溶洞真菌 *Furcasterigmium* sp. L-YB-P1-1 的次级代谢产物研究

田静源, 舒 婷, 李金严, 位彩霞, 孔凡栋, 王 佩, 许海棠, 周丽曼*

(广西民族大学化学化工学院, 林产化学与工程国家民委重点实验室, 广西林产化学与工程重点实验室, 林木生物质低碳高质利用广西高校工程研究中心, 广西 南宁 530006)

摘要: 对源自广西金伦洞的真菌 *Furcasterigmium* sp. L-YB-P1-1 的次级代谢产物粗提物进行提取研究。利用薄层色谱、高效液相色谱等对真菌次级代谢产物粗提物进行分离纯化, 并运用现代波谱技术HNMR、质谱等测定化合物结构, 得到 10 个化合物, 其中包括 1 个新化合物 (2*R*,3*S*)-2-hydroxy-3-methylpentanoic acid (*E*)-5′-hydroxy-3′-methylpent-2′-enoate (**1**) 和 9 个已知化合物: uridine (**2**)、adenosine (**3**)、2-methoxyl-*β*-*L*-arabinofuroside uracil (**4**)、thymidine (**5**)、2′-*O*-methyladenosine (**6**)、5′-*O*-acetyl-9-*β*-arabinofuranosyl adenosine (**7**)、uridine-5′-*α*-hydroxypropanoate (**8**)、asperteretal G (**9**)及 *trans*-ferulic acid (**10**)。使用DPPH法对化合物进行抗氧化活性评价, 结果显示化合物 **2**～**5** 和 **10** 具有抗氧化活性; 使用Griess法检测化合物对LPS诱导RAW264.7细胞产生NO的含量的影响, 发现化合物 **9** 具有一定的抗炎活性。

关键词: 溶洞真菌; *Furcasterigmium* sp. L-YB-P1-1; 次级代谢产物; 结构鉴定; 活性评价

中图分类号: Q946.5 **文献标识码**: A **文章编号**: 0513-4870(2026)07-2590-06

Study on secondary metabolites of cave-derived fungus *Furcasterigmium* sp. L-YB-P1-1

TIAN Jing-yuan, SHU Ting, LI Jin-yan, WEI Cai-xia, KONG Fan-dong, WANG Pei, XU Hai-tang, ZHOU Li-man*

(*Key Laboratory of Chemistry and Engineering of Forest Products, State Ethnic Affairs Commission, Guangxi Key Laboratory of Chemistry and Engineering of Forest Products, Engineering Research Center of Low-Carbon and High-Quality Utilization of Forest Biomass, University of Guangxi; School of Chemistry and Chemical Engineering, Guangxi Minzu University, Nanning 530006, China*)

Abstract: The secondary metabolites of the fungus *Furcasterigmium* sp. L-YB-P1-1, isolated from Jinlun Cave in Guangxi were investigated. The crude extract was separated and purified by chromatographic techniques including thin-layer chromatography (TLC) and high-performance liquid chromatography (HPLC). The structures of the isolated compounds were elucidated through comprehensive spectroscopic analysis such as HNMR and mass spectrometry. Ten compounds were obtained, comprising one new compound, (2*R*,3*S*)-2-hydroxy-3-methylpentanoic acid (*E*)-5′-hydroxy-3′-methylpent-2′-enoate (**1**) and 9 known compounds: Uridine (**2**), adenosine (**3**), 2-methoxyl-*β*-*L*-arabinofuranosyl uracil (**4**), thymidine (**5**), 2′-*O*-methyladenosine (**6**), 5′-*O*-acetyl-9-*β*-arabinofuranosyl adenosine (**7**), uridine-5′-*α*-hydroxypropanoate (**8**), asperteretal G (**9**), and *trans*-ferulic acid (**10**). The antioxidant activity of the compounds was evaluated using the DPPH free radical scavenging assay, which revealed that compounds **2**−**5** and **10** possessed antioxidant activity. Furthermore, the anti-inflammatory activity was assessed by measuring the

收稿日期: 2026-01-09; 修回日期: 2026-04-05.

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (82104034); 广西自然科学基金项目 (2021GXNSFBA220040); 广西民族大学相思湖青年创新团队资助项目 (2021RSCXSHQN01).

*通讯作者 E-mail: zhouliman88@126.com

DOI: 10.16438/j.0513-4870.2026-0040

inhibition of NO production in LPS-induced RAW 264.7 cells using the Griess method, indicating that compound **9** exhibited certain anti-inflammatory activity.

Key words: Cave fungus; *Furcasterigmium* sp. L-YB-P1-1; secondary metabolites; structural identification; activity evaluation

溶洞作为一种独特的生态环境, 具有光照稀缺、温度波动小、湿度高以及营养贫瘠等特点。这种长期与外界相对隔离的环境, 促进了具有特殊代谢途径的真菌类群的生长与演化。根据现有研究, 溶洞中蕴藏着丰富的真菌资源[1-4], 目前已报道的真菌物种约 2 000 种, 分属于青霉属 (*Penicillium*)、链格孢属 (*Alternaria*)、枝孢菌属 (*Cladosporium*) 等多个类群。然而, 相较于物种多样性调查, 针对溶洞真菌次级代谢产物的研究尚处于起步阶段, 相关报道仍较少。已有研究表明, 溶洞真菌能产生结构新颖且具有多种生物活性的次级代谢产物, 例如从溶洞真菌中分离到的代谢产物显示出抗肿瘤[5,6]、抗氧化[7]、促血管生成[8]等生物活性。此外, 真菌在共培养等策略下能被激活产生通常条件下沉默的代谢产物, 后续还可通过共培养等策略进一步挖掘这些菌株的代谢潜力。因此, 探索溶洞真菌的次级代谢产物, 对于发现结构新颖的先导化合物、开发新型药物以及理解真菌的生态适应机制均具有重要意义, 展现出巨大的潜力。

在 *Furcasterigmium* sp. L-YB-P1-1 中共分离得到 10 个化合物, 其中包括 1 个新化合物 (2*R*,3*S*)-2-hydroxy-3-methylpentanoic acid (*E*)-5′-hydroxy-3′-methylpent-2′-enoate (**1**) 和 9 个已知化合物: uridine (**2**)、adenosine (**3**)、2-methoxyl-*β*-*L*-arabinofuroside uracil (**4**)、thymidine (**5**)、2′-*O*-methyladenosine (**6**)、5′-*O*-acetyl-9-*β*-arabinofuranosyl adenosine (**7**)、uridine-5′-*α*-hydroxypropanoate (**8**)、asperteretal G (**9**) 及 *trans*-ferulic acid (**10**) (图 1)。抗氧化活性评价结果显示, 从菌株 *Furcasterigmium* sp. L-YB-P1-1 中分离鉴定的化合物 **2**～**5** 和 **10** 具有一定的抗氧化活性, 此外化合物 **9** 具有一定的抗炎活性。

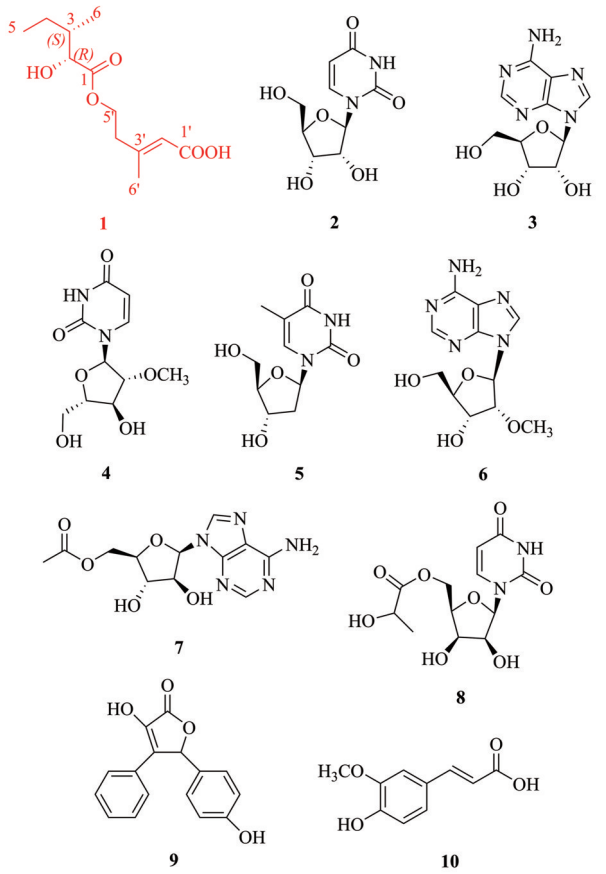


Figure 1 Chemical structures of compounds **1**–**10**

结果与讨论

1 菌株鉴定

菌株 L-YB-P1-1 ITS 序列通过 PCR 扩增获得长度为 536 bp 序列, 通过检索 NCBI 数据库并进行基因序列对比, 该真菌菌株鉴定为 *Furcasterigmium* sp. 属, GenBank 登录号为 PX908945, 该菌株的系统发育树如图 2 所示。

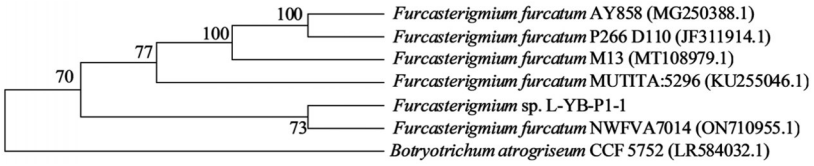


Figure 2 *Furcasterigmium* sp. L-YB-P1-1 the phylogenetic tree

2 结构解析

化合物 **1** 为无色油状物, 其分子式通过正离子高分辨电喷雾质谱 (HRESIMS) 确定为 $C_{12}H_{20}O_5$, 比旋光度 $[\alpha]^{25}_D$ = 12 (*c* 0.100 0, CH_3OH)。化合物 **1** 的 ^{1}H NMR 和 ^{13}C NMR (表 1) 光谱显示有 3 个甲基基团 [$\delta_{C/H}$ (18.5/2.17, d, *J* = 1.1 Hz, CH_3-6′), $\delta_{C/H}$ (14.1/0.84, d, *J* = 6.7 Hz, CH_3-6), $\delta_{C/H}$ (12.1/0.94, overlap, CH_3-5)]; 3 个亚甲基

[$\delta_{C/H}$ (63.1/4.39, m, CH_2-5′; 63.1/4.28, m, CH_2-5′), $\delta_{C/H}$ (40.6/2.52, t, J = 6.4 Hz, CH_2-4′), $\delta_{C/H}$ (27.0/1.48, m, CH_2-4; 27.0/1.27, m, CH_2-4)]; 3个次甲基 [$\delta_{C/H}$ (74.3/4.10, d, J = 3.6 Hz, CH-2), $\delta_{C/H}$ (39.9/1.77, m, CH-3)], 包括一个 sp^2 次甲基 [$\delta_{C/H}$ (119.2/5.71, s, CH-2′)]; 一个羧基碳, 一个 sp^2 杂化双键碳和一个酯基碳。上述数据表明该化合物具有三个不饱和度。根据 ^{1}H-^{1}H COSY 图谱, 显示了 H-4′/H-5′、H-2/H-3/H-4/H-5 以及 H-3/H-6 之间的相关性。HMBC 图显示 H-2′与 C-1′、C-4′相连, H-5′与 C-1 相连, H-2 与 C-1 相连, H-3 与 C-1 相连, H-6′与 C-2′、C-3′、C-4′相连。通过对 HMBC 和 COSY 数据的详细分析, 确定了该化合物的平面结构 (图 3)。为明确 C-2 和 C-3 的构型, 分别对两种可能的构型 (2*R*,3*S*)-1 与 (2*R*,3*R*)-1 进行了 ^{13}C NMR 化学位移的理论计算, 并将计算结果与实验数据进行了系统比较。DP4+概率分析结果显示, (2*R*,3*S*)-1 构型与实验 13C NMR 数据具有更高的匹配概率。在此基础上, 进一步对该构型进行了 ECD 计算。结果表明, (2*R*,3*S*)-1 构型不仅其理论 ^{13}C NMR 化学位移与实验值吻合良好, 其计算的 ECD 曲线也与实验测得的 ECD 谱图高度一致 (图 4), 因此确定 C-2 和 C-3 的绝对构型分别为 *R* 型和 *S* 型。因此, 化合物 **1** 被命名为 (2*R*,3*S*)-2-hydroxy-3-methylpentanoic acid (*E*)-5′-hydroxy-3′-methylpent-2′-enoate, 即 (2*R*,3*S*)-2-羟基-3-甲基戊酸(*E*)-5′-羟基-3′-甲基戊-2′-烯酸酯。

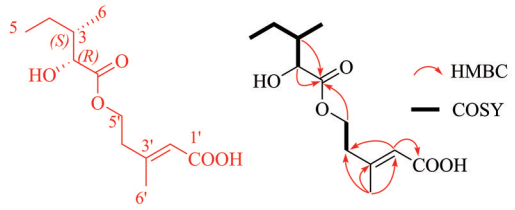


Figure 3 Chemical structure of compound **1** and key ^{1}H-^{1}H COSY and HMBC signals

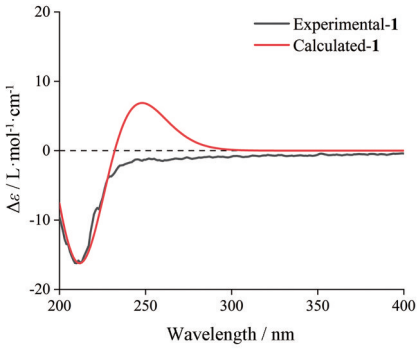


Figure 4 The measured and calculated ECD spectra of compound **1**

Table 1 ^{1}H and ^{13}C spectral data of compound **1**

C No.	δ_H (J/Hz)	δ_C
1′	–	169.7, C
2′	5.71 (1H, s)	119.2, CH
3′	–	156.7, C
4′	2.52 (2H, t, J = 6.4)	40.6, CH_2
5′	4.39 (1H, m); 4.28 (1H, m)	63.1, CH_2
1	–	175.8, C
2	4.10 (1H, d, J = 3.6)	74.3, CH
3	1.77 (1H, m)	39.9, CH
4	1.48 (1H, m); 1.27 (1H, m)	27.0, CH_2
5	0.94 (3H, overlap)	12.1, CH_3
6	0.84 (3H, d, J = 6.7)	14.1, CH_3
6′	2.17 (3H, d, J = 1.1)	18.5, CH_3

3 抗氧化活性

化合物的抗氧化活性通过 DPPH 法进行测定, 实验数据表明, 当化合物浓度为 20 μmol·L^{-1} 时, 化合物 **2**～**5** 和 **10** 的 DPPH 自由基清除率分别为 73.61% ± 4.36%、62.50% ± 6.26%、68.06% ± 7.25%、47.22% ± 5.67%、59.72% ± 6.13%, 阳性对照 (V_C) 的 DPPH 自由基清除率为 88.89% ± 5.21%。

4 抗炎活性

对 *Furcasterigmium* sp. L-YB-P1-1 中获得的含量较大的次级代谢产物化合物 **2**、**3** 和 **9** 进行抗炎活性测试, 实验数据表明化合物 **9** 在 20、10 μmol·L^{-1} 浓度下均具有一定的抗炎活性, 对炎症因子 NO 的产生具有显著的抑制作用。

实验部分

WZZ-2S 数字旋光仪; Brucker AVANCE 400 MHz 核磁共振 (德国 Brucker 公司); 日立 Primaide 高效液相色谱仪 (北京日立科学仪器有限公司); 分析高效色谱柱 C_{18}-MS-Ⅱ (C18, 250 mm × 4.6 mm, 5 μm)、5PFP (50 mm × 4.6 mm, 5 μm), 日本 Nacalai tesque 公司; 兰博 seriesⅢ 制备型高效液相色谱, 制备型高效液相色谱柱 5C18-MS-Ⅱ (C_{18}, 250 mm × 10 mm, 5 μm); 5PFP (250 mm × 10 mm, 5 μm), 日本 Nacalai tesque 公司。

1 菌株的发酵

Furcasterigmium sp. L-YB-P1-1 来源于广西金伦洞穴的岩壁附着物, 该附着物是溶洞中经水溶蚀和再沉积形成的碳酸钙沉积物。纯化后的菌株通过 ITS rDNA 基因序列鉴定。本实验使用马铃薯培养基: 葡萄糖 2%, 琼脂 2%, 马铃薯 20%; 大米培养基: 大米 80 g, 水 120 mL。*Furcasterigmium* sp. L-YB-P1-1 菌株在 28 ℃ 的马铃薯葡萄糖琼脂培养基上纯化培养 7 d, 将培养的菌株分别接入含碳酸氢钙溶液和不含碳酸氢钙溶液的培养基中, 在室温下发酵培养 30 d。

2 化合物的提取和分离

发酵30 d后, *Furcasterigmium* sp. L-YB-P1-1的发酵产物用乙酸乙酯在室温减压下萃取, 得到41.8 g粗提取物。粗提物进一步用90%甲醇−水混合液和石油醚按1∶1的比例萃取, 得到14.3 g甲醇层提取物和30.4 g石油醚层提取物。甲醇层提取物经正相硅胶柱色谱, 以石油醚−乙酸乙酯 (10∶1～1∶2) 梯度洗脱, 得到26个馏分, 分别为Fr.1～Fr.26。馏分Fr.5 (646.7 mg) 经C_{18}高速制备型HPLC处理, 得到5个亚馏分, 即Fr.5.1～Fr.5.5。Fr.5.4 (85.8 mg) 经半制备型HPLC (50%甲醇−酸水−C_{18}柱) 进一步纯化, 得到化合物**1** (6.4 mg) 和化合物**9** (31.7 mg)。馏分Fr.26 (1.0 g) 经半制备型HPLC (10%甲醇−水−C18柱) 纯化, 得到化合物**2** (7.4 mg) 和化合物**3** (21.9 mg)。馏分Fr.25 (512.0 mg) 经C_{18}高速制备型HPLC处理, 得到12个亚馏分, 即Fr.25.1～Fr.25.12。Fr.25.1被鉴定为化合物**8** (5.7 mg), Fr.25.4 (9.3 mg) 经半制备型HPLC (15%甲醇−水−5PFP柱) 进一步纯化, 得到化合物**4** (2.1 mg)。Fr.25.5 (19.7 mg) 经半制备型HPLC (15%甲醇−水−5PFP柱) 纯化, 得到化合物**5** (8.5 mg)。Fr.25.6 (9.3 mg) 经半制备型HPLC (20%甲醇−水−5PFP柱) 纯化, 得到化合物**6** (1.8 mg)。Fr.25.11 (5.5 mg) 经半制备型HPLC (30%甲醇−水−5PFP柱) 纯化, 得到化合物**7** (1.4 mg)。馏分Fr.11经半制备型HPLC (40%甲醇−水−C_{18}柱) 纯化, 得到化合物**10** (2.9 mg)。

3 结构鉴定

化合物**2**: 黄色油状; ESI-MS *m*/*z* 267.0 $[M+Na]^+$, 分子式$C_9H_{12}N_2O_6$; ^{1}H NMR (400 MHz, CD_3OD): δ_H 8.02 (1H, d, *J* = 7.9 Hz, H-6), 5.91 (1H, d, *J* = 4.6 Hz, H-7), 5.70 (1H, d, *J* = 8.2 Hz, H-5), 4.16 (2H, m, H-8, H-9), 4.01 (1H, s, H-10), 3.84 (1H, dd, *J* = 2.5, 12.3 Hz, H-11a), 3.73 (1H, dd, *J* = 3.1, 12.2 Hz, H-11b); ^{13}C NMR (100 MHz, CD_3OD): δ_C 166.2 (C, C-4), 152.4 (C, C-2), 142.7 (CH, C-6), 102.6 (CH, C-5), 90.6 (CH, C-7), 86.4 (CH, C-10), 75.7 (CH, C-8), 71.3 (CH, C-9), 62.4 (CH_2, C-11)。该化合物的数据与文献[9]报道的一致, 故化合物**2**鉴定为uridine。

化合物**3**: 白色粉末; ESI-MS *m*/*z* 268.1 $[M+H]^+$, 分子式$C_{10}H_{13}N_5O_4$; ^{1}H NMR (400 MHz, CD_3OD): δ_H 8.32 (1H, s, H-2), 8.18 (1H, s, H-8), 5.96 (1H, d, *J* = 6.3 Hz, H-1′), 4.74 (1H, dd, *J* = 4.9, 6.3 Hz, H-2′), 4.32 (1H, dd, *J* = 2.5, 5.1 Hz, H-3′), 4.17 (1H, dd, *J* = 2.5, 5.0 Hz, H-4′), 3.89 (1H, dd, *J* = 2.5, 12.5 Hz, H-5′a), 3.74 (1H, dd, *J* = 2.5, 12.5 Hz, H-5′b); ^{13}C NMR (100 MHz, CD_3OD): δ_C 157.6 (C, C-6), 153.5 (CH, C-3), 150.0 (C, C-4), 142.0 (CH, C-5), 121.0 (C, C-5), 91.3 (CH, C-1′), 88.2 (CH, C-4′), 75.6 (CH, C-2′), 72.7 (CH, C-3′), 63.5 (CH_2, C-5′)。该化合物的数据与文献[10,11]报道的一致, 故化合物**3**鉴定为adenosine。

化合物**4**: 无色油状; ESI-MS *m*/*z* 259.1 $[M+H]^+$, 分子式$C_{10}H_{14}N_2O_6$; ^{1}H NMR (400 MHz, CD_3OD): δ_H 8.09 (1H, d, *J* = 8.1 Hz, H-6), 5.94 (1H, d, *J* = 3.6 Hz, H-1′), 5.69 (1H, d, *J* = 8.1 Hz, H-5), 4.24 (1H, t, *J* = 5.8 Hz, H-4′), 3.98 (1H, m, H-3′), 3.86 (2H, overlap, H-2′, H-5′a), 3.75 (1H, dd, *J* = 3.2, 12.3 Hz, H-5′b), 3.52 (3H, s, 2′-OMe); ^{13}C NMR (100 MHz, CD_3OD): δ_C 166.3 (C, C-4), 152.2 (C, C-2), 142.5 (CH, C-6), 102.5 (CH, C-5), 88.8 (CH, C-1′), 86.1 (CH, C-3′), 85.0 (CH, C-2′), 69.7 (CH, C-4′), 61.6 (CH_2, C-5′), 58.8 (CH_3, 2′-OMe)。该化合物的数据与文献[12]报道的一致, 故化合物**4**鉴定为2-methoxyl-*β*-*L*-arabinofuroside uracil。

化合物**5**: 白色油状; ESI-MS *m*/*z* 243.1 $[M+H]^+$, 分子式$C_{10}H_{14}N_2O_5$; ^{1}H NMR (400 MHz, CD_3OD): δ_H 7.82 (1H, d, *J* = 1.3 Hz, H-2), 6.28 (1H, t, *J* = 7.0 Hz, H-1′), 4.40 (1H, m, H-4′), 3.91 (1H, dd, *J* = 3.5, 6.7 Hz, H-3′), 3.80 (1H, dd, *J* = 3.1, 12.0 Hz, H-5′a), 3.73 (1H, dd, *J* = 3.7, 12.0 Hz, H-5′b), 2.23 (2H, m, H-2′), 1.88 (3H, d, *J* = 1.2 Hz, H-7); ^{13}C NMR (100 MHz, CD_3OD): δ_C 166.5 (C, C-4), 152.4 (C, C-6), 138.2 (CH, C-2), 111.6 (C, C-3), 88.8 (CH, C-1′), 86.2 (CH, C-4′), 72.2 (CH, C-3′), 62.8 (CH_2, C-5′), 41.2 (CH_2, C-2′), 12.5(CH_3, C-7)。该化合物的数据与文献[13]报道的一致, 故化合物**5**鉴定为thymidine。

化合物**6**: 白色固体; ESI-MS *m*/*z* 304.1 $[M+Na]^+$, 分子式$C_{11}H_{15}N_5O_4$; ^{1}H NMR (400 MHz, CD_3OD): δ_H 8.37 (1H, s, H-7), 8.21 (1H, s, H-2), 6.08 (1H, d, *J* = 5.9 Hz, H-1′), 4.49 (1H, dd, *J* = 3.0, 5.0 Hz, H-3′), 4.42 (1H, t, *J* = 6.0 Hz, H-2′), 4.16 (1H, dd, *J* = 2.8, 5.6 Hz, H-4′), 3.89 (1H, dd, *J* = 2.5, 12.2 Hz, H-5′a), 3.76 (1H, dd, *J* = 2.8, 12.2 Hz, H-5′b), 3.42 (3H, s, 2′-OMe); ^{13}C NMR (100 MHz, CD_3OD): δ_C 152.9 (CH, C-7), 142.0 (CH, C-2), 89.2 (CH, C-1′), 88.4 (CH, C-4′), 84.7 (CH, C-2′), 70.8 (CH, C-3′), 63.2 (CH_2, C-5′), 58.8 (CH_3, 2′-OMe)。该化合物的数据与文献[14,15]报道的一致, 故化合物**6**鉴定为2′-*O*-methyladenosine。

化合物**7**: 白色固体; ESI-MS *m*/*z* 332.1 $[M+Na]^+$, 分子式$C_{12}H_{15}N_5O_5$; ^{1}H NMR (400 MHz, CD_3OD): δ_H 8.32 (1H, s, H-2), 8.26 (1H, s, H-7), 6.03 (1H, d, *J* = 4.5 Hz, H-1′), 4.73 (1H, t, *J* = 4.8 Hz, H-5′a), 4.34～4.40 (3H, overlap, H-5′b, H-2′, H-3′), 4.26 (1H, t, *J* =

5.0 Hz, H-4′), 2.06 (3H, s, H-7′); ^{13}C NMR (100 MHz, CD_3OD): δ_C 172.4 (C, C-6′), 169.6 (C, C-4), 152.0 (C, C-9), 141.8 (CH, C-7), 90.5 (CH, C-1′), 83.6 (CH, C-4′), 75.2 (CH, C-2′), 71.8 (CH, C-3′), 64.9 (CH_2, C-5′), 20.7 (CH_3, C-7′)。该化合物的数据与文献[16]报道的一致，故化合物**7**鉴定为5′-*O*-acetyl-9-*β*-arabinofuranosyl adenosine。

化合物**8**: 白色粉末; ESI-MS *m*/*z* 339.0 $[M+Na]^+$, 分子式 $C_{12}H_{16}N_2O_8$; ^{1}H NMR (400 MHz, CD_3OD): δ_H 7.83 (1H, d, *J* = 8.1 Hz, H-6), 5.87 (1H, d, *J* = 4.2 Hz, H-1′), 5.71 (1H, d, *J* = 8.2 Hz, H-5), 4.42 (1H, dd, *J* = 3.9, 12.4 Hz, H-5′a), 4.37 (1H, d, *J* = 2.7 Hz, H-5′b), 4.33 (2H, dd, *J* = 3.1, 10.0 Hz, H-2′, H-2″), 4.20 (2H, overlap, H-4′, H-3′), 1.40 (3H, d, *J* = 6.9 Hz, H-3″); ^{13}C NMR (100 MHz, CD_3OD): δ_C 175.9 (C, C-1″), 166.2 (C, C-4), 152.3 (C, C-2), 142.7 (CH, C-6), 102.9 (CH, C-5), 91.3 (CH, C-1′), 82.9 (CH, C-4′), 71.5 (CH, C-2′), 71.2 (CH, C-3′), 68.1 (CH, C-2″), 65.0 (CH_2, C-5′), 20.7 (CH_3, C-3″)。该化合物的数据与文献[17]报道的一致，故化合物**8**鉴定为uridine-5′-*α*-hydroxypropanoate。

化合物**9**: 白色粉末; ESI-MS *m*/*z* 291.1 $[M+Na]^+$, 分子式 $C_{16}H_{12}O_4$; ^{1}H NMR (400 MHz, CD_3OD): δ_H 7.62 (2H, d, *J* = 7.3 Hz, H-2″, H-6″), 7.27 (2H, t, *J* = 7.3 Hz, H-3″, H-5″), 7.22 (1H, d, *J* = 7.3 Hz, H-4″), 7.16 (2H, d, *J* = 8.4 Hz, H-2′, H-6′), 6.74 (2H, d, *J* = 8.5 Hz, H-3′, H-5′), 6.23 (1H, s, H-4); ^{13}C NMR (100 MHz, CD_3OD): δ_C 171.5 (C, C-1), 159.6 (C, C-4′), 140.1 (C, C-2), 132.1 (C, C-3), 130.6 (CH, C-2′, C-6′), 129.5 (C, C-1″), 129.4 (CH, C-4″), 129.3 (CH, C-3″, C-5″), 128.9 (CH, C-2″, C-6″), 128.4 (C, C-1′), 116.7 (CH, C-3′, C-5′), 82.3 (CH, C-4)。该化合物的数据与文献[18]报道的一致，故化合物**9**鉴定为asperteretal G。

化合物**10**: 黄色粉末; ESI-MS *m*/*z* 217.0 $[M+Na]^+$, 分子式 $C_{10}H_{10}O_4$; ^{1}H NMR (400 MHz, CD_3OD): δ_H 7.60 (1H, d, *J* = 15.9 Hz, H-7), 7.18 (1H, d, *J* = 2.1 Hz, H-2), 7.06 (1H, dd, *J* = 1.9, 8.1 Hz, H-6), 6.81 (1H, d, *J* = 8.2 Hz, H-5), 6.31 (1H, d, *J* = 16.0 Hz, H-8), 3.89 (3H, s, 3-OMe); ^{13}C NMR (100 MHz, CD_3OD): δ_C: 171.0 (C, C-9), 150.5 (C, C-4), 149.4 (C, C-3), 146.9 (CH, C-7), 127.8 (C, C-1), 124.0 (CH, C-6), 116.5 (CH, C-5), 115.9 (CH, C-8), 111.7 (CH, C-2), 56.4 (CH_3, 3-OMe)。该化合物的数据与文献[19]报道的一致，故化合物**10**鉴定为*trans*-ferulic acid。

4 抗氧化活性

抗氧化活性采用DPPH法进行测定。样品和V_C均配制成甲醇溶液，浓度为20 μmol·L^{-1}。DPPH称量后配制成0.15 μmol·L^{-1}的甲醇溶液，需在低温避光条件下保存。在96孔板中设置了以下组别，空白对照组: 200 μL甲醇溶液; 阴性对照组: 160 μL甲醇溶液和40 μL DPPH溶液; V_C对照组: 160 μL V_C溶液和40 μL甲醇溶液; V_C + DPPH组: 160 μL V_C溶液和40 μL DPPH溶液; 样品对照组: 160 μL样品溶液和40 μL甲醇溶液; 样品 + DPPH组: 160 μL样品溶液和40 μL DPPH溶液，每孔均设置3个重复。将96孔板置于暗处30 min，使用酶标仪在517 nm波长下测定各孔的吸光度 (OD)值，随后计算清除率。

5 抗炎活性测试

通过测量LPS处理的RAW 264.7细胞中NO的产生来筛选抗炎活性。将RAW 264.7细胞以5×10^{4}个细胞/孔的密度在96孔板中培养24 h。用LPS (1 μg·mL^{-1})刺激细胞，然后用不同浓度的样品培养24 h。以吲哚美辛为阳性对照，取上清液50 μL，加入Griess试剂 (试剂A 50 μL，试剂B 50 μL)，用酶标仪在540 nm处测定OD值，在实验过程中，为每个测量的浓度设置了3个平行。计算化合物对NO产量的抑制率，将抑制率高于50%的化合物，进行IC_{50}测试。IC_{50}实验方案浓度配置为0、0.625、1.25、2.5、5、10、20、30、40、50 μmol·L^{-1}，实验步骤与初筛一致，使用IBM SPSS Statistics软件根据其各浓度抑制率计算得IC_{50}值。

作者贡献: 田静源是本文第一作者，负责实验设计与论文的写作; 舒婷负责论文的修改; 李金严负责化合物的分离纯化; 位彩霞负责样本的采集和前处理; 孔凡栋负责实验指导及结构解析的指导; 王佩、许海棠负责提供了研究所需的经费及关键资源; 周丽曼是本文的通讯作者，负责实验设计及把关，提供本文思路，参与稿件修改等工作。

利益冲突: 所有作者均声明不存在利益冲突。

References

[1] Fernandez-Cortes A, Cuezva S, Sanchez-Moral S, et al. Detection of human-induced environmental disturbances in a show cave [J]. Environ Sci Pollut Res Int, 2011, 18: 1037-1045.

[2] Zhang ZF, Liu F, Zhou X, et al. Culturable mycobiota from Karst caves in China, with descriptions of 20 new species [J]. Persoonia, 2017, 39: 1-31.

[3] Zhang ZF, Zhou SY, Eurwilaichitr L, et al. Culturable mycobiota from Karst caves in China II, with descriptions of 33 new species [J]. Fungal Diversity, 2021, 106: 29-136.

[4] Vanderwolf, Karen J, Malloch D, et al. A world review of fungi, yeasts, and slime molds in caves [J]. Int J Speleol, 2013, 42: 77-96.

[5] Gubiani JR, Bernardi DI, De Paula CCP, et al. Absolute configu-

ration of cytotoxic anthraquinones from a Brazilian cave soil-derived fungus, *Aspergillus* sp. SDC28 [J]. Arch Pharm (Weinheim), 2022, 355: e2100441.

[6] Wu RX, Guo JL, Huang Y, et al. Two new isocoumarins from a cave-derived fungus *Metarhizium anisopliae* NHC-M3-2 [J]. Acta Pharm Sin (药学学报), 2024, 59: 2588-2593.

[7] Xu Y, Liu W, Wu D, et al. Sulfur-containing phenolic compounds from the cave soil-derived *Aspergillus fumigatus* GZWMJZ-152 [J]. J Nat Prod, 2022, 85: 433-440.

[8] Wei C, Sun J, Tian J, et al. Secondary metabolites from the karst cave fungus *Roussoella* sp. LCP1-2 with proangiogenic activity [J]. Fitoterapia, 2025, 186: 106838.

[9] Newaz AW, Yong K, Yi W, et al. Antimicrobial metabolites from the Indonesian mangrove sediment-derived fungus *Penicillium chrysogenum* sp. ZZ1151 [J]. Nat Prod Res, 2023, 37: 1702-1708.

[10] Zhou PF, Lu YZ, Wang XJ, et al. Secondary metabolites and their α-glucosidase inhibitory activity of endophyte fungi from *Orixa japonica* [J]. Chin Tradit Pat Med (中成药), 2024, 46: 478-483.

[11] Xie AQ, Chi J, Zhang WJ, et al. Chemical constituents from EtOAc extract of Pinelliae Rhizoma and their anti-inflammatory activity [J]. Nat Prod Res Dev (天然产物研究与开发), 2024, 36: 1339-1349.

[12] Li XS, Tan MH, Lv MM, et al. New γ-pyranone and nucleoside derivatives from *Penicillium* sp. [J]. Phytochem Lett, 2017, 20: 285-288.

[13] Ai W, Lin XP, Qin C, et al. Studies on secondary metabolites of an endophytic fungus obtained from Mangrove plant *Kandelia candel* [J]. Chin J Mar Drugs (中国海洋药物), 2014, 33: 76-80.

[14] Yamada T, Kageyama K, Joh Y, et al. Naturally occurring 2′-*O*-methylpurine nucleosides with hypotensive properties [J]. Cell Mol Life Sci, 1998, 54: 125-128.

[15] Chen C, Pan WD, Xiao JH, et al. Secondary metabolites of *Penicillium jiangxiense* [J]. Nat Prod Res Dev (天然产物研究与开发), 2011, 23: 664-666.

[16] Yolanda S, Jose VS, Andres R. Regioselective enzymatic acylation of pharmacologically interesting nucleosides in 2-methyltetrahydrofuran, a greener substitute for THF [J]. Green Chem, 2009, 11: 855-862.

[17] Chen G, Tian L, Wu HH, et al. Secondary metabolites from fungus *Nigrospora* sp. [J]. J Asian Nat Prod Res, 2012, 14: 759-763.

[18] Peng Q, Chen W, Lin X, et al. Butenolides from the coral-derived fungus *Aspergillius terreus* SCSIO41404 [J]. Mar Drugs, 2022, 20: 212.

[19] Zhou MN, Liu P, Jing SJ, et al. Chemical constituents of *Scrophulariae Radix* and their antitumor activities *in vitro* [J]. China J Chin Mater Med (中国中药杂志), 2022, 47: 111-121.