

植物内生菌次生代谢物生物活性研究进展

黄维钊¹, 喻路兵¹, 崔晶², 刘梦玉洁², 赵宇^{1*}

¹山东大学齐鲁医学院药学院, 山东 济南

²山东大学齐鲁医院药剂科, 山东 济南

收稿日期: 2025年4月18日; 录用日期: 2025年7月4日; 发布日期: 2025年7月21日

摘要

植物内生菌(Endophyte)是能够定殖在植物细胞间隙或细胞内, 并与寄主植物建立和谐联合关系的一类微生物, 主要包括内生真菌、内生细菌以及内生放线菌三类。医学研究表明, 植物内生菌代谢产物具有抗肿瘤、抗菌、抗病毒等生物活性, 而在农业方面也具有促植物生长等重要作用。因此, 植物内生菌被认为是获取具有治疗用途的生物分子的最重要的微生物资源之一, 具有良好的开发前景, 本文对其次生代谢物常见生物活性的最新研究进展作一综述。

关键词

植物内生菌, 药理活性, 抗肿瘤, 抗菌, 抗氧化, 促生作用

Advances in Bioactive Secondary Metabolites of Plant Endophytes

Weichuan Huang¹, Lubing Yu¹, Jing Cui², Mengyujie Liu², Yu Zhao^{1*}

¹School of Pharmaceutical Science, Cheeloo College of Medicine, Shandong University, Jinan Shandong

²Department of Pharmacy, Qilu Hospital of Shandong University, Jinan Shandong

Received: Apr. 18th, 2025; accepted: Jul. 4th, 2025; published: Jul. 21st, 2025

Abstract

Plant endophytes are microorganisms capable of colonizing the intercellular spaces or intracellular regions of plants and establishing a harmonious symbiotic relationship with their host plants. They primarily include three categories: endophytic fungi, endophytic bacteria, and endophytic actinomycetes. Medical studies have demonstrated that metabolites from plant endophytes exhibit biological activities such as antitumor, antibacterial, and antiviral effects. In agriculture, they also play

*通讯作者。

文章引用: 黄维钊, 喻路兵, 崔晶, 刘梦玉洁, 赵宇. 植物内生菌次生代谢物生物活性研究进展[J]. 植物学研究, 2025, 14(4): 221-228. DOI: 10.12677/br.2025.144025

significant roles in promoting plant growth and enhancing stress tolerance. Therefore, plant endophytes are recognized as one of the most critical microbial resources for obtaining therapeutic biomolecules, demonstrating promising development prospects. This review comprehensively summarizes recent advances in the common bioactivities of their secondary metabolites.

Keywords

Plant Endophytes, Pharmacological Activity, Antitumor, Antibacterial, Antioxidant, Plant Growth-Promoting Effects

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着医药科学技术的飞速发展，微生物药物的开发和应用越来越广泛，从最初的抗生素类药物，逐渐延伸至抗肿瘤、免疫抑制、抗氧化、降血脂等多种治疗领域[1][2]，为维护人类健康发挥着极其重要的作用，也成为新药研发的热点。

植物内生菌是指部分或整个生命周期生活在健康植物组织中而不会对宿主植物造成明显的感染症状的微生物类群[3]。植物内生菌普遍存在于高等植物中，其种类繁多，但大致分为三类：内生真菌(Endophytic fungi)、内生细菌(Endophytic bacteria)以及内生放线菌(Endophytic actinomycetes)等。内生菌在与宿主长期共生的过程中，为对抗自然环境和其他致病菌等因素，会产生一些特殊的代谢物，不但可以通过提高植物的养分吸收效率、调节相关植物激素、抑制致病菌等使寄主植物受益[4]，甚至具有一定的药理活性，成为微生物药物的重要来源。

植物内生菌次生代谢产物种类丰富且结构多样，目前对各种植物内生菌次生代谢产物化学成分及活性的研究受到广泛的关注。张举成[5]研究了七株来源于不同植物的内生菌，采用分离技术手段和现代波谱技术，从中分离鉴定出 118 个化合物，其中有 7 个为新化合物，包括除莠菌素类、nonactic acid、大环酯肽、葱醌、异黄酮、核苷和环肽等多种类型。林羽滢[6]研究了四株不同来源的植物内生菌，在三株内生菌中分离鉴定出 34 个化合物，其中新化合物 2 个，包含有生物碱、酚、聚酮、糖苷、苯丙素、甾体、脂肪酸等多种结构类型；第四株内生菌中得到 2 个异黄酮类化合物。王邦艳[7]对两株红参培养下的来源于石斛的内生菌进行研究，最终分离鉴定出 32 个化合物，其中 4 个为新化合物，化合物类型涉及聚乙炔、聚酮、甾醇、萜类、细胞松弛素、Azaphilones、核苷等。可知，植物内生菌中次生代谢产物种类多样，结构类型不一，新化合物丰富，对于天然药物的开发具有较大的研究价值。

2. 生物活性研究

2.1. 抗肿瘤作用

目前，对于植物内生菌次生代谢产物药理作用研究最多的是其抗肿瘤作用，大量研究表明，其对多种肿瘤细胞具有抑制作用。朱美林等[8]对夹竹桃内生真菌进行分离筛选获得菌株 *Aspergillus sp.* 系列共 18 株，并在此基础上对其进行次生代谢产物的研究，从中发现菌株 *Aspergillus sp.* 10-4 的乙酸乙酯粗提物对人体非小细胞腺癌细胞(H1975)具有明显的细胞毒活性。

李丹等[9]从广西黄槿中分离得到一株内生真菌 *Penicillium sp.* LD-68，对其次级代谢产物及其生物活

性进行研究。通过对菌株发酵产物进行分离,得到5个弯孢霉毒素类化合物。利用SRB和MTT法评价化合物的抗肿瘤活性,以A549(肺癌人类肺泡基底上皮细胞)、Hela(宫颈癌细胞)、BEL-7402(人肝癌细胞)、K562(人慢性髓系白血病细胞)4种人肿瘤细胞株作为指示细胞,发现5种化合物均对4种指示细胞具有不同程度的抑制作用。其中4种化合物对Hela细胞生长具有显著抑制作用,表现出较好的抗肿瘤活性。闫慧娇[10]在对黄槿内生真菌赤散囊菌(*Eurotium rubrum* G2)代谢产物的研究中,鉴定了32个化合物的结构,其中苯甲醛类、蒽醌类、含吡啶的二酮哌嗪生物碱类是其代谢产物的主要结构类型。其中化合物14对人肝癌细胞SMMC-7721、化合物55对人胰腺胆管癌细胞sw1990和人前列腺癌细胞Du145表现出较强的抑制活性,IC50分别为11、10、15 $\mu\text{g/mL}$ 。

旷歧轩等[11]对川芎内生真菌 *Fusarium proliferatum* 次生代谢产物及其细胞毒活性进行研究,从该菌发酵产物的乙酸乙酯萃取相中分离得到23个化合物,主要为甾体类和环二肽类,并发现了其中多个成分对细胞株HCT116(人结肠癌细胞)、HGC-27(人胃癌细胞)和MV4-11(外周血B细胞白血病细胞)分别具有不同程度的抑制活性。林羽洁[6]对三株植物内生真菌和一株植物内生放线菌的代谢物进行活性研究,化合物ar-1和ar-2对肿瘤细胞株NCI-H1957、Hep G2、MCF-7都具有一定生长抑制活性,IC50在46.10到79.74 μM 之间。Zhao等[12]从石斛中分离出内生真菌9属58株,并且对其内产生的新肽等代谢产物进行抗癌活性评价,发现其代谢产物chartreusin对癌细胞Hep3B2.1-7具有明显的细胞毒活性。

Lim等[13]从马来西亚莫里布海滩生长的海洋植物内生菌入手,分离出乙酸乙酯提取物,并且对其抗大肠癌活性进行了评价,发现其对HCT116肿瘤细胞具有较好的拮抗作用。Ramalingam等[14]从海藻中分离出内生真菌草酸霉菌,发现其乙酸乙酯提取物对人乳腺癌细胞系MCF-7细胞的抑制活性较高,并揭示了其机理可能是诱导癌细胞膜损伤从而导致凋亡。Chen[15]等证实从雷公藤内生真菌分离得到的环(L-亮氨酸-L-脯氨酸)是通过破坏CD151与EGFR信号的相互作用,从而抑制了三阴性乳腺癌细胞的迁移。

总之,植物内生菌的次生代谢产物种类丰富,能抑制各种类型的肿瘤细胞,为抗肿瘤药物的筛选提供了一条新的途径。

2.2. 抗菌作用

近年来,植物内生菌次生代谢物对人体致病菌的抑制活性报道较多,发现其对临床常见致病菌及耐药菌具有抑制作用。戴婧婧等[16]从梵净山藤茶中分离出内生菌共48株,其中细菌23株、真菌25株,并对其进行发酵培养,发酵液进行抑菌活性实验,实验结果表明其中三株内生菌对大肠埃希菌、金黄色葡萄球菌具有较强的抑制效果。周璇等[17]分离了贵州省一株星点梅衣属地衣 *Punctelia* sp.的内生真菌蔡氏轮层炭壳菌 *Daldinia childiae*,发现其液体发酵物的乙酸乙酯萃取物对9株临床致病菌和耐药菌中的6种(耐药表面葡萄球菌Z12、耐药布氏杆菌B103、金黄色葡萄球菌25953、金黄色葡萄球菌6538、耐药枯草芽孢杆菌163、耐药藤黄微球菌261)都具抑制活性。Xian等[18]从三七叶中获得的内生真菌 *Penicillium capsulatum* XL027中分离出一种新的4-羟基- α 吡喃酮,并发现了其对耐甲氧西林金黄色葡萄球菌具有拮抗性。Li等[19]通过对禾本科植物狗牙根内生菌的研究,发现其具有很强的幽门螺旋杆菌抑制活性,并从中提取出有效物质5,8-环二氧麦角甾醇和麦角甾醇。Gauchan等[20]从尼泊尔不同地点采集的16种不同的红豆杉中,分离出13种不同的内生真菌,通过琼脂孔扩散法分析抗菌活性,结果2种内生真菌(枝状枝孢霉和油菜链格孢菌)的提取物对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌和枯草芽孢杆菌显示出较好的抗菌活性。张慧茹[21]等在对胶股蓝内生真菌进行研究时,发现内生真菌JY25主要以破坏细菌的细胞膜及影响细菌蛋白质合成而抑制细菌生长。

植物内生菌次生代谢物除对部分人体致病菌有抑制活性外,对多种植物致病菌也表现出较好的抑制活性。段辰君等[22]以红掌为研究对象,从中筛选出内生细菌224株、真菌44株、放线菌104株,其中

从不同的分离部位所分离的内生细菌对 8 种植物病原真菌(番茄灰霉病、番茄早疫病菌、棉花立枯病菌、黄瓜枯萎病菌、黄瓜疫病病菌、黄瓜灰霉病菌、西瓜枯萎病菌、萝卜黑斑病菌)有不同程度的抑制作用,细菌发酵液对 4 种植物病原细菌(黄瓜角斑病菌、番茄疮痂病菌、西瓜果斑病菌、大白菜软腐病菌)也有一定的抑制效果。谢颖等[23]对从海南大羽藓(*Thuidium cymbifolium*)叶片中分离得到一株绿芽孢杆菌,对峙实验结果显示其对 4 种病原菌(白绢病、香蕉枯萎病、立枯丝核病、芒果炭疽病)有不同程度的抑制作用,最大抑菌率分别为 66.9%、59.7%、60.3%和 83.0%;发酵液抑菌实验结果显示其对 6 种病原菌(蔓枯病、稻瘟病、白绢病、香蕉枯萎病、立枯丝核病、芒果炭疽病)有抑制作用,其中对白绢病病原菌和立枯丝核病病原菌的抑制效果最好,最大抑菌率分别高达 92.8%和 92.6%,具有极大的生防潜力。Chaouachi 等[24]从来自 Cape Bon 地区(突尼斯)的六个地点的番茄的不同器官中得到 50 种细菌菌株。体外双重培养实验表明,36%的内生细菌菌株产生了具有抗灰霉病真菌活性的挥发性有机化合物(VOCs)。其中五种具有拮抗性的内生细菌菌株产生一组七种具有相同结构母核的 VOCs,以及其他已知具有特异性抗真菌活性的 VOCs,如 3-Methylbutan-1-ol、含硫化合物、2-庚酮和十二醛。Nischitha 等[25]对异马唐和类雀稗的内生真菌进行分离,共发现异马唐内生真菌 29 属 70 种、类雀稗内生真菌 30 属 71 种。在对这些菌株发酵液的乙酸乙酯及甲醇提取物进行研究后,发现卷曲菌和柠檬青霉菌表现出较高的抗菌活性。

由此可见,多种植物内生菌的代谢产物对人体致病菌或植物致病菌都表现出较好的抑制活性,可为发掘新型抗菌素以解决抗药性问题提供一个新的研究途径。

2.3. 抗氧化作用

氧化损伤是高等动物多种疾病的诱因,多种类型的天然产物均有很好的清除氧自由基、对抗氧化损伤的作用,所以许多学者希望通过对植物内生菌的研究发现新的天然抗氧化剂[26]。王盈桐等[27]采用组织分离法从茵陈、苦菜中分离内生真菌 KC-G-2-3-2 和 YC-J-4-2,分别为木霉属菌株和间座壳属菌株,并测定其内生真菌提取物 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼的自由基(DPPH)清除率,发现 2 株内生真菌菌液和菌体提取物都表现出较好的 DPPH 清除功效,其中 YC-J-4-2 的 PDB 培养基发酵液的菌液提取物对 DPPH 的清除率超过 90%。冯书珍等[28]选取了广西湾海域绿藻门石莼和褐藻门裙带菜为研究对象,发现其内生细菌和内生真菌发酵液的乙酸乙酯提取物对 DPPH、羟基自由基和超氧阴离子都具有一定清除活性,且随浓度升高而增强,不同藻类的石莼与裙带菜的内生菌抗氧化活性之间存在显著差异($P < 0.05$);同种藻类内生菌间,除裙带菜内生真菌外,整体表现为,石莼与裙带菜的内生细菌对 DPPH、羟基自由基与超氧阴离子的半抑制浓度 IC50 值均显著高于内生真菌,其中石莼内生真菌短梗霉属真菌 SZ-5 抗氧化能力最强。金卫华等[29]从樱树皮中分离出 7 株内生菌株,通过测定其代谢产物对 DPPH 自由基、羟基自由基、超氧阴离子自由基和过氧化氢的清除能力来研究其抗氧化活性。实验结果表明,其中 6 株菌株的代谢产物都具有抗氧化活性。

Zhang 等[30]对海莲内生菌进行研究,分离到的最常见的内生真菌物种是 *Diaporthe phaseolorum*,其乙酸乙酯提取物和分离的代谢物体外抗氧化实验表明,60.0%的菌株具有一定程度的抗氧化活性。其中,在 PDA 培养基上生长的芒果拟盘多毛孢菌具有较强的清除 DPPH 和 ABTS 自由基的能力。Gauchan 等[20]对分离出的 13 种内生真菌,还利用 DPPH 法测定了其抗氧化活性,结果 3 种内生真菌(交链孢霉、枝状枝孢霉和油菜链格孢菌)的提取物均表现出剂量依赖性的自由基清除活性。Silva 等[31]从西番莲的叶片中分离出 315 株内生真菌,并筛选出 60 株含有与抗氧化活性有关的化学成分。其中 5 株菌株的乙酸乙酯和正丁醇提取物中含有黄酮类化合物和酚类化合物,其对 DPPH 自由基表现出高抗氧化活性。一株曲霉属(*Aspergillus nidulans* var. *dentatus*)菌株还能产生单宁,其清除 DPPH 自由基效果与 BHT(丁基羟基甲苯)和芦丁相似。Xiong 等[32]以盐生植物内生放线菌 KLBMP 5180 为研究对象,经发酵培养后获得两种纯化

的胞外多糖(EPSs),经超氧阴离子和羟基自由基的清除能力和还原能力的评价表明,这两种胞外多糖均具有中等的体外抗氧化活性。

目前多数学者采用清除 DPPH 自由基、羟基自由基、超氧阴离子自由基和过氧化氢的方法,证明了植物内生菌具有体外抗氧化能力,而体内抗氧化实验的研究相对欠缺,部分研究也并没有揭示发挥抗氧化作用的具体物质类型。后续应进一步深入研究具有抗氧化作用的植物内生菌次生代谢物,力争使植物内生菌成为天然抗氧化剂的新来源。

2.4. 抗病毒作用

病毒是一种可以在其它生物体间传播并感染生物体的微小生物,包括动物病毒和植物病毒,其对宿主危害极大,许多新型病毒的出现,也给人类健康造成巨大危机,因此研究和发现更多安全有效的抗病毒药物,是目前国内外研究的热点。近年来发现,很多植物内生菌产生的一些活性代谢物,具有抗病毒作用[33],可为抗病毒药物的开发提供一个新的源头。

Zhang 等[34]从乌头中分离得到内生真菌 *Nigrospora* sp. YE3033, 并从其培养液中分离出一系列蒽醌类和氮杂菲酮类化合物,其中 4 个化合物对流感病毒 H1N1 具有抑制作用。梁新新[35]从滇重楼内生菌 *Cladosporium* sp. 7951 的发酵物中,分离并鉴定了 8 个 aspulvinone 类新化合物,该类化合物在 10 μ M 时对新冠病毒主蛋白酶(SARS-CoV-2 Mpro)表现出不同程度的抑制作用,其中 aspulvinones D, M 和 R 的抑制活性大于 50%。

李文华等[36]从泽漆的健康组织中分离出了内生真菌、内生细菌和内生放线菌共 101 株,对发酵液进行抗病毒活性筛选,最终得到 2 株具有较好抗烟草花叶病毒活性的放线菌菌株。夏从芳[37]从滇重楼内生真菌杂色曲霉的次级代谢产物中分离得到了 20 个丁内酯类化合物,其中有 5 个化合物具有较好的抗烟草花叶病毒活性。

2.5. 促植物生长作用

长期研究发现,植物内生菌在与植物共生的过程中,具有促进植物生长和促进宿主活性成分的生物合成等积极作用[38],对培育产量高、品质好的农作物和中药材,提高土地利用率,维护国家粮食安全具有重要意义。

内生菌能够促进宿主植物生长的一个主要原因是具有产生吲哚乙酸(IAA)等植物激素的能力。赵龙飞等[39]从药用植物地黄块根中分离内生细菌并开展相关研究,发现有 7 个菌株产生 IAA 含量大于 1.32 mg/L,其中产量最高的 1 株达到了 34.696 mg/L。Wang [40]等从地黄中分离鉴定了 7 属 25 种不同的内生菌,其中 22 株菌株可在 L-色氨酸存在的情况下产生 IAA。曾夏冬[41]和王真真[42]等分别从水稻中分离、筛选并鉴定出能够明显抑制稻瘟病菌生长的内生放线菌 OsiLf-2 和 OsiRt-1,通过实验研究发现其均能利用色氨酸为前体合成 IAA,从而促进植物生长。刘丽辉[43]等从南方野生稻(*Oryza meridionalis*)中共分离到 58 株内生细菌,其中菌株 JH40、JH50 促生能力强,产 IAA 能力分别为 27.84 mg/L 和 29.97 mg/L。

内生菌促进植物活性成分合成,可能是通过内生菌作为诱导子,诱导宿主植物的靶向基因表达,激活宿主相关代谢途径合成活性物质。Wu [44]等从中国东北椴木中分离鉴定了 96 株内生真菌,并对代表性菌株的培养滤液中的皂苷浓度进行了测定,其中属于青霉菌属的 G22 产生皂苷浓度最高(2.049 mg/mL),HPLC 检测到 G22 培养滤液中含有人参皂苷 Re 和 Rb2。李瑞婷[45]等从炭角菌属内生菌对三七总皂苷的转化产物中分离鉴定了 7 个皂苷类成分,均为稀有人参皂苷。

2.6. 其他作用

除了抗肿瘤、抗氧化、抗菌、抗病毒、促进植物生长外,植物内生菌的次生代谢物还具有其他多种

药理作用。郭钦等[46]从5种药用植物中分离出内生真菌,并研究其代谢物的抗单胺氧化酶和乙酰胆碱酯酶活性,发现其中25个粗提物单胺氧化酶抑制率在60%以上。王邦艳[7]研究了红参培养下的内生菌 *Chaetomium globosum* (球毛壳菌)和 *Daldinia eschscholzii* (轮层菌)的次生代谢产物及其活性,在前者中分离鉴定出17个化合物,包括1个新天然产物 *cazaldehyde B*,在50 μM 浓度下,该化合物具有显著的NO生成抑制活性;在后者中分离鉴定出15个化合物,其中2个新化合物8-hydroxyl-helicascotide A和 *daldinsin* 具有一定的抗Ach活性。Xu等[47]从红树林中的内生真菌中分离出4种生物碱和8种聚酮类化合物,其中一种聚酮类化合物具有显著的免疫抑制活性。Wang等[48]从苔藓内生真菌曲霉中分离出两个新的喹啉衍生物以及10种已知化合物,其中部分化合物对NO生成具有显著的抑制作用,IC₅₀值分别为49.85、22.14和46.02 μM ,提示具有明显的抗炎活性。

3. 展望

植物内生菌次生代谢物近年来受到广泛关注,研究植物内生菌代谢产物的生物活性对于新药开发具有重要的意义。目前,植物内生菌生物活性的研究涉及抗肿瘤、抗菌、抗氧化以及促植株生长等多种活性,但报道大多只限于体外研究,体内实验的相关研究较为缺乏,而且抗病毒领域的研究近年来报道较少。随着分子生物学、天然药物化学、药理学的发展,为进一步挖掘植物内生菌的作用提供了可能,无论是在医药研发方向还是在农业生产方向,都有望在植物内生菌领域取得更多的重大突破。

基金项目

国家自然科学基金(81903479),山东省中医药科技发展计划项目(2019-0989)。

参考文献

- [1] 陈健钱. 微生物制药研究进展与发展趋势[J]. 生物化工, 2016, 2(2): 61-63.
- [2] 鞠建华, 杨镇业, 李青连, 等. 微生物药物研究开发现状与思考[J]. 山东大学学报(医学版), 2021, 59(9): 43-50, 63.
- [3] Hallmann, J., Quadt-Hallmann, A., Mahaffee, W.F. and Kloepper, J.W. (1997) Bacterial Endophytes in Agricultural Crops. *Canadian Journal of Microbiology*, **43**, 895-914. <https://doi.org/10.1139/m97-131>
- [4] 程龙媛, 张国卉, 孙燕, 等. 药用植物-内生菌-根际微生物互作研究进展[J]. 中草药, 2024, 55(15): 5264-5270.
- [5] 张举成. 七株植物内生菌的次生代谢产物及活性研究[D]: [博士学位论文]. 昆明: 云南大学, 2016.
- [6] 林羽涵. 四株植物内生菌的代谢物及生物活性研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 云南中医药大学, 2018.
- [7] 王邦艳. 红参培养下两株植物内生菌 *Chaetomium globosum* & *Daldinia eschscholzii* 次生代谢产物研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 云南大学, 2019.
- [8] 朱美林, 王皓天, 黄雪南, 等. 夹竹桃活性内生真菌的分离筛选及菌株 *Aspergillus sp.* 次级代谢产物的研究[J]. 山西医科大学学报, 2020, 51(9): 982-985.
- [9] 李丹, 朱天骄, 顾谦群, 等. 黄槿内生真菌的次级代谢产物及其生物活性研究[J]. 中国海洋药物, 2012, 31(6): 17-22.
- [10] 闫慧娇. 两株黄槿内生真菌次生代谢产物研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2010.
- [11] 旷歧轩, 谭璐, 罗禹, 等. 川芎内生真菌 *Fusarium proliferatum* 的化学成分[J]. 应用与环境生物学报, 2021, 27(5): 1318-1325.
- [12] Zhao, H., Chen, X., Chen, X., Zhu, Y., Kong, Y., Zhang, S., et al. (2020) New Peptidocyclins and Anticancer Charteusins from an Endophytic Bacterium of *Dendrobium officinale*. *Annals of Translational Medicine*, **8**, 455-455. <https://doi.org/10.21037/atm.2020.03.227>
- [13] Lim, S.M., Agatonovic-Kustrin, S., Lim, F.T., et al. (2021) High-Performance Thin Layer Chromatography-Based Phytochemical and Bioactivity Characterisation of Anticancer Endophytic Fungal Extracts Derived from Marine Plants. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis: An International Journal on All Drug-Related Topics in Pharmaceutical, Biomedical and Clinical Analysis*, **193**, Article 113702. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2020.113702>

- [14] Parthasarathy, R., Chandrika, M., Yashavantha Rao, H.C., Kamalraj, S., Jayabaskaran, C. and Pugazhendhi, A. (2020) Molecular Profiling of Marine Endophytic Fungi from Green Algae: Assessment of Antibacterial and Anticancer Activities. *Process Biochemistry*, **96**, 11-20. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2020.05.012>
- [15] Chen, C., Lu, S., Zou, Y., Mao, D. and Kakeya, H. (2025) Secondary Metabolites from *Tripterygium wilfordii* Hook. F.-Associated Endophytes: Producing Microbes, Structures, and Bioactivities. *Asian Journal of Organic Chemistry*, **14**, e202400696. <https://doi.org/10.1002/ajoc.202400696>
- [16] 戴婧婧, 车木勇, 胡佳佳. 梵净山藤茶内生菌的分离及其抑菌活性的初步研究[J]. 河南农业, 2020(32): 28-30.
- [17] 周璇, 杨彩玲, 孟庆峰, 等. 拮抗临床致病菌的一株地衣内生真菌[J]. 菌物学报, 2021, 40(1): 87-94.
- [18] Xian, P.J., Chen, H.Y., Feng, Z., et al. (2020) Capsulactone: A New 4-Hydroxy- α -Pyrone Derivative from an Endophytic Fungus *Penicillium capsulatum* and Its Antimicrobial Activity. *Journal of Asian Natural Products Research*, **23**, 1100-1106. <https://doi.org/10.1080/10286020.2020.1847092>
- [19] Li, Y., Song, Y.C., Liu, J.Y., Ma, Y.M. and Tan, R.X. (2005) Anti-*Helicobacter pylori* Substances from Endophytic Fungal Cultures. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, **21**, 553-558. <https://doi.org/10.1007/s11274-004-3273-2>
- [20] Gauchan, D.P., Kandel, P., Tuladhar, A., Acharya, A., Kadel, U., Baral, A., et al. (2020) Evaluation of Antimicrobial, Antioxidant and Cytotoxic Properties of Bioactive Compounds Produced from Endophytic Fungi of Himalayan Yew (*Taxus wallichiana*) in Nepal. *F1000Research*, **9**, Article 379. <https://doi.org/10.12688/f1000research.23250.1>
- [21] 张慧茹, 孟素香, 曹健, 等. 绞股蓝内生真菌抗大肠杆菌抗菌机制的研究[J]. 微生物学通报, 2015, 42(1): 157-162.
- [22] 段辰君, 王彦譔, 刘慧芹, 等. 红掌内生拮抗菌的分离及抑制作用初步研究[J]. 天津农学院学报, 2020, 27(4): 39-42
- [23] 谢颖, 刘祎炜, 刘安巧, 等. 一株 *Thuidium cymbifolium* 内生细菌的鉴定及其抑制真菌活性研究[J]. 化学与生物工程, 2020, 37(12): 17-21.
- [24] Chaouachi, M., Marzouk, T., Jallouli, S., Elkahoui, S., Gentzbittel, L., Ben, C., et al. (2021) Activity Assessment of Tomato Endophytic Bacteria Bioactive Compounds for the Postharvest Biocontrol of Botrytis Cinerea. *Postharvest Biology and Technology*, **172**, Article 111389. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111389>
- [25] Nischitha, R. and Shivanna, M.B. (2021) Antimicrobial Activity and Metabolite Profiling of Endophytic Fungi in *Digitalis bicornis* (Lam) Roem. and Schult. and *Paspalidium flavidum* (Retz.) A. Camus. *3 Biotech*, **11**, Article No. 53. <https://doi.org/10.1007/s13205-020-02590-x>
- [26] Santos, T.F.B., dos Santos Carvalho, C., de Almeida, M.A., Delforno, T.P. and Duarte, I.C.S. (2020) Endophytic Fungi Isolated from Brazilian Medicinal Plants as Potential Producers of Antioxidants and Their Relations with Anti-Inflammatory Activity. *3 Biotech*, **10**, Article No. 223. <https://doi.org/10.1007/s13205-020-02211-7>
- [27] 王盈桐, 李学威, 陆云彪, 等. 苦菜、茵陈内生真菌的分离鉴定与生物活性[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(20): 265-270.
- [28] 冯书珍, 谢广燕, 刘南英, 等. 两种海藻内生菌的分离及其抗氧化活性研究[J]. 食品与生物技术学报, 2020, 39(6): 99-105.
- [29] 金卫华, 胡伟, 唐红枫. 樱树内生菌代谢产物的抗氧化活性研究[J]. 化学与生物工程, 2019, 36(10): 31-34.
- [30] Zhang, X., Xu, Z., Ma, J., et al. (2021) Phylogenetic Diversity, Antimicrobial and Antioxidant Potential and Identification of Bioactive Compounds from Culturable Endophytic Fungi Associated with Mangrove *Bruguiera sexangula* (Lour.) Poir. *Current Microbiology*, **78**, 479-489. <https://doi.org/10.1007/s00284-020-02314-7>
- [31] da Silva, M.H.R., Cueva-Yesquén, L.G., Júnior, S.B., Garcia, V.L., Sartoratto, A., de Franceschi de Angelis, D., et al. (2020) Endophytic Fungi from *Passiflora incarnata*: An Antioxidant Compound Source. *Archives of Microbiology*, **202**, 2779-2789. <https://doi.org/10.1007/s00203-020-02001-y>
- [32] Xiong, Y., Ju, X., Li, X., et al. (2020) Fermentation Conditions Optimization, Purification, and Antioxidant Activity of Exopolysaccharides Obtained from the Plant Growth-Promoting Endophytic Actinobacterium *Glutamicibacter Halophytocola* KLBMP 5180. *International Journal of Biological Macromolecules*, **153**, 1176-1185.
- [33] 王烟波, 李泽琳, 曾毅. 植物内生菌抗病毒活性成分的研究进展[J]. 中华实验和临床病毒学杂志, 2012, 26(1): 78-80
- [34] Zhang, S., Huang, R., Li, F., Wei, H., Fang, X., Xie, X., et al. (2016) Antiviral Anthraquinones and Azaphilones Produced by an Endophytic Fungus *Nigrospora* Sp. from Aconitum Carmichaeli. *Fitoterapia*, **112**, 85-89. <https://doi.org/10.1016/j.fitote.2016.05.013>
- [35] 梁新新. 两种植物内生菌及四种药用植物的代谢产物及活性研究[D]: [博士学位论文]. 昆明: 云南大学, 2022.
- [36] 李文华, 李乐, 吴云锋, 等. 泽漆内生菌的分离及抗病毒活性筛选[J]. 西北农业学报, 2008, 17(2): 285-288.

- [37] 夏从芳. 滇重楼内生真菌杂色曲霉发酵产物中丁内酯类化合物的研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 云南民族大学, 2015.
- [38] 尤式备, 徐佳慧, 郭怡文, 等. 蓝莓根毛缺失的机制及内生菌根真菌的促生作用[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2020, 46(4): 417-427.
- [39] 赵龙飞, 徐亚军, 邓振山, 等. 拮抗棉花枯萎病菌的地黄内生细菌筛选、鉴定和促生潜能[J]. 微生物学报, 2021, 61(8): 2338-2357.
- [40] Wang, S., Ji, B., Su, X., Li, H., Dong, C., Chen, S., *et al.* (2020) Isolation of Endophytic Bacteria from *Rehmannia glutinosa* Libosch and Their Potential to Promote Plant Growth. *The Journal of General and Applied Microbiology*, **66**, 279-288. <https://doi.org/10.2323/jgam.2019.12.001>
- [41] 曾夏冬. 水稻内生放线菌 OsiLf-2 的分离、鉴定及其抗稻瘟病研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2016.
- [42] 王真真, 徐婷, 袁珊珊, 等. 水稻内生放线菌 OsiRt-1 的分离鉴定及对稻瘟病的防治作用[J]. 微生物学通报, 2016, 43(5): 1009-1018.
- [43] 刘丽辉, 蒋慧敏, 区宇程, 等. 南方野生稻内生细菌的分离鉴定及促生作用[J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26(5): 1051-1058.
- [44] Wu, H., Yang, H., You, X. and Li, Y. (2012) Isolation and Characterization of Saponin-Producing Fungal Endophytes from *Aralia elata* in Northeast China. *International Journal of Molecular Sciences*, **13**, 16255-16266. <https://doi.org/10.3390/ijms131216255>
- [45] 李瑞婷, 郭从亮, 崔秀明, 等. 炭角菌属内生菌对三七总皂苷的生物转化研究[J]. 中药材, 2020, 43(9): 2155-2158.
- [46] 郭钦, 杨中锋, 孙建慧. 5 种药用植物内生真菌的分离纯化及生物活性研究[J]. 甘肃科学学报, 2020, 32(5): 22-24.
- [47] Xu, Z.Y., Zhang, X.X., Ma, J.K., *et al.* (2020) Secondary Metabolites Produced by Mangrove Endophytic Fungus *Aspergillus fumigatus* HQD24 with Immunosuppressive Activity. *Biochemical Systematics and Ecology*, **93**, Article 104166.
- [48] Wang, N., Liu, C., Wang, T., Li, Y., Xu, K. and Lou, H. (2021) Two New Quinazoline Derivatives from the Moss Endophytic Fungus *Aspergillus* Sp. and Their Anti-Inflammatory Activity. *Natural Products and Bioprospecting*, **11**, 105-110. <https://doi.org/10.1007/s13659-020-00287-5>