

不同地区蛹虫草内生及生境土壤可培养真菌多样性及抑菌活性

陈馨忆¹, 许小蓉¹, 黄之镨¹, 赵金丽¹, 阳红燕¹, 杨佳倩¹, 王艳¹, 赵庆¹, 张晓梅^{2*}

(1. 云南中医药大学中药学院, 云南 昆明 650500; 2. 云南中医药大学基础医学院, 云南 昆明 650500)

摘要: **目的** 探讨不同地区蛹虫草内生及生境土壤真菌多样性, 并进行抑菌活性分析, 从中筛选具有良好抗菌活性的菌株。**方法** 本研究基于纯培养手段分离蛹虫草共生微生物, 并通过平板对峙法对蛹虫草内生及生境土壤真菌进行抑菌活性测试。**结果** 从蛹虫草内共获 86 株分属于 4 门 22 属 51 种内生真菌以及 71 株分属于 4 门 22 属 46 种土壤真菌, 4 个地区蛹虫草内生、生境土壤都共有优势属为 *Aspergillus*、*Fusarium* 和 *Trichoderma*。**结论** 研究通过纯培养手段证实不同居群蛹虫草共生微生物丰富多样, 筛选得到的活性菌株为蛹虫草内生及土壤真菌资源开发和利用提供依据, 对保护天然虫草物种及虫草资源具有一定意义。

关键词: 蛹虫草; 内生及土壤; 可培养真菌; 物种多样性; 抑菌活性

中图分类号: R285.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-4299(2026)01-0088-08

DOI: 10.19288/j.cnki.issn.2097-4299.2026.01.019

Diversity and Antibacterial Activity of Culturable Endophytic and Habitat Soil Fungi of *Cordyceps militaris* Collected from Different Regions

CHEN Xinyi¹, XU Xiaorong¹, HUANG Zhipu¹, ZHAO Jinli¹, YANG Hongyan¹,
YANG Jiaqian¹, WANG Yan¹, ZHAO Qing¹, ZHANG Xiaomei²

(1. College of Traditional Chinese Medicine, Yunnan University of Chinese Medicine, Kunming 650500, China ;
2. School of Basic Medicine, Yunnan University of Chinese Medicine, Kunming 650500, China)

ABSTRACT: Objective To explore the diversity of endophytic and habitat soil fungi of *Cordyceps militaris* in different regions and conduct antibacterial activity analysis, and to screen out strains with good antibacterial activity. **Methods** In this study, the symbiotic microorganisms of *C. militaris* were isolated by pure culture methods, and the antibacterial activity of endophytic and habitat soil fungi of *C. militaris* was tested by the plate confrontation method. **Results** A total of 86 endophytic fungi belonging to 4 phyla, 22 genera and 51 species and 71 soil fungi belonging to 4 phyla, 22 genera and 46 species were obtained from *C. militaris*. The dominant genera of endophytic and habitat soil fungi in the four regions of *C. militaris* were *Aspergillus*, *Fusarium* and *Trichoderma*. **Conclusion** This study confirmed the rich diversity of symbiotic microorganisms of different populations of *C. militaris* by pure culture methods. The active strains screened provide a basis for the development and utilization of endophytic and soil fungal resources of *C. militaris*, and have certain significance for the protection of natural *Cordyceps* species and *Cordyceps* resources.

KEY WORDS: *Cordyceps militaris*; endophytic and soil; culturable fungi; species diversity; antibacterial activity

内生真菌及土壤真菌作为中药的共生微生物群落, 广泛存在于各类植物中^[1-3], 它们可以为宿主提供营养, 促进宿主的生长, 增强植物对病虫害的抵抗力^[4]。在这种特殊的生长环境下, 内生及土壤真菌在与宿主

植物的协同进化中产生了种类丰富且生物活性多样的代谢产物^[5]。例如, 吴晓贤等^[6]从红菇内分离出的内生真菌爪哇虫草中的多糖成分对金黄色葡萄球菌和铜绿假单胞菌均具有抑菌活性; 于帮红等^[7]从冬虫夏

基金项目: 国家自然科学基金(82360697); 云南省科技计划项目(202101AZ070001-204)

作者简介: 陈馨忆(1999-), 女, 在读硕士研究生, E-mail: chenxinyi627@163.com

* **通信作者:** 张晓梅(1986-), 女, 副教授, 硕士研究生导师, 研究方向: 药用植物内生菌及其活性代谢产物发掘, E-mail: meimeizhang.net@163.com

草内分离得到的高山被孢霉不仅抑菌活性较好,还兼具油脂产量丰富、生长周期短等特性;许小蓉等^[8]从云南地区虫草中分离出的内生真菌 *Trichoderma* sp. Y3-1 对部分革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌表现出较好的抑菌活性,对植物病原真菌也具有不同程度的拮抗能力。这些研究不仅揭示了虫草群落中真菌资源的丰富多样性,还证明了从虫草及其相关真菌资源中挖掘出的活性物质蕴含着巨大的潜力与价值。

蛹虫草 (*Cordyceps militaris* (Link. Fries) Link) 为麦角菌科、虫草属真菌,是寄生于昆虫中药食两用的菌,富含虫草素、虫草酸^[9]、虫草多糖^[10]、喷司他汀等多种药理作用与冬虫夏草相似^[11]的活性物质,因此引起了大家的广泛关注。现代药理学研究表明,蛹虫草具有抗肿瘤、抗菌消炎和提高免疫力等功效^[12]。此外,秦建春等^[13]发现,蛹虫草发酵液萃取物对金黄色葡萄球菌等病原细菌及绿色木霉具有明显的抑菌效果,是一种开发价值极大的真菌资源。目前,对蛹虫草的研究多数集中在虫草素、药理作用及人工栽培方面,而有关蛹虫草内生及生境土壤真菌多样性、真菌抗菌活性研究却鲜有报道。有研究通过高通量测序手段对云南省昆明市蛹虫草内生及其生境土壤真菌群落组成进行分析,发现天然蛹虫草微生物群落较为丰富^[14]。本文基于纯培养手段分离铁岭、楚雄、昆明、曲靖 4 个地区蛹虫草内生及生境土壤真菌,以期丰富蛹虫草内生及土壤真菌资源,并通过平板对峙法对蛹虫草内生及生境土壤可培养真菌进行抑菌活性测试,以期获得抗菌活性特异性好的菌株,为后续研究提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 样品采集 野生蛹虫草 *C.militaris* 及其生境土壤样本采集自辽宁省铁岭市西丰县、云南省楚雄市紫溪山、云南省昆明市嵩明县大哨乡以及云南省曲靖市会泽县驾车乡,共采集样品数量分别为:云南省楚雄市紫溪山(11 个),云南省曲靖市会泽县驾车乡(6 个),辽宁省铁岭市西丰县(9 个),云南省昆明市嵩明县大哨乡(9 个),样品信息及编号见表 1。采集蛹虫草样本时,需佩戴无菌手套,使用无菌工具采集后,将其放入无菌容器内,4 ℃条件下保存,以备后续使用。采集生境土壤样品时,去除生境样本表面的腐质,避免污染,使用无菌铲子采集距离虫草 5 cm、深度与虫体底部平行的周围土壤约 15~20 g,将采集到的土壤样品装入离心管内,运回实验室,放入 4 ℃条件下保存,以备后续分析使用。不同居群蛹虫草样本见图 1。

表 1 样本采集信息

采样地	类型	样本编号	经纬度
辽宁省铁岭市 西丰县	内生真菌 土壤真菌	CDB SDB	42°22'N, 124°16'E
云南省楚雄市 紫溪山	内生真菌 土壤真菌	FZC FZS	24°58'N, 101°22'E
云南省曲靖市 会泽县驾车乡	内生真菌 土壤真菌	HZ HZS	25°99'N, 103°37'E
云南省昆明市 嵩明县大哨乡	内生真菌 土壤真菌	FDC FDS	25°4'N, 102°92'E



A. 铁岭市

B. 曲靖市

C. 楚雄市

D. 昆明市

图 1 不同居群蛹虫草样本

1.1.2 供试菌株与试剂

(1) 常见病原菌:耐甲氧西林金黄色葡萄球菌(methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*, MRSA-1505、MRSA-1450、MRSA-28299、MRSI-20),耐氟康唑白色念珠菌(drug-resistant *Candida albicans*)23[#]、63[#]、14053),白色念珠菌(*C. albicans* ATCC10231),粪肠球菌(*Enterococcus faecalis* ATCC29212),耻垢分枝杆菌(*Mycobacterium megalotubeforme* 1037),鲍曼不动杆菌(*Acinetobacter baumannii* ATCC196-6),克雷伯氏菌(*Klebsiella pneumoniae* ATCC13883),肺炎链球菌(*S. pneumoniae* BNCC338425),金黄色葡萄球菌(*S. aureus* ATCC25923),大肠杆菌(*Escherichia coli* ATCC25922);植物病原菌:禾谷镰刀菌(*Fusarium graminearum* 2)、黄瓜枯萎病菌(*F. oxysporum f.sp. cucumerinum* 7)、西瓜枯萎病菌(*F. oxysporum f.sp. niveum* 9)、黄瓜根腐病菌(*Phytophthora melonis* 10)和串珠镰刀菌(*F. moniliforme* 11)。以上供试菌株均为实验室前期研究保存。

(2) 试剂:真菌 DNA 抽提试剂盒(B518259-0100)、ExTaqDNA 聚合酶、Trans2KplusDNAMarker、琼脂糖、TAE 缓冲液、Buffer;均从生工生物工程(上海)股份有限公司购入。

1.1.3 培养基

(1) LB(Luria-Bertani)病原细菌培养基:胰蛋白胨 10 g,酵母提取物 5 g,氯化钠 10 g,琼脂 15 g,蒸馏水 1 L,pH 调节至 7.2~7.6 范围内。

(2) 内生及生境土壤真菌、植物病原真菌培养基 PDA 培养基:马铃薯 200 g(煮沸 20 min 后滤除固体残渣,收集汁液),葡萄糖 20 g,琼脂 15 g,蒸馏水 1 L,pH 6.0~7.0。

1.2 蛹虫草内生与土壤真菌的分离纯化 内生真菌:通过组织分离法^[15-16]用无菌手术刀取蛹虫草菌核内部 5 mm 大小的组织接种至含 50 mg/L 萘啶酮酸钠的 PDA 培养基中 23 °C 恒温培养 1 周;生境土壤真菌:取 1 g 生境土壤转移至含 9 mL 无菌水的试管中,于 23 °C 摇床内 120 r/min 振荡 1 h,接着 160 W 超声处理 40 s,取 3 只装有 9 mL 无菌水的试管依次编号,将土壤样品逐级稀释;取浓度稀释至 10⁻³ 的土壤混悬液 200 μL 使用涂布器涂布至含 50 mg/L 萘啶酮酸钠的 PDA 培养基中,23 °C 恒温培养,定期观察。根据菌落形态、颜色等特征,挑取生长状况较好的单菌落接种于 PDA 培养基上,纯化并去除重复,将纯化所

得的真菌接种至 PDA 斜面,于 4 °C 条件下保存,以备后续研究使用^[17]。

1.3 菌株分类地位鉴定 根据真菌 DNA 提取说明书建议提取真菌 DNA。选择真菌引物 ITS1 (5'-TC-CGTAGGTGAACCTGCGG-3') 和 ITS4 (5'-TCCTC-CGCTTATTGATATGC-3')(北京擎科生物科技有限公司合成)对 ITS 基因片段进行扩增。真菌 PCR 扩增反应条件:98 °C 预变性 2 min,98 °C 变性 10 s,56 °C 退火 10 s,72 °C 延伸 10 s,35 个循环;72 °C 终延伸 5 min,4 °C 结束反应。扩增成功的真菌 PCR 产物送至擎科(北京)生物科技有限公司进行测序。根据测序结果,序列数据经处理后与 NCBI 数据库 Blast 比对,初步确定菌株的分类地位,下载相似性较高的同源序列,随后使用 Clustal X^[18]进行序列相似性比对,用 MEGA-X^[19](最大似然法)软件采用邻接法(neighbour-joining, NBJ)法构建内生真菌与土壤真菌系统发育树,以确定内生及土壤真菌分类地位。

1.4 抑菌活性测试 采用平板对峙法^[20]检测抑菌活性。(1) 常见病原菌抑菌活性:将病原细菌接种至液体 LB 培养基,37 °C、200 r/min 避光条件下培养 12 h;白色念珠菌接种至液体沙氏培养基中,28 °C、200 r/min 避光条件下培养 24 h,取 150 μL 细菌培养液加入至 200 mL LB 琼脂培养基,取 150 μL 白色念珠菌培养液加入至 200 mL 沙氏琼脂培养基混匀后倒板。取直径为 4 mm 的含菌琼脂块移至含病原菌的培养基中,28 °C 恒温培养 18 h(耻垢分枝杆菌 1037 因生长较慢需培养 48 h 以上),测定抑菌圈直径;(2) 植物病原真菌拮抗能力:在 PDA 平板中央放置直径为 4 mm 病原真菌指示菌饼,再在其两端相距 2~3 cm 处各放置一块待测菌饼,对照组仅接种植物病原指示真菌,25 °C 黑暗培养 5 d 后,观察是否有抑菌带产生。采用十字交叉法^[21]测量菌落生长直径。

2 结果

2.1 不同居群蛹虫草内生及土壤真菌多样性 对分离所获菌株根据形态初步鉴定和去除重复后,对余下 157 株进行 ITS 基因序列测定,获 86 株隶属于 4 门 11 纲 15 目 19 科 22 属 51 种蛹虫草内生真菌以及 71 株隶属于 4 门 7 纲 8 目 12 科 22 属 46 种蛹虫草土壤真菌,部分蛹虫草内生及土壤真菌构建 ITS 基因系统发育树(见图 2)。结果表明,不同地区蛹虫草内生真菌及土壤真菌群落组成均存在明显差异,并且每个地

区的优势类群各不同。从菌株分类地位来看,4 个地区蛹虫草内生真菌多样性高于土壤真菌多样性;从区域来看,内生及土壤真菌多样性排序依次为楚雄>曲靖>铁岭>昆明(见表 2)。

不同地区可培养内生及生境土壤菌属数量统计结果见表 3。属水平上,4 个地区蛹虫草内生、生境土壤真菌共有优势菌属木霉属 *Trichoderma*、曲霉属 *Aspergillus* 和镰刀菌属 *Fusarium*。在 4 个地区的内生真菌中,拟盘多毛孢属 *Pestalotiopsis* 为楚雄居群蛹虫草内生真菌优势属,其菌株数占楚雄居群蛹虫草内生真菌鉴定总数的 14%,毛壳菌属 *Chaetomium*、栓菌属 *Trametes*、彼得壳属 *Petriella* 和蒙氏团菌 *Hypomontagnella* 为楚雄居群蛹虫草内生真菌特有属;蒲头霉

表 2 不同地区蛹虫草共生真菌分类地位组成

居群	编号	鉴定株	门	纲	目	科	属	种
铁岭	CDB	14	3	5	5	5	10	13
	SDB	12	3	5	5	6	7	12
楚雄	FZC	43	4	9	13	16	11	34
	FZS	28	3	5	5	7	14	20
昆明	FDC	17	4	7	7	7	9	11
	FDS	10	4	5	12	5	5	9
曲靖	HZ	12	4	5	6	6	7	12
	HZS	21	3	6	6	8	10	18
总计	内生	86	4	11	15	19	22	51
	土壤	71	4	7	8	12	22	46

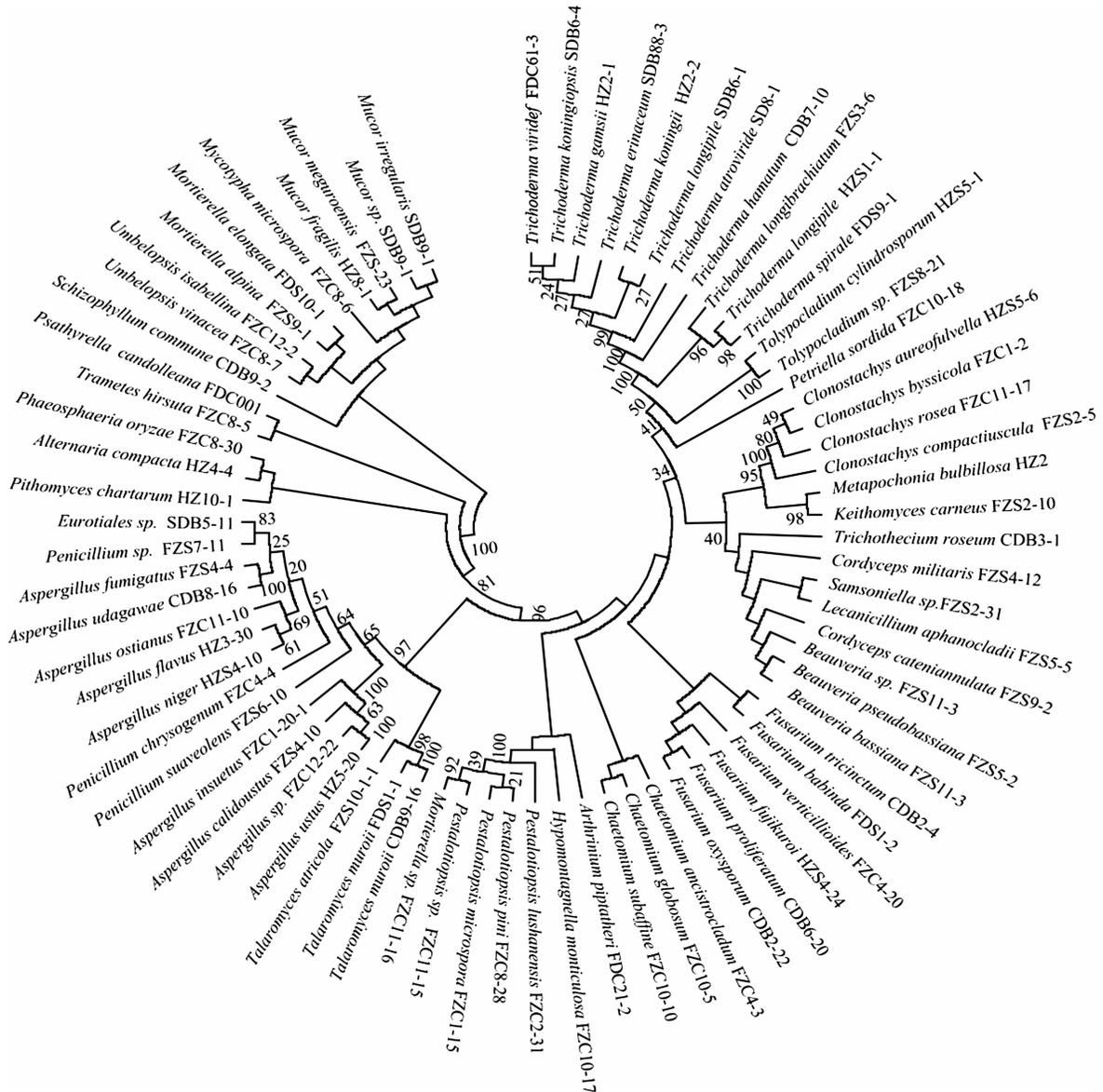


图 2 部分蛹虫草代表性内生真菌及土壤真菌系统发育树

表 3 不同居群蛹虫草内生及土壤真菌可培养真菌多样性

属	内生真菌				土壤真菌			
	CDB	FZC	HZ	FDC	SDB	FZS	HZS	FDS
镰刀菌属 <i>Fusarium</i>	5	2	1	2	2	0	5	1
弯颈霉属 <i>Tolypocladium</i>	0	0	0	0	0	3	1	0
紫枝孢属 <i>Purpureocillium</i>	0	0	0	0	1	0	0	0
泛普可尼亚属 <i>Metapochonia</i>	0	0	0	0	0	0	1	0
绿僵菌属 <i>Metarhizium</i>	0	0	0	0	0	1	0	0
白僵菌属 <i>Beauveria</i>	0	0	0	0	0	4	2	0
鳞翅虫草属 <i>Samsoniella</i>	0	0	0	0	0	1	0	0
虫草属 <i>Cordyceps</i>	0	0	0	0	0	2	0	0
蜡蚧霉属 <i>Lecanicillium</i>	0	0	0	0	0	1	2	0
曲霉属 <i>Aspergillus</i>	3	5	3	1	3	3	2	0
聚端孢属 <i>Trichothecium</i>	1	1	0	0	0	0	0	0
木霉属 <i>Trichoderma</i>	1	4	4	8	3	4	4	5
毛壳菌属 <i>Chaetomium</i>	0	4	0	0	0	0	0	0
拟盘多毛孢属 <i>Pestalotiopsis</i>	0	6	0	0	1	0	0	0
青霉属 <i>Penicillium</i>	0	6	0	1	0	1	0	0
篮状菌属 <i>Talaromyces</i>	1	1	0	1	0	3	0	1
螺旋聚孢霉属 <i>Clonostachys rosea</i>	1	2	0	1	1	1	0	0
弯孢聚壳属 <i>Eutypella</i>	0	0	0	0	0	0	1	0
<i>Eurotiales</i>	0	1	0	0	0	0	0	0
枝孢菌属 <i>Cladosporium</i>	0	0	0	0	0	0	0	1
裂褶菌属 <i>Schizophyllum</i>	0	0	0	1	0	0	0	0
链格孢霉属 <i>Alternaria</i>	1	3	1	0	0	0	0	1
毛霉属 <i>Mucor</i>	1	0	2	1	1	0	0	0
栓菌属 <i>Trametes</i>	0	1	0	0	0	0	0	0
矮被孢霉属 <i>Umbelopsis</i>	0	2	0	0	0	2	0	0
被孢霉属 <i>Mortierella</i>	0	1	0	0	0	0	2	1
暗球腔菌属 <i>Phaeosphaeria</i>	0	0	0	0	0	2	1	0
彼得壳属 <i>Petriella</i>	0	1	0	0	0	0	0	0
蒙氏团菌属 <i>Hypomontagnella</i>	0	1	0	0	0	0	0	0
皮思霉属 <i>Pithomyces</i>	0	1	0	0	0	0	0	0
蒲头霉属 <i>Mycotypha</i>	0	0	1	0	0	0	0	0
节菱孢霉属 <i>Arthrinium</i>	0	1	0	0	0	0	0	0
<i>Psathyrella</i>	0	0	0	1	0	0	0	0
总计	14	43	12	17	12	28	21	10

属 *Mycotypha* 为曲靖居群蛹虫草内生真菌独有属; *Trichoderma* 为昆明居群蛹虫草内生真菌优势菌属, 其菌株数占昆明居群蛹虫草内生真菌鉴定总数的 47%; *Psathyrella* 属为昆明居群蛹虫草内生真菌独有属; 铁岭居群蛹虫草内生真菌中无独有属, 但有优势菌属 *Fusarium*, 其菌株数占铁岭蛹虫草内生真菌鉴定总数的 36%。在 4 个地区生境土壤真菌中, 紫枝孢属 *Purpureocilli* 为铁岭居群蛹虫草生境土壤独有属; 绿僵菌属 *Metarhizium* 和鳞翅虫草属 *Samsoniella* 为楚雄居群蛹虫草生境土壤独有属; 泛普可尼亚属 *Metapochonia* 为曲靖居群蛹虫草生境土壤独有属; 枝孢菌属 *Cladosporium* 为昆明居群蛹虫草生境土壤独有属。

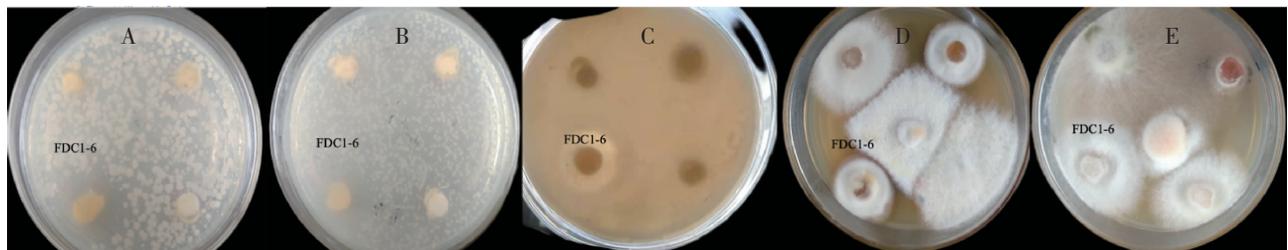
2.2 内生及土壤真菌抑菌活性分析 对分离获得的 157 株内生及土壤真菌进行抑菌活性实验, 结果表明, 有 42 株真菌(铁岭 7 株、楚雄 6 株、曲靖 6 株、昆

明 23 株) 对 1 株及以上常见病原菌具有明显抑菌活性, 初筛阳性率为 26.75%。其中有 11 株真菌对 2 株及以上常见病原菌具有明显抑菌活性(表 4), 31 株真菌表现出抑菌活性。在这些具有抑菌活性的菌株中, 对 MASA、耐氟康唑白色念珠菌、克雷伯氏菌、粪肠球菌、大肠杆菌、白色念珠菌、耻垢分枝杆菌、鲍曼不动杆菌、肺炎链球菌、金黄色葡萄球菌具有抑菌活性的菌株分别有 20、7、5、6、7、2、6、3、3、14 株。对植物病原真菌进行拮抗测试, 结果表明, 有 34 株真菌对 1 株及以上植物病原真菌具有不同程度的拮抗能力, 初筛阳性率为 21.60%。其中对串珠镰刀菌、西瓜枯萎病菌、黄瓜根腐病菌、禾谷镰刀菌具有较强拮抗率的菌株分别有 10、8、7、5 株, 这些菌株拮抗作用高效, 均是具有生防潜力的菌株, 所有测试真菌对黄瓜枯萎病菌都没有拮抗作用, 部分抑菌或拮抗效果图见图 3。

表 4 11 株阳性真菌抑菌活性

菌株 Bacterial strain	抑菌圈直径 Inhibition zone (mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>Trichoderma hamatum</i> CDB7-10	-	-	24.44	-	-	+	-	-	-	-
<i>Trichoderma</i> sp. FZS2-11	-	-	+	22.89	-	-	-	-	-	-
<i>Trichoderma koningii</i> FDC3-1	10.00	-	-	-	-	-	-	20.05	25.25	20.33
<i>Trichoderma</i> sp. FDC12-1	10.22	-	-	-	-	-	-	-	-	20.21
<i>Trichoderma viride</i> FDS6-1	-	-	+	-	-	-	-	-	-	10.00
<i>Fusarium tricinctum</i> FDC1-6	-	-	24.98	-	19.89	-	20.00	-	-	+
<i>Fusarium babinda</i> FDS1-2	-	-	12.67	-	23.67	24.00	-	-	-	-
<i>Fusarium</i> sp. FDC6-1	-	-	-	-	-	-	-	+	+	15.18
<i>Penicillium</i> sp. FDC6-2	+	-	-	-	-	-	-	-	20.21	-
<i>Clonostachys</i> sp. FDC8-2	16.19	-	-	-	-	-	-	10.10	-	16.37
<i>Beauveria pseudobassiana</i> CDB9-31	-	12.34	+	-	+	-	-	-	-	-

注: 1~10 依次为 MRSA 1591、1450、1505, 耐氟康唑白色念珠菌 14053、23#, 白色念珠菌 ATCC10231, 耻垢分枝杆菌, 粪肠球菌, 鲍曼不动杆菌, 金黄色葡萄球菌; “+”表示抑菌圈直径 5~7 mm; “-”表示无抑菌活性



A. 耐甲氧西林金黄色葡萄球菌 MRSA-1505; B. 耻垢分枝杆菌 *Mycobacterium megmatidis* 1037; C. 耐氟康唑白色念珠菌 drug-resistant *Candida albicans* 23#; D. 西瓜枯萎病菌 *Fusarium oxysporum* f.sp. *niveum* 9; E. 黄瓜根腐病菌 *Phytophthora melonis* 10

图 3 菌株 FDC1-6 的抑菌活性

3 结论

本研究通过纯培养技术系统分析了铁岭、楚雄、昆明和曲靖 4 个地区蛹虫草内生及生境土壤可培养真菌的多样性,并进行抑菌活性实验。结果表明,不同地区蛹虫草共生真菌群落组成存在显著差异,共分离到 157 株真菌,涵盖 4 门 22 属 51 种内生真菌和 4 门 22 属 46 种土壤真菌,优势菌属为 *Aspergillus*、*Fusarium* 和 *Trichoderma*。抑菌活性分析显示,42 株真菌对常见病原菌或植物病原菌具有显著拮抗作用,其中 11 株表现出广谱抑菌潜力,尤其是菌株 *F. babinda* FDC1-6 对多种病原菌表现出较好的活性。这些发现不仅揭示了蛹虫草共生真菌的生态适应性与功能多样性,还为开发新型抗菌资源提供了候选菌株,对蛹虫草资源的可持续利用及天然产物挖掘开发提供了理论基础。

4 讨论

本研究表明,不同地区蛹虫草内生及生境土壤真菌存在显著差异,蛹虫草内生及生境土壤真菌在不同生境下形成共生,使菌群具有多样性。其中铁岭地区蛹虫草的优势菌属为镰刀菌属(*Fusarium* sp.),镰刀菌属在土壤及植物体内分布广泛,对植物生长、抗逆及化合物产生等方面起到重要作用^[22];昆明地区蛹虫草与木霉属(*Trichoderma* sp.)的共生关系更为紧密,木霉属在土壤内具有强大抗病原菌能力,能显著改变根际土壤化学成分,调节土壤 pH 值及土壤微生物群落^[23]帮助蛹虫草适应温暖湿润、多病害的生境;而楚雄地区独有的鳞翅虫草属(*Samsoniella* sp.)^[24]可通过调节昆虫种群和分解有机物质维持生态平衡,使得楚雄地区的蛹虫草更好生长。综上所述,不同地区蛹虫草的内生及土壤真菌差异,反映其如何与植物在不同生境中进行适应性共生,为理解蛹虫草微生物群落的生态功能提供新的视角;通过对比 4 个地区的微生物群落,展示不同环境条件下微生物群落的多样性如何影响蛹虫草的生长和抗逆能力,为后期蛹虫草品种改良和微生物资源的开发提供重要依据。

另外,抑菌结果表明,对常见病原菌及植物病原菌具有抑菌活性的内生及土壤真菌主要分布于铁岭和昆明地区,不同地区的蛹虫草内生及土壤真菌抑菌活性存在差异。如陈利等^[25]从土壤中筛选出一株抗菌活性较好的类芽孢杆菌 *Paenibacillus elgii* CL-1,并

通过质谱分析发现为抗菌物质 pelgipeptin B;本研究从蛹虫草内生真菌中分离到 *F. babinda*(FDC1-6),该菌株对多株常见病原菌及植物病原真菌均具有不同程度的抑菌活性,从中发现新颖抗菌活性成分的几率较大,并将其优先列为活性代谢产物挖掘的研究对象,此外青霉属菌株不仅在数量上较为丰富,且表现出优异的抗菌活性,特别是对耐甲氧西林金黄色葡萄球菌(MRSA)和植物病原真菌均显示出显著的抑制效果。

本研究通过纯培养分离手段将 4 个地区蛹虫草内生及土壤真菌作为研究对象,并获得大量真菌资源,结果表明,不同地区内生及土壤真菌存在差异,可能是不同地区温度、湿度和土壤条件(pH 值、有机质等)不同,导致微生物群落存在差异,这种差异使不同地区蛹虫草内生及土壤真菌种类丰富,且具有不同的生态功能,为后期蛹虫草优秀品种筛选提供数据支持,为天然产物的开发和微生物资源的利用提供新的视角,并为未来的药物开发、生物资源利用提供新的研究路径。

参考文献:

- [1] GOUDA S, DAS G, SEN S K, et al. Endophytes: a treasure house of bioactive compounds of medicinal importance[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2016, 7: 1538.
- [2] SANA T, SIDDIQUI B, KHAN M, et al. Bioactive natural products from endophytic fungus *Aspergillus nidulans* associated with *Nyctanthes arbor-tristis* linn[J]. *Records of Natural Products*, 2021, 15(6): 608-612.
- [3] STROBEL G, DAISY B. Bioprospecting for microbial endophytes and their natural products[J]. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 2003, 67(4): 491-502.
- [4] PIMENTEL M R, MOLINA G, DIONÍSIO A P, et al. The use of endophytes to obtain bioactive compounds and their application in biotransformation process[J]. *Biotechnology Research International*, 2011, 2011(1): 576286.
- [5] LIU G R, HUO R Y, ZHAI Y N, et al. New bioactive sesquiterpenoids from the plant endophytic fungus *Pestalotia theae*[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2021, 12: 641504.
- [6] 吴晓贤, 刘远超, 王傲, 等. 一株灰肉红菇内生真菌的分离鉴定及其抑菌活性研究[J]. *生物资源*, 2020, 42(5): 585-592.
- [7] 于帮红, 徐慧, 张传博. 一株冬虫夏草来源真菌的鉴定

- 及抑菌活性检测[J]. 中国实验方剂学杂志,2016,22(8):36-40.
- [8] 许小蓉,黄之镨,虞泓,等. 云南高明大哨天然虫生真菌及其内生真菌的分离鉴定与抑菌活性分析[J]. 微生物学通报,2022,49(10):4048-4065.
- [9] FEIGE K,RUBBERT J,RAUPACH A,et al. Cardioprotective properties of mannitol-involvement of mitochondrial potassium channels[J]. International Journal of Molecular Sciences,2021,22(5):2395.
- [10] ZHANG J X,WEN C T,DUAN Y Q,et al. Advance in *Cordyceps militaris*(linn) link polysaccharides:isolation, structure, and bioactivities: a review[J]. International Journal of Biological Macromolecules,2019,132:906-914.
- [11] JOUNG H J,KIM Y S,HWANG J W,et al. Anti-inflammatory effects of extract from *Haliotis discus* Hannai fermented with *Cordyceps militaris* mycelia in RAW264.7 macrophages through TRIF-dependent signaling pathway [J]. Fish & Shellfish Immunology,2014,38(1):184-189.
- [12] JĘDREJKO K J,LAZUR J,MUSZYŃSKA B. *Cordyceps militaris*: an overview of its chemical constituents in relation to biological activity[J]. Foods,2021,10(11):2634.
- [13] 秦建春,李晓明,张鞍灵,等. 蛹虫草发酵液抗菌活性初步研究[J]. 西北植物学报,2006,26(2):402-406.
- [14] ZHANG X M,TANG D X,LI Q Q,et al. Complex microbial communities inhabiting natural *Cordyceps militaris* and the habitat soil and their predicted functions[J]. Antonie Van Leeuwenhoek,2021,114(4):465-477.
- [15] XU X R,ZHANG X M,HUANG Z P,et al. Microbial community composition and soil metabolism in the coexisting *Cordyceps militaris* and *Ophiocordyceps highlandensis*[J]. Journal of Basic Microbiology,2022,62(10):1254-1273.
- [16] 宋静静,陆柳琳,黎俊杰,等. 杨叶肖槿内生真菌多样性和抑菌活性研究[J]. 西南农业学报,2024,37(2):326-336.
- [17] 黄东生. 菌种保存方法及其优缺点的探讨[J]. 民营科技,2016(7):273.
- [18] THOMPSON J D,GIBSON T J,PLEWNIAC F,et al. The CLUSTAL_X windows interface: flexible strategies for multiple sequence alignment aided by quality analysis tools[J]. Nucleic Acids Research,1997,25(24):4876-4882.
- [19] KUMAR S,STECHE G,LI M,et al. MEGA X:molecular evolutionary genetics analysis across computing platforms[J]. Molecular Biology and Evolution,2018,35(6):1547-1549.
- [20] 陆洁森,张家豪,明乾良,等. 西红花球茎腐烂病拮抗真菌的筛选、鉴定及抑菌机制[J]. 中草药,2022,53(10):3165-3170.
- [21] 廖旺姣,韦维,邹东霞,等. 广西香花油茶炭疽病原菌鉴定及生物学特性[J]. 西南农业学报,2022,35(6):1340-1347.
- [22] SONG Y L,WU P,LI Y F,et al. Effect of endophytic fungi on the host plant growth,expression of expansin gene and flavonoid content in *Tetrastigma hemsleyanum* Diels & Gilg ex Diels[J]. Plant and Soil,2017,417(1):393-402.
- [23] ZHANG F G,HUO Y Q,COBB A B,et al. *Trichoderma biofertilizer* links to altered soil chemistry,altered microbial communities,and improved grassland biomass[J]. Frontiers in Microbiology,2018,9:848.
- [24] 孙涛,李天昊,黄偶,等. 蝙蝠蛾鳞翅虫草 *Samsoniella hepiali* 模式菌株线粒体基因组系统发育分析[J]. 菌物学报,2022,41(10):1572-1584.
- [25] 陈利,黄升,苏国旗,等. 一株类芽孢杆菌的鉴定及抗菌活性探究[J]. 天然产物研究与开发,2024,36(9):1499-1511.

(收稿日期:2025-03-05)