Fig.5 Fluorescence microscope observation of 4 pathogenic fungi treated with biological agents (40×)

注：光学镜头下的菌（Bright），荧光下的菌（PI）。

## 2.6 生物药剂对4种病原菌细胞膜完整性和通透性的影响

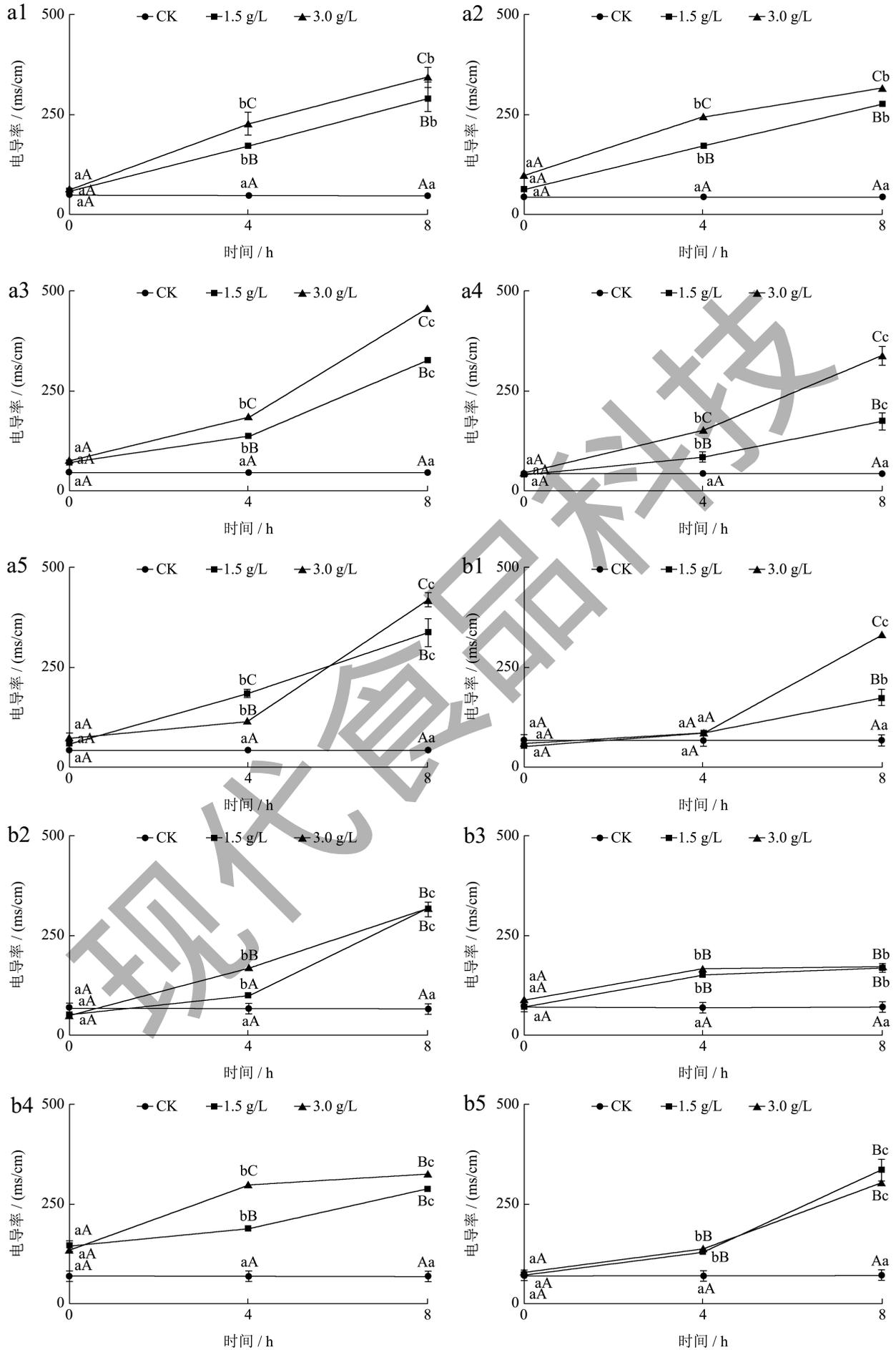
### 2.6.1 PI荧光染色

细胞膜如果被损伤，在经过PI染色后在荧光显微镜下观察发出红色荧光。将质量浓度为0、1.50和3.00 g/L的5种生物药剂处理火龙果4株病原菌，通过PI溶液染色和荧光显微镜下观察得到如图5所示，从图中可以看出生物杀菌剂对病原菌细胞膜完整性的损伤作用且PI染色效果明显，红色荧光强度反映细胞膜的损伤程度。没有经过生物药剂处理的细胞膜具有良好的完整性，生物药剂通过破坏真菌细胞膜而发挥控制菌丝扩展生长。

### 2.6.2 电导率的测定

细胞膜是细胞的重要保护屏障，是物质交换的

重要场所具有选择透过性。胞内电解质如 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{K}^{+}$ 、 $\text{Na}^{+}$ 是细胞渗透压和酸碱平衡的重要支撑，维持了细胞的正常稳态。如图6所示，电导率值大小代表着溶液中离子强度，当细胞处于逆境时，细胞膜可能被破坏，从而改变细胞膜通透性，胞内部分电解质泄漏，溶液中离子强度发生改变，通过电导率的改变在一定程度上反映了细胞膜透性的改变<sup>[30]</sup>。因此可以通过测定病原菌的电导率变化反映细胞膜通透性的变化。如图6所示，对照组保持相对稳定的状态，但经过5种生物药剂处理后电导率发生明显变化且电导率随浓度呈依赖性效应。生物杀菌剂处理致病菌菌导致电导率、核酸泄露量增加，表明生物杀菌剂处理提高了致病菌细胞膜的通透性，离子流紊乱，致使电导率提高<sup>[31]</sup>。



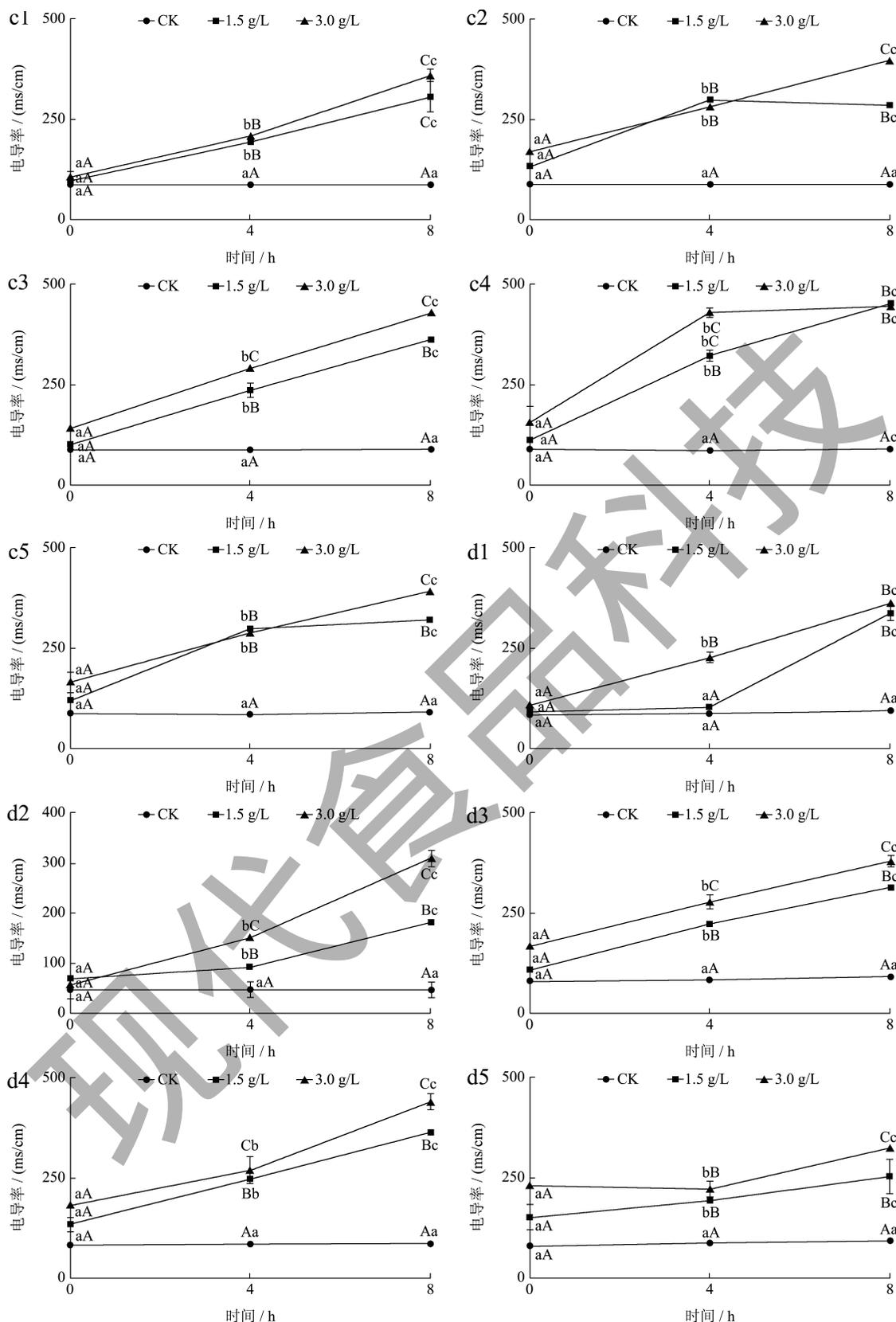
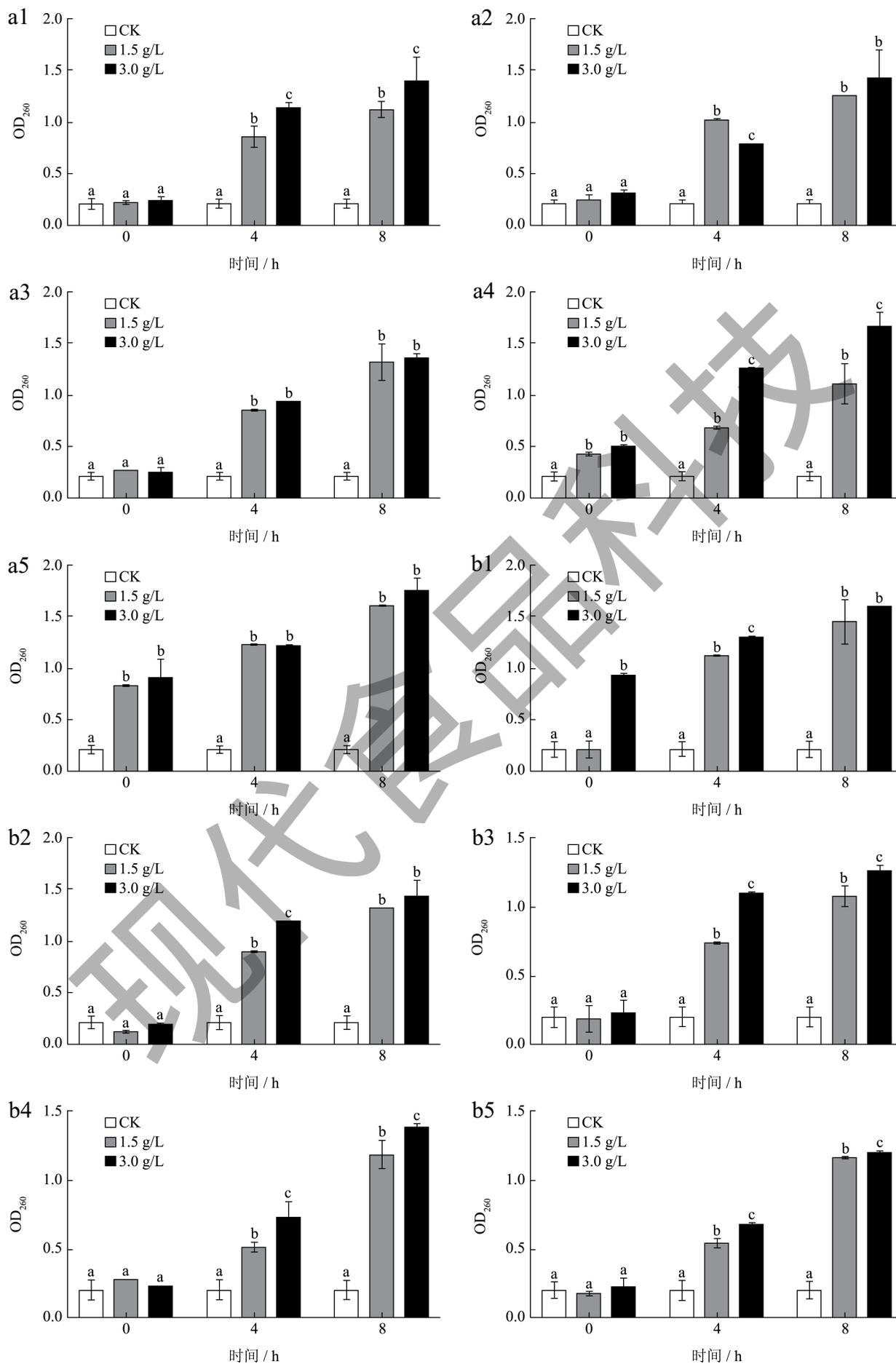


图 6 生物药剂对火龙果 4 株致病菌电导率的影响

Fig.6 Effect of biological agents on the conductivity of four pathogenic fungi in *Hylocereus undatus*

注: a 为球黑孢菌 (*Nigrospora sphaerica*), b 为尖孢镰刀菌 (*Fusarium oxysporum*), c 为黑附球菌 (*Epicoccum nigrum*), d 为新暗色柱节孢菌 (*Neoscytalidium dimidiatum*)。下标 1 为苦参碱, 2 为中生菌素, 3 为春雷霉素, 4 为多抗霉素, 5 为井冈霉素。图 7 同。图中小写字母表示同一处理不同时间的显著性差异 ( $P < 0.05$ ); 大写字母不同表示处理在相同时间内的显著性差异 ( $P < 0.05$ )。



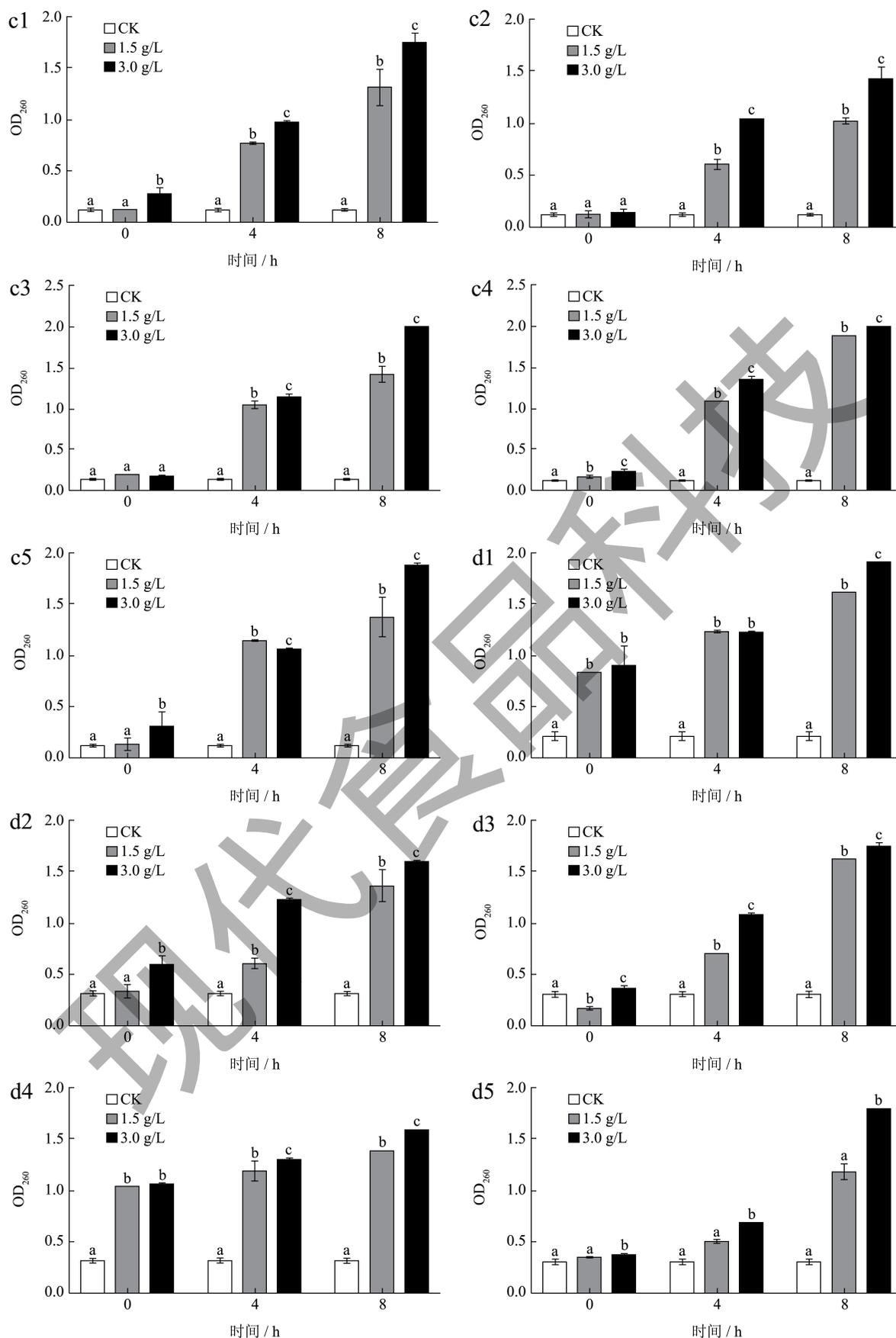


图7 生物药剂处理后4种菌 OD<sub>260</sub> 的变化

Fig.7 Changes of OD<sub>260</sub> of four strains after treatment with biological agents

注: 不同小写字母表示不同处理之间的差异显著 ( $P < 0.05$ )。

2.6.3 病原菌核酸泄露的测定

细胞膜的完整性为菌体的正常生理代谢提供了重要保障,生物药剂处理菌体后,菌体处于非适宜生长环境中,菌体细胞膜完整性被破坏或者造成死亡,细胞重要组成成分外泄,从而影响菌体的正常生长代谢。核酸在波长 260 nm 处有很强的紫外吸收,通过测定在波长 260 nm 处生物药剂处理的病原菌的光密度变化来反映核酸泄露情况。

图 7 可以获得,CK 组在 0~8 h 无明显变化,处理 0 h 时处理组和对照组的 OD<sub>260</sub> 无明显差异,核酸几乎没有泄露,这表明细胞膜受到轻微损伤或无损伤。但当生物药剂(1.50、3.00 g/L)处理时间延长至 4~8 h 后,菌液的 OD<sub>260</sub> 显著高于空白对照组,这表明经过生物药剂处理菌丝体后慢慢破坏细胞膜结构导致了核酸泄露。在经过 8 h 后,核酸大量泄露,说明经生物药剂处理可能破坏了病原菌的脂质层,破坏了细胞膜,导致膜内外电势失衡,膜通透性增加,从而体现了在波长 260 nm 处具有明显的紫外吸收光值<sup>[32]</sup>。

2.7 5种生物源杀菌剂对火龙果球黑孢菌的毒力测定

表 6 5种生物药剂对火龙果球黑孢菌室内毒力测定

Table 6 Determination of indoor virulence of five biological agents on *Hylocereus undatus* fruit *N. sphaerica*

生物杀菌剂	毒力回归方程	相关系数 (r <sup>2</sup> )	EC <sub>50</sub> (g/L)
0.5% 苦参碱水剂	Y=1.497X+0.732	0.906 6	0.71
3% 中生菌素可湿性粉剂	Y=2.031X+1.349 8	0.884 7	1.34
4% 春雷霉素水剂	Y=2.271 9X-2.026 4	0.984 1	1.24
10% 多抗霉素可湿性粉剂	Y=2.525 4X-2.961 8	0.939 4	1.42
28% 井冈霉素可溶粉剂	Y=3.744 1X-7.523 4	0.855 0	2.21

由表 6 可知,5 种生物杀菌剂对火龙果球黑孢菌的 EC<sub>50</sub> 值由小到大依次为苦参碱(0.71 g/L)、春雷霉素(1.24 g/L)、中生菌素(1.34 g/L)、多抗霉素(1.42 g/L)和井冈霉素(2.21 g/L)。因此,对于球黑孢菌来说,苦参碱对其室内毒力最强,春雷霉素、中生菌素和多抗霉素次之,井冈霉素最弱。结合表 5 和表 6,发现苦参碱能够较好地抑制火龙果球黑孢菌的生长。苦参碱对球黑孢菌菌丝生长抑制效果最佳,其 EC<sub>50</sub> 最小,毒力最强。王俊容等<sup>[25]</sup>研究发现球黑孢菌对生物药剂芽孢杆菌较为敏感,

对其具有较好的防控效果。

2.8 5种生物源杀菌剂对火龙果尖孢镰刀菌的毒力测定

由表 7 可知,5 种生物杀菌剂对火龙果尖孢镰刀菌的 EC<sub>50</sub> 值由小到大依次为苦参碱(0.94 g/L)、中生菌素(1.18 g/L)、多抗霉素(1.73 g/L)、春雷霉素(1.85 g/L)和井冈霉素(2.14 g/L)。因此,对于尖孢镰刀菌来说,苦参碱对其室内毒力最强,中生菌素,多抗霉素和春雷霉素次之,井冈霉素最弱。结合表 5 和表 7,得到苦参碱是防治火龙果采后尖孢镰刀菌较好的生物防控药剂。

表 7 5种生物药剂对火龙果尖孢镰刀菌室内毒力测定

Table 7 Determination of indoor virulence of 5 kinds of biological agents on *Hylocereus undatus* fruit *F. oxysporum*

生物杀菌剂	毒力回归方程	相关系数 (r <sup>2</sup> )	EC <sub>50</sub> (g/L)
0.5% 苦参碱水剂	Y=2.373 6X-2.052 4	0.768 8	0.94
3% 中生菌素可湿性粉剂	Y=4.259 4X-0.080 9	0.771 3	1.18
4% 春雷霉素水剂	Y=3.599 9x-6.764 7	0.974 6	1.85
10% 多抗霉素可湿性粉剂	Y=4.125 4x-8.359	0.790 0	1.73
28% 井冈霉素可溶粉剂	Y=4.751 6x-10.826	0.807 1	2.14

2.9 5种生物源杀菌剂对火龙果黑附球菌的毒力测定

表 8 5种生物药剂对火龙果黑附球菌室内毒力测定

Table 8 Determination of indoor virulence of 5 kinds of biological agents on *Hylocereus undatus* fruit *E. nigrum*

生物杀菌剂	毒力回归方程	相关系数 (r <sup>2</sup> )	EC <sub>50</sub> (g/L)
0.5% 苦参碱水剂	Y=2.065 4x-1.197 6	0.765 4	1.00
3% 中生菌素可湿性粉剂	Y=4.219 9x-6.686 1	0.690 6	0.59
4% 春雷霉素水剂	Y=1.806 9x-0.987 2	0.836 7	2.06
10% 多抗霉素可湿性粉剂	Y=3.746 3x-7.462 9	0.743 6	2.12
28% 井冈霉素可溶粉剂	Y=4.143 2x-9.280 1	0.785 0	2.80

由表 8 可知,5 种生物杀菌剂对火龙果黑附球菌的 EC<sub>50</sub> 值由小到大依次为中生菌素(0.59 g/L)、苦参碱(1.00 g/L)、春雷霉素(2.06 g/L)、多抗霉素(2.12 g/L)和井冈霉素(2.80 g/L)。因此,对于黑附球菌来说,中生菌素对其室内毒力最强,苦参碱,春雷霉素和多抗霉素次之,井冈霉素最弱。结

合表 5 和表 8 可知, 5 种生物源杀菌剂对火龙果黑附球菌的抑制效果中, 中生菌素对火龙果黑附球菌的抑制效果显著于其他 4 种生物药剂, 其  $EC_{50}$  最小, 毒力最强。井冈霉素的抑制效果最差, 毒力最小。目前, 对火龙果致病真菌黑附球菌的生物防控未见相关报道。

### 2.10 5 种生物源杀菌剂对火龙果新暗色柱节孢菌的毒力测定

表 9 5 种生物药剂对火龙新暗色柱节孢菌室内毒力测定

Table 9 Determination of indoor virulence of 5 kinds of biological agents on *Hylocereus undatus* fruit *N. dimidiatum*

生物杀菌剂	毒力回归方程	相关系数 ( $R^2$ )	$EC_{50}$ / (g/L)
0.5% 苦参碱水剂	$Y=1.483 5x+0.853 9$	0.791 7	0.62
3% 中生菌素可湿性粉剂	$Y=5.587 8x-10.694$	0.901 6	0.64
4% 春雷霉素水剂	$Y=1.578 1x-0.792 8$	0.977 3	4.68
10% 多抗霉素可湿性粉剂	$Y=2.445 7x-2.903 5$	0.927 3	1.70
28% 井冈霉素可溶粉剂	—	—	—

注: —表示新暗色柱节孢菌对井冈霉素极不敏感, 井冈霉素无法抑制新暗色柱节孢菌生长。

由表 9 可知, 4 种生物杀菌剂对火龙果新暗色柱节孢菌的  $EC_{50}$  值由小到大依次为苦参碱 (0.62 g/L)、中生菌素 (0.64 g/L)、多抗霉素 (1.70 g/L) 和春雷霉素 (4.68 g/L), 井冈霉素在该浓度下无法抑制火龙果采后致病真菌新暗色柱节孢菌菌丝生长, 说明致病真菌对井冈霉素不敏感。结合表 5 和表 9, 发现苦参碱对火龙新暗色柱节孢菌的抑制效果显著于其他 4 种供试药剂且  $EC_{50}$  最小, 毒力最强。柏自琴等<sup>[33]</sup>研究表明, 在生物药剂中, 中生菌素可湿性粉剂显著抑制新暗色柱节孢菌菌落生长, 其  $EC_{50}$  值为 2.03 mg/L, 但本研究中中生菌素对新暗色柱节孢菌的  $EC_{50}$  值为 0.64 g/L, 其  $EC_{50}$  值存在一定差异, 说明各种植地区间得到的菌株敏感性存在明显差异, 这可能受环境条件的变化、农药残留、气象、品种抗性以及田间病原量等多种因素的影响, 导致贵州火龙果采后致病真菌的敏感性不断减弱, 从而出现  $EC_{50}$  有不同的趋势。目前, 火龙果病害的防控以化学手段为主, 但是化学农药的危害较大, 真正作用于防治靶标病害的有效药剂不足 1%<sup>[34]</sup>。通过室内毒力测定, 获取绿色高效的杀菌剂是田间防控的基础。 $EC_{50}$  值越小, 毒力越强, 病原菌对药剂的敏感性越高, 即随着药剂浓度的增加, 抑菌率明显增大。

### 3 结论

本研究报道 5 种生物源杀菌剂对火龙果采后主要致病菌 (球黑孢菌、尖孢镰刀菌、黑附球菌和新暗色柱节孢菌) 菌丝生长的影响。其中, 生物杀菌剂通过损伤致病真菌的细胞膜发挥抑菌作用。苦参碱对火龙果采后致病真菌新暗色柱节孢菌、球黑孢菌、尖孢镰刀菌具有较好的抑制效果, 其抑制率分别为 80.87%、84.17% 和 90.93%,  $EC_{50}$  值分别为 0.62、0.71 和 0.94 g/L; 中生菌素对黑附球菌的抑制率达 100%,  $EC_{50}$  值为 0.59 g/L。目前, 生物农药靶向防治技术未见报道, 现有生物农药都具广靶杀菌性。因此, 不同生物源杀菌剂对不同致病菌的抑制效果不同, 致病菌对生物药剂的敏感性差异较大, 呈现出不同的抑制效果。利用致病菌的生长特性结合生物农药作用机制, 进一步对生物农药作用特性加以改进, 力争开发更具广靶杀菌性的生物农药, 降低农药使用率, 对生态环境保护做出贡献。本研究结果为火龙果采后病害防治提供了一定的科学依据, 但由于仅在室内进行实验, 还需要进一步探究其田间防控效果。

### 参考文献

- [1] ATTAR S H, GUNDESLI M A, URUN I, et al. Nutritional analysis of red-purple and white-fleshed pitaya (*Hylocereus*) species [J]. *Molecules*, 2022, 27(3): 808.
- [2] MIN X, YUN P, ZHAO Q, et al. Identification of *Neoscytalidium dimidiatum* causing canker disease of pitaya in Hainan, China [J]. *Australas Plant Path*, 2018, 47: 1-7.
- [3] LATA D, NARAYANA C K, ANAND A, et al. Effect of ambient storage on postharvest quality and shelf life of white pulp (*Hylocereus undatus*) and red pulp dragon fruit (*Hylocereus polyrhizus*) [J]. *Erwerbs-Obstbau*, 2023, 65: 2469-2478.
- [4] GARCÍA-CRUZ L, DUEÑAS M, SANTOS-BUELGAS C, et al. Betalains and phenolic compounds profiling and antioxidant capacity of pitaya (*Stenocereus* spp.) fruit from two species (*S. Pruinosis* and *S. Stellatus*) [J]. *Food Chem*, 2017, 234: 111-118.
- [5] ANGONESE M, MOTTA G E, DEFARIAS N S, et al. Organic dragon fruits (*Hylocereus undatus* and *Hylocereus polyrhizus*) grown at the same edaphoclimatic conditions: Comparison of phenolic and organic acids profiles and antioxidant activities [J]. *LWT*, 2021, 149: 111924.
- [6] 张鸿雁, 陈盈莹, 周雁薇, 等. 火龙果软腐病病原菌鉴定

- 及链霉菌菌株LWL1827的防效测定[J].热带作物学报, 2023,44(8):1689-1697.
- [7] LAN G B, HE Z F, XI P G, et al. First report of brown spot disease caused by *Neoscytalidium dimidiatum* on *Hylocereus undatus* in Guangdong, Chinese Mainland [J]. Plant Dis, 2012, 96(11): 1702-1702.
- [8] 韦文添.几种杀菌剂对火龙果镰刀菌果腐病菌的室内毒力测定[J].中国南方果树,2016,45(2):87-88.
- [9] KEE Y J, HAFIFI A B M, HUDA-SHAKIRAH A R, et al. First report of reddish brown spot disease of red-fleshed dragon fruit (*Hylocereus polyrhizus*) caused by *Nigrospora lacticola* and *Nigrospora sphaerica* in Malaysia [J]. Crop Prot, 2019, 122: 165-170.
- [10] 罗冬兰,雷霁卿,曹森,等.火龙果采后病原菌的分离鉴定及丁香酚抑菌研究[J].中国果树,2022,226(8):23-27,2.
- [11] MOHD HAB, KEE YJ, MOHD MH. First report of *Fusarium oxysporum* as a causal agent of stem blight of red-fleshed dragon fruit (*Hylocereus polyrhizus*) in Malaysia [J]. Plant Dis, 2019, 103(5): 1040.
- [12] 巴良杰,曹森,吉宁,等.保鲜纸处理改善采后火龙果的贮藏品质[J].现代食品科技,2020,36(10):133-139, 252.
- [13] BORDOH P K, ALI A, DICKINSON M, et al. A review on the management of postharvest anthracnose in dragon fruits caused by *Colletotrichum* spp [J]. Crop Protection, 2020, 130: 105067.
- [14] MAMAT S, MD SHAH U K, REMLI N A M. Characterization of antifungal activity of endophytic *Penicillium oxalicum* T 3.3 for anthracnose biocontrol in dragon fruit (*Hylocereus* sp) [J]. Int J Agric Environ Res, 2018, 4(1): 65-76.
- [15] LIN S, CHEN X, XIE L, et al. Biocontrol potential of lipopeptides produced by *Paenibacillus polymyxa* AF01 against *Neoscytalidium dimidiatum* in pitaya [J]. Frontiers in Microbiology, 2023, 14: 1188722.
- [16] HUANG M, ZHAO J. Recent advances in postharvest storage and preservation technology of pitaya (dragon fruit) [J]. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 2024, 99: 115-129.
- [17] ROMANAZZI G, SANZANI SM, BI Y, et al. Induced resistance to control postharvest decay of fruit and vegetables [J]. Postharvest Biol Technol, 2016, 122: 82-94.
- [18] 陈霁晖.氨基寡糖素诱导猕猴桃抗溃疡病的效果及机理研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2021.
- [19] BALENDRES M A, BENGGOA J C. Diseases of dragon fruit (*Hylocereus species*): Etiology and current management options [J]. Crop Protection, 2019, 126: 104920.
- [20] 赵晓珍,王荔,张雪,等.贵州省火龙果炭疽病病原的分离鉴定及生物农药筛选[J].贵州农业科学,2020,48(4):70-74, 2.
- [21] COSTA J A V, FREITAS B C B, CRUZ C G, et al. Potential of microalgae as biopesticides to contribute to sustainable agriculture and environmental development [J]. J Environ Sci Heal B, 2019, 54(5): 366-375.
- [22] 郭明程,王晓军,苍涛,等.我国生物源农药发展现状及对策建议[J].中国生物防治学报,2019,35(5):755-758.
- [23] 刘中芳,孙晓婷,陈正浩,等.苹果主要病虫害全程生物农药防控效果[J].中国生物防治学报,2022,38(6):1393-1399.
- [24] 蒋军喜,戴兆基,唐自文,等.5种杀菌剂对梨轮纹病菌的毒力测定和田间药效试验[J].江西农业大学学报,2010, 32(4):710-713.
- [25] 王俊容,秦顺,樊瑞冬,等.百香果球黑孢菌叶枯病的发生与生物防治初探[C]//中国植物病理学会.中国植物病理学会2023年学术年会论文集.中国农业科学技术出版社,2023:1.
- [26] 王帅.苹果树腐烂病菌对吡唑醚菌酯的抗药性风险评估及生物源杀菌剂的室内活性评价[D].杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [27] 王帅,刘召阳,高小宁,等.10种生物源杀菌剂对苹果树腐烂病菌的室内活性评价[J].西北林学院学报,2019,34(1): 150-156.
- [28] 胡翠平,黄慧燕,周桂.火龙果采后病原菌的分离鉴定及抑制效应研究[J].南方农业学报,2020,51(7):1560-1567.
- [29] 李界秋,李杨秀,吴凡.火龙果溃疡病菌病的室内药剂筛选[J].广西植保,2016,29(4):16-18.
- [30] 刘佳怡,王嘉欣,宋海超,等.纳他霉素对芒果采后胶孢炭疽菌的抑菌效果及机理[J].植物学报,2019,54(4):455-463.
- [31] 彭洋,杨书珍,张美红,等.橙子果皮诱导抗病组分对意大利青霉的抑菌活性及作用机制[J].食品科学,2019, 40(9):1-6.
- [32] 邱夕兰.植物精油对桃果生链核盘菌的抑制机理及抑菌效果研究[D].乌鲁木齐:新疆大学,2022.
- [33] 柏自琴,赵晓珍,李兴忠,等.贵州火龙果溃疡病有效药剂的筛选及田间防效评价[J].中国南方果树,2022,51(6): 100-103.
- [34] 闫晓静,杨代斌,薛新宇,等.中国农药应用工艺学20年的理论研究与技术概述[J].农药学报,2019,21(Z1):908-920.