

冯楠楠, 李青青, 沐琦, 等. 1 株红树内生真菌高粱附球菌 *Epicoccum sorghinum* 的代谢产物及抗菌活性 [J]. 华南农业大学学报, 2022, 43(4): 77-81.
FENG Nannan, LI Qingqing, MU Qi, et al. Metabolites and antifungal activities of an endophytic fungus *Epicoccum sorghinum* from mangrove[J]. Journal of South China Agricultural University, 2022, 43(4): 77-81.

1 株红树内生真菌高粱附球菌 *Epicoccum sorghinum* 的代谢产物及抗菌活性

冯楠楠¹, 李青青², 沐琦¹, 林珊愉¹, 刘圣权¹, 李浩君¹, 李春远¹, 熊亚红¹

(1 华南农业大学 生物基材料与能源教育部重点实验室/材料与能源学院, 广东 广州 510642;

2 广东新科农生物科技有限公司, 广东 韶关 512000)

摘要:【目的】研究红树内生真菌高粱附球菌 *Epicoccum sorghinum* L28 的代谢产物及其抗真菌活性。【方法】柱层析分离纯化代谢产物, 波谱技术鉴定结构; 二倍稀释法测试代谢产物对小麦赤霉菌 *Fusarium graminearum* 和番茄枯萎菌 *F. oxysporum* 的最小抑菌浓度 (Minimum inhibitory concentration, MIC)。【结果】分离鉴定出 7-羟基-2, 5-二甲基色原酮 (化合物 1)、Livistone A (化合物 2)、Barceloneic acid A (化合物 3)、Barceloneic lactone (化合物 4)、2'-O-methylbarceloneate (化合物 5)、Spirostaphylotrichin R (化合物 6)、Spirostaphylotrichin U (化合物 7)、 β -谷甾醇 (化合物 8)、 β -胡萝卜素 (化合物 9) 和 β -腺苷 (化合物 10)。化合物 1 能强烈抑制小麦赤霉菌和番茄枯萎菌的生长, MIC 均为 100 $\mu\text{g/mL}$; 化合物 5 对番茄枯萎菌的生长具有中等抑制作用, MIC 为 200 $\mu\text{g/mL}$ 。【结论】化合物 1 和化合物 5 可作为相应抗菌农药先导化合物开展研究。

关键词: 红树林; 植物内生真菌; 代谢产物; 抗真菌活性; 二倍稀释法

中图分类号: O629

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2022)04-0077-05

Metabolites and antifungal activities of an endophytic fungus *Epicoccum sorghinum* from mangrove

FENG Nannan¹, LI Qingqing², MU Qi¹, LIN Shanyu¹, LIU Shengquan¹, LI Haojun¹, LI Chunyuan¹, XIONG Yahong¹
(1 Key Laboratory of Biomaterials and Energy, Ministry of Education/College of Materials and Energy, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2 Guangdong New Kenong Biological Technology Co. Ltd, Shaoguan 512000, China)

Abstract: 【Objective】The metabolites of *Epicoccum sorghinum* L28 from mangrove and their antifungal activities were studied. 【Method】The metabolites were isolated and purified by column chromatography, and their structures were identified by spectral technique. The minimum inhibitory concentration (MIC) of the metabolites against *Fusarium graminearum* and *F. oxysporum* were tested by the double dilution method. 【Result】Ten compounds were isolated and identified as 7-hydroxy-2, 5-dimethyltrichroprimorone (compound 1), livistone A (compound 2), barceloneic acid A (compound 3), barceloneic lactone (compound 4), 2'-O-methylbarceloneate (compound 5), spirostaphylotrichin R (compound 6), spirostaphylotrichin U (compound 7), β -sitosterol (compound 8), β -carotenoside (compound 9) and β -adenosine (compound 10). 7-hydroxy-2, 5-dimethyltryptophanone displayed strong inhibitory effect against the growths of *F. graminearum* and *F.*

收稿日期: 2021-12-08 网络首发时间: 2022-04-13 17:03:32
网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20220412.1754.002.html>
作者简介: 冯楠楠, 硕士研究生, 主要从事资源利用与植物保护研究, E-mail: fengnannan7a@163.com; 通信作者: 李春远, 教授, 博士, 主要从事天然产物化学研究, E-mail: chunyuanli@scau.edu.cn; 熊亚红, 副教授, 博士, 主要从事应用化学研究, E-mail: xiongyahong@scau.edu.cn
基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金 (2019B1515210023, 2020A1515010325); 广东省自然科学基金 (2018A030313582)

oxysporum with MIC of 100 $\mu\text{g/mL}$. 2'-O-methylbarceloneate showed moderate inhibitory activity against *F. oxysporum* with MIC of 200 $\mu\text{g/mL}$. 【Conclusion】 Compounds 1 and 5 could be further studied as the lead compounds of corresponding antifungal pesticides.

Key words: Mangrove; Plant endophytic fungus; Metabolite; Antifungal activity; Double dilution method

近年来,全球气候变暖和农业产业结构的变化导致植物病害频繁暴发,对我国农业生产造成严重威胁^[1],例如禾谷镰孢菌 *Fusarium graminearum* 可引起小麦赤霉病,多在小麦穗期和苗期发生,导致苗腐、秆腐和穗腐^[2],尖孢镰孢菌 *Fusarium oxysporum* 可引起番茄枯萎病,侵染植株导管组织,使得植株萎蔫^[3]。化学防治由于见效快一度成为我国病害防治的重要手段,但用量大、毒性强、残留多等问题也给环境造成了严重威胁^[4]。植物内生真菌次级代谢产物属于天然产物,通常毒性低、易降解,是发掘新的环境友好的抗菌活性物质的重要资源^[5],红树林真菌代谢产物是其中的研究热点^[6]。高粱附球菌 *Epicoccum sorghinum* L28 是我们分离自海洋红树林植物苦槛蓝 *Myoporum bontioides* A. Gray 叶片的 1 株内生真菌,前期曾从中发现了 9 个具有抗菌活性的新化合物^[7]。本文研究其代谢产物的分离、鉴定及抗植物病原菌活性,以期找到有潜力的防治植物病害的活性物质。

1 材料与方法

1.1 材料

LCMS-IT-TOF 液质联用仪,日本 Shimadzu 公司生产; Bruker AV600 核磁共振波谱仪,德国 Bruker Biospin GmbH 公司生产。硅胶柱填料 (50~80 μm),中国青岛海洋化工有限公司生产;其余所有分离溶剂均为分析级。三唑酮,中国上海 Aladdin 生化科技有限公司生产。

高粱附球菌 *Epicoccum sorghinum* L28 于 2018 年 6 月从中国雷州半岛半红树林植物苦槛蓝 *Myoporum bontioides* 叶片中分离得到。其种属已通过形态学、内部转录间隔区 (ITS)rDNA 序列 (Genbank No. MZ378789) 和 β -微管蛋白 (β -tub2) 基因序列 (Genbank No. MZ407981) 得到鉴定并报道^[7]。它与禾谷镰孢菌 *Fusarium graminearum*、尖孢镰孢菌 *Fusarium oxysporum* 保藏在华南农业大学材料与能源学院。

1.2 发酵培养

将 *E. sorghinum* L28 菌株接种于马铃薯蔗糖琼

脂 (PSA) 培养基,28 $^{\circ}\text{C}$ 恒温黑暗条件下培养 5~7 d 活化。在 1000 mL 锥形瓶中装入 100 g 籼米,100 mL 水,于 121 $^{\circ}\text{C}$ 高温高压灭菌 30 min 后接种活化后的 *E. sorghinum* L28 菌株,28 $^{\circ}\text{C}$ 条件下静置培养 30 d,共培养 100 瓶。

1.3 发酵产物的分离与提取

用 ϕ 为 95% 乙醇溶液浸泡菌种,重复 3 次,每次浸泡 3 d。将乙醇提取液浓缩,用乙酸乙酯萃取 3 次,浓缩后经硅胶柱层析法分离代谢物,按照石油醚:乙酸乙酯体积比 10:0~0:10、乙酸乙酯:甲醇体积比 10:0~5:1 梯度洗脱,再借助硅胶柱色谱进行分离,得到化合物 1~10。

1.4 结构鉴定

通过分析化合物的氢谱 (^1H NMR)、碳谱 (^{13}C NMR)、电喷雾质谱 (ESIMS)、电喷雾高分辨质谱 (HRESIMS) 等试验数据,并与文献或标准品对照,鉴定化合物 1~10 的结构。

1.5 抗菌活性测试

采用二倍稀释法^[8]测试化合物对小麦赤霉菌 *F. graminearum* 和番茄枯萎菌 *F. oxysporum* 的最小抑菌浓度 (Minimum inhibitory concentration, MIC) 阳性对照选取三唑酮。

2 结果与分析

2.1 化合物及波谱数据

分离到 10 种化合物,在 $V(\text{石油醚}):V(\text{乙酸乙酯})=3:1$ 时得到化合物 1 (1.7 mg) 和化合物 2 (1.8 mg);在 $V(\text{石油醚}):V(\text{乙酸乙酯})=1:1$ 时用乙酸乙酯重结晶,而后用甲醇清洗晶体表面得到化合物 3 (30.5 mg);在 $V(\text{石油醚}):V(\text{乙酸乙酯})=1:1$ 时得到化合物 4 (20.9 mg);在 $V(\text{石油醚}):V(\text{乙酸乙酯})=7:1$ 时得到化合物 5 (1.7 mg);在 $V(\text{石油醚}):V(\text{乙酸乙酯})=1:3$ 时分离得到化合物 6 和化合物 7 的混合物 (79.5 mg);在 $V(\text{石油醚}):V(\text{乙酸乙酯})=10:1$ 时分离得到化合物 8 (14.7 mg);在 $V(\text{乙酸乙酯}):V(\text{甲醇})=10:1$ 时分离得到化合物 9 (3.8 mg) 和化合物 10 (8.5 mg)。

鉴定化合物 1~10 分别为 7-羟基-2,5-二甲基色原酮、Livistone A、Barceloneic acid A、

Barceloneic lactone、2'-O-methylbarceloneate、Spirostaphylotrichin R、Spirostaphylotrichin U、 β -谷甾醇、 β -胡萝卜苷和 β -腺苷。其中化合物1~7的波谱数据如下。

化合物1:黄色晶体。分子式 $C_{11}H_{10}O_3$, ESIMS (m/z): 191.1 $[M+H]^+$ 。 1H NMR(400 MHz, acetone- d_6) δ_H 2.29 (d, 0.50 Hz, 3H), 2.70 (s, 3H), 5.94 (s, 1H), 6.67 (d, 2.0 Hz, 1H), 6.68 (d, 2.0 Hz, 1H)。 ^{13}C NMR (100 MHz, acetone- d_6) δ_C 179.5, 164.6, 161.8, 160.6, 143.0, 117.2, 113.1, 111.7, 101.5, 22.8, 19.7。

化合物2:无色粉末。分子式为 $C_{16}H_{14}O_6$, ESIMS (m/z): 335.1 $[M+H]^+$ 。 1H NMR (400 MHz, acetone- d_6) δ_H 6.66 (br s, 1H), 6.52 (br s, 2H), 5.06 (s, 2H), 2.44 (s, 3H), 2.36 (s, 3H); ^{13}C NMR (150 MHz, acetone- d_6) δ_C 163.9, 162.2, 161.4, 155.6, 146.0, 144.9, 143.5, 132.6, 116.7, 116.5, 115.0, 113.9, 106.0, 56.4, 21.3, 17.2。

化合物3:乳白色粉末。分子式 $C_{16}H_{16}O_7$, ESIMS (m/z): 320.1 $[M+H]^+$ 。 1H NMR (400 MHz, acetone- d_6) δ_H 6.67 (d, 3.0 Hz, 1H), 6.54 (d, 3.0 Hz, 1H), 6.49 (d, 1.8 Hz, 1H), 6.02 (d, 1.8 Hz, 1H), 4.53 (br s, 2H), 3.80 (s, 3H), 2.18 (s, 3H); ^{13}C NMR (150 MHz, acetone- d_6) δ_C 171.9, 164.4, 159.3, 159.2, 151.07, 147.8, 137.5, 132.5, 112.6, 105.7, 105.3, 102.5, 101.0, 60.3, 55.8, 22.0。

化合物4:无色结晶。分子式为 $C_{16}H_{14}O_6$, ESIMS (m/z): 303.1 $[M+H]^+$ 。 1H NMR (400 MHz, acetone- d_6) δ_H 8.95 (s, 1H), 8.55 (s, 1H), 6.74 (d, 3.0 Hz, 1H), 6.56 (d, 3.0 Hz, 1H), 6.55 (d, 3.0 Hz, 1H), 6.28 (d, 3.0 Hz, 1H), 5.17 (br s, 2H), 3.72 (s, 3H), 2.27 (s, 3H); ^{13}C NMR (150 MHz, acetone- d_6) δ_C 167.8, 156.9, 156.3, 153.9, 150.1, 145.0, 138.7, 128.9, 114.9, 114.6, 111.9, 105.4, 103.3, 69.2, 55.5, 21.2。

化合物5:白色粉末。分子式 $C_{17}H_{18}O_7$, ESIMS (m/z): 335.1 $[M+H]^+$ 。 1H NMR (400 MHz, acetone- d_6) δ_H 11.02 (s, 1H), 8.30 (s, 1H), 6.70 (d, 3.0 Hz, 1H), 6.49 (d, 3.0 Hz, 1H), 6.42 (s, 1H), 5.95 (s, 1H), 4.49 (d, 4.0 Hz, 2H), 4.07 (t, 5.6 Hz, 1H), 3.94 (s, 3H), 3.79 (s, 3H), 2.14 (s, 3H); ^{13}C NMR (150 MHz, acetone- d_6) δ_C 170.7, 162.2, 159.2, 158.0, 150.0, 145.9, 137.0, 132.2, 110.6, 105.4, 103.9, 102.1, 101.0, 58.8, 54.7, 51.8, 21.6。

化合物6 (和化合物7以物质的量3:5混合):淡黄色固体。分子式 $C_{14}H_{19}NO_6$, HRESIMS (m/z): 298.129 5 $[M+H]^+$ 。 1H NMR(400 MHz, $CDCl_3$) δ_H

7.05 (d, 10.0 Hz, 1H), 6.17 (t, 12.0 Hz, 1H), 5.93, (d, 10.0 Hz, 1H), 4.74, (s, 1H), 4.09 (s, 1H), 4.01, (s, 3H), 2.21 (m, 2H), 1.67 (s, 3H), 1.05 (t, 7.2 Hz, 3H)。 ^{13}C NMR (100 MHz, $CDCl_3$) δ_C 197.1, 167.5, 153.2, 150.5, 128.5, 120.9, 86.7, 73.5, 68.5, 64.5, 56.5, 23.6, 23.5, 13.5。

化合物7 (和化合物6以物质的量5:3混合):淡黄色固体。分子式 $C_{14}H_{19}NO_6$, HRESIMS (m/z): 298.129 3 $[M+H]^+$ 。 1H NMR(400 MHz, $CDCl_3$) δ_H 7.12 (d, 10.0 Hz, 1H), 6.37 (t, 12.0 Hz, 1H), 5.97 (d, 10.0 Hz, 1H), 4.74 (s, 1H), 3.83 (s, 1H), 4.01 (s, 3H), 2.27 (m, 1H), 2.10 (m, 1H), 1.55 (s, 3H), 1.08 (t, 7.2 Hz, 3H)。 ^{13}C NMR (100 MHz, $CDCl_3$) δ_C 195.3, 166.3, 154.0, 152.6, 127.3, 120.1, 90.4, 73.3, 73.2, 64.5, 56.8, 23.6, 18.6, 13.2。

化合物8、化合物9和化合物10为 β -谷甾醇、 β -胡萝卜苷、 β -腺苷,均为真菌和天然产物中常见的化合物,数据略。

2.2 化合物结构鉴定

所鉴定的10个化合物的结构如图1所示。

化合物1的 1H NMR谱 δ_H 6.67 (d, 2.0 Hz), 6.68 (d, 2.0 Hz) 苯环间位H信号表明存在1个1, 2, 3, 5-四取代苯环, ^{13}C NMR谱除显示6个苯环碳信号外,还显示1个双键及1个与苯环及双键共轭的羰基碳信号 δ_C 179.5,这表明化合物1具有色原酮碳架。此外, 1H NMR谱还观察到2个甲基信号 δ_H 2.29、2.70及1个未与其他质子偶合的双键H信号 δ_H 5.94。查阅文献核磁数据[9],鉴定为7-羟基-2, 5-二甲基色原酮。

化合物2的 1H NMR谱显示了3个苯环H信号(由于仪器分辨率问题,未能观察到明显裂分),结合 ^{13}C NMR谱12个双键碳及1个羰基碳信号,表明分子仍是二苯醚骨架,且与化合物3相比多1个环结构,推测可能具有内酯环结构。 1H NMR谱还显示了1个连羟基的 $-CH_2$ 以及2个甲基信号。查阅文献波谱数据[10],鉴定为Livistone A。

化合物3的分子式通过ESIMS (m/z): 320.1 $[M+H]^+$ 结合 ^{13}C NMR确定分子式为 $C_{16}H_{16}O_7$ 。 1H NMR谱 δ_H 6.67 (d, 3.0 Hz, 1H), 6.54 (d, 3.0 Hz, 1H), 6.49 (d, 1.8 Hz, 1H), 6.02 (d, 1.8 Hz, 1H)的信号表明存在2个1, 2, 3, 5-四取代苯环; δ_H 4.53 (br s, 2H)是连羟基的亚甲基信号,3.80 (s, 3H)和2.18 (s, 3H)分别是甲氧基和甲基信号, ^{13}C NMR谱除上述基团外,还显示了1个羧基碳信号 δ_C 171.9,剩余的取代基为满足分子式推测可能是羟基。根据文献[11],

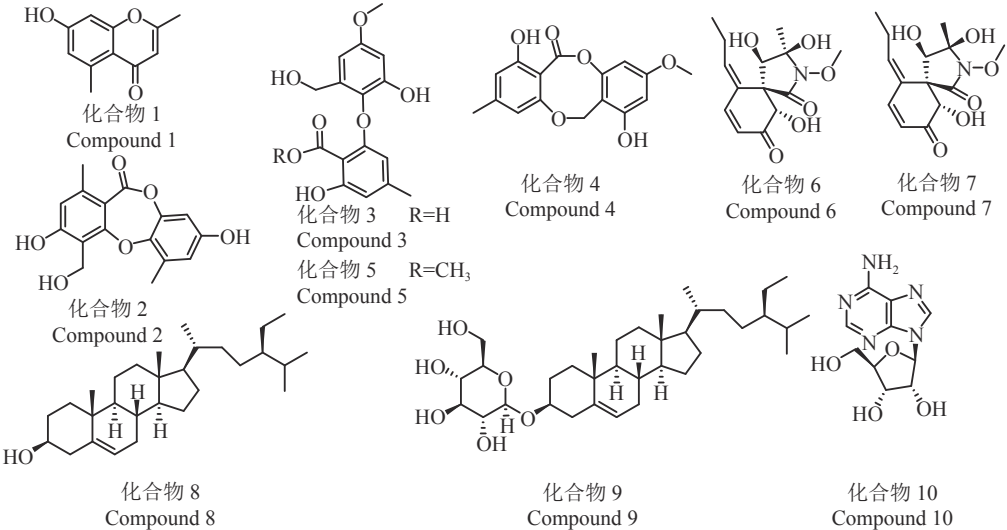


图 1 化合物的分子结构
Fig. 1 Structures of compounds

鉴定为 *Barceloneic acid A*。

化合物 4 的 ^1H NMR 谱 δ_{H} 6.74 (d, 3.0 Hz, 1H), 6.56 (d, 3.0 Hz, 1H), 6.55 (d, 3.0 Hz, 1H), 6.28 (d, 3.0 Hz, 1H) 表明, 其和化合物 3 一样存在 2 个 1, 2, 3, 5-四取代苯环, δ_{H} 5.17 (br s, 2H), 3.72 (s, 3H), 2.27 (s, 3H) 分别是 1 个连氧的亚甲基, 1 个甲氧基和 1 个甲基信号, δ_{H} 8.95 (s, 1H), 8.55 (s, 1H) 是 2 个酚羟基信号, 表明化合物 4 仍然是二苯醚骨架。 ^{13}C NMR 谱还显示了 1 个酯羰基信号, 根据文献 [12] 数据, 鉴定为 *Barceloneic lactone*。

化合物 5 的相对分子质量比化合物 3 的多 15, ^1H NMR 及 ^{13}C NMR 与化合物 3 的十分类似, 仅多出了 1 个甲氧基信号 δ_{H} 3.94 (s, 3H), δ_{C} 58.8, 由于苯环碳化学位移值基本未变化, 推测化合物 5 是化合物 3 羧基 H 被甲基取代的衍生物。根据文献 [13] 数据, 鉴定为 *2'-O-methylbarceloneate*。

化合物 6 和化合物 7 一起被分离到, 通过氢谱积分比例发现二者大约以物质的量 3:5 的比例混合, 碳谱显示出 28 个碳, 且每 2 个碳的化学位移值比较接近, 推测这 2 个化合物是 1 对旋光异构体。化合物 6 和 7 的 HRESIMS (m/z): 298.129 5 [$\text{M}+\text{H}$] $^+$ 结合 ^{13}C NMR 谱 (共显示 28 个 C, 按每个化合物 14 个 C 计) 表明每个化合物的分子式为 $\text{C}_{14}\text{H}_{19}\text{NO}_6$ 。通过 $^1\text{H}-^1\text{H}$ COSY 以及氢谱积分, 可以发现 ^1H NMR 谱 δ_{H} 7.05 (d, 10.0 Hz, 1H), 5.93 (d, 10.0 Hz, 1H) 是 1 对双键上的 H, 结合异核单量子关系 (Heteronuclear singular quantum correlation, HSQC) 的 ^{13}C NMR δ_{C} 153.2, 120.9 的碳, 再联系 197 左右的碳, 推测分子中存在 1 个 α, β -六元环的烯酮结构单元。 ^1H NMR 谱 δ_{H} 6.17 (t, 12.0 Hz, 12-

H) 的双键化学位移偏向低场, 同时观察到它和 δ_{H} 7.05 弱的 $^1\text{H}-^1\text{H}$ COSY 相关信号, 再根据偶合常数和氢谱积分可以判断其一端与前述烯酮的双键相连且形成共轭, $^1\text{H}-^1\text{H}$ COSY 相关信号和积分比例显示, 其另一端与 δ_{H} 2.21 (m, 2H) 的 $-\text{CH}_2-$ 相连, 该 $-\text{CH}_2-$ 则与 δ_{H} 1.05 (t, 7.2 Hz, 3H) 的甲基连接。此外, 根据积分比例还可以判断出 ^1H NMR 谱中化合物 6 和 7 的混合物每个异构体分子分别具有 2 个连氧的次甲基、1 个甲氧基和 1 个甲基。扣除每个分子中的双键和羰基 (δ_{C} 120.0 ~197.1) 所具有的不饱和度, 表明分子中存在双环结构, 结合分子式判断可能还有 1 个五元环, 查阅文献 [14], 鉴定二者为 *Spirostaphylotrichin R* 和 *Spirostaphylotrichin U* 的混合物, 且物质的量比为 3:5, 并进行了氢谱和碳谱的归属。

化合物 8、化合物 9 和化合物 10 为真菌和植物中常见代谢产物, 化合物 8 的波谱数据与文献 [15-16] 对比基本一致, 化合物 9 和 10 波谱数据与文献 [17-18] 基本一致, 分别鉴定为 β -谷甾醇、 β -胡萝卜苷和 β -腺苷。

2.3 抗植物病原菌活性测定

采用二倍稀释法测定化合物 1~10 对小麦赤霉菌和番茄枯萎菌的 MIC, 结果表明, 化合物 1 对小麦赤霉菌的 MIC 为 100 $\mu\text{g/mL}$, 强于阳性对照三唑酮的 150 $\mu\text{g/mL}$, 同时其对番茄枯萎菌的 MIC 也为 100 $\mu\text{g/mL}$, 与阳性对照等效。化合物 5 对番茄枯萎菌的 MIC 为 200 $\mu\text{g/mL}$, 效果弱于三唑酮的 100 $\mu\text{g/mL}$ 。在抗菌测试所测样品最高质量浓度为 200 $\mu\text{g/mL}$ 的情况下, 其余化合物仍有菌生长, 即 MIC 数据均大于 200 $\mu\text{g/mL}$ 。

3 结论与讨论

从高粱附球菌 *Epicoccum sorghinum* L28 的发酵物乙醇浸泡液中共分离得到 10 种化合物。我们曾从该菌分离到 9 个二苯醚类新化合物, 它们的结构与本研所得化合物均不相同^[7]。本研所得化合物除化合物 2~5 属于二苯醚结构类型外, 还包括色原酮、生物碱、甾醇结构类型, 丰富了该菌的代谢产物库, 证实了该菌代谢产物具有结构多样性。抗菌测试结果表明, 化合物 7-羟基-2, 5-二甲基色原酮 (化合物 1) 能强烈抑制禾谷镰孢菌和尖孢镰孢菌的生长, 2'-O-methylbarceloneate (化合物 5) 对尖孢镰孢菌的生长具有中等抑制作用, 可作为相应的抗菌先导化合物开展深入研究。据文献报道 Livistone A 具有较强的 α -葡萄糖苷酶抑制活性, IC_{50} 为 $2.1 \pm 0.2 \mu\text{mol/L}$ ^[19], 且其对 H_2O_2 诱导的 SH-SY5Y (人神经母细胞瘤细胞) 细胞损伤具有明显的细胞保护活性^[10]; Barceloneic acid A 是一种新型温和的法呢基转移酶 (Farnesyl protein transferase, FPTase) 抑制剂, IC_{50} 为 $40 \mu\text{mol/L}$ ^[11]; Spirostaphylotrichin R 具有抗氧化活性, 对 OH $\cdot$ 的抑制作用较强, IC_{50} 为 0.17 mmol/L , 对 1, 1-二苯基-2-三硝基苯肼自由基 (DPPH 自由基; 1, 1-diphenyl-2-picrylhydrazyl radical) 和 O^2 自由基的清除作用较弱, IC_{50} 分别为 0.50 和 5.15 mmol/L ^[20]。因此, 它们也具有相应的开发价值。本研究结果丰富了天然植物内生真菌抗植物病原菌化合物库, 有利于抗菌农药的开发。此外, 研究也为 Livistone A、Barceloneic acid A、Spirostaphylotrichin R 等活性物质提供了新的菌种来源, 有助于后续开展深入研究。

参考文献:

[1] 欧阳迪莎, 施祖美, 吴祖建, 等. 植物病害与粮食安全[J]. 农业环境与发展, 2003(6): 24-26.

[2] 荚恒刚, 魏安季. 小麦赤霉病的发生及防治[J]. 现代农业科技, 2021(17): 108-109.

[3] 王云霞. 番茄枯萎病的发生原因及综合防治[J]. 农业技术与装备, 2019(6): 89-90.

[4] 孙艳敏, 韩锦峰, 陈小丽, 等. 减施化学农药防治植物病害措施的研究进展[J]. 贵州农业科学, 2021, 49(5): 58-66.

[5] 卜宣尹, 杨卫丽. 植物内生菌抑菌机制和抑菌次生代谢产物的研究进展[J]. 现代药物与临床, 2021, 36(10): 2200-2206.

[6] 郑颖琳, 佟奕辰, 孙英英, 等. 红树林真菌 *Aspergillus* sp. 次级代谢产物及其生物活性 (英文)[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2020, 59(1): 133-143.

[7] ZHU J, LI Z, LU H, et al. New diphenyl ethers from a fungus *Epicoccum sorghinum* L28 and their antifungal

activity against phytopathogens[J]. *Bioorganic Chemistry*, 2021, 115: 105232.

[8] WU Z, XIE Z, WU M, et al. New antimicrobial cyclopentenones from *Nigrospora sphaerica* ZMT05, a fungus derived from *Oxya chinensis* Thunber[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66(21): 5368-5372.

[9] KAMETANI S, KOJIMA-YUASA A, KIKUZAKI H, et al. Chemical constituents of cape aloe and their synergistic growth-inhibiting effect on *Ehrlich ascites* tumor cells[J]. *Bioscience Biotechnology and Biochemistry*, 2007, 71(5): 1220-1229.

[10] YUAN T, YANG S P, ZHANG H Y, et al. Phenolic compounds with cell protective activity from the fruits of *Livistona chinensis*[J]. *Journal of Asian Natural Products Research*, 2009, 11(3): 243-249.

[11] JAYASURIYA H, BALL R G, ZINK D L, et al. Barceloneic acid A, a new farnesyl-protein transferase inhibitor from a *Phoma* species[J]. *Journal of Natural Products*, 1995, 58(7): 986-991.

[12] 李露莹, 张晓燕, 孙炳达, 等. 沙漠药用植物沙蒿内生真菌 *Embellisia chlamydospora* 中酚酸类化合物研究[J]. 菌物学报, 2018, 37(1): 88-94.

[13] OVERY D P, LARSEN T O, DALSGAARD P W, et al. Andrastin A and barceloneic acid metabolites, protein farnesyl transferase inhibitors from *Penicillium albocoremium*: Chemotaxonomic significance and pathological implications[J]. *Mycological Research*, 2005, 109(11): 1243-1249.

[14] ABRAHAM W R, HANSEN H P, ARFMANN H A. Spirostaphylotrichins U and V from *Curvularia pallescens*[J]. *Phytochemistry*, 1994, 38(4): 834-845.

[15] 封士兰, 何兰, 王敏, 等. 百合花化学成分的研究[J]. 中国中药杂志, 1994(10): 611-612.

[16] RUBINSTEIN L, GOAD L J, CLAGUE A D H, et al. The 220 MHz NMR spectra of phytosterols[J]. *Phytochemistry*, 1976, 15: 195-200.

[17] LASISI A A, ADESOMOJU A A. New monoacylglycerol and antimicrobial constituents from the stem barks of *Berlinia confusa*[J]. *Journal of Herbs, Spices & Medicinal Plants*, 2012, 18(2): 111-131.

[18] DOMONDON D L, HE W, DE KIMPE N, et al. β -adenosine, a bioactive compound in grass chaff stimulating mushroom production[J]. *Phytochemistry*, 2004, 65(2): 181-187.

[19] CHEN S, LIU Z, LIU Y, et al. New depsidones and isoin-dolinones from the mangrove endophytic fungus *Meyerozyma guilliermondii* (HZ-Y2) isolated from the South China Sea[J]. *Beilstein Journal of Organic Chemistry*, 2015, 11(1): 1187-1193.

[20] ARUNPANICHLERT J, RUKACHAISIRIKUL V, TADPETCH K, et al. A dimeric chromanone and a phthalide: Metabolites from the seagrass-derived fungus *Bipolaris* sp. PSU-ES64[J]. *Phytochemistry Letters*, 2012, 5(3): 604-608.