

云南巍山地区广义虫草的物种多样性研究

赵志远^{1,2}, 王元兵^{1,2}, 王志勤^{1,2}, 汤德相^{1,2}, 耿宇鹏^{1*}, 虞泓^{1,2*}

(1. 云南大学生态与环境学院, 昆明 650091; 2. 云南大学-中国(云南)东南亚虫草生物资源可持续利用国际联合研究中心, 昆明 650091)

摘要: 为了解云南巍山地区的广义虫草资源状况, 通过资源调查, 利用形态观察结合多基因(*nrSSU*、*nrLSU*、*EF-1 α* 、*RPB1* 和 *RPB2*)系统发育分析, 对广义虫草的物种多样性进行了研究。结果表明, 巍山地区共采集虫草 341 株, 隶属于 2 科 5 属 20 种, 其中有 7 种为疑似新物种, 虫草寄主包含鳞翅目、鞘翅目、膜翅目和半翅目昆虫。巍山地区虫草优势属为虫草属 (*Cordyceps*, 7 种 215 株), 优势种为蛹虫草 (*C. militaris*, 93 株)。巍山地区北部红河源样地的虫草物种多样性和丰富度最高, 小鸡足山样地最低。物种累计曲线表明巍山地区绝大多数虫草种类已被采集研究。这为云南虫草资源保护与可持续利用提供依据。

关键词: 巍山; 广义虫草; 物种多样性; 资源调查

doi: 10.11926/jtsb.4194

Species Diversity of *Cordyceps* Sensu Lato in Weishan, Yunnan

ZHAO Zhi-yuan^{1,2}, WANG Yuan-bing^{1,2}, WANG Zhi-qin^{1,2}, TANG De-xiang^{1,2}, GENG Yu-peng^{1*}, YU Hong^{1,2*}

(1. School of Ecology and Environmental Science, Yunnan University, Kunming 650091, China; 2. International Joint Research Center for Sustainable Utilization of *Cordyceps* Bioresources in China and Southeast Asia, Yunnan University, Kunming 650091, China)

Abstract: In order to reveal the status of *Cordyceps* sensu lato resource in Weishan County, Yunnan Province, the species diversity of *Cordyceps* sensu lato was studied based on field survey, morphological observation and multigene (*nrSSU*, *nrLSU*, *EF1- α* , *RPB1* and *RPB2*) phylogenetic analysis. The results showed that there were 341 strains of *Cordyceps* sensu lato collected from 5 plots, belonging to two families and five genera, including seven suspected new species. The hosts of *Cordyceps* sensu lato were Lepidoptera, Coleoptera, Hymenoptera and Dermoptera, respectively. The dominant genus was *Cordyceps* collected 7 species 215 strains, and *C. militaris* was dominant species collected 93 strains. The species diversity and richness of *Cordyceps* sensu lato were the highest in plot of Red River Source and the lowest in plot of Xiao Jizu Shan. Based on the accumulative curve, it was indicated that most of *Cordyceps* sensu lato had been collected in Weishan area. So, these would provide the basis for protection and sustainable utilization of *Cordyceps* sensu lato in Yunnan Province.

Key words: Weishan; *Cordyceps* sensu lato; Species diversity; Resource investigation

广义虫草(*Cordyceps* sensu lato), 是肉座菌目(Hypocreales)真菌寄生在无脊椎动物、少数真菌和黏菌等的总称。虫草是重要的药用和生物防治资源, 对保健产品开发和农林有害昆虫调节有重要作

用。冬虫夏草(*Ophiocordyceps sinensis*)、蛹虫草(*Cordyceps militaris*)和蝉花虫草(*C. cicadae*)等含有多种生物活性成分, 如虫草酸、多糖、腺苷等, 对抗氧化、抗肿瘤、润肺、提高免疫力和降血糖血脂

收稿日期: 2020-01-14 接受日期: 2020-03-30

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31870017); 云南省科技厅项目[2018FY001(-006)]资助

This work was supported by the General Projects of National Natural Science Foundation of China (Grant No. 31870017), and the Projects of Yunnan Science and Technology Department [Grant No. 2018FY001(-006)].

作者简介: 赵志远(1996~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为广义虫草与寄主协同进化。E-mail: zhiyuan@mail.ynu.edu.cn

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: ypgeng@ynu.edu.cn; hongyu@ynu.edu.cn

有明显功效,具有重要的药用价值^[1]。在生物防治研究中,球孢白僵菌(*Beauveria bassiana*)、布氏白僵菌(*B. brongniartii*)等白僵菌属物种对生态系统节肢动物种群调节和稳定有重要作用^[2]。自然界中虫草种类繁多,我国更是具有丰富和独特的虫草资源,据不完全统计,全球已报道的虫草种类约有 100 属 800 余种,其中我国约有 40 多属 400 余种^[3]。作为世界上 12 个生物多样性丰富的国家之一,虫草资源的调查对丰富我国真菌多样性具有重要意义^[4]。前期,宋斌等^[5]对滇黔桂虫草资源多样性进行了初步调查,发现 52 种虫草,表明中国是虫草的一个分布中心。唐保宏等^[6]整理报道了河南省的 10 种虫草资源,并提出开发和保护建议。彭凡等^[7]报道安徽万佛山地区 6 种虫草资源,其中 1 种为中国新记录。虫草的分布与地理位置、气候和植被类型等环境因素有很大关系,因此对不同地区虫草进行物种多样性研究,可以更好地了解不同生态系统中虫草物种分布格局。目前,有关虫草的开发应用正在深入展开,对虫草资源进行广布性调查,明确各地区虫草物种名录,可以为保护与合理开发利用虫草资源提供基础信息,为有害昆虫生物防治提供理论依据。

大理白族自治州位于云南省中西部,平均海拔 2 090 m,主要以山地为主,地势西北高、东南低。全年温差较小,四季如春,年均降雨量约 1 053 mm,四季干湿分明^[8]。巍山彝族回族自治县位于大理白族自治州的西南部,地处哀牢山和无量山的北部,是澜沧江和红河两大水系的分水岭,并且具有纵贯巍山坝子的西河为国际河流——红河的源头。巍山地区属亚热带季风气候类型,年均温为 15.7℃,降雨量约 812.6 mm^[9-10]。因其独特的地形地貌、全年温和的气候条件以及茂密的天然森林植被,为该地区真菌资源的形成提供了良好的地理优势和生态环境,因此巍山地区势必拥有丰富的虫草物种多样性。

本研究于 2019 年 7-9 月分别在巍山地区东、西、南、北和中部设置样地进行虫草的资源调查,通过形态观察及多基因系统发育分析鉴定物种,采用 α 多样性和物种相对频率分析探讨该地区虫草物种多样性,基于物种累计曲线预测巍山地区虫草丰富度,以期了解该地区虫草物种多样性和分布特点,为虫草资源的保护和可持续利用提供参考依据。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

巍山彝族回族自治县位于云南省西部,地处 99°55'~100°25' E, 24°56'~25°32' N。全县面积 2 183.01 km²,山地面积占全县的 94%,具有丰富的森林植被资源。巍山地区森林多为天然林,以针叶林和针阔混交林为主,多为云南松(*Pinus yunnanensis*)和栎树(*Quercus linn*)、冬瓜树(*Alnus cremastogyne*)、核桃(*Juglans regia*)、高山榕(*Ficus altissima*)和华山松(*Pinus armandii*)组成^[11]。

1.2 方法

标本采集 2019 年 7-9 月分别在巍山地区东、西、南、北和中部的巍宝山、紫金山、小鸡足山、红河源和卫东林场采集虫草标本。虫草通常生长在林中灌木丛下、枯枝落叶层或树叶背面等环境湿度较高的地方,采用沿路踏查、普查等方式,在适宜虫草生长的小生境下采集。采集的标本用脱脂棉包好,放入灭菌的收集管和密封袋保鲜,于 4℃ 冰箱内保存。

菌株分离 参见梁宗琦等^[12]和王元兵等^[13]的方法,采取子囊孢子分离法、组织分离法和表面消毒法进行菌种分离。所有虫草标本均保存在云百草标本馆(YHH),纯化分离菌株均保存于云南真菌培养物保存中心(YFCC)。

物种培养和鉴定 使用 PDA 培养基在 25℃ 下培养虫草,采取形态观察和多基因(*nrSSU*、*nrLSU*、*EF-1 α* 、*RPB1* 和 *RPB2*)系统发育分析的方法^[14-15],鉴定采集物种。形态观察包括寄主的种类、有性型和无性型等特征。采用 CTAB 法提取成熟菌丝的总 DNA 对 5 个基因片段进行 PCR 扩增后,用 1% 琼脂糖胶进行电泳检测,将条带明亮且无杂带的样品送至铂尚生物技术(上海)有限公司进行测序。根据已有研究^[16-20],在 GenBank 数据库中检索并下载虫草的 5 个基因序列,对单个基因数据矩阵序列进行比对, N 表示缺失的片段,最后将 5 个基因数据矩阵序列进行拼接整合,以 *Trichoderma deliquescens* 和 *T. deliquescens* 作为外类群,用 RAxML 软件进行多基因系统发育分析,构建系统发育树(最大似然树),确定各物种的分类地位,最后选取每种物种的代表性菌株显示在系统发育树上。

物种多样性分析 基于 α 多样性分析研究样地内虫草真菌数量特征,物种丰富度指数、多样性

指数、均匀度指数和优势度指数, 用 RStudio 的 Vegan 软件包进行统计分析^[21-23]。相对频率(relative frequency, RF)指巍山地区采集的某种虫草物种数占该地区虫草总数的百分比。相似性系数(similarity coefficient, Cs)采用 Sorenson 公式计算: $Cs = 2j / (a + b)$, 式中, j 指两样地间共有的虫草物种数, a 指一个样地的虫草物种数, b 指另一样地的虫草物种数目^[24]。利用 EstimateS 软件计算和分析 ACE 指数和 Bootstrap 指数, 以获得物种期望丰富度(S)。通过 Excel 绘制巍山地区虫草的物种累计曲线(species accumulation curve)。

表 1 巍山地区调查样地信息
Table 1 Investigate plots in Weishan County

样地 Plot	经度 Longitude (E)	纬度 Longitude (N)	相对湿度 /% Relative humidity	植被类型 Vegetation type
巍宝山 Weibao Shan	100°21'28.872"	25°10'44.328"	72	常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forest
紫金山 Zijin Shan	100°3'38.628"	25°27'55.116"	65	高山丛林 Mountain forest
小鸡足山 Xiao Jizu Shan	100°12'17.2476"	25°9'3.1788"	62	落叶阔叶林 Deciduous broad-leaved forest
红河源 Red River Source	100°16'31.6128"	25°28'33.546"	77	针阔叶混交林 Mixed coniferous broad-leaved forest
卫东林场 Weidong Forestry Station	100°13'52.1724"	25°17'7.1268"	66	针叶林 Coniferous forest

2.2 虫草分布特征

巍山地区采集到 341 株虫草, 分别鉴定为 13 种已知种和 7 种疑似新物种, 其中巍宝山 9 种(73 株), 占该地区总数的 21.4%; 紫金山 8 种(53 株), 占 15.5%; 小鸡足山 9 种(25 株), 占 7.3%; 红河源 13 种(125 株), 占 36.7%; 卫东林场 8 种(61 株), 占 17.9%。只有细脚虫草(*C. tenuipes*)和球孢白僵菌在 5 个样地均有分布。基于物种丰富度指数、Berger-Parker 优势度、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数分析巍山地区东、西、南、北和中部 5 个样地的虫草物种多样性表明, 该地区虫草物种多样性较高, 优势种属现象较为明显, 优势属为虫草属(优势度为 0.63, 共采集 215 株), 优势种为蛹虫草(生态优势度为 0.27, 共采集了 93 株), 虫草寄主涉及鳞翅目、鞘翅目、膜翅目和半翅目昆虫, 主要是鳞翅目。对各样地虫草物种多样性的分析表明, 北部的红河源样地虫草物种多样性较高(Shannon-wiener 指数为 1.76, 物种丰富度为 13 种), 多样性最低的是南部的小鸡足山(Shannon-wiener 指数为 1.60, 物种丰富度为 9 种)。

用物种相似性系数(Cs)来比较巍山地区不同样地间的虫草物种组成的相似度。从表 3 可见, 巍山

2 结果和分析

2.1 虫草物种鉴定

本次调查共采集虫草 341 株, 初步鉴定巍山地区有 20 种虫草, 隶属于 2 科 5 属, 分别是虫草科(Cordycipitaceae)的虫草属(*Cordyceps*)、白僵菌属、*Samsoniella* 和线虫草科(Ophiocordycipitaceae)的线虫草属(*Ophiocordyceps*)和多头霉属(*Polycephalomyces*)。其中有 7 种为疑似新物种, 隶属于 2 科 4 属, 其中, 2 种虫草属、2 种 *Samsoniella*、1 种多头霉属和 2 种线虫草属(表 1, 图 1)。

地区 5 个样地中, 红河源样地与其他样地的相似度最高, 为 0.38~0.64; 巍宝山样地与红河源样地的物种相似度最高, Cs 达 0.64; 小鸡足山与紫金山样地、巍宝山与卫东林场样地的虫草物种组成最为接近, Cs 为 0.58; 而小鸡足山与卫东林场样地的 Cs 最低, 为 0.24。

2.3 虫草物种累计曲线

物种累计曲线是描述随抽样数量增多而增加物种数量的模型, 是调查研究样地物种组成和预测物种丰度的理想工具^[25]。本研究基于巍山东、西、南、北和中部 5 个研究样地虫草的物种分布数据, 利用 EstimateS 软件计算和分析了巍山地区虫草多样性, 绘制了巍山虫草物种累计曲线。

根据物种累计曲线图和 EstimateS 软件计算, ACE 值和 Bootstrap 值分别为 21.16 和 22.72, 表明该地区虫草丰富度约为 21~23 种, 估计本次研究已经调查了巍山地区 86.96%~95.24% 的虫草。

3 结论和讨论

本研究结果表明, 巍山地区拥有丰富且独特的

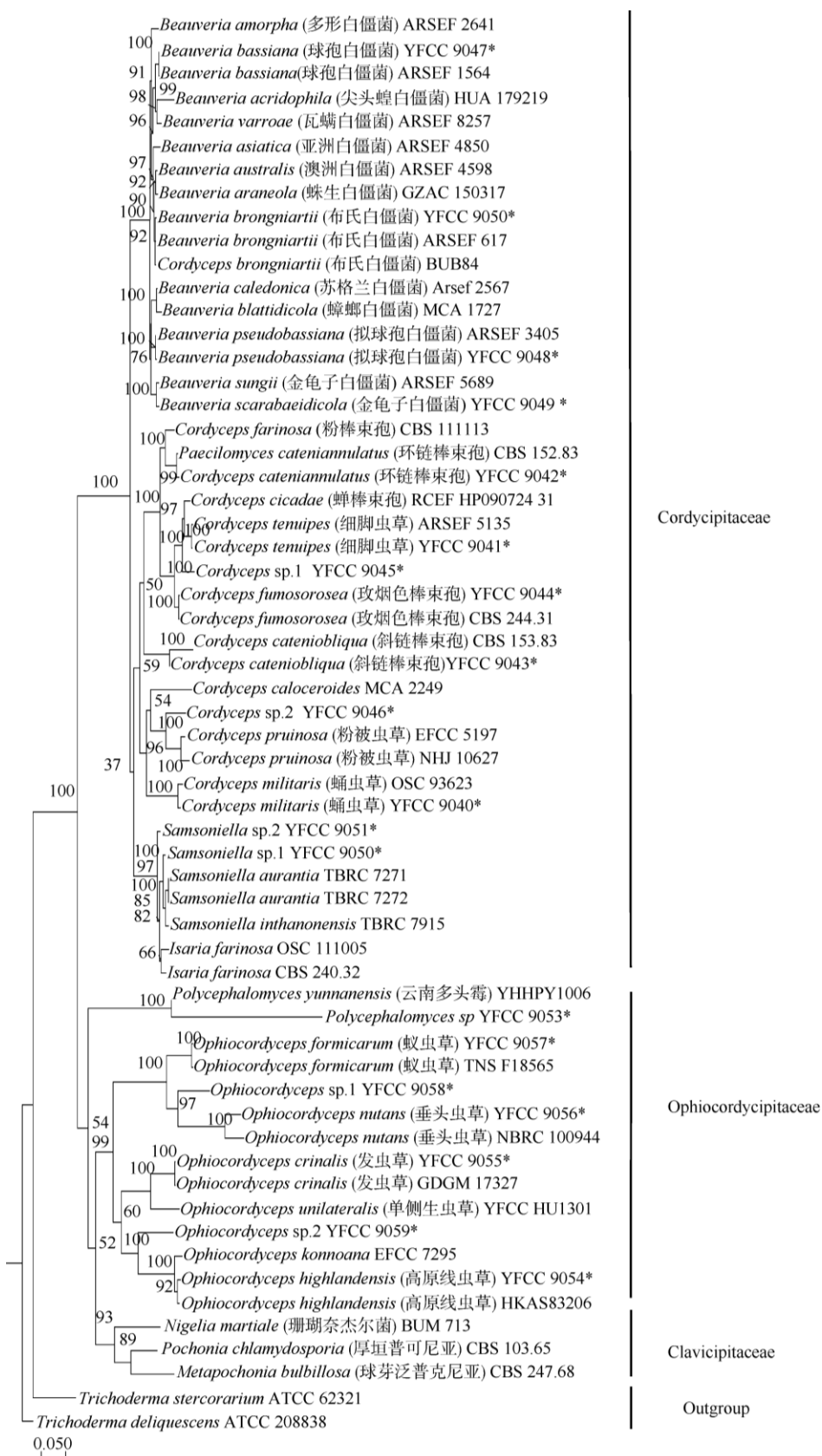


图 1 基于 5 个基因(*nrSSU*、*nrLSU*、*EF-1 α* 、*RPB1* 和 *RPB2*)构建的巍山地区虫草系统发育树。*: 采自巍山地区。

Fig. 1 Phylogenetic tree of *Cordyceps* sensu lato from the Weishan country constructed by the analysis of five-locus (*nrSSU*, *nrLSU*, *EF-1 α* , *RPB1* and *RPB2*) dataset. *: Collected from Weishan area.

表 2 虫草标本统计

Table 2 Statistics of *Cordyceps* sensu lato specimens

科 Family	属 Genus	种 Species	寄主 Host	数量 Number
虫草科 Cordycipitaceae	虫草属 <i>Cordyceps</i>	蛹虫草 <i>C. militaris</i>	鳞翅目蛹 Pupae of Lepidoptera	93
		细脚虫草 <i>C. tenuipes</i>	鳞翅目幼虫或蛹 Larvae or pupae of Lepidoptera	59
		环链棒束孢 <i>C. cateniannulata</i>	鞘翅目成虫 Adult of Coleoptera	9
		斜链棒束孢 <i>C. cateniobliqua</i>	鳞翅目和膜翅目昆虫 Lepidoptera and Hymenoptera	48
		玫烟色棒束孢 <i>C. fumosorosea</i>	鳞翅目幼虫 Larvae of Lepidoptera	3
		<i>Cordyceps</i> sp. 1	鳞翅目蛹 Pupae of Lepidoptera	2
		<i>Cordyceps</i> sp. 2	鳞翅目幼虫 Larva of Lepidoptera	1
	白僵菌属 <i>Beauveria</i>	球孢白僵菌 <i>B. bassiana</i>	鞘翅目成虫或幼虫 Adult or larvae of Coleoptera	40
		拟球孢白僵菌 <i>B. pseudobassiana</i>	鞘翅目成虫或幼虫 Adult or larvae of Coleoptera	9
		金龟子白僵菌 <i>B. sungii</i>	鳞翅目幼虫 Larvae of Lepidoptera	5
		布氏白僵菌 <i>B. brongniartii</i>	鞘翅目昆虫 Coleoptera	3
	<i>Samsoniella</i>	<i>Samsoniella</i> sp. 1	鳞翅目幼虫或蛹 Larvae or pupae of Lepidoptera	2
		<i>Samsoniella</i> sp. 2	鳞翅目幼虫或蛹 Larvae or pupae of Lepidoptera	3
		<i>Polycephalomyces</i> sp. 1	鳞翅目幼虫 Larvae of Lepidoptera	2
线虫草科 Ophiocordy- cipitaceae	多头霉属 <i>Polycephalomyces</i>			
	线虫草属 <i>Ophiocordyceps</i>	高原线虫草 <i>O. highlandensis</i>	鳃金龟幼虫 Larvae of gill beetle	2
		发虫草 <i>O. crinalis</i>	鳞翅目昆虫 Lepidoptera	6
		垂头虫草 <i>O. nutans</i>	蝽象成虫 Adult of Pentatomoidea	1
		蚁虫草 <i>O. formicarum</i>	蚂蚁成虫 Adult of Formicidae	13
		<i>Ophiocordyceps</i> sp. 1	沫蝉成虫 Adult of Cercopidae	12
		<i>Ophiocordyceps</i> sp. 2	鞘翅目幼虫 Larvae of Coleoptera	28

表 3 巍山地区的虫草物种多样性指数

Table 3 Diversity indexes of *Cordyceps* sensu lato in Weishan County

样地 Spot	数量 Number	物种丰富度 Species richness	Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index	Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index
巍宝山 Weibao Shan	73	9	1.68	0.76
紫金山 Zijin Shan	53	8	1.76	0.85
小鸡足山 Xiao Jizu Shan	25	9	1.60	0.72
红河源 Red River Source	125	13	1.78	0.70
卫东林场 Weidong Forestry Station	61	8	1.72	0.83

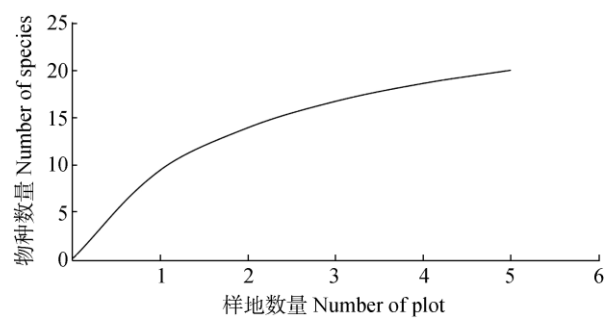


图 2 巍山地区的虫草物种累计曲线

Fig. 2 Species accumulation curve of *Cordyceps* sensu lato in Weishan County

虫草资源，其虫草物种多样性较高，物种丰富度较大。本次调查的采样范围涉及巍山地区的东、南、

西、北和中部 5 个样地，包括未被人类活动干扰的样地以及已被开发的自然保护区样地，以期更详细探明巍山地区虫草的数量及种类。本次调查共采集虫草 341 株，鉴定出 20 种虫草，其中有 7 种疑似新物种，分别隶属于虫草科的虫草属、*Samsoniella* 以及线虫草科的多头霉属和线虫草属。

本次研究表明，巍山地区北部红河源样地具有较高的虫草物种多样性，南部的小鸡足山的虫草物种多样性较低，推测可能与巍山地势北高南低且海拔悬殊较大，中部被山脉阻隔划分为不同水系导致南北部森林植被不同有关。此外，物种多样性最高的红河源样地森林植被覆盖良好且物种丰富，山间流淌溪流，空气湿度大且昆虫种类丰富，因而造就了该地区独特和丰富的虫草多样性。小鸡足山山间

表 4 巍山样地间的虫草物种相似性系数

Table 4 Similarity coefficient (Cs) of *Cordyceps* sensu lato among plots in Weishan County

样地 Spot	小鸡足山 Xiao Jizu Shan	紫金山 Zijin Shan	红河源 Red River Source	卫东林场 Weidong Forestry Station
巍宝山 Weibao Shan	0.44	0.47	0.64	0.58
小鸡足山 Xiao Jizu Shan		0.58	0.45	0.24
紫金山 Zijin Shan			0.48	0.63
红河源 Red River Source				0.38

种植许多的经济作物且山顶有祭祀等活动，人类干扰较大，空气湿度相对较低，昆虫种类及丰度不大，因而该地区的虫草物种多样性相对较低。因此虫草更适宜生活在人为干扰较低、气候条件优越、且生物多样性较高的自然生态系统内^[26]。

巍山地区虫草资源优势种属现象明显，优势属为虫草属，优势种为蛹虫草，占菌株总数的 27%。蛹虫草为世界广布种，分布于热带、亚热带和温带地区，具有较宽的生态位，对森林生态系统的昆虫群落数量的稳定具有重要作用。此外，蛹虫草药食同源，具有卓越的医药用途和保健价值，含有多种活性成分，其在免疫调节、抑菌、抗肿瘤和抗病毒上具有重要的药理作用，广泛应用于医药、食品和保健品中。前期研究表明，蛹虫草发生与生态环境因子的综合作用有密切关系，主要影响因子包括温湿度、植被类型、寄主昆虫以及土壤质地等^[27]，不同生境下蛹虫草变异式样差异较大，主要包括子座大小与子囊大小以及着生方式上的区别^[28–29]。本次调查不同生境样地中，红河源样地的蛹虫草丰富度最高，但形态比其他样地较小，子座相对较短，可能是该样地虫草物种多样性较高，寄主鳞翅目蛹昆虫在较小时便被感染，其营养物质不足以长出粗长的子座，导致该地区蛹虫草形态较小，但丰富度很高。

巍山地区北部红河源样地与东部巍宝山样地的虫草物种相似度最高，相似系数为 0.64，表明两样地的虫草物种最为相似；南部小鸡足山与中部卫东林场样地物种相似系数为 0.24，表明两地的物种相似度最低。可能地理隔离的因素更能决定虫草的分布和物种组成的相似性，可以为日后对野外虫草调查提供参考。

巍山地区的虫草资源调查丰富了大理州乃至云南省的虫草物种资源库，同时为云南省及国内其他地区的虫草资源调查奠定了一定基础^[30]。本次调查基本弄清该地区的虫草物种种类，对当地的虫草资源保护和可持续利用提供了理论依据。由于本

次调查研究的取样范围以及采集到的虫草标本有限，调查到的虫草资源物种主要涉及虫草科和线虫草科物种，对于未调查到的麦角菌科物种在日后对于滇中西部地区的真菌资源调查研究中尚需加强关注。

参考文献

[1] JIANG X, WANG C Y, LI L Z, et al. Activity comparison study on *Paecilomyces hepiali*, *Cordyceps militaris* and wild *Cordyceps sinensis* [J]. J Changchun Univ Trad Chin Med, 2017, 33(4): 544–547. doi: 10.13463/j.cnki.cczyy.2017.04.010.
姜雪, 王春月, 李兰洲, 等. 蝙蝠蛾拟青霉及蛹虫草与野生冬虫夏草活性比较 [J]. 长春中医药大学学报, 2017, 33(4): 544–547. doi: 10.13463/j.cnki.cczyy.2017.04.010.

[2] LI Z Z. History, progress and current status of the application of fungi against pest insects in China [J]. Chin J Biol Control, 2015, 31(5): 699–711. doi: 10.16409/j.cnki.2095-039x.2015.05.010.
李增智. 我国利用真菌防治害虫的历史、进展及现状 [J]. 中国生物防治学报, 2015, 31(5): 699–711. doi: 10.16409/j.cnki.2095-039x.2015.05.010.

[3] LIU Y J, ZHOU H B, DONG X R, et al. Species diversity and distribution characteristics of entomogenous fungi in Zipeng Mountain National Forest Park [J]. Chin J Biol Control, 2018, 34(4): 568–573. doi: 10.16409/j.cnki.2095-039x.2018.04.011.
刘玉军, 周海波, 董先茹, 等. 紫蓬山国家森林公园虫生真菌物种多样性与分布特点 [J]. 中国生物防治学报, 2018, 34(4): 568–573. doi: 10.16409/j.cnki.2095-039x.2018.04.011.

[4] WANG S B, HUANG Y P, FAN M Z, et al. Species diversity of entomogenous fungal flora of Mountains Dabie, Anhui [J]. Biodiv Sci, 2003, 11(6): 475–479. doi: 10.17520/biods.2003056.
王四宝, 黄勇平, 樊美珍, 等. 安徽大别山区虫生真菌区系的物种多样性研究 [J]. 生物多样性, 2003, 11(6): 475–479. doi: 10.17520/biods.2003056.

[5] SONG B, LI T H, WU X L, et al. Preliminary study of *Cordyceps* diversity in Yunnan, Guizhou and Guangxi Provinces, China [J]. Gui-

- zhou Sci, 2004, 22(4): 41–44.
- 宋斌, 李泰辉, 吴兴亮, 等. 滇黔桂虫草资源多样性初步研究 [J]. 贵州科学, 2004, 22(4): 41–44.
- [6] TANG B H, MIAO W L, ZHANG Y Z. Study on *Cordyceps* resources in Henan Province [J]. J Anhui Agri Sci, 2008, 36(28): 12311–12312, 12323. doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2008.28.099.
- 唐保宏, 苗文莉, 张一折. 河南省虫草资源调查研究 [J]. 安徽农业科学, 2008, 36(28): 12311–12312, 12323. doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2008.28.099.
- [7] PENG F, CAO S, ZHANG Q, et al. Investigation on resources of *Cordyceps* sensu lato in Wanfoshan Reserve [J]. J Anhui Agri Sci, 2011, 38(3): 400–403. doi: 10.13610/j.cnki.1672-352x.2011.03.019.
- 彭凡, 曹珊, 张琪, 等. 安徽省万佛山地区虫草资源的初步调查 [J]. 安徽农业大学学报, 2011, 38(3): 400–403. doi: 10.13610/j.cnki.1672-352x.2011.03.019.
- [8] CHEN F J, XUE D J. Climate suitability zoning of walnut planting in Dali Bai Nationality Autonomous Prefecture [J]. J China W Norm Univ (Nat Sci), 2019, 40(4): 407–412. doi: 10.16246/j.issn.1673-5072.2019.04.014.
- 陈凤娇, 薛东剑. 大理白族自治州核桃种植气候适宜性区划 [J]. 西华师范大学学报(自然科学版), 2019, 40(4): 407–412. doi: 10.16246/j.issn.1673-5072.2019.04.014.
- [9] ZHANG Y Z. Macrofungi resources in Weishan County [J]. Ed Fungi China, 1991, 10(1): 28–29. doi: 10.13629/j.cnki.53-1054.1991.01.012.
- 张一中. 巍山县大型真菌资源 [J]. 中国食用菌, 1991, 10(1): 28–29. doi: 10.13629/j.cnki.53-1054.1991.01.012.
- [10] MA H L, XIONG J F, MA H, et al. Grassland resources and ecological status of Weishan County [J]. China Anim Ind, 2012(24): 64–65. doi: 10.3969/j.issn.2095-2473.2012.24.030.
- 马海轮, 熊景发, 马红, 等. 巍山县草原资源与生态状况 [J]. 中国畜牧业, 2012(24): 64–65. doi: 10.3969/j.issn.2095-2473.2012.24.030.
- [11] WU Y H. Present status and management countermeasures of forest resources consumption in Weishan County [J]. For Invent Plann, 2017, 42(6): 48–51. doi: 10.3969/j.issn.1671-3168.2017.06.010.
- 吴永会. 巍山县森林资源消耗现状调查与管理对策 [J]. 林业调查规划, 2017, 42(6): 48–51. doi: 10.3969/j.issn.1671-3168.2017.06.010.
- [12] LIANG Z Q, LIU A Y, HUANG J Z, et al. Some *Cordyceps* species and their allies from Suoluo Nature Preserve in Guizhou [J]. Mycosystema, 2002, 21(1): 9–14. doi: 10.3969/j.issn.1672-6472.2002.01.004.
- 梁宗琦, 刘爱英, 黄建忠, 等. 桫欏自然保护区的虫草及其相关真菌 [J]. 菌物系统, 2002, 21(1): 9–14. doi: 10.3969/j.issn.1672-6472.2002.01.004.
- [13] WANG Y B. Studies on phylogeny of *Polycephalomycetaceae* fam. nov., with microbial diversities of *Polycephalomycetes multiramosus* and its host [D]. Kunming: Yunnan University, 2016: 1–182.
- 王元兵. 多头霉新科系统发育研究——兼论多枝多头霉及其寄主微生物多样性 [D]. 昆明: 云南大学, 2016: 1–182.
- [14] CHEN Z H, DAI Y D, YU H, et al. Systematic analyses of *Ophiocordyceps lanpingensis* sp. nov., a new species of *Ophiocordyceps* in China [J]. Microbiol Res, 2013, 168(8): 525–532. doi: 10.1016/j.micres.2013.02.010.
- [15] SUNG G H, HYWEL-JONES N L, SUNG J M, et al. Phylogenetic classification of *Cordyceps* and the clavicipitaceous fungi [J]. Stud Mycol, 2007, 57: 5–59. doi: 10.3114/sim.2007.57.01.
- [16] KEPLER R M, LUANGSA-ARD J J, HYWEL-JONES N L, et al. A phylogenetically-based nomenclature for Cordycipitaceae (Hypocreales) [J]. IMA Fungus, 2017, 8(2): 335–353. doi: 10.5598/imafungus.2017.08.02.08.
- [17] DAI Y D, YU H, YANG K. Identifying a sporocarp-inhabiting fungus *Isaria farinosa* and analyzing its molecular phylogeny of ITS sequence [J]. Ed Fungi China, 2013, 32(5): 46–52. doi: 10.13629/j.cnki.53-1054.2013.05.004.
- 代永东, 虞泓, 杨坤. 1株重寄生真菌粉棒束孢鉴定及系统发育分析 [J]. 中国食用菌, 2013, 32(5): 46–52. doi: 10.13629/j.cnki.53-1054.2013.05.004.
- [18] CHEN Z H, WANG Y B, DAI Y D, et al. Species diversity and seasonal fluctuation of entomogenous fungi of Ascomycota in Taibao-shan Forest Park in western Yunnan [J]. Biodiv Sci, 2019, 27(9): 993–1001. doi: 10.17520/biods.2019135.
- 陈自宏, 王元兵, 代永东, 等. 滇西太保山森林公园子囊菌门虫生真菌物种多样性及其消长动态 [J]. 生物多样性, 2019, 27(9): 993–1001. doi: 10.17520/biods.2019135.
- [19] WANG Y B, NGUYEN T T, DAI Y D, et al. Molecular phylogeny and morphology of *Ophiocordyceps unituberculata* sp. nov. (Ophiocordycipitaceae), a pathogen of caterpillars (Noctuidae, Lepidoptera) from Yunnan, China [J]. Mycol Prog, 2018, 17(6): 745–753. doi: 10.1007/s11557-017-1370-5.
- [20] WANG Y B, YU H, DAI Y D, et al. *Polycephalomycetes yunnanensis* (Hypocreales), a new species of *Polycephalomycetes* parasitizing *Ophiocordyceps nutans* and stink bugs (hemipteran adults) [J]. Phytotaxa, 2015, 208(1): 34–44. doi: 10.11646/phytotaxa.208.1.3.
- [21] KONG F Z, YU R C, XU Z J, et al. Application of excel in calculation of biodiversity indices [J]. Marine Sci, 2012, 36(4): 57–62.
- 孔凡洲, 于仁成, 徐子钧, 等. 应用 Excel 软件计算生物多样性指数 [J]. 海洋科学, 2012, 36(4): 57–62.
- [22] XU R J, HUANG C T, ZHOU X G, et al. Species diversity and

- dominate population dynamics of *Triadica rotundifolia* community in Qingxin and Yangshan Counties, Guangdong [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2013, 21(6): 496–504. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2013.06.002.
- 徐瑞晶, 黄川腾, 周雪刚, 等. 清新和阳山县圆叶乌柏群落物种多样性和优势种群动态探讨 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2013, 21(6): 496–504. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2013.06.002.
- [23] HE B, LI Q, LIU Y. Community characteristics and species diversity of *Pinus armandii* in Caohai National Nature Reserve [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2020, 28(1): 44–52. doi: 10.11926/jtsb.4063.
- 何斌, 李青, 刘勇. 草海国家级自然保护区华山松群落特征及物种多样性研究 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2020, 28(1): 44–52. doi: 10.11926/jtsb.4063.
- [24] ZANG W, LIU C Y, XIE G F, et al. Resources and species diversity of the phyllosphere yeasts from the Yandang Mountains in Zhejiang Province [J]. *Acta Ecol Sin*, 2018, 38(11): 3920–3930. doi: 10.5846/stxb201705040827.
- 臧威, 刘春月, 谢广发, 等. 浙江雁荡山脉叶栖酵母菌资源与物种多样性 [J]. *生态学报*, 2018, 38(11): 3920–3930. doi: 10.5846/stxb201705040827.
- [25] LI Q. Species accumulation curves and its application [J]. *Chin J Appl Entomol*, 2011, 48(6): 1882–1888.
- 李巧. 物种累积曲线及其应用 [J]. *应用昆虫学报*, 2011, 48(6): 1882–1888.
- [26] ZHANG Q D, WEI W, CHEN L D, et al. Spatial variation of soil moisture and species diversity patterns along a precipitation gradient in the grasslands of the Loess Plateau [J]. *J Nat Resour*, 2018, 33(8): 1351–1362. doi: 10.31497/zrzyxb.20170726.
- 张钦弟, 卫伟, 陈利顶, 等. 黄土高原草地土壤水分和物种多样性沿降水梯度的分布格局 [J]. *自然资源学报*, 2018, 33(8): 1351–1362. doi: 10.31497/zrzyxb.20170726.
- [27] ZUO J H, GONG X Y, DONG Y M, et al. Research achievements in bioactive components, pharmacological effects and applications of *Cordyceps militaris* [J]. *Food Sci*, 2018, 39(21): 330–339.
- 左锦辉, 贡晓燕, 董银卯, 等. 蛹虫草的活性成分和药理作用及其应用研究进展 [J]. *食品科学*, 2018, 39(21): 330–339.
- [28] CHAI J P, RI X R, XIE D Y. Distribution and ecological factors of *Cordyceps militaris* in Yunnan [J]. *Yunnan Agric Sci Technol*, 2002(4): 25. doi: 10.3969/j.issn.1000-0488.2002.04.008.
- 柴建萍, 日兴荣, 谢道燕. 云南蛹虫草分布及发生生态因素浅析 [J]. *云南农业科技*, 2002(4): 25. doi: 10.3969/j.issn.1000-0488.2002.04.008.
- [29] LIANG Z Q. *Flora Fungorum Sinicorum*, Vol. 32 *Cordyceps* [M]. Beijing: Science Press, 2007: 1–190.
- 梁宗琦. 中国真菌志, 第 32 卷 虫草属 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 1–190.
- [30] YANG Z L, YU H, CHEN Z H, et al. Study on the biological and ecological habits of populations of *Cordyceps militaris* in middle of Yunnan [J]. *Ed Fungi China*, 2011, 30(5): 43–47. doi: 10.3969/j.issn.1003-8310.2011.05.016.
- 杨钟林, 虞泓, 陈自宏, 等. 滇中蛹虫草居群生物学及其生态学习性研究 [J]. *中国食用菌*, 2011, 30(5): 43–47. doi: 10.3969/j.issn.1003-8310.2011.05.016.