

· 研究论文 ·

doi: 10.16801/j.issn.1008-7303.2025.0004

# 太湖底泥来源吸水链霉菌 HU216 代谢产物 及其抗真菌活性

何云飞, 王瑞俊, 朱礼显, 陈春同, 齐欢,  
吴漪, 张立钦, 王继栋\*, 张绍勇\*

(湖州师范学院 浙江省作物病虫害生物学与生态调控重点实验室, 浙江 湖州 313000)

**摘要:** 太湖底泥中分离得到的吸水链霉菌 (*Streptomyces hygroscopicus*) HU216 具有广谱抗植物病原真菌活性。为进一步明确其活性代谢产物, 通过硅胶、凝胶柱层析及制备高效液相色谱等方法对菌株发酵粗提物进行分离纯化, 得到 6 个单体化合物; 利用质谱和核磁共振谱 (1D, 2D) 等进行结构表征, 鉴定为子囊霉素 (ascomycin, **1**)、3-(1-羟丙基) 苯酚 (3-(1-hydroxypropyl) phenol, **2**)、阿比利醚 (abierixin, **3**)、(2E,4Z)-8-羟基癸-2,4-二烯酸 ((2E,4Z)-8-hydroxydeca-2,4-dienoic acid, **4**)、库瓦烯 (cuevaene A, **5**) 和 29-O-尼日利亚菌素 (29-O-methylnigericin, **6**), 并采用滤纸片法测定其对 6 种植物病原真菌的活性。活性测试结果表明, 在供试浓度为 60  $\mu\text{g}$ /滤纸片时, 化合物 **1**~**6** 均表现出一定的抗真菌活性。其中化合物 **1**~**3** 对番茄灰霉病病原菌的抑制率分别为 85.83%、75.74% 和 70.15%; 对苹果树腐烂病病原菌的抑制率分别为 89.38%、76.63% 和 62.25%; 对玉米圆斑病病原菌的抑制率分别为 63.40%、64.22% 和 58.50%, 活性均高于阳性对照戊唑醇 (36.76%); 对番茄早疫病病原菌的抑制率分别为 44.61%、34.31% 和 43.30%, 其中化合物 **1** 和 **3** 的活性高于阳性对照戊唑醇 (38.54%), 表现出较好的抗真菌作用。对番茄果实接种灰霉病后的防治效果测试表明, 化合物 **1**~**3** 能有效保护番茄果实免受灰霉病危害, 具有开发为新型农用抗生素的应用价值。

**关键词:** 吸水链霉菌; 代谢产物; 结构鉴定; 抗真菌活性

中图分类号: TQ450.1 文献标志码: A

## Antifungal metabolites of *Streptomyces hygroscopicus* HU216 from the sediments in Taihu Lake

HE Yunfei, WANG Ruijun, ZHU Lixian, CHEN Chuntong, QI Huan,  
WU Yi, ZHANG Liqin, WANG Jidong\*, ZHANG Shaoyong\*

(Zhejiang Key Laboratory of Biology and Ecological Regulation of Crop Pathogens and Insects, Huzhou University,  
Huzhou 313000, Zhejiang Province, China)

收稿日期: 2024-08-27; 录用日期: 2024-11-06; 网络首发日期: 2025-01-17.

Received: August 27, 2024; Accepted: November 6, 2024; Published online: January 17, 2025.

URL: <https://doi.org/10.16801/j.issn.1008-7303.2025.0004>

<http://www.nyxb.cn/cn/article/doi/10.16801/j.issn.1008-7303.2025.0004>

基金项目: 国家重点研发计划 (No. 2021YFC2600104); 湖州市公益性应用研究项目 (No. 2023GZ58); 大学生省级创新项目 (No. S202310347098).

**Funding:** Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFC2600104); Public Welfare Services Foundation of Huzhou (No. 2023GZ58); Students' Innovation and Entrepreneurship Training Program (No. S202310347098).

第一作者 (First author): 何云飞, E-mail: [ihyunfei@163.com](mailto:ihyunfei@163.com). \*通信作者 (Corresponding authors): 王继栋, E-mail: [02752@zjhu.edu.cn](mailto:02752@zjhu.edu.cn); 张绍勇, E-mail: [1zhangshaoyong@163.com](mailto:1zhangshaoyong@163.com).

The authors declare that they have no competing interests.



**Abstract:** *Streptomyces hygroscopicus* HU216, isolated from the sediment of Taihu Lake, exhibits broad-spectrum antifungal activity against plant pathogenic fungi. To further explore its active metabolites, the fermentation broth of strain HU216 underwent fractionation and purification through silica gel chromatography, gel column chromatography, and preparative high-performance liquid chromatography (HPLC). Six pure compounds were isolated and their structures were determined by mass spectrometry (MS) and nuclear magnetic resonance spectroscopy (NMR, including 1D and 2D NMR). These compounds were identified as ascomycin (**1**), 3-(1-hydroxypropyl)phenol (**2**), abierixin (**3**), (2E,4Z)-8-hydroxydeca-2,4-dienoic acid (**4**), cuevaene A (**5**), and 29-O-methylnigericin (**6**). The antifungal activities of these compounds were evaluated against six plant pathogenic fungi. The results showed that six compounds exhibited significant antifungal activity at a concentration of 60 µg/tablet. Specifically, compounds **1**, **2**, and **3** showed inhibition rates of 85.83%, 75.74%, and 70.15% against *Botrytis cinerea*; 89.38%, 76.63%, and 62.25% against *Valsa mali*; and 63.40%, 64.22%, and 58.50% against *Bipolaris maydis*, respectively. The antifungal activity of these compounds was comparable to that of the positive control tebuconazole, demonstrating effective antifungal properties. The control efficacy tests of compounds 1-3 on tomato fruits inoculated with gray mold demonstrated that these compounds effectively protect tomato fruits from gray mold infection, showing potential for development into new agricultural antibiotics.

**Keywords:** *Streptomyces hygroscopicus*; metabolites; structural identification; antifungal activity

植物是农业生产体系的核心要素,其健康生长直接关乎食物安全供给与农业生态系统的动态平衡。70%~80%植物病害由病原真菌侵染引起,不仅使粮食作物减产,造成巨大的经济损失,还会严重危害人类健康和生态环境<sup>[1-2]</sup>。化学防治是控制病原真菌的主要手段,但其长期不合理使用,使病原真菌的抗药性问题日益加剧<sup>[3-4]</sup>。此外,化学防治可能会引发食品安全问题、造成环境污染,对人类和动物健康存在威胁<sup>[5-6]</sup>。因此,开发选择性高、作用机制新颖、生物相容性良好和毒性低的天然活性物质,已成为抗菌药物研究的热点,对于推动农业可持续发展和进行环境保护具有重要意义。

源自特定生态环境的链霉菌,因其独特的生理、生化、遗传及代谢特性,演化出了独特的代谢途径,含有更多未知的生物活性成分,从而在开发新型生物农药方面具有更大的潜力<sup>[7-12]</sup>。根际链霉菌通过固氮作用、溶解磷酸盐和钾等营养物质及产生抗真菌化合物,防止植物根部的真菌感染<sup>[13]</sup>。CHEN 等<sup>[14]</sup>发现海洋链霉菌 (*Streptomyces* sp.) CB-75 与各类海洋生物相互作用,促进次级代谢途径的进化,产生多种活性化合物。湖泊生态系统中的链霉菌对环境变化非常敏感,能够快速响应环境变化,改变其代谢途径并产生新的代谢产物<sup>[15]</sup>。目前市场上使用的农用抗生素中,60%

来源于链霉菌代谢产物或其衍生物,减少了 56% 由植物病原真菌引起的疾病<sup>[16-17]</sup>。深入探索链霉菌的生物活性成分,将为应对不断变化的农业需求和挑战提供坚实的科学基础。

太湖为典型的浅水富营养型湖泊,研究表明太湖底泥中具有丰富的链霉菌资源,也发现了淡水特有的放线菌谱系 (acI),对植物病原菌具有抑制作用的活性菌株较多,具有重要的研究价值<sup>[18-19]</sup>。本课题组前期从南太湖沉积物中共分离得到 160 株可培养活性放线菌菌株,其中活性链霉菌 100 株<sup>[20]</sup>。以植物病原真菌为靶标进行筛选,得到 1 株具有广谱抑菌活性的链霉菌 HU216,经鉴定其为吸水链霉菌 (*Streptomyces hygroscopicus*) (GenBank 登录号: PQ282546)。文献报道吸水链霉菌可产生雷帕霉素等抑菌活性物质<sup>[21-22]</sup>,经基因组测序,吸水链霉菌 HU216 具有产其他类化合物的潜在基因簇,为进一步探究其应用潜力,研究了其活性代谢产物及抗真菌活性,并评估将其开发为农用抗菌化合物的潜力,以期对农业病害防治提供新的方案。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

1.1.1 菌株 供试活性菌株:吸水链霉菌 (*Streptomyces hygroscopicus*) HU216,由省作物病虫害生物

学与生态调控重点实验室从太湖底泥中分离、鉴定。

供试病原菌株：苹果树腐烂病病原菌(黑腐皮壳, *Valsa mali*)、山核桃干腐病病原菌(葡萄座腔菌, *Botryosphaeria dothidea*)；玉米圆斑病病原菌(炭色长蠕孢菌, *Drechslera carbonum*)、番茄早疫病病原菌(茄链格孢菌, *Alternaria solani*)、黄瓜棒孢病病原菌(多主棒孢菌, *Phytophthora melonis*)、番茄灰霉病病原菌(灰葡萄孢菌, *Botrytis cinerea*)，由省作物病虫生物学与生态调控重点实验室病原菌库提供。

1.1.2 培养基 GYM 种子培养基(g/L)：葡萄糖 4，酵母抽提物 4，麦芽抽提物 10，碳酸钙 4，pH 7.2~7.4。GYM 发酵培养基：酵母抽提物 4 g，麦芽抽提物 10 g，葡萄糖 4 g，可溶性淀粉 20 g，微量元素溶液 1 mL ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  1 g,  $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  1 g,  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  1 g, 蒸馏水 1 L)，轻质碳酸钙 2 g，蒸馏水 1 L，pH 7.2~7.4。PDA 培养基(g/L)：新鲜去皮马铃薯 200，葡萄糖 20，琼脂 20。ISP2 培养基(g/L)：酵母抽提物 4，麦芽抽提物 10，葡萄糖 4，琼脂 20，pH 7.2~7.4。

1.1.3 试剂与仪器 石油醚、乙酸乙酯、二氯甲烷、甲醇等试剂(分析纯，国药集团化学试剂有限公司)；色谱甲醇、色谱乙腈(色谱纯，安耐吉化学)；戊唑醇(南京南农农药科技发展有限公司)；LX-60 大孔吸附树脂(西安蓝晓科技新材料股份有限公司)；硅胶(100~200 目，青岛海洋化工有限公司)；LH-20 凝胶 Sephadex(日本三菱化学公司)；HSGF254 薄层层析硅胶板(烟台江友硅胶开发有限公司)； $\Phi$  10 cm  $\times$  100 cm 大孔吸附树脂层析柱、 $\Phi$  5 cm  $\times$  100 cm 硅胶层析柱、 $\Phi$  5 cm  $\times$  80 cm 凝胶层析柱(上海满创玻璃仪器)。

ZWY-2112D 智城恒温培养振荡器(上海智城)；L550 台式离心机(湖南湘仪实验室仪器开发有限公司)；ZF-7 暗箱式三用紫外分析仪(上海嘉鹏科技有限公司)；RE-52AA 旋转蒸发器(上海亚荣生化仪器厂)；1260II 高效液相色谱仪、ZORBAX-C<sub>18</sub> (21.2 mm  $\times$  250 mm, 5  $\mu$ m) 制备型色谱柱、6545 Q-TOF LC/MS 高分辨液质联用仪(安捷伦科技有限公司)；Quantum-I Plus-400 核磁共振波谱仪(武汉中科牛津波谱技术有限公司)。

## 1.2 菌株发酵液的制备

将吸水链霉菌 HU216 接种于 ISP2 固体培养基上，于 28  $^{\circ}\text{C}$  培养箱中培养 6~8 d。在超净台

中，刮取长势良好的菌落接种至 4 瓶装有 250 mL GYM 种子培养基的 1000 mL 三角摇瓶中，于 28  $^{\circ}\text{C}$ ，180 r/min 下培养 2 d 得种子液。按 4% 比例将种子液接种至 80 瓶装有 250 mL GYM 种子培养基的 1000 mL 三角摇瓶中，于 28  $^{\circ}\text{C}$ ，180 r/min 下培养 7 d。

## 1.3 菌株代谢产物的提取及纯化

1.3.1 菌株发酵液处理及粗提物制备 将发酵液以 4000 r/min 离心 15 min，分离上清液和固体菌体。将上清液通过大孔吸附树脂层析柱吸附。用 95% 乙醇( $V(\text{树脂}) : V(\text{乙醇}) = 1 : 2$ )洗脱树脂并收集洗脱液，减压浓缩得到菌株发酵液粗提物 100 g。

1.3.2 菌株代谢产物的分离纯化 用甲醇溶解粗提物，加入 100 g 硅胶进行拌样，干燥后转入硅胶柱进行梯度洗脱( $V(\text{二氯甲烷}) : V(\text{甲醇}) = 100 : 0, 90 : 10, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40, 50 : 50, 40 : 60$ )，每梯度 2 L。收集组分 250 mL/份，采用薄层层析(TLC)及显色剂(硫酸香兰素)显色检测，将含相同组分的洗脱液合并，45  $^{\circ}\text{C}$  减压浓缩得到 6 个组分(Fr. 1~Fr. 6)，通过活性追踪，得到 3 个活性组分(Fr. 1~Fr. 3)。活性组分 Fr. 2 继续进行硅胶柱梯度洗脱分离( $V(\text{石油醚}) : V(\text{乙酸乙酯}) = 100 : 0, 90 : 10, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40, 50 : 50, 40 : 60$ )，经 TLC 分析合并得到 3 个组分(Fr. 2-1~Fr. 2-3)。将组分 Fr. 2-2、Fr. 2-3 分别进行凝胶柱层析洗脱( $V(\text{二氯甲烷}) : V(\text{甲醇}) = 1 : 1$ )，得 Fr. 2-2-1~Fr. 2-2-3 和 Fr. 2-3-1~Fr. 2-3-3 6 个组分，其中 Fr. 2-3-1 为单体化合物 1 (27.9 mg)。组分 Fr. 3 经 ODS 反相硅胶柱层析梯度分离( $V(\text{甲醇}) : V(\text{水}) = 65 : 35, 70 : 30, 75 : 25, 80 : 20$ )，得到 3 个组分(Fr. 3-1~Fr. 3-3)，经 TLC 分析，Fr. 3-2 为化合物 2 (10.1 mg)。Fr. 3-3 经凝胶柱层析共收集 2 个组分(Fr. 3-3-1、Fr. 3-3-2)。

采用制备型高效液相色谱仪进一步纯化，检测波长  $\lambda = 220/254$  nm，流速为 20 mL/min。组分 Fr. 2-2-1 中得化合物 3 (18.7 mg) (甲醇(30%~45%) : 水(70%~55%)，25 min,  $t_R = 15.5$  min)。Fr. 2-3-2 中得化合物 4 (15.2 mg) (甲醇(30%~80%) : 水(70%~20%)，30 min;  $t_R = 27.3$  min)。Fr. 2-3-3 中得化合物 5 (7.7 mg) (甲醇(35%~65%) : 水(65%~35%)，25 min,  $t_R = 21.8$  min)。Fr. 3-3-1 中得化合物 6 (23.2 mg) (甲醇(75%~90%) : 水(25%~10%)，25 min,

$t_R = 18.3 \text{ min}$ )。

## 1.4 菌株代谢产物的结构鉴定

采用高分辨液质联用仪对 6 种化合物进行分子质量分析。采用核磁共振波谱仪 ( $^1\text{H}$  NMR 为 400 MHz、 $^{13}\text{C}$  NMR 为 100 MHz) 进行一维和二维核磁共振波谱测定, 通过谱图分析并结合文献资料解析确定化合物结构。

## 1.5 菌株代谢产物的活性测定

以山核桃干腐病病原菌、黄瓜棒孢病病原菌、番茄早疫病病原菌、苹果树腐烂病病原菌、玉米圆斑病病原菌、番茄灰霉病病原菌 6 种植物病原菌为指示菌, 采用滤纸片法<sup>[23]</sup>对化合物 1~6 进行抗真菌活性测试, 滤纸片上化合物为 30 和 60  $\mu\text{g}$ /滤纸片两个梯度, 每处理重复 3 次, 28  $^{\circ}\text{C}$  培养 4~7 d, 设置药物戊唑醇和不含药物的空白组作为对照。测量病原菌菌丝向右生长的半径 (mm), 并根据公式 (1) 计算抑制率 ( $I$ , %) <sup>[24]</sup>。

$$I/\% = \frac{D_{\text{CK}} - D_t}{D_{\text{CK}}} \times 100 \quad (1)$$

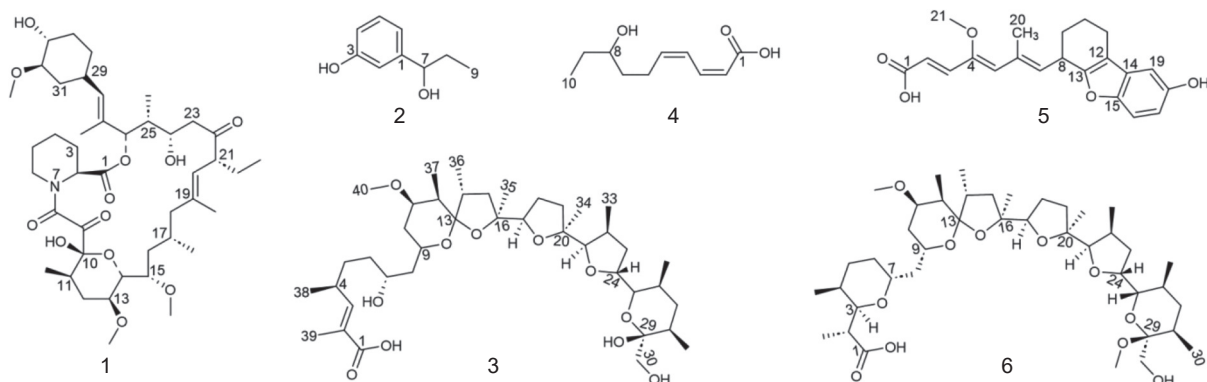
式中:  $D_{\text{CK}}$  为对照菌丝半径, mm;  $D_t$  为处理组菌丝半径, mm。

参考 Li 等<sup>[25]</sup>的方法对接种番茄果实灰霉病的控制效果进行测试。选取大小相近的番茄果实, 用 2% (体积分数) 次氯酸钠溶液对果实表面消毒 5 min, 无菌蒸馏水冲洗。风干后, 分别将 6 种化合物用甲醇配制为 100 mg/L 的溶液作为保护剂对番茄均匀喷雾, 风干后在每个果实的中心部位打孔 (3 mm  $\times$  3 mm), 接入灰霉菌饼 (3 mm  $\times$  3 mm)。使用戊唑醇和无菌蒸馏水作为对照。每处理重复 3 次, 在 28  $^{\circ}\text{C}$  下培养 3 d 后观察番茄果实被侵染情况。测量果实病变直径, 并根据公式 (1) 计算抑制率。试验数据采用 SPSS 21.0 软件进行差异性显著性检验统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 菌株代谢产物的结构鉴定

通过活性追踪及分离纯化, 从吸水链霉菌 HU216 的发酵粗提取物中分离得到 6 个单体化合物, 利用高分辨率质谱和核磁共振谱分析获得相应的结构表征数据 (图谱见附件)。化合物 1~6 的结构如图式 1 所示。



图式 1 化合物 1~6 的结构式

Scheme 1 Structure of compounds 1-6

化合物 1: 白色粉末。高分辨质谱 ESI-MS:  $m/z$  809.5184 [ $\text{M} + \text{NH}_4$ ] $^+$ , 814.4723 [ $\text{M} + \text{Na}$ ] $^+$  (calcd 814.4717),  $^{13}\text{C}$  NMR 和 DEPT-135 核磁图谱数据示, 该化合物共有 43 个碳, 其中羰基类碳有 4 个 ( $\delta_{\text{C}}$  为 211.9, 197.4, 169.3, 166.7), 除羰基碳外, 还包括 2 个  $\text{sp}^2$  季碳, 2 个  $\text{sp}^2$  质子碳, 1 个缩酮碳 ( $\delta_{\text{C}}$  98.5),  $^1\text{H}$  NMR、DEPT-135 和 HMQC 核磁图谱数据示, 化合物有 13 个  $\text{sp}^3$  次甲基 (7 个含氧次甲基), 12 个  $\text{sp}^3$  亚甲基和 9 个甲基 (包括 3 个甲氧基)。推测其分子式为  $\text{C}_{43}\text{H}_{69}\text{NO}_{12}$ , 提示有 10 个不饱和度。 $^1\text{H}$  NMR (400 MHz,  $\text{CD}_3\text{OD}$ )  $\delta_{\text{H}}$ : 5.23-5.27 (2H, m, H-20, 28), 5.12-5.13 (1H, d,  $J = 6.8 \text{ Hz}$ , H-26), 4.36-4.40 (1H, m, H-2), 3.98-

4.07 (1H, m, H-14), 3.74-3.76 (2H, m, H-24, 31), 3.64-3.67 (2H, m, H-6), 3.44-3.52 (2H, m, H-13, 15), 3.43 (3H, s,  $\text{OCH}_3$ ), 3.39 (3H, s,  $\text{OCH}_3$ ), 3.37 (3H, s,  $\text{OCH}_3$ ), 3.35-3.39 (1H, m, H-32), 2.85-2.90 (1H, dd,  $J = 14.6, 4.2 \text{ Hz}$ , H-21), 2.47-2.53 (2H, m, H-23), 2.14-2.39 (4H, m, H-3, 25, 29), 1.95-2.04 (2H, m, H-11, 18), 1.39-1.83 (14H, m, H-4, 5, 12, 16, 30, 33, 35), 0.85-0.98 (12H, m,  $\text{CH}_3$ )。  $^{13}\text{C}$  NMR (100 MHz,  $\text{CD}_3\text{OD}$ )  $\delta_{\text{C}}$ : 211.9 (C-22), 197.4 (C-9), 169.3 (C-1), 166.7 (C-8), 138.4 (C-19), 132.6 (C-27), 131.3 (C-28), 123.8 (C-20), 98.5 (C-10), 83.9 (C-31), 80.2 (C-26), 79.0 (C-15), 77.6 (C-13), 75.5 (C-14), 74.2 (C-32), 69.0 (C-24), 56.7 (15-

OCH<sub>3</sub>), 56.4 (13-OCH<sub>3</sub>), 56.4 (C-2), 55.4 (31-OCH<sub>3</sub>), 55.4 (C-21), 54.6 (C-18), 52.4 (C-6), 40.2 (C-23), 40.0 (C-25), 34.8 (C-29), 34.5 (C-16), 33.9 (C-11), 32.2 (C-12), 32.2 (C-33), 31.8 (C-34), 26.8 (C-3), 26.8 (C-17), 25.9 (C-5), 25.9 (C-35), 21.2 (C-4), 20.7 (17-CH<sub>3</sub>), 15.9 (11-CH<sub>3</sub>), 15.2 (19-CH<sub>3</sub>), 12.5 (27-CH<sub>3</sub>), 11.9 (C-36), 10.7 (25-CH<sub>3</sub>)。综合该化合物的<sup>1</sup>H NMR 和<sup>13</sup>C NMR 数据, 结合实验室化合物核磁数据库, 并通过与文献比对<sup>[26]</sup>, 确定该化合物为子囊霉素(ascomycin)。

化合物 2: 白色粉末。高分辨质谱 ESI-MS:  $m/z$  151.0764 [M-H]<sup>-</sup>, 结合其<sup>1</sup>H NMR 和<sup>13</sup>C NMR 数据推测其分子式为 C<sub>9</sub>H<sub>12</sub>O<sub>2</sub>, 提示有 4 个不饱和度。<sup>1</sup>H NMR (400 MHz, CDCl<sub>3</sub>)  $\delta$ : 7.21 (1H, t,  $J$  = 7.8 Hz, H-5), 6.88 (1H, d,  $J$  = 7.8 Hz, H-6), 6.86 (1H, s, H-2), 6.75 (1H, d,  $J$  = 7.8 Hz, H-4), 4.57 (1H, t,  $J$  = 6.6 Hz, H-7), 1.78-1.80 (2H, m, H-8), 0.93 (3H, t,  $J$  = 7.4 Hz, H-9)。<sup>13</sup>C NMR (100 MHz, CDCl<sub>3</sub>)  $\delta$ : 155.9 (C-3), 146.4 (C-1), 129.6 (C-5), 118.4 (C-6), 114.5 (C-2), 112.8 (C-4), 75.9 (C-7), 31.7 (C-8), 10.1 (C-9)。综合该化合物的<sup>1</sup>H NMR 和<sup>13</sup>C NMR 数据并通过与文献比对<sup>[27]</sup>, 确定该化合物为 3-(1-羟丙基) 苯酚 (3-(1-hydroxypropyl)phenol)。

化合物 3: 无色粉末。高分辨质谱 ESI-MS:  $m/z$  742.5114 [M + NH<sub>4</sub>]<sup>+</sup>(calcd 724.5105), <sup>13</sup>C NMR 和 DEPT-135 核磁图谱数据显示, 该化合物共有 40 个碳, 其中包括 1 个羧基( $\delta_C$  为 170.3), 包括 1 个 sp<sup>2</sup> 季碳, 1 个 sp<sup>2</sup> 质子碳, 2 个缩酮碳( $\delta_C$  为 107.7, 99.2), <sup>1</sup>H NMR、DEPT-135 和 HMQC 核磁图谱数据显示, 化合物有 15 个 sp<sup>3</sup> 次甲基 (8 个含氧次甲基), 10 个 sp<sup>3</sup> 亚甲基和 10 个甲基 (包括 2 个甲氧基)。结合其<sup>1</sup>H NMR 和<sup>13</sup>C NMR 数据推测其分子式为 C<sub>40</sub>H<sub>68</sub>O<sub>11</sub>, 提示有 7 个不饱和度。<sup>1</sup>H NMR (400 MHz, CD<sub>3</sub>OD)  $\delta$ : 6.56 (1H, d,  $J$  = 8.6 Hz, H-3), 3.92 (1H, d,  $J$  = 2.4 Hz, H-7), 3.81-3.83 (1H, m, H-21), 3.74-3.76 (2H, m, H-17, 24), 3.53-3.61 (1H, m, H-9), 3.33-3.36 (2H, m, H-30), 3.30-3.32 (1H, m, H-11), 2.53-2.54 (1H, m, H-4), 2.11-2.13 (1H, m, H-14), 2.08 (1H, m, H-12), 1.96 (1H, m, H-22), 1.95 (1H, m, H-23b), 1.93 (1H, m, H-15a), 1.86 (2H, m, H-19), 1.81 (1H, m, H-18b), 1.75-1.78 (2H, m, H-10), 1.75 (3H, s, H-39), 1.55 (1H, m, H-26), 1.54 (2H, m, H-6), 1.53 (1H, m, H-23a), 1.49 (1H, m, H-8b), 1.49 (1H, m, H-18a), 1.47 (1H, m, H-15b), 1.47 (1H, m, H-5b), 1.38-1.39 (2H, m, H-27), 1.35 (1H, m, H-8a), 1.25-1.28 (1H, m, H-5a), 1.23 (3H, s, H-35), 1.17 (3H, s, H-34), 1.01-1.03 (3H, m, H-37), 0.96-0.97 (1H, m, H-28), 0.96 (3H, d,  $J$  = 7.6 Hz, H-33), 0.90 (3H, d,  $J$  = 5.6 Hz, H-32), 0.89 (3H, s, H-31), 0.88 (3H, s, H-36), 0.86 (3H, s, H-38), 3.36 (3H, s, 40-CH<sub>3</sub>)。 <sup>13</sup>C NMR (100 MHz, CD<sub>3</sub>OD)  $\delta$ : 171.7 (C-1), 149.4 (C-3), 127.7 (C-2), 109.2 (C-13), 100.8 (C-29), 87.7 (C-21), 85.7 (C-25), 85.7 (C-20), 82.7 (C-16), 79.9 (C-17), 78.9 (C-24), 78.9 (C-11), 71.2 (C-30), 71.2 (C-7), 64.5 (C-9), 58.0

(40-CH<sub>3</sub>), 49.8 (C-26), 44.1 (C-6), 40.8 (C-15), 38.5 (C-14), 37.0 (C-12), 36.1 (C-22), 35.8 (C-10), 35.4 (C-28), 35.0 (C-8), 34.4 (C-23), 34.1 (C-5), 33.9 (C-27), 33.9 (C-4), 28.8 (C-19), 28.8 (C-35), 25.3 (C-18), 23.5 (C-34), 20.5 (C-38), 18.1 (C-39), 16.4 (C-33), 16.3 (C-32), 13.5 (C-36), 13.3 (C-31), 12.7 (C-37)。综合该化合物的<sup>1</sup>H NMR 和<sup>13</sup>C NMR 数据并通过与文献比对<sup>[28]</sup>, 确定该化合物为阿比利醚(abierixin)。

化合物 4: 白色粉末。高分辨质谱 ESI-MS:  $m/z$  183.1027 [M-H]<sup>-</sup>, 结合其<sup>1</sup>H NMR 和<sup>13</sup>C NMR 数据推测其分子式为 C<sub>10</sub>H<sub>16</sub>O<sub>3</sub>, 提示有 3 个不饱和度。<sup>1</sup>H NMR (400 MHz, CD<sub>3</sub>OD)  $\delta$ : 7.68 (1H, t,  $J$  = 13.5 Hz, H-3), 6.16 (1H, t,  $J$  = 11.1 Hz, H-4), 5.89 (2H, m, H-2, 5), 3.54 (1H, m, H-8), 2.44 (2H, q,  $J$  = 7.7 Hz, H-6), 1.53 (4H, m, H-7, 9), 0.94 (3H, t,  $J$  = 7.5 Hz, H-10)。<sup>13</sup>C NMR (100 MHz, CD<sub>3</sub>OD)  $\delta$ : 171.9 (C-1), 141.5 (C-3), 140.8 (C-5), 126.8 (C-4), 121.4 (C-2), 72.5 (C-8), 36.2 (C-7), 30.3 (C-9), 24.6 (C-6), 9.9 (C-10), 综合该化合物的<sup>1</sup>H NMR 和<sup>13</sup>C NMR 数据并通过与文献比对<sup>[29]</sup>, 确定该化合物为 (2E,4Z)-8-羟基癸-2,4-二烯酸 ((2E,4Z)-8-hydroxydeca-2,4-dienoic acid)。

化合物 5: 黄色油状。高分辨质谱 ESI-MS:  $m/z$  353.1418 [M-H]<sup>-</sup>, 结合其<sup>1</sup>H NMR 和<sup>13</sup>C NMR 数据推测其分子式为 C<sub>21</sub>H<sub>22</sub>O<sub>5</sub>, 提示有 11 个不饱和度。<sup>1</sup>H NMR (400 MHz, CD<sub>3</sub>OD)  $\delta$ : 7.14 (1H, d,  $J$  = 8.7 Hz, H-16), 7.02 (1H, d,  $J$  = 15.4 Hz, H-3), 6.68 (1H, d,  $J$  = 2.5 Hz, H-19), 6.62 (1H, dd,  $J$  = 8.7, 2.5 Hz, H-17), 5.99 (1H, d,  $J$  = 15.4 Hz, H-2), 5.85-5.90 (1H, s, H-5), 5.78 (1H, d,  $J$  = 10.1 Hz, H-7), 3.84 (1H, dd,  $J$  = 9.6, 7.5, 5.1 Hz, H-8), 3.64 (3H, s, H-21), 2.69 (2H, td,  $J$  = 6.3, 5.8, 2.3 Hz, H-11), 2.23 (3H, d,  $J$  = 1.3 Hz, H-20), 2.04 (2H, td,  $J$  = 16.4, 12.5, 7.5 Hz, H-10), 1.92-1.80 (1H, m, H-9), 1.61-1.52 (1H, m, H-9)。<sup>13</sup>C NMR (100 MHz, CD<sub>3</sub>OD)  $\delta$ : 171.1 (C-1), 156.0 (C-13), 153.7 (C-15), 153.6 (C-4), 150.3 (C-18), 143.1 (C-3), 133 (C-6), 130.3 (C-14), 140.5 (C-7), 119.0 (C-2), 105.3 (C-19), 115.8 (C-16), 112.3 (C-12), 111.7 (C-17), 130.4 (C-5), 60.6 (C-21), 33.6 (C-8), 31.0 (C-9), 24.3 (C-11), 22.5 (C-10), 15.4 (C-20)。综合该化合物的<sup>1</sup>H NMR 和<sup>13</sup>C NMR 数据并通过与文献比对<sup>[30]</sup>, 确定该化合物为库瓦烯(cuevaene A)。

化合物 6: 白色固体。高分辨质谱 ESI-MS:  $m/z$  761.4816 [M + Na]<sup>+</sup>(calcd 761.4816), <sup>13</sup>C NMR 和 DEPT-135 核磁图谱数据显示, 该化合物共有 41 个碳, 其中包括 1 个羧基( $\delta_C$  为 176.3), 包括 2 个缩酮碳( $\delta_C$  为 107.9, 100.8), <sup>1</sup>H NMR、DEPT-135 和 HMQC 核磁图谱数据显示, 化合物有 15 个 sp<sup>3</sup> 次甲基 (8 个含氧次甲基), 10 个 sp<sup>3</sup> 亚甲基 (1 个含氧亚甲基) 和 11 个甲基 (包括 2 个甲氧基)。结构与尼日利亚菌素非常相似, 仅在 29-C 位有所差别, 化合物 6 显示出羟甲基特征, HMBC 图谱数据显示, H-31 与 C-29 的耦合关系进一步证实羟甲基特征。结合其

<sup>1</sup>H NMR 和<sup>13</sup>C NMR 数据推测其分子式为 C<sub>41</sub>H<sub>70</sub>O<sub>11</sub>, 提示有 7 个不饱和度。<sup>1</sup>H NMR (400 MHz, CDCl<sub>3</sub>) δ<sub>H</sub>: 4.28 (1H, td, *J* = 7.7, 3.5 Hz, H-24), 4.14-4.19 (2H, m, H-7, 9), 3.89 (1H, d, *J* = 4.6 Hz, H-21), 3.75-3.79 (2H, m, H-3, 17), 3.71 (1H, d, *J* = 11.7 Hz, H-30a), 3.54 (1H, d, *J* = 11.3 Hz, H-30b), 3.46 (1H, dd, *J* = 9.3, 3.0 Hz, H-25), 3.38 (3H, s, 11-OCH<sub>3</sub>), 3.32-3.35 (1H, m, H-11), 3.29 (3H, s, 29-OCH<sub>3</sub>), 2.38-2.40 (1H, m, H-2), 1.26 (3H, s, 16-CH<sub>3</sub>), 1.17 (3H, s, 20-CH<sub>3</sub>), 1.08 (3H, d, *J* = 7.2 Hz, 2-CH<sub>3</sub>), 0.99 (3H, d, *J* = 7.0 Hz, 22-CH<sub>3</sub>), 0.96 (3H, d, *J* = 6.0 Hz, 4-CH<sub>3</sub>), 0.94 (3H, d, *J* = 5.5 Hz, 12-CH<sub>3</sub>), 0.88 (9H, m, 14-CH<sub>3</sub>, 26-CH<sub>3</sub>, 28-CH<sub>3</sub>). <sup>13</sup>C NMR (100 MHz, CDCl<sub>3</sub>) δ<sub>C</sub>: 176.3 (C-1), 107.7 (C-13), 99.1 (C-29), 86.7 (C-21), 84.2 (C-20), 83.6 (C-16), 81.9 (C-17), 79.3 (C-11), 77.8 (C-25), 77.2 (C-24), 73.6 (C-3), 69.4 (C-7), 64.0 (C-30), 60.4 (C-9), 58.4 (11-OCH<sub>3</sub>), 48.6 (29-OCH<sub>3</sub>), 43.8 (C-2), 40.4 (C-8), 39.3 (C-12), 37.1 (C-15), 36.7 (C-14), 35.8 (C-28), 35.5 (C-27), 35.2 (C-23), 35.0 (C-22), 34.2 (C-10), 33.1 (C-4), 32.5 (C-19), 27.7 (C-26), 26.9 (C-6), 26.0 (C-5), 25.0 (20-CH<sub>3</sub>), 23.0 (C-18), 22.5 (16-CH<sub>3</sub>), 17.6 (14-CH<sub>3</sub>), 16.1 (22-CH<sub>3</sub>), 15.7 (26-CH<sub>3</sub>), 13.0 (28-CH<sub>3</sub>), 12.6 (2-CH<sub>3</sub>), 12.5 (12-CH<sub>3</sub>), 11.0 (4-CH<sub>3</sub>)。综合该化合物的<sup>1</sup>H NMR 和<sup>13</sup>C NMR 数据并通过与文献对比<sup>[31]</sup>, 确定该化合物为 29-*O*-尼日利亚菌素 (29-

*O*-methylnigericin)。

### 2.2 菌株代谢产物的抗真菌活性

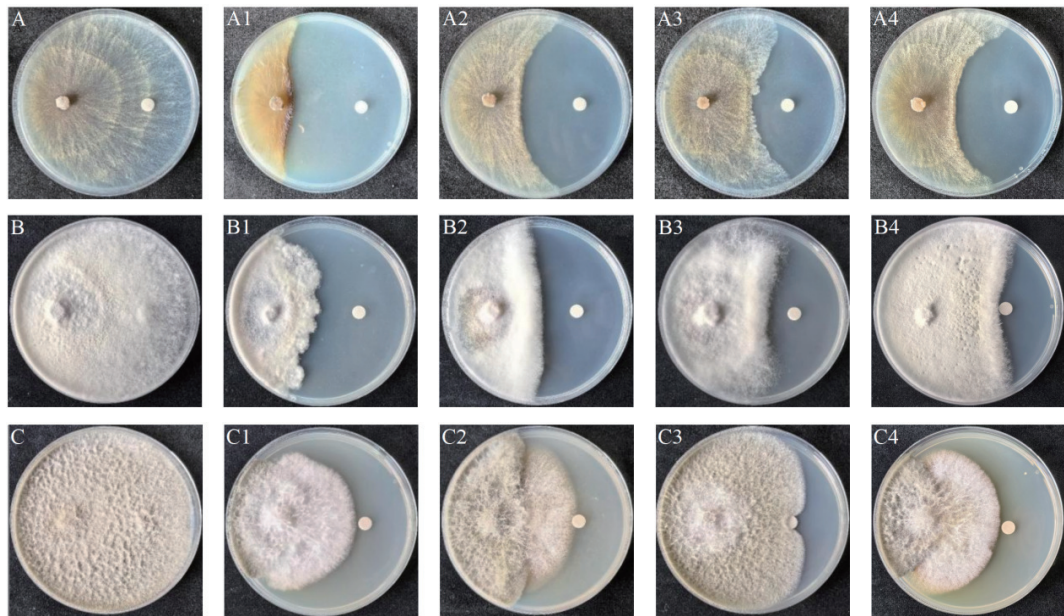
载药滤纸片法对 6 个化合物及阳性对照药物戊唑醇体外抑菌作用如表 1 和图 1 所示。在 30 μg/滤纸片下, 化合物 1 和 2 对苹果树腐烂病病原菌有较强的抑制作用, 抑制率分别达 89.87% 和 76.31%, 均强于阳性对照戊唑醇 (73.22%); 化合物 1、2、3 和 6 对玉米圆斑病病原菌有较强的抑制作用, 抑制率分别达 64.38%、52.29%、46.08% 和 51.08%, 均强于阳性对照戊唑醇 (38.44%); 化合物 1、2、5 和 6 对番茄早疫病病原菌的抑制作用高于阳性对照戊唑醇 (32.16%), 而化合物 3 的抑制作用与对照相当。在 60 μg/滤纸片下, 化合物 1、2 和 3 对番茄灰霉病病原菌的抑制率分别达 85.83%、75.74% 和 70.15%, 均强于阳性对照戊唑醇 (61.43%); 化合物 1、2 和 5 对山核桃干腐病病原菌的抑制作用与阳性对照戊唑醇 (22.98%) 相当; 化合物 1 对黄瓜棒孢病原菌的抑制率达 29.12%, 强于阳性对照戊唑醇 (19.65%), 其他化合物与阳性对照戊唑醇抑制效果接近。

| 表 1 化合物 1~6 对 6 种植物病原真菌的抑制率                                            |                                     |                                    |                                                 |                                            |                                          |                                             |                                         |
|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Table 1 Inhibition rate of compounds 1-6 on six plant pathogenic fungi |                                     |                                    |                                                 |                                            |                                          |                                             |                                         |
| 化合物<br>Compound                                                        | 浓度<br>Concentration/<br>(μg/tablet) | 苹果树腐烂病<br>病原菌<br><i>Valsa mali</i> | 山核桃干腐病<br>病原菌<br><i>Botryosphaeria dothidea</i> | 玉米圆斑病<br>病原菌<br><i>Drechslera carbonum</i> | 番茄早疫病<br>病原菌<br><i>Alternaria solani</i> | 黄瓜棒孢病<br>病原菌<br><i>Phytophthora melonis</i> | 番茄灰霉病<br>病原菌<br><i>Botrytis cinerea</i> |
| 1                                                                      | 30                                  | 89.87 ± 3.12 a                     | 30.56 ± 1.64 a                                  | 64.38 ± 1.92 a                             | 40.85 ± 2.32 b                           | 19.06 ± 1.01 c                              | 85.41 ± 1.12 a                          |
|                                                                        | 60                                  | 89.38 ± 2.88 a                     | 30.42 ± 0.67 a                                  | 63.40 ± 2.41 a                             | 44.61 ± 3.12 a                           | 29.12 ± 1.26 a                              | 85.83 ± 2.32 a                          |
| 2                                                                      | 30                                  | 76.31 ± 3.11 b                     | 20.59 ± 1.42 c                                  | 52.29 ± 3.52 c                             | 37.09 ± 2.73 c                           | 19.70 ± 1.12 c                              | 77.22 ± 2.99 b                          |
|                                                                        | 60                                  | 76.63 ± 1.73 b                     | 24.51 ± 1.61 b                                  | 64.22 ± 3.97 a                             | 34.31 ± 2.67 cd                          | 19.27 ± 1.45 c                              | 75.74 ± 3.35 b                          |
| 3                                                                      | 30                                  | 0.00 ± 0.00                        | 7.03 ± 1.92 d                                   | 46.08 ± 1.31 d                             | 30.23 ± 2.42 d                           | 7.07 ± 0.41 f                               | 65.21 ± 3.12 cd                         |
|                                                                        | 60                                  | 62.25 ± 3.39 c                     | 7.35 ± 0.79 d                                   | 58.50 ± 4.05 b                             | 43.30 ± 1.55 a                           | 18.20 ± 1.45 cd                             | 70.15 ± 1.44 c                          |
| 4                                                                      | 30                                  | 2.45 ± 0.30 g                      | 5.72 ± 0.83 e                                   | 0.00 ± 0.00                                | 0.00 ± 0.00                              | 11.35 ± 0.66 e                              | 0.00 ± 0.00                             |
|                                                                        | 60                                  | 44.28 ± 1.19 e                     | 7.68 ± 0.12 d                                   | 2.78 ± 1.65 g                              | 7.19 ± 0.75 f                            | 20.99 ± 0.53 c                              | 20.30 ± 4.31 f                          |
| 5                                                                      | 30                                  | 44.44 ± 2.25 e                     | 19.44 ± 1.28 c                                  | 31.37 ± 2.05 f                             | 19.61 ± 0.53 e                           | 21.63 ± 0.58 c                              | 10.98 ± 0.47 g                          |
|                                                                        | 60                                  | 52.29 ± 2.20 d                     | 30.23 ± 1.42 a                                  | 30.56 ± 1.42 f                             | 30.56 ± 1.25 d                           | 16.06 ± 1.52 d                              | 9.41 ± 2.12 g                           |
| 6                                                                      | 30                                  | 12.00 ± 2.08 f                     | 5.82 ± 2.22 e                                   | 51.08 ± 3.19 c                             | 36.23 ± 3.41 c                           | 4.07 ± 0.62 g                               | 49.78 ± 2.41 e                          |
|                                                                        | 60                                  | 58.25 ± 1.94 c                     | 7.91 ± 3.12 d                                   | 58.31 ± 1.42 b                             | 46.53 ± 1.14 a                           | 24.12 ± 1.83 b                              | 55.83 ± 1.17 de                         |
| 戊唑醇<br>tebuconazole                                                    | 30                                  | 73.22 ± 3.65 b                     | 19.21 ± 2.11 c                                  | 38.44 ± 1.88 e                             | 32.16 ± 1.36 d                           | 19.99 ± 0.42 c                              | 50.41 ± 2.12 e                          |
|                                                                        | 60                                  | 74.31 ± 4.18 b                     | 22.98 ± 1.78 b                                  | 36.76 ± 1.95 e                             | 38.54 ± 3.28 c                           | 19.65 ± 1.15 c                              | 61.43 ± 4.29 d                          |

注: 戊唑醇为阳性药剂对照; 抑制率以平均值 ± 标准误差表示; 同列不同小写字母表示经统计分析在 α = 0.05 水平差异显著。  
Note: Tebuconazole is included as positive control; inhibition rate were presented as mean ± SD. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences at 0.05 level.

100 mg/L 的 6 个单体化合物及阳性对照药物戊唑醇对番茄果实接种灰霉病的抑制效果如表 2 和图 2 所示。与对照组相比, 化合物 1、2、3 和

6 均对番茄灰霉病病原菌有明显的抑制作用, 病斑直径明显减小, 其中化合物 1 和 2 可以完全抑制番茄灰霉病的发生, 化合物 3 和 6 对番茄灰霉病



A. 空白对照对苹果树腐烂病原菌的抗菌活性；A1~A4. 化合物 1~3 和戊唑醇对苹果树腐烂病原菌的抗菌活性；B. 空白对照对玉米圆斑病原菌的抗菌活性；B1~B4. 化合物 1~3 和戊唑醇对玉米圆斑病原菌的抗菌活性；C. 空白对照对番茄早疫病病原菌的抗菌活性；C1~C4. 化合物 1~3 和戊唑醇对番茄早疫病病原菌的抗菌活性。

A. Antifungal activities of control against *V. mali*; A1~A4. Antifungal activities of compounds 1-3 and tebuconazole against *V. mali*; B. Antifungal activities of control against *D. carbonum*; B1~B4. Antifungal activities of compounds 1-3 and tebuconazole against *D. carbonum*; C. Antifungal activities of control against *A. solani*; C1~C4. Antifungal activities of compounds 1-3 and tebuconazole against *A. solani*.

图 1 化合物 1~3 的抗菌活性

Fig. 1 Antifungal activities of compounds 1-3

表 2 化合物 1~6 对番茄灰霉病的抑制率  
Table 2 Inhibition rates of compounds 1-6 against *Botrytis cinerea*

| 化合物<br>Compound     | 质量浓度<br>Concentration/<br>(mg/L) | 对番茄灰霉病的抑制率<br>Inhibition rate against <i>B. cinerea</i> /% |
|---------------------|----------------------------------|------------------------------------------------------------|
| 1                   | 100                              | 100 ± 0.00 a                                               |
| 2                   | 100                              | 100 ± 0.00 a                                               |
| 3                   | 100                              | 90.18 ± 4.22 b                                             |
| 4                   | 100                              | 4.42 ± 0.66 c                                              |
| 5                   | 100                              | 10.03 ± 1.51e                                              |
| 6                   | 100                              | 74.35 ± 3.74 c                                             |
| 戊唑醇<br>tebuconazole | 100                              | 62.31 ± 3.68 d                                             |

注：戊唑醇为阳性药剂对照；抑制率以平均值 ± 标准误差表示；同列不同小写字母表示经统计分析在  $\alpha = 0.05$  水平差异显著。

Note: Tebuconazole was used as the positive control; inhibition rates were presented as mean ± SD. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences at 0.05 level.

的抑制率达到了 90.18% 和 74.35%，均高于阳性对照药物戊唑醇 (62.31%)。

3 结论与讨论

本文研究了从太湖底泥中筛选到的吸水链霉

菌 HU216 的次级代谢产物及抗植物病原真菌活性。经活性追踪，从发酵液分离纯化出 6 个单体化合物，经鉴定分别为子囊霉素 (ascomycin, 1)、3-(1-羟丙基) 苯酚 (3-(1-hydroxypropyl)phenol, 2)、阿比利醚 (abierixin, 3)、(2*E*,4*Z*)-8-羟基癸-2,4-二烯酸 ((2*E*,4*Z*)-8-hydroxydeca-2,4-dienoic acid, 4)、库瓦烯 (cuevaene A, 5) 和 29-*O*-尼日利亚菌素 (29-*O*-methylnigericin, 6)。活性测试结果表明，化合物 1、2 和 3 对苹果树腐烂病病原菌、玉米圆斑病原菌和番茄灰霉病病原菌表现出显著的抑制效果，特别是化合物 1 和 2 在 100 mg/L 下可完全抑制番茄灰霉病病原菌的生长，同时对山核桃干腐病病原菌、黄瓜棒孢病病原菌、番茄早疫病病原菌均有不同程度的抑制作用。文献报道的吸水链霉菌 (*Streptomyces hygroscopicus*) 能够产生免疫抑制剂雷帕霉素 (rapamycin)、子囊霉素 (ascomycin)，抗真菌活性的化合物制霉素 (nystatin)、丰加霉素 (toyocamycin)<sup>[21-22]</sup> 等活性物质，其活性代谢产物结构并不完全相同，说明不同生境下的同一菌株其次生代谢产物具有一定的多样性。本研究揭示了太湖底泥来源吸水链霉菌 HU216 产生的次级代谢



图2 六种化合物对离体番茄果实上灰霉病菌的防治效果

Fig. 2 Control efficacy of six compounds against grey mold on detached tomato fruits

产物和生物活性，为开发新的农用抗生素提供了新的微生物来源和科学依据。

链霉菌代谢产物一直是新药研发的重要来源，在寻找抗菌药物先导化合物方面发挥着不可或缺的作用。本研究发现吸水链霉菌 HU216 代谢产物展现出显著的抗真菌活性，具有应用研究价值。化合物 1 子囊霉素是一种大环内酯类抗菌药，目前已有报道其具有免疫抑制、抗病毒及抗真菌作用<sup>[32-34]</sup>。子囊霉素在国内作为微生物源类杀菌剂于 2001 年由上海市农药研究所创制成功。其高效、低毒，对环境友好，能防治作物灰霉病、玉米小斑病等多种病害，曾取得农药临时登记证<sup>[35]</sup>，至今未转入正式登记。本研究再次验证其有良好抗农用真菌活性。化合物 2 为 2-(2-hydroxypropyl) phenol 的类似物，2-(2-hydroxypropyl) phenol 是一种有效杀菌剂 2-allylphenol (2-AP) 的代谢产物，可抗瓜果腐霉 (*Pythium aphanidermatum*)、番茄灰霉病病原菌等多种植物病原真菌<sup>[36]</sup>，本研究发现化合物 2 也表现出了较好的抗真菌活性。化合物 3 和 6 为聚醚类化合物，其中化合物 3 可作饲料添加剂，具有抗细菌和抗球虫活性<sup>[37-38]</sup>；化合物 6 为尼日利亚菌素的衍生物，可用作抗肿瘤药物<sup>[31]</sup>，而尼日利亚菌素本身具有显著的抗真菌活性<sup>[39]</sup>，在本研究中化合物 3 和 6 均表现出了一定的抗真菌活性。化合物 5 为多烯类化合物，具有抗细菌活性<sup>[30]</sup>，本研究发现其有较弱的抗真菌活性。本文首次发现子囊霉素对山核桃干腐病病原菌、黄瓜棒孢病病原菌和番茄早疫病病原菌有抑制作用，对苹果树腐烂病病原菌和玉米圆斑

病病原菌有较强抑制作用，在 30 μg/滤纸片时抑制率分别为 89.87% 和 64.38%，均强于阳性对照戊唑醇的抑菌活性；阿比利醚、29-*O*-尼日利亚菌素和 3-(1-羟丙基)苯酚对上述 5 种植物病原真菌的抑制率与阳性对照相当；化合物 4 和 5 对 6 种供试菌也表现出一定的抑制作用。研究结果丰富了子囊霉素 (1) 和 3-(1-羟丙基)苯酚 (2) 的抑菌谱，进一步证明了子囊霉素作为农用抗生素的潜力。3-(1-羟丙基)苯酚以其简单的分子结构展示了对多种植物病原真菌显著的抑制活性，可作为抗菌先导化合物进一步开发。其在生化和分子水平上的作用方式以及该化合物在植物病害防治中的作用，其安全性及活性作用机理等，有待进一步研究探讨。

参考文献 (References):

[1] 康振生. 我国植物真菌病害的研究现状及发展策略[J]. 植物保护, 2010, 36(3): 9-12.  
KANG Z S. Current status and development strategy for research on plant fungal diseases in China[J]. Plant Prot, 2010, 36(3): 9-12.

[2] FISHER M C, HENK D A, BRIGGS C J, et al. Emerging fungal threats to animal, plant and ecosystem health[J]. Nature, 2012, 484(7393): 186-194.

[3] PUGLIESE M, GILARDI G, GARIBALDI A, et al. The impact of climate change on vegetable crop diseases and their management: the value of phytotron studies for the agricultural industry and associated stakeholders[J]. Phytopathology, 2024, 114(5): 843-854.

[4] 姚彦坡, 朱永官, 褚海燕. 加强气候变化背景下植物病原真菌控制技术的创新和突破[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(3): 473-475.  
YAO Y P, ZHU Y G, CHU H Y. Strengthen the innovation and breakthrough of plant pathogenic fungi control technology in the

context of climate change[J]. *J Agro Environ Sci*, 2024, 43(3): 473-475.

[ 5 ] FISHER M C, ALASTRUEY-IZQUIERDO A, BERMAN, J, et al. Tackling the emerging threat of antifungal resistance to human health[J]. *Nat Rev Microbiol*, 2022, 20(9): 557-571.

[ 6 ] 汤鸣强, 吴承燕, 何爱明, 等. 化学农药对三沙湾滩涂土壤细菌多样性及其功能的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2023, 42(11): 2483-2493.

TANG M Q, WU C Y, HE A M, et al. Effects of agrochemicals on soil bacterial diversity and functions in the coastal tidal-flat area of Sansha Bay[J]. *J Agro Environ Sci*, 2023, 42(11): 2483-2493.

[ 7 ] CULP E J, YIM G, WAGLECHNER N, et al. Hidden antibiotics in actinomycetes can be identified by inactivation of gene clusters for common antibiotics[J]. *Nat Biotechnol*, 2019, 37(10): 1149-1154.

[ 8 ] LEIMER N, WU X Q, IMAI Y, et al. A selective antibiotic for Lyme disease[J]. *Cell*, 2021, 184(21): 5405-5418. e16.

[ 9 ] PERRY E K, MEIRELLES L A, NEWMAN D K. From the soil to the clinic: the impact of microbial secondary metabolites on antibiotic tolerance and resistance[J]. *Nat Rev Microbiol*, 2022, 20(3): 129-142.

[10] 张勇, 沈吉, 王建军, 等. 东太湖表层沉积物放线菌群落结构多样性及其空间异质性[J]. *生态科学*, 2011, 30(1): 8-13.

ZHANG Y, SHEN J, WANG J J, et al. Phylogenetic diversity and spatial heterogeneity of Actinobacteria communities in the surface sediments of the East Taihu Lake[J]. *Ecol Sci*, 2011, 30(1): 8-13.

[11] CHEN J N, XU L, ZHOU Y R, et al. Natural products from actinomycetes associated with marine organisms[J]. *Mar Drugs*, 2021, 19(11): 629.

[12] KUANG B, XIAO R, HU Y P, et al. Metagenomics reveals biogeochemical processes carried out by sediment microbial communities in a shallow eutrophic freshwater lake[J]. *Front Microbiol*, 2023, 13: 1112669.

[13] VURUKONDA S S K P, GIOVANARDI D, STEFANI E. Plant growth promoting and biocontrol activity of *Streptomyces* spp. as endophytes[J]. *Int J Mol Sci*, 2018, 19(4): 952.

[14] CHEN Y F, ZHOU D B, QI D F, et al. Growth promotion and disease suppression ability of a *Streptomyces* sp. CB-75 from banana rhizosphere soil[J]. *Front Microbiol*, 2018, 8: 2704.

[15] KAALE S E, MACHANGU R S, LYIMO T J. Molecular characterization and phylogenetic diversity of actinomycetota species isolated from Lake Natron sediments at Arusha, Tanzania[J]. *Microbiol Res*, 2024, 278: 127543.

[16] LIU Z J, SUN W Y, HU Z, et al. Marine *Streptomyces*-derived novel alkaloids discovered in the past decade[J]. *Mar Drugs*, 2024, 22(1): 51.

[17] LEBLANC N. Bacteria in the genus *Streptomyces* are effective biological control agents for management of fungal plant pathogens: a meta-analysis[J]. *BioControl*, 2022, 67(1): 111-121.

[18] WANG J J, ZHANG Y, LI Z K, et al. Higher seasonal variation of actinobacterial communities than spatial heterogeneity in the surface sediments of Taihu Lake, China[J]. *Can J Microbiol*, 2013, 59(5): 353-358.

[19] 陈瑶瑶, 刘雪萍, 张绍勇, 等. 南太湖水体抑藻菌的筛选分离及其活性成分鉴定[J]. *浙江农业学报*, 2024, 36(5): 1124-1133.

CHEN Y Y, LIU X P, ZHANG S Y, et al. Isolation of strains with algicidal activity from South Taihu Lake in China and identification of active compounds[J]. *Acta Agric Zhejiangensis*, 2024, 36(5): 1124-1133.

[20] 刘雪萍, 张绍勇, 陈瑶瑶, 等. 南太湖沉积物中可培养放线菌的分离、鉴定及其抑菌活性[J]. *中国饲料*, 2024(7): 11-19.

LIU X P, ZHANG S Y, CHEN Y Y, et al. Isolation, identification, and antimicrobial activity of culturable *Actinomycetes* from the sediment of South Taihu Lake[J]. *China Feed*, 2024(7): 11-19.

[21] GANESH S K, SUBATHRA D C. Formulation of cost-effective medium and optimization studies for enhanced production of rapamycin[J]. *Microb Cell Fact*, 2023, 22(1): 189.

[22] 王俊博, 孔令新, 乔永健, 等. 基于基因组挖掘的农抗 120 活性成分制霉菌素和丰加霉素的发现和鉴定[J]. *微生物学报*, 2021, 61(10): 3076-3086.

WANG J B, KONG L X, QIAO Y J, et al. Genome mining guided discovery and identification of nystatin and toyocamycin in *Streptomyces hygrospinosus* var. *beijingensis*[J]. *Acta Microbiol Sin*, 2021, 61(10): 3076-3086.

[23] KHOOBCHANDANI M, OJESWI B K, GANESH N, et al. Antimicrobial properties and analytical profile of traditional *Eruca sativa* seed oil: comparison with various aerial and root plant extracts[J]. *Food Chem*, 2010, 120(1): 217-224.

[24] 何明川, 曾舒泉, 王志江, 等. 一株烟草疫霉拮抗菌 MC4-2 的鉴定、发酵条件优化及防效测定[J]. *微生物学通报*, 2021, 48(12): 4636-4648.

HE M C, ZENG S Q, WANG Z J, et al. Identification, fermentation condition optimization and control effect of an antagonistic strain MC4-2 against *Phytophthora parasitica* var. *nicotianae*[J]. *Microbiol China*, 2021, 48(12): 4636-4648.

[25] LI G J, WANG Y, ZHANG Z Q, et al. Mushroom alcohol controls gray mold caused by *Botrytis cinerea* in harvested fruit via activating the genes involved in jasmonic acid signaling pathway[J]. *Postharvest Biol Technol*, 2022, 186: 111843.

[26] FERRABOSCHI P, COLOMBO D, DE MIERI M, et al. Evaluation, synthesis and characterization of tacrolimus impurities[J]. *J Antibiot*, 2012, 65(7): 349-354.

[27] UJVARY I, MIKITE G. A practical synthesis of 3-*n*-propylphenol, a component of tsetse fly attractant blends[J]. *Org Process Res Dev*, 2003, 7(4): 585-587.

[28] DAVID L, AYALA H L, TABET J C. Abierixin, a new polyether antibiotic. Production, structural determination and biological activities[J]. *J Antibiot*, 1985, 38(12): 1655-1663.

[29] VANMIDDLESWORTH F, DUFRESNE C, SMITH J, et al. Structure elucidation of L-687, 781, a new  $\beta$ -1, 3-*D*-glucan synthesis

inhibitor[J]. [Tetrahedron](#), 1991, 47(36): 7563-7568.

[30] SCHLEGEL B, GROTH I, GRAFE U, Cuevaenes A and B, new polyene carboxylic acids from *Streptomyces* sp. HKI 0180[J]. [J Antibiot](#), 2000, 53(4): 415-417.

[31] 王俊锋, 王雪妮, 刘永宏. 一种尼日利亚菌素衍生物及其制备方法和在制备抗肿瘤药物中的应用: CN113527325A[P]. 2021-10-22.

WANG J F, WANG X N, LIU Y H. A derivative of Nigerian bacteriocin and its preparation method, and its application in the preparation of anti-tumor drugs. CN113527325A[P]. 2021-10-22.

[32] QUARTIER J, LAPTEVA M, BOULAGUIEM Y, et al. Influence of molecular structure and physicochemical properties of immunosuppressive drugs on micelle formulation characteristics and cutaneous delivery[J]. [Pharmaceutics](#), 2023, 15(4): 1278.

[33] ZHOU L, ZHOU J, CHEN T L, et al. Identification of Ascomycin against Zika virus infection through screening of natural product library[J]. [Antivir Res](#), 2021, 196: 105210.

[34] SAMBYAL K, SINGH R V. Bioprocess and genetic engineering aspects of ascomycin production: a review[J]. [J Genet Eng Biotechnol](#), 2020, 18(1): 73.

[35] 顾学斌, 王磊. 新颖生物杀菌剂: 长川霉素[J]. [世界农药](#), 2007, 29(6): 51.

GU X B, WANG L. A novel biological bactericide—changchuan-mycin[J]. [World Pestic](#), 2007, 29(6): 51.

[36] QU T L, GAO S M, LI J Q, et al. Synthesis and antifungal activity of 2-allylphenol derivatives against fungal plant pathogens[J]. [Pestic Biochem Physiol](#), 2017, 135: 47-51.

[37] SUPONG K, THAWAI C, CHOOWONG W, et al. Antimicrobial compounds from endophytic *Streptomyces* sp. BCC72023 isolated from rice (*Oryza sativa* L.)[J]. [Res Microbiol](#), 2016, 167(4): 290-298.

[38] SUPONG K, SRIPREECHASAK P, TANASUPAWAT S, et al. Investigation on antimicrobial agents of the terrestrial *Streptomyces* sp. BCC71188[J]. [Appl Microbiol Biotechnol](#), 2017, 101(2): 533-543.

[39] COUILLEROT O, LOQMAN S, TORIBIO A, et al. Purification of antibiotics from the biocontrol agent *Streptomyces anulatus* S37 by centrifugal partition chromatography[J]. [J Chromatogr B Analyt Technol Biomed Life Sci](#), 2014, 944: 30-34.

(责任编辑: 李 蕊)

• 书 讯 •

一部系统介绍农药环境污染危害调查与评价相关知识的学术著作

《农药环境污染危害调查与评价》

李倩 滕葭 柳琪 编著

化学工业出版社 出版



内容简介:

本书详细介绍了农药对农业环境和农作物的污染危害, 农作物侵染性病害与非侵染性病害的识别, 农药对农作物与农业生态环境生物的危害识别等内容, 此外, 还重点介绍了农药对农作物与农业环境的危害处理程序, 内容新颖系统, 可读性强。有助于读者初步掌握农药对农作物和农业生态环境危害的相关知识, 以提高读者鉴别农作物和农业生态环境中农药危害的能力。

图书特点:

(1) 全面整理农作物受害症状, 科学鉴别农药环境污染危害

本书全面整理了 55 种常见农作物的侵染性病害症状, 32 种常见农作物元素失调危害症状, 14 种农作物药害症状, 以及 4 大类农业生态环境药害表现, 为农作物和农业生态危害的鉴别提供依据, 有助于读者初步掌握农药对农作物和农业生态环境危害的相关知识。

(2) 系统介绍危害调查处理程序, 示范农药污染物检测方法

本书系统介绍了农业环境危害调查鉴定的 7 个环节, 以及农业环境危害调查鉴定意见书编写的 10 个步骤, 对水、土壤中有有机磷农药检测方法, 蔬菜和水果中植物生长调节剂测定方法以及土壤中磺酰胺类除草剂残留量的测定方法作出具体示范, 全面提升读者识别、调查、检测农药环境污染危害的能力。

◆书 号: 9787122463630    ◆定 价: 88.00 元    ◆出版时间: 2024 年 11 月    ◆开 本: B5

邮购地址: 北京市东城区青年湖 13 号化学工业出版社; 邮编: 100011; 当当、京东、天猫网店均可销售, 输入书号或书名搜索。也可联系出版社相关人员 (电话: 010-64519154/17610529386)。约稿出书请联系 (电话: 010-64519457/13810683813)。

(刘 军 提供)