•生物编目•

古田山国家级自然保护区木腐真菌物种多样性及分布

李 通^{1,2} 李俊凝^{1,2} 魏玉莲^{1*}

1 (中国科学院沈阳应用生态研究所, 中国科学院森林生态与管理重点实验室, 沈阳 110016)

2 (中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 木腐真菌是微生物的一个重要类群, 主要以倒木为生长基质, 通过产生各种水解酶将倒木的纤维素、木质素和半纤维素分解为小分子物质, 对促进森林生态系统中的营养物质循环发挥着重要的生态功能。于2016年8月在浙江古田山国家级自然保护区开展的木腐真菌野外调查, 利用形态学和DNA序列分析对采集的标本进行了物种鉴定, 并分析了木腐真菌的物种组成和地理成分。在采集的158份标本中鉴定木腐真菌45属92种, 其中白腐真菌78种, 褐腐真菌14种。古田山的木腐真菌物种区系组成中, 热带-亚热带成分比例最高。在158份木腐真菌标本中, 97份标本采自直径大于10 cm的倒木或树桩上, 分属于76个种, 是木腐真菌生长的主要基质大小类型; 48份标本采自直径为2–10 cm的枝干上, 分属38个种; 13份标本采自直径小于2 cm的枝干上, 分属12种。不同腐烂等级倒木上生长的真菌数量和种类差异明显, 其中一级腐烂倒木上采集到9份标本(7种), 二级腐烂倒木上采集到86份标本(45种), 三级腐烂倒木上49份标本(29种), 四级腐烂倒木上14份标本(14种)。结果表明, 林分中倒木直径大小和腐烂程度是影响木腐真菌生长与分布的重要因子。

关键词: 亚热带森林; 木腐真菌; 物种组成; 分布

Species diversity and distribution of wood-decaying fungi in Gutianshan National Nature Reserve

Tong Li^{1,2}, Juning Li^{1,2}, Yulian Wei^{1*}

1 Key Laboratory of Forest Ecology and Management, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract: Wood-decaying fungi decompose the cellulose, hemicellulose and lignin of wood by producing various hydrolytic enzymes, and therefore play a key ecological role in the nutrient cycle of forest ecosystems. In August 2016, a survey of wood-decaying fungi was carried out in Gutianshan National Nature Reserve, Zhejiang Province. Fungal species were identified using morphological characters and DNA sequence analysis. Both the species composition and biogeography were also analyzed. A total of 92 fungal species, 78 white rot species and 14 brown rot species, representing 45 genera were identified from the 158 samples collected. Among these fungi, tropically-contained families are better represented than cosmopolitan families. Of the 158 specimens, 97 (76 species) were collected from woody substrates with a diameter larger than 10 cm, 48 (38 species) from a dead branch with a diameter ranging from 2 cm to 10 cm, and 13 (12 species) from a dead twig with a diameter smaller than 2 cm. The abundance of fungal species differed conspicuously in different decaying classes of dead wood as well. Of 92 fungal species, seven species (nine specimens) were collected from woody substrate of decay class 1, 45 species (86 specimens) from wood of decay class 2, 29 species (49 specimens) from wood of decay class 3, and 14 species (14 specimens) from wood of decay class 4. This study indicates that the diameter and decay class of dead wood are important factors influencing the growth and species distribution of wood-decaying fungi.

收稿日期: 2018-06-03; 接受日期: 2018-11-30

基金项目: 国家自然科学基金(31870018)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: weiyulianer@sina.com

Key words: subtropical forest; wood-decaying fungi; species composition; distribution

木腐真菌是一类以各种立木、倒木、腐烂木为生长基质的真菌,通过分泌胞外酶,如氧化酶和水解酶类,降解木材中的纤维素、半纤维素和木质素,进而促进森林生态系统的物质循环,是森林生态系统的重要组成部分(Harley, 1971; Kubartova et al, 2012)。木腐真菌是森林生态系统中的初级分解者,形态上主要有多孔菌类、革菌类和齿菌类,另外伞菌类的一些种类也生长在倒木上并具有降解朽木的功能,如香菇、扇菇、裂褶菌等(李玉等, 2015)。关于该类真菌的系统分类学研究已开展了250余年,目前进展较为深入,全球已报道的种类约有5,000余种(Ryvarden & Gilbertson, 1993a, b; Núñez & Ryvarden, 2001),而中国目前已报道的木腐真菌约有2,000余种(戴玉成和庄剑云, 2010; Dai, 2011, 2012)。

根据对倒木降解机制的不同,木腐真菌主要可分为白腐真菌和褐腐真菌。白腐真菌能够降解木材的大部分成分,包括纤维素、半纤维素和木质素,在降解后期,木材呈线状或片状。褐腐真菌只降解木材中的纤维素和半纤维素,不能降解木质素,被降解后的木材呈破裂或颗粒状,在腐朽的最后阶段表现为褐色的易碎块状。褐色腐朽主要发生在针叶树上,其残留物主要是木质素,具有增加土壤的通风和保水能力,促进外生菌根的形成和非共生微生物的固氮作用,以及改善土壤温度,降低土壤的pH值和增加养分中阳离子的交换等作用(魏玉莲和戴玉成, 2004)。

木腐真菌的物种多样性受多方面因素的影响。从大尺度范围来看,造成不同地区物种多样性差异的原因主要集中在环境特征、林分组成和寄主种类等方面。Hattori (2005)运用Simpson和Shannon-Wiener多样性指数分析了日本温带森林不同植被类型中的多孔菌多样性,发现栲树(*Castanopsis*)林、青冈(*Cyclobalanopsis*)林、次生橡树(*Quercus*)林、次生松树(*Pinus*)林、日本雪松(*Cedrus*)林等不同林分类型中多孔菌物种组成存在明显差异。美国真菌学家Gilbert等(2008)对迈克罗尼西亚热带雨林中孔状真菌的研究表明,寄主和生境特异性明显影响着多孔菌的分布。

近年来,随着我国对木腐真菌系统分类学研究

的深入开展,对该类真菌的认识有了极大的提高。在此基础上,一些真菌学者开展了不同地区木腐真菌的物种组成、群落结构和分布特征等方面的研究。李通等(2017)通过对我国温带地区具有代表性的次生林中木腐真菌的群落组成和分布特征的对比,发现我国温带到暖温带的木腐真菌物种纬度地带分布相对较均匀。王小燕和魏玉莲(2015a)比较了我国从西北到东南不同森林类型中木腐真菌的群落组成和降解方式,发现白腐真菌物种所占比例由北到南呈上升趋势,褐腐真菌的比例总体呈下降趋势,主要原因是阔叶树在林分中的比例由北到南逐渐增加,针叶树逐渐降低,而褐腐真菌主要生长在针叶树上。另外,研究还发现在某一特定林分中,倒木的种类、直径和腐烂程度也是影响真菌种类组成的重要因素(魏玉莲, 2011; 王小燕和魏玉莲, 2015b; 魏玉莲和李通, 2017)。

我国亚热带森林生态系统是全球面积最广、自然资源最丰富的森林生态系统,北起自秦岭、淮河一线,约自34°–22° N,植物区系特别丰富,区系成分也非常复杂,是东亚的亚热带植物区系起源中心,拥有许多特有种、属和子遗植物。该地区处于湿润或半湿润亚热带森林生态系统地带,包括了亚热带常绿阔叶林、竹林和针叶林生态系统,其中常绿阔叶林是我国中亚热带的顶极生态系统,类型繁多,资源极为丰富,是由与亚热带湿润的地理环境密切相关的植物、动物、微生物与无机物所共同组成的一个地带性生态系统(吴征镒, 1980)。木腐真菌在森林生态系统中具有极为重要的生态功能,但关于我国亚热带地区木腐真菌群落组成和生态功能的研究还比较少。本文选取亚热带具有代表性的古田山自然保护区开展木腐真菌的物种多样性及分布研究,探究该地区木腐真菌的物种组成及其功能属性,并结合其生长基质的特征进行分析,初步揭示该类真菌在亚热带森林生态系统中的生态功能,为进一步深入研究亚热带地区木腐真菌的多样性形成机制奠定理论基础。

1 研究区域和研究方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于浙江省开化县境内的古田山国

家级自然保护区(29°10′–29°17′ N, 118°03′–118°11′ E), 属于中亚热带常绿阔叶林地带(吴征镒, 1980)。该区属典型中亚热带季风气候区, 四季分明, 年平均气温15.3℃, 生长期总积温5,221.5℃, 无霜期约250天, 年平均降水量1,964 mm, 相对湿度为92.4%。受夏季风影响较大, 一年中气候有明显的季节性变化。区内地形复杂, 构成了丰富多样的小气候生境。古田山自然保护区保存着完好的以甜槠(*Castanopsis eyrei*)和木荷(*Schima superba*)等为优势种的常绿阔叶林, 保护区总面积8,107 ha (祝燕等, 2008)。保护区天然植被保存相对完好, 成熟林的林龄在150年以上(于明坚等, 2001; Legendre et al, 2009)。常绿阔叶林是古田山的优势植被类型, 主要分布于海拔350–800 m的山坡和山麓; 在海拔720 m (山脊)和800 m (山谷)至海拔1,100 m左右, 分布着大片马尾松(*Pinus massoniana*)针阔叶混交林; 海拔1,100 m以上至山顶为黄山松(*Pinus taiwanensis*)林(于明坚等, 2001)。

1.2 研究方法

1.2.1 野外调查

2016年8月, 在古田山自然保护区开展了关于木腐真菌的野外考察, 调查时详细记录时间、地点、海拔、森林类型、寄主种类、倒木直径、腐烂程度等。用标本袋收集真菌子实体, 35℃低温烘干, 带回实验室鉴定。参考Renvall (1995)的分级特征并结合野外调查的实际情况, 将木腐真菌的生长基质按照不同腐烂程度分为4个阶段。(1)腐烂一级: 树木死后不久, 倒木基本保持原有形状, 树皮尚未开始腐烂; (2)腐烂二级: 倒木或枯立木的树皮和木材刚开始腐烂, 木材比较硬; (3)腐烂三级: 倒木或枯立木的树皮已经腐烂完全, 木材中度腐烂, 但还能保持倒木的原有形状, 木材稍硬; (4)腐烂四级: 倒木或枯立木的树皮已经完全腐烂, 不能保持倒木的原有形状, 木材很软。

1.2.2 标本鉴定

依托相差显微镜Nikon80i, 根据标本的子实体宏观形态特征、菌丝结构、担孢子和其他一些主要分类性状对标本进行鉴定。对宏观形态和微观结构依然不能确定的种类, 采用分子生物学手段: 使用Phire® Plant Direct PCR Kit (Finnzymes, Finland)试剂盒, 从标本中提取DNA, 通过PCR获取ITS (PCR扩增和测序引物: ITS2、ITS4和ITS5)、LSU-rDNA

(PCR和测序引物: LR0R、LR3R、LR3和LR7)等基因片段进行测序。同时从GenBank中获取相关的可信序列(已发表在重要的真菌学相关杂志), 运用Clustal_X 2.0软件对上述分子序列进行比对, 用jModel Test软件, 基于Corrected Akaike Information Criterion标准预测其最适合的进化分析模型和参数。根据得出的最适进化模型和参数, 运用MrBayes 3.2和PhyML 3.0软件, 分别采用最大简约法、贝叶斯法和最大似然法构建系统发育树, 最终结合形态特征确定该物种种类。

1.2.3 物种区系的组成分析

木腐真菌的很多种类具有地区特异性, 其分布受地域的影响较大, 但在属这一分类等级上, 多孔菌的地理成分更具共性, 许多属是世界广布属, 包括中国在内的世界很多地区均有分布; 而中国地跨北半球的寒温带、温带、暖温带、亚热带和热带, 北温带成分和热带–亚热带成分也占有很大比例(Ryvarden, 1991; 周丽伟和戴玉成, 2013; 员瑗等, 2015)。

1.2.4 生态习性的确定

木腐真菌的腐朽类型(白腐white rot; 褐腐brown rot)主要根据对木腐真菌标本的鉴定结果, 参考相关文献进行确定(Ryvarden et al, 1993a; b; Núñez & Ryvarden, 2001)。木腐真菌在中国的出现频率(常见种或稀有种)和生活习性(寄生或腐生)主要参考已发表文献(戴玉成, 2003; 边禄森和戴玉成, 2015)。

数据采用Excel表格进行整理、分析和制图。

2 结果

2.1 物种多样性与区系组成

野外采集标本共计158份, 已鉴定木腐真菌45属92种; 其中白腐真菌78种, 占有种类的84.8%; 褐腐真菌14种, 占15.2%。有31种属于稀有, 占有种类的33.7% (附录1)。

2.2 木腐真菌区系地理成分分析

真菌区系的地理成分一般是按照属或种的分布类型划分。由于目前对各属种的现代分布区尚未完全了解, 所以地理成分分析的准确性只能是相对的。

2.2.1 属的地理成分分析

根据附录1中古田山自然保护区分布的木腐真

菌种类名录, 将其所分布的45个属分布型分为以下3类:

(1)世界广布属。古田山地区木腐真菌的世界广布属有: 小薄孔菌属(*Antrodiella*)、管孔菌属(*Bjerkandera*)、蜡孔菌属(*Ceriporia*)、迷孔菌属(*Daedalea*)、软齿菌属(*Dentipellis*)、纤孔菌属(*Fuscoporia*)、灵芝属(*Ganoderma*)、猴头菌属(*Hericium*)、锈齿革菌属(*Hydnochaete*)、锈革孔菌属(*Hymenochaete*)、丝齿菌属(*Hyphodontia*)、容氏孔菌属(*Junghuhnia*)、香菇属(*Lentinus*)、多年卧孔菌属(*Perenniporia*)、原毛平革菌属(*Phanerochaete*)、木层孔菌属(*Phellinus*)、射脉革菌属(*Phlebia*)、多孔菌属(*Polyporus*)、泊氏孔菌属(*Postia*)、裂褶菌属(*Schizophyllum*)、皮垫革菌属(*Scytinostroma*)、干皮孔菌属(*Skeletocutis*)、齿耳菌属(*Steccherinum*)、韧革菌属(*Stereum*)、栓孔菌属(*Trametes*)、干酪菌属(*Tyromyces*)等共26个属, 占全部属的57.8%。

(2)北温带属。古田山地区木腐真菌中北温带分布属有: 薄孔菌属(*Antrodia*)、栗孔菌属(*Castanoporus*)、拟蜡孔菌属(*Ceriporiopsis*)、小嗜蓝孢孔菌属(*Fomitiporella*)、拟层孔菌属(*Fomitopsis*)、褐腐干酪孔菌属(*Oligoporus*)、沃菲卧孔菌属(*Wolfiporia*)等共7个属, 占全部属的15.5%。

(3)热带-亚热带属。古田山地区木腐真菌的热带-亚热带分布属有: 淀粉韧革菌属(*Amylostereum*)、环褶孔菌属(*Cyclomyces*)、黄层孔菌属(*Fulvifomes*)、*Ginnsia*、假射脉革菌属(*Hydnophlebia*)、丝毛伏革菌属(*Hyphoderma*)、拟小孔菌属(*Microporellus*)、小孔菌属(*Microporus*)、针齿菌属(*Mycoacia*)、假赖特孔菌属(*Pseudowrightoporia*)、须革菌属(*Rhizochaete*)、色孔菌属(*Tinctoporellus*)共12个属, 占全部属的26.7%。

2.2.2 种的地理成分

古田山自然保护区木腐真菌物种的区系地理成分如附录1、图1所示, 以热带-亚热带成分为主, 占有物种的38%; 其次为世界广布成分和北温带成分, 分别是26.1%和23.9%; 其他几种区系成分也有一定分布。在上述种类中, 中国特有种有4种, 分别是*Antrodia tropica*, *Fomitiporella caviphila*, *Fulvifomes indicus*和*Perenniporia nanlingensis*, 这4种是报道于中国的新种, 目前仅在中国发现(Zhao & Cui, 2012; Cui, 2013; Zhou, 2014a, b)。

图1 古田山国家级自然保护区木腐真菌地理区系组成。A: 亚-欧; B: 东亚-北美; C: 东亚; D: 中国特有; E: 世界广布; F: 热带-亚热带; G: 北温带

Fig. 1 Geographical distribution of wood-decaying fungi in Gutianshan National Nature Reserve. A, Asia-Europe; B, East Asia- North America; C, East Asia; D, Endemic to China; E, Cosmopolitan; F, Tropical-subtropical; G, North temperate.

3 生态习性分析

3.1 木腐真菌的腐朽类型

古田山自然保护区的92种木腐真菌中白腐真菌有78种, 其寄主树种多为阔叶树。白腐真菌中绝大多数种类为腐生菌, 生长在已经倒死的树木基质上, 而*Fuscoporia contigua*、*Ganoderma* sp.、*Perenniporia subacida*、*Phellinus gilvus*这4种白腐真菌能够生长在活树上, 虽然没有直接导致寄主树木死亡, 但却造成树木生长势衰弱, 易发生风折等。其中*Castanopsis castaneus*专性生长于针叶树上, 造成针叶树倒木的白色腐朽。而14种褐色腐朽种类中, *Fomitopsis pinicola*和*F. rosea*亦是专性生长于针叶树倒木上。

3.2 不同直径倒木基质的木腐真菌

木腐真菌主要生长在直径大于10 cm的倒木或树桩上, 共有97份标本76个种, 占有调查样本的61.4%, *Antrodiella albocinnamomea*, *Cyclomyces xeranticus*, *Daedalea dickinsii*, *Polyporus hygrocybe*是其中数量具有相对优势的种类; 直径为2-10 cm的倒木枝干上生长的真菌数量占总数的30.4%; 直径小于2 cm的小枝上木腐真菌数量较少, 仅采到13份标本(图2a), 其中*Fuscoporia contigua*倾向于生长在较细的小枝上, 而*Polyporus mori*和*Skeletocutis*

图2 (a)不同直径倒木上木腐真菌数量;(b)不同腐烂等级倒木上的木腐真菌数量。DC1: 腐烂一级; DC2: 腐烂二级; DC3: 腐烂三级; DC4: 腐烂四级。

Fig. 2 (a) Number of wood-decaying fungi on fallen wood of different diameters; (b) Number of wood-decaying fungi on wood with different rotting classes. DC1, Decaying class 1; DC2, Decaying class 2; DC3, Decaying class 3; DC4, Decaying class 4.

*nivea*对寄主直径的选择范围比较广。

3.3 不同腐烂等级倒木上的木腐真菌数量

古田山自然保护区中不同腐烂等级倒木上的木腐真菌数量和种类差异明显, 腐烂一级的倒木上采集到9份标本, 隶属于7个种; 二级倒木上采集真菌种类和数量最多, 共采集到86份标本, 隶属于45种, 是木腐真菌生长最重要的倒木腐烂等级, 其中数量具有相对优势的物种是 *Daedalea dickinsii*, *Microporellus obovatus*, *Polyporus mori*, *Tinctoporellus epimiltinus*, 其出现的频次均大于2次; 其次是三级倒木上采集到有49份标本, 隶属于29种, 其中 *Ceriporia xylostromatoides*, *Ceriporiopsis aneirina*, *Cyclomyces xeranticus*, *Daedalea dickinsii* 的数量具有相对优势; 四级倒木上有14份14种(图2b)。木腐真菌在不同腐烂等级倒木上的生长具有延续性, 同一个物种可能会跨越2个腐烂等级, 如 *Polyporus leprieurii* 出现在倒木腐烂的1级和2级, *Daedalea dickinsii* 出现在倒木腐烂的2级和3级, *Cyclomyces*

xeranticus 出现在倒木腐烂的3级和4级。

4 讨论

古田山地处我国东南部, 具有典型的亚热带常绿阔叶林, 树种组成以阔叶树为主, 针叶树相对较少。从本次野外调查结果来看, 该地区木腐真菌中白腐真菌的种类比例高达84.8%, 远高于褐腐真菌, 可见林分树种组成对木腐真菌的类群组成具有重要作用。另外, 由于古田山自然保护区具有良好的森林生态环境, 倒木数量较多, 为木腐真菌的生长提供了良好的条件, 木腐真菌种类丰富, 92种真菌中有31种属于稀有物种。

木腐真菌的地理成分因受其寄主树木的影响而具有一定的共性, 许多属是世界广布属, 包括中国在内的世界很多地区均有分布, 但更多属的分布与地理区域相关。中国地跨北半球的寒温带、温带、暖温带、亚热带和热带, 不同气候带分布的木腐真菌具有明显的地带特征。古田山地区的木腐真菌物种区系地理成分表现出较为明显的热带-亚热带特征, 但该地区较热带相对偏低的气温, 又为一些喜爱低温生长的种类提供了适宜的环境, 因此该地区北温带成分的种类占有调查种类的23.9%。而26.1%的广布种也显示古田山地区的木腐真菌种类与其他地区有一定的共性。

有研究指出, 稀有和濒危物种倾向于选择生长在表面积较大的基质上, 有些物种选择生长在腐烂程度较深的倒木上, 有些物种必须有其他物种寄生之后才可以生长(周丽伟和戴玉成, 2013)。古田山自然保护区内所调查的真菌中61.4%的个体生长在直径大于10 cm的倒木上, 可见大径级的倒木数量是影响木腐真菌物种多样性的重要因素。而小径级的木材基质对于一些倾向于生长在小枝上的物种而言, 也非常重要。

森林中倒木的腐烂是一个动态的变化过程, 随着倒木腐烂程度的加深, 其理化结构也随之变化, 其上生长的真菌种类和数量也有着很大差异。在调查过程中发现古田山地区新鲜倒木上的木腐菌数量较少, 腐烂二级的倒木上生长的真菌种类最多, 其次是腐烂三级的倒木。可以看出, 该地区的木腐真菌主要生长在腐烂中后期阶段的基质上, 是发挥降解作用中数量最多和多样性最高的一个类群。而初期腐烂阶段上生长的物种数量和种类比较少, 属

于先锋物种,它们能够破坏木材最致密的结构并从中获取营养进行生长,同时也为其他腐生真菌的着生提供了条件。本次研究中共发现4种真菌可以生长在活立木上造成寄主的生长势衰弱。古田山地区不同腐烂级倒木上生长的木腐真菌种类数量分布情况与其他地区一致,作者对丰林自然保护区、长白山自然保护区和东灵山自然保护区等地的木腐真菌种类数量与寄主倒木特征的相关性研究均表现出类似的结果(魏玉莲, 2011; 王小燕和魏玉莲, 2015b; 张丽燕和魏玉莲, 2016)。

纬度变化通过影响森林生态系统中树种分布进而影响该林分中木腐真菌的物种组成;不同的真菌种类有其寄主偏好性,因此倒木的数量和多样化对于木腐真菌的生物多样性有着重要的影响。原始森林中倒木和腐朽木数量丰富,木腐真菌在此类森林中多样性很高,但原始森林的砍伐和天然林的减少对木腐真菌的生境造成了巨大的破坏,木腐真菌的种群数量逐渐减少。加强对原始森林的保护,提高对森林中倒木的保存,对木腐真菌资源的保护具有重要意义。

致谢: 本研究的野外采集工作得益于中国科学院植物研究所米湘成老师和田磊博士的大力帮助,在此表示真挚的感谢。

参考文献

- Bian LS, Dai YC (2015) Mycota and ecology of polypores in eastern Himalayas. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 1554–1563. (in Chinese with English abstract) [边禄森, 戴玉成 (2015) 东喜马拉雅地区多孔菌区系和生态习性. *生态学报*, 35, 1554–1563.]
- Cui BK (2013) *Antrodia tropica* sp. nov. from southern China inferred from morphological characters and molecular data. *Mycological Progress*, 12, 223–230.
- Dai YC (2003) Rare and threatened polypores in the ecosystem of Changbaishan Nature Reserve of northeastern China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 14, 1015–1018. (in Chinese with English abstract) [戴玉成 (2003) 长白山森林生态系统中的稀有和濒危多孔菌. *应用生态学报*, 14, 1015–1018.]
- Dai YC, Zhuang JY (2010) Numbers of fungal species hitherto known in China. *Mycosystema*, 29, 625–628. (in Chinese with English abstract) [戴玉成, 庄剑云 (2010) 中国菌物已知种数. *菌物学报*, 29, 625–628.]
- Dai YC (2011) A revised checklist of corticioid and hydroid fungi in China for 2010. *Mycoscience*, 52, 69–79.
- Dai YC (2012) Polypore diversity in China with an annotated checklist of Chinese polypores. *Mycoscience*, 53, 49–80.
- Gilbert GS, Gorospe J, Ryvarden L (2008) Host and habitat preferences of polypore fungi in Micronesian tropical flooded forests. *Mycological Research*, 112, 674–680.
- Harley JL (1971) Fungi in ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 8, 627–642.
- Hattori T (2005) Diversity of wood-inhabiting polypores in temperate forests with different vegetation types in Japan. *Fungal Diversity*, 18, 73–88.
- Kubartova A, Ottosson E, Dahlberg A (2012) Patterns of fungal communities among and within decaying logs, revealed by 454 sequencing. *Molecular Ecology*, 21, 4514–4532.
- Legendre P, Mi XC, Ren HB, Ma KP, Yu MJ, Sun IF, He FL (2009) Partitioning beta diversity in a subtropical broad-leaved forest of China. *Ecology*, 90, 663–674.
- Li T, Li JN, Wei YL (2017) Community composition characteristics of wood-decaying fungi in temperate secondary forest ecosystems in China. *Chinese Journal of Ecology*, 36, 3199–3208. (in Chinese with English abstract) [李通, 李俊凝, 魏玉莲 (2017) 我国温带次生林生态系统中木腐真菌群落组成特征. *生态学杂志*, 36, 3199–3208.]
- Li Y, Li TH, Yang ZL, Bau T, Dai YC (2015) Atlas of Chinese Macrofungal Resources. Central China Farmer's Publishing House, Zhengzhou. (in Chinese) [李玉, 李泰辉, 杨祝良, 图力古尔, 戴玉成 (2015) 中国大型菌物资源图鉴. 中原农民出版社, 郑州.]
- Núñez M, Ryvarden L (2001) East Asian polypores. II. *Synopsis Fungorum*, 14, 170–522.
- Renvall P (1995) Community structure and dynamics of wood rotting Basidiomycetes on decomposing conifer trunks in northern Finland. *Karstenia*, 35, 1–51.
- Ryvarden L (1991) Genera of polypores: Nomenclature and taxonomy. *Synopsis Fungorum*, 5, 1–363.
- Ryvarden L, Gilbertson RL (1993a) European polypores. I. *Synopsis Fungorum*, 6, 1–387.
- Ryvarden L, Gilbertson RL (1993b) European Polypores II. *Synopsis Fungorum*, 7, 388–743.
- Wang XY, Wei YL (2015a) Population difference of polypores in northwest and southeast of China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 26, 3160–3166. (in Chinese with English abstract) [王小燕, 魏玉莲 (2015a) 我国西北和东南地区多孔菌种群差异. *应用生态学报*, 26, 3160–3166.]
- Wang XY, Wei YL (2015b) Floral composition and distribution characteristics of wood-decaying fungi in Dongling Mountain, Beijing. *Chinese Journal of Ecology*, 34, 2167–2172. (in Chinese with English abstract) [王小燕, 魏玉莲 (2015b) 北京东灵山木腐菌主要种类的区系组成及分布特征. *生态学杂志*, 34, 2167–2172.]
- Wei YL (2011) Polypore species diversity, floral composition, and distribution characteristics in Changbai Mountains, Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 22,

- 2711–2717. (in Chinese with English abstract) [魏玉莲 (2011) 长白山多孔菌物种多样性、区系组成及分布特征. 应用生态学报, 22, 2711–2717.]
- Wei YL, Dai YC (2004) Ecological function of wood-inhabiting fungi in forest ecosystem. Chinese Journal of Applied Ecology, 15, 1935–1938. (in Chinese with English abstract) [魏玉莲, 戴玉成 (2004) 木材腐朽菌在森林生态系统中的功能. 应用生态学报, 15, 1935–1938.]
- Wei YL, Li T (2017) Community characters of wood-decaying fungi on dominant hosts in the broad-leaved Korean pine mixed forest in Changbai Mountain. Chinese Journal of Ecology, 36, 3209–3215. (in Chinese with English abstract) [魏玉莲, 李通 (2017) 长白山阔叶红松林优势树种的木腐真菌群落结构特征. 生态学杂志, 36, 3209–3215.]
- Wu ZY (1980) Vegetation of China. Science Press, Beijing. (in Chinese) [吴征镒 (1980) 中国植被. 科学出版社, 北京.]
- Yu MJ, Hu ZH, Yu JP, Ding BY, Fang T (2001) Forest vegetation types in Gutianshan Natural Reserve in Zhejiang. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 27, 375–380. (in Chinese with English abstract) [于明坚, 胡正华, 余建平, 丁炳扬, 方腾 (2001) 浙江古田山自然保护区森林植被类型. 浙江大学学报(农业和生命科学版), 27, 375–380.]
- Yuan Y, Bian LS, Wu F, Si J (2015) Floral composition and ecology of polypores in Hainan Province. Chinese Journal of Ecology, 34, 1689–1698. (in Chinese with English abstract) [员瑗, 边禄森, 吴芳, 司静 (2015) 中国海南省多孔菌区系组成和生态习性. 生态学杂志, 34, 1689–1698.]
- Zhang LY, Wei YL (2016) Species diversity and distribution characters of wood-decaying fungi in Fenglin Nature Reserve. Chinese Journal of Ecology, 35, 2745–2751. (in Chinese with English abstract) [张丽燕, 魏玉莲 (2016) 丰林自然保护区木材腐朽真菌发生规律及其物种多样性. 生态学杂志, 35, 2745–2751.]
- Zhao CL, Cui BK (2012) A new species of *Perenniporia* (Polyporales, Basidiomycota) described from southern China based on morphological and molecular characters Volume. Mycological Progress, 11, 555–560.
- Zhou LW (2014a) *Fomitiporella caviphila* sp. nova (Hymenochaetales, Basidiomycota) from eastern China, with a preliminary discussion on the taxonomy of *Fomitiporella*. Annales Botanici Fennici, 51, 279–284.
- Zhou LW (2014b) *Fulvifomes hainanensis* sp. nov. and *F. indicus* comb. nov. (Hymenochaetales, Basidiomycota) evidenced by a combination of morphology and phylogeny. Mycoscience, 55, 70–77.
- Zhou LW, Dai YC (2013) Chinese polypore diversities: Species, mycota and ecological functions. Biodiversity Science, 21, 499–506. (in Chinese with English abstract) [周丽伟, 戴玉成 (2013) 中国多孔菌多样性初探: 物种、区系和生态功能. 生物多样性, 21, 499–506.]
- Zhu Y, Zhao GF, Zhang LW, Shen GC, Mi XC, Ren HB, Yu MJ, Chen JH, Chen SW, Fang T, Ma KP (2008) Community composition and structure of Gutianshan forest dynamic plot in a mid-subtropical evergreen broad-leaved forest, East China. Journal of Plant Ecology (Chinese Version), 32, 262–273. (in Chinese with English abstract) [祝燕, 赵谷风, 张俪文, 沈国春, 米湘成, 任海保, 于明坚, 陈建华, 陈声文, 方腾, 马克平 (2008) 古田山中亚热带常绿阔叶林动态监测样地——群落组成与结构. 植物生态学报, 32, 262–273.]

(责任编辑: 郭良栋 责任编辑: 时意专)

附录 Supplementary Material

附录1 古田山国家级自然保护区木腐真菌的功能属性与地理成分

Appendix 1 Functional trait and geographical element of wood-decaying fungi in Gutianshan National Nature Reserve

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2018-156-1.pdf>

附录1 古田山国家级自然保护区木腐真菌的功能属性与地理成分

Appendix 1 Functional trait and geographical element of wood-decaying fungi in Gutianshan National Nature Reserve

编号 No.	物种 Species	功能属性 Functional trait	出现频率 Occurrence frequency	地理成分 Geographical element
1.	东方淀粉韧革菌 <i>Amylostereum orientale</i>	腐生/白腐 Saprohytic/white rot	稀有 Rare	热带—亚热带 Tropical-subtropical
2.	<i>Antrodia</i> sp.	腐生/褐腐 Saprohytic/brown rot	稀有 Rare	北温带 North temperate
3.	热带薄孔菌 <i>Antrodia tropica</i>	腐生/褐腐 Saprohytic/brown rot	稀有 Rare	中国特有 Endemic to China
4.	白黄小薄孔菌 <i>Antrodiella albocinnamomea</i>	腐生/白腐 Saprohytic/white rot	常见 Common	东亚 East Asia
5.	黑卷小薄孔菌 <i>Antrodiella liebmannii</i>	腐生/白腐 Saprohytic/white rot	常见 Common	热带—亚热带 Tropical-subtropical
6.	若氏小薄孔菌 <i>Antrodiella romellii</i>	腐生/白腐 Saprohytic/white rot	常见 Common	北温带 North temperate
7.	乌苏里小薄孔菌 <i>Antrodiella ussuri</i>	腐生/白腐 Saprohytic/white rot	常见 Common	北温带 North temperate
8.	烟管孔菌 <i>Bjerkandera adusta</i>	腐生/白腐 Saprohytic/white rot	常见 Common	世界广布 Cosmopolitan
9.	褐栗孔菌 <i>Castanoporus castaneus</i>	腐生/白腐 Saprohytic/white rot	常见 Common	北温带 North temperate
10.	阿尔巴蜡孔菌 <i>Ceriporia alba</i>	腐生/白腐 Saprohytic/white rot	稀有 Rare	北温带 North temperate
11.	橘黄蜡孔菌 <i>Ceriporia aurantiocarnescens</i>	腐生/白腐 Saprohytic/white rot	常见 Common	北温带 North temperate
12.	<i>Ceriporia xylostromatoides</i>	腐生/白腐 Saprohytic/white rot	稀有 Rare	热带—亚热带 Tropical-subtropical
13.	角孔拟蜡孔菌 <i>Ceriporiopsis aneirina</i>	腐生/白腐 Saprohytic/white rot	稀有 Rare	北温带 North temperate
14.	巴拉尼拟蜡孔菌 <i>Ceriporiopsis balaenae</i>	腐生/白腐 Saprohytic/white rot	常见 Common	北温带 North temperate
15.	毛缘拟蜡孔菌 <i>Ceriporiopsis fimbriata</i>	腐生/白腐 Saprohytic/white rot	稀有 Rare	东亚 East Asia
16.	近浅黄拟蜡孔菌 <i>Ceriporiopsis pseudogilvescens</i>	腐生/白腐 Saprohytic/white rot	稀有 Rare	北温带 North temperate
17.	<i>Ceriporiopsis</i> sp.	腐生/白腐 Saprohytic/white rot	稀有 Rare	北温带 North temperate
18.	干锈革孔菌 <i>Cyclomyces xeranticus</i>	腐生/白腐 Saprohytic/white rot	常见 Common	东亚 East Asia
19.	迪氏迷孔菌 <i>Daedalea dickinsii</i>	腐生/褐腐 Saprohytic/brown rot	常见 Common	东亚 East Asia
20.	<i>Dentipellis</i> sp. 1	腐生/白腐 Saprohytic/white rot	常见 Common	世界广布 Cosmopolitan
21.	<i>Dentipellis</i> sp. 2	腐生/白腐 Saprohytic/white rot	稀有 Rare	世界广布 Cosmopolitan
22.	洞生小嗜蓝孢孔菌 <i>Fomitiporella caviphila</i>	腐生/白腐 Saprohytic/white rot	稀有 Rare	中国特有 Endemic to China
23.	红缘拟层孔菌 <i>Fomitopsis pinicola</i>	腐生/褐腐 Saprohytic/brown rot	常见 Common	北温带 North temperate
24.	玫瑰拟层孔菌 <i>Fomitopsis rosea</i>	腐生/褐腐 Saprohytic/brown rot	常见 Common	北温带 North temperate
25.	<i>Fomitopsis</i> sp.	腐生/褐腐 Saprohytic/brown rot	常见 Common	北温带 North temperate
26.	硬白孔拟层孔菌 <i>Fomitopsis spraguei</i>	腐生/褐腐 Saprohytic/brown rot	常见 Common	北温带 North temperate
27.	印度黄层孔菌 <i>Fulvifomes indicus</i>	腐生/白腐 Saprohytic/white rot	稀有 Rare	中国特有 Endemic to China
28.	<i>Fuscoporia contigua</i>	寄生/白腐 Parasitic/white rot	常见 Common	北温带 North temperate
29.	<i>Fuscoporia</i> sp.	寄生/白腐 Parasitic/white rot	稀有 Rare	热带—亚热带 Tropical-subtropical
30.	<i>Ganoderma</i> sp.	寄生/白腐 Parasitic/white rot	常见 Common	世界广布 Cosmopolitan
31.	<i>Ginnsia viticola</i>	腐生/白腐 Saprohytic/white rot	稀有 Rare	热带—亚热带 Tropical-subtropical

编号 No.	物种 Species	功能属性 Functional trait	出现频率 Occurrence frequency	地理成分 Geographical element
32.	<i>Hericium flagellum</i>	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	常见 Common	热带—亚热带 Tropical-subtropical
33.	日本锈齿革菌 <i>Hydnochaete japonica</i>	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	常见 Common	东亚 East Asia
34.	<i>Hydnophlebia</i> sp.	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	常见 Common	热带—亚热带 Tropical-subtropical
35.	烟色锈革菌 <i>Hymenochaete adusta</i>	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	常见 Common	世界广布 Cosmopolitan
36.	异常锈革菌 <i>Hymenochaete anomala</i>	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	稀有 Rare	热带—亚热带 Tropical-subtropical
37.	厚锈革菌 <i>Hymenochaete cinnamomea</i>	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	常见 Common	热带—亚热带 Tropical-subtropical
38.	<i>Hymenochaete epichlora</i>	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	常见 Common	热带—亚热带 Tropical-subtropical
39.	齿囊锈革菌 <i>Hymenochaete hydroides</i>	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	常见 Common	热带—亚热带 Tropical-subtropical
40.	非交织锈革菌 <i>Hymenochaete innexa</i>	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	稀有 Rare	热带—亚热带 Tropical-subtropical
41.	长孢锈革菌 <i>Hymenochaete longispora</i>	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	常见 Common	热带—亚热带 Tropical-subtropical
42.	大黄锈革菌 <i>Hymenochaete rheicolor</i>	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	常见 Common	热带—亚热带 Tropical-subtropical
43.	单色锈革菌 <i>Hymenochaete unicolor</i>	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	常见 Common	热带—亚热带 Tropical-subtropical
44.	柔毛锈革菌 <i>Hymenochaete villosa</i>	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	稀有 Rare	热带—亚热带 Tropical-subtropical
45.	<i>Hyphoderma</i> sp.	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	稀有 Rare	世界广布 Cosmopolitan
46.	淡黄丝齿菌 <i>Hyphodontia flavipora</i>	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	常见 Common	世界广布 Cosmopolitan
47.	<i>Hyphodontia</i> sp.	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	常见 Common	热带—亚热带 Tropical-subtropical
48.	皱容氏孔菌 <i>Junghuhnia collabens</i>	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	常见 Common	世界广布 Cosmopolitan
49.	<i>Lentinus tuber-regium</i>	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	常见 Common	热带—亚热带 Tropical-subtropical
50.	倒卵拟小孔菌 <i>Microporellus obovatus</i>	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	稀有 Rare	热带—亚热带 Tropical-subtropical
51.	近缘小孔菌 <i>Microporus affinis</i>	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	常见 Common	热带—亚热带 Tropical-subtropical
52.	褐扇小孔菌 <i>Microporus vernicipes</i>	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	常见 Common	热带—亚热带 Tropical-subtropical
53.	<i>Mycoacia nothofagi</i>	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	稀有 Rare	热带—亚热带 Tropical-subtropical
54.	<i>Oligoporus mappa</i>	腐生/褐腐 Saprophytic/brown rot	稀有 Rare	北温带 North temperate
55.	<i>Oligoporus</i> sp.	腐生/褐腐 Saprophytic/brown rot	稀有 Rare	北温带 North temperate
56.	白蜡多年卧孔菌 <i>Perenniporia fraxinea</i>	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	常见 Common	世界广布 Cosmopolitan
57.	狭髓多年卧孔菌 <i>Perenniporia medulla-panis</i>	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	常见 Common	世界广布 Cosmopolitan
58.	南岭多年卧孔菌 <i>Perenniporia nanlingensis</i>	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	稀有 Rare	中国特有 Endemic to China
59.	白赭多年卧孔菌 <i>Perenniporia ochroleuca</i>	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	常见 Common	世界广布 Cosmopolitan
60.	<i>Perenniporia</i> sp.	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	稀有 Rare	热带—亚热带 Tropical-subtropical
61.	微酸多年卧孔菌 <i>Perenniporia subacida</i>	寄生/白腐 Parasitic/white rot	常见 Common	北温带 North temperate
62.	<i>Phanerochaete galactites</i>	寄生/白腐 Parasitic/white rot	常见 Common	热带—亚热带 Tropical-subtropical
63.	<i>Phanerochaete laevis</i>	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	常见 Common	世界广布 Cosmopolitan
64.	污白平革菌 <i>Phanerochaete sordida</i>	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	稀有 Rare	北温带 North temperate
65.	铁木层孔菌	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	常见 Common	世界广布 Cosmopolitan

编号 No.	物种 Species	功能属性 Functional trait	出现频率 Occurrence frequency	地理成分 Geographical element
	<i>Phellinus ferreus</i>			
66.	香木层孔菌 <i>Phellinus fragrans</i>	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	常见 Common	北温带 North temperate
67.	淡黄木层孔菌 <i>Phellinus gilvus</i>	寄生/白腐 Parasitic/white rot	常见 Common	世界广布 Cosmopolitan
68.	<i>Phellinus</i> sp.	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	常见 Common	北温带 North temperate
69.	金射脉菌 <i>Phlebia aurea</i>	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	常见 Common	世界广布 Cosmopolitan
70.	<i>Phlebia chrysocreas</i>	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	稀有 Rare	世界广布 Cosmopolitan
71.	漏斗多孔菌 <i>Polyporus arcularius</i>	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	常见 Common	世界广布 Cosmopolitan
72.	理坡瑞多孔菌 <i>Polyporus leprieurii</i>	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	常见 Common	热带—亚热带 Tropical-subtropical
73.	<i>Polyporus hygrocybe</i>	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	常见 Common	热带—亚热带 Tropical-subtropical
74.	桑多孔菌 <i>Polyporus mori</i>	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	常见 Common	世界广布 Cosmopolitan
75.	<i>Polyporus</i> sp.	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	稀有 Rare	热带—亚热带 Tropical-subtropical
76.	<i>Postia</i> sp. 1	腐生/褐腐 Saprophytic/brown rot	常见 Common	热带—亚热带 Tropical-subtropical
77.	<i>Postia</i> sp. 2	腐生/褐腐 Saprophytic/brown rot	常见 Common	世界广布 Cosmopolitan
78.	希玛波斯特孔菌 <i>Postia simanii</i>	腐生/褐腐 Saprophytic/brown rot	稀有 Rare	亚—欧 Asia-Europe
79.	灰白波斯特孔菌 <i>Postia tephroleuca</i>	腐生/褐腐 Saprophytic/brown rot	常见 Common	北温带 North temperate
80.	长孢假赖特孔菌 <i>Pseudowrightoporia oblongispora</i>	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	稀有 Rare	热带—亚热带 Tropical-subtropical
81.	<i>Rhizochaete radicata</i>	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	稀有 Rare	热带—亚热带 Tropical-subtropical
82.	裂褶菌 <i>Schizophyllum commune</i>	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	常见 Common	世界广布 Cosmopolitan
83.	<i>Scytinostroma</i> sp.	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	常见 Common	世界广布 Cosmopolitan
84.	白干皮孔菌 <i>Skeletocutis nivea</i>	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	常见 Common	世界广布 Cosmopolitan
85.	赭色齿耳菌 <i>Steccherinum ochraceum</i>	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	常见 Common	世界广布 Cosmopolitan
86.	<i>Steccherinum</i> sp.	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	常见 Common	热带—亚热带 Tropical-subtropical
87.	扁韧革菌 <i>Stereum ostrea</i>	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	常见 Common	热带—亚热带 Tropical-subtropical
88.	红木色孔菌 <i>Tinctoporellus epimiltinus</i>	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	常见 Common	热带—亚热带 Tropical-subtropical
89.	<i>Trametes modesta</i>	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	常见 Common	热带—亚热带 Tropical-subtropical
90.	云芝 <i>Trametes versicolor</i>	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	常见 Common	世界广布 Cosmopolitan
91.	<i>Tyromyces</i> sp.	腐生/白腐 Saprophytic/white rot	常见 Common	热带—亚热带 Tropical-subtropical
92.	<i>Wolfiporia dilatohypha</i>	腐生/褐腐 Saprophytic/brown rot	稀有 Rare	东亚—北美 East Asia-North America