

后河保护区柳杉林中黏菌群落组成

杜鹃¹ 李敏¹ 陶欣¹ 李彪¹ 朱晓琴² 黄德枚² 陈双林¹

闫淑珍¹✉

①南京师范大学生命科学学院 江苏 南京 210023

②湖北后河国家级自然保护区 湖北 宜昌 443413

摘 要: 柳杉是中国特有树种, 对于广泛分布于森林生态系统的黏菌而言, 单纯的柳杉林是一种特殊的生境。为探索柳杉林中黏菌的物种多样性, 本研究在武陵山区东北部的湖北省后河国家级自然保护区柳杉林样地中采集柳杉树皮和凋落物, 在 120 个培养湿室中, 发生黏菌的湿室 68 个, 占 56.67%。从两种基物上获得黏菌 6 目 7 科 12 属 24 种, 优势种为混淆筛菌 *Cribraria confusa*, 相对丰度达到 19.01%。柳杉林凋落物上发生的黏菌种类和数量高于柳杉树皮, 凋落物和柳杉树皮上发生的黏菌共有种为 4 种, 种群间的 Sørensen 相似性系数为 $C_s=0.333$ 。在不同季节间, 黏菌物种的群落组成与多样性也表现出差异, 春季 Shannon-Wiener 多样性指数 $H'=0.2987\pm0.1564$, 夏季 $H'=0.1105\pm0.0949$, 秋季 $H'=0.1968\pm0.0589$, 冬季 $H'=0.2726\pm0.0875$ 。黏菌物种数量发生最多的是春季和冬季, 均有 15 种, 仅在春季发生的黏菌物种为粗壮发菌 *Comatricha suksdorfii*、鲜黄绒泡菌 *Physarum luteolum*、暗红团网菌 *Arcyria denudata* 和极小无丝菌 *Licea minima*, 仅在冬季发生的黏菌物种为钙丝绒泡菌 *Physarum decipiens*、小筛菌 *Cribraria microcarpa* 和暗褐无丝菌 *Licea belmontiana*。典型对应分析 (canonical correspondence analyses, CCA) 表明, 影响柳杉林中黏菌物种群落组成与多样性的主要环境因素是基物类型。

关键词: 柳杉, 黏菌, 群落结构, 分布差异, 影响因素

[引用本文] 杜鹃, 李敏, 陶欣, 李彪, 朱晓琴, 黄德枚, 陈双林, 闫淑珍, 2021. 后河保护区柳杉林中黏菌群落组成. 菌物学报, 40(10): 2641-2652

Du Q, Li M, Tao X, Li B, Zhu XQ, Huang DM, Chen SL, Yan SZ, 2021. The community of myxomycetes in *Cryptomeria fortunei* forest of Houhe National Nature Reserve, Hubei Province, China. Mycosystema, 40(10): 2641-2652

基金项目: 国家自然科学基金 (32070007, 31470143)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (32070007, 31470143).

✉ Corresponding author. E-mail: yanshuzhen@njnu.edu.cn

ORCID: DU Que (0000-0001-8111-1527), YAN Shu-Zhen (0000-0004-8752-3215)

Received: 2021-07-30, accepted: 2021-08-24

The community of myxomycetes in *Cryptomeria fortunei* forest of Houhe National Nature Reserve, Hubei Province, China

DU Que¹ LI Min¹ TAO Xin¹ LI Biao¹ ZHU Xiao-Qin² HUANG De-Mei²
CHEN Shuang-Lin¹ YAN Shu-Zhen¹✉

①College of Life Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210023, China

②Research Institute of Houhe National Nature Reserve, Yichang, Hubei 443413, China

Abstract: *Cryptomeria fortunei* is an endemic tree species in China. Pure *C. fortunei* forest is a special habitat for myxomycetes which are widely distributed in forest ecosystem. In order to explore the species diversity of myxomycetes in *C. fortunei* forest, the bark and litter of *C. fortunei* were collected in Houhe National Nature Reserve of Hubei Province in the northeast of Wuling mountainous area. Among the 120 moist chamber cultures, 68 cultures were colonized by myxomycetes, accounting for 56.67% of the total. A total of 24 myxomycete species was obtained, belonging to 6 orders, 7 families and 12 genera. The dominant species was *Cribraria confusa*, with relative abundance of 19.01%. The number of species occurred on the litter were more than that on the bark. Litter and bark have 4 species in common. Sørensen similarity coefficient between populations was $C_s=0.333$. In different seasons, the community composition and diversity of myxomycete species showed differences, $H'=0.2987\pm0.1564$ in spring, $H'=0.1105\pm0.0949$ in summer, $H'=0.1968\pm0.0589$ in autumn, $H'=0.2726\pm0.0875$ in winter. The largest number of myxomycete species occurred in spring and winter, being equally 15 species. The species only occurred in spring were *Comatrucha suksdorfii*, *Physarum luteolum*, *Arcyria denudata*, and *Licea minima*. The species only occurred in winter were *Physarum decipiens*, *Cribraria microcarpa* and *Licea belmontiana*. Canonical correspondence analyses (CCA) showed that the main environmental factor that affected the community composition and diversity of the myxomycetes in *C. fortunei* forest was the type of substrate.

Key words: *Cryptomeria cryptomerata*, myxomycetes, community structure, distribution differences, influencing factors

黏菌是全球陆地上普遍分布的一类属于原生动物界的菌物 (Dai *et al.* 2020; 李敏和陈双林 2021)。一般来说, 气候条件适宜、具有植物残体的地方都可以发生黏菌, 温暖湿润的森林是黏菌常见的栖息环境 (Schnittler & Stephenson 2000; Rojas & Stephenson 2012; Velloso *et al.* 2020), 森林中的树下凋落物和活树的树皮等是适合黏菌生长的最基本的基

物 (Stephenson 1989; 戴丹等 2021)。大量研究表明, 影响黏菌群落中物种组成和多样性的因素有林型、海拔高度、温度、湿度和 pH 等 (Ronikier & Ronikier 2009; Kamono *et al.* 2013; Schnittler *et al.* 2015)。一般认为, 林型是重要的影响因素之一, 不同林型内的黏菌物种多样性和群落结构具有较大差异 (Ndiritu *et al.* 2009; Wrigley *et al.* 2010;

Takahashi 2014; Gao *et al.* 2018)。柳杉属 *Cryptomeria* 是杉科常绿乔木，特有性地分布在东亚（于永福 1995），几乎不与阔叶树和其他针叶树形成混交林，构成一种独特的林型生境。Takahashi（2014）和 Takahashi *et al.*（2018）从日本柳杉 *C. japonica* 林中发现有 38 种黏菌的发生和分布，温度、降雨量和 pH 等因素影响着其中黏菌物种的分布和丰富度。柳杉 *Cryptomeria fortunei* 是中国特有树种（余林 2019），是柳杉属仅有的两个物种之一。为揭示中国柳杉林中黏菌的物种群落组成及其在不同基物 and 不同季节的发生异同，并为比较中国柳杉与日本柳杉林中黏菌区系和演替奠定基础，本研究在后河国家级自然保护区柳杉林中设置样地，分析其中不同基物 and 不同季节发生的黏菌的物种多样性，探讨基物、季节和气候因素等对黏菌发生与分布的影响。

1 材料与方法

1.1 研究地点

湖北省五峰县后河国家级自然保护区地处武陵山脉东北部，其范围在 30°2′45″–30°8′40″N、110°29′25″–110°40′45″E，属于华中北亚热带季风气候，四季分明、温度适宜、雨量充沛（李作洲等 2005），具备适合黏菌发生的优良条件。本研究在该保护区纸厂河（30°6′51″N，110°34′53″E）柳杉 *Cryptomeria fortunei* 林中设置面积为 50m×50m 样地。

1.2 取样方法

在该柳杉林样地中，按照 5 点取样法确定 5 个样点，每个样点（10m×10m）随机选取 3 棵树，分别在 2019 年冬季（1 月）、春季（4 月）、夏季（7 月）和秋季（10 月）采集距离地面 1.5m 处的柳杉活树树皮和相应的地面凋落物作为基物。将所采集基物分别装入密封袋中，带回实验室供湿室培养。

1.3 湿室培养

将所采集的基物放在铺有吸水纸的培养皿（直径为 9cm）中。将无菌水 pH 调至 7，加入到培养皿中，充分湿润浸透培养基物，加盖封闭 24h 后，用 pH 计（衡欣科技股份有限公司，8695AZ，中国台湾）测定每个平皿内的 pH。倾去多余水分，放置于 25℃恒温培养箱（宁波江南仪器有限公司，GXZ-250A，中国浙江）中培养 90d。在体视显微镜（南京江南永新仪器有限公司，JSZ6，中国江苏）下逐日观察黏菌子实体发生情况并记录，至子实体成熟后取出晾干（李敏等 2021）。

1.4 形态鉴定

在体视显微镜下测量黏菌子实体大小，观察子实体的着生类型、基质层、菌柄、囊被层数及质地等特征，用解剖针剥开囊被，观察囊轴及假囊轴等形态结构。用光学显微镜（Olympus Corporation，BX53，日本）观察黏菌子实体时，一般以乳酚油作为浮载剂制片，对于含有石灰质的子实体则用 8% 的甘油作为浮载剂。制片时，取黏菌子实体在体视显微镜下剥开囊被，用洗耳球将孢子吹散后，以解剖针将子实体挑至载玻片上，加 1 滴 80% 乙醇浸润，待乙醇接近完全挥发时，加 1 滴 3% KOH 溶液，放置 10min，加 1 滴 8% 甘油，最后封片。光学显微镜下，观察囊被、柄、囊轴或假囊轴（如果有）的结构，孢子的形状、大小、纹饰，孢丝的纹饰、分枝和着生状态，石灰质的有无、形状和大小等显微性状。

根据子实体宏观和微观特征进行物种鉴定。黏菌的归属主要依据 Neubert *et al.*（1993，1995，2000）的分类系统，黏菌的名称则主要采纳 Lado（2005–2021）的处理意见。

1.5 数据分析

根据子实体的鉴定结果，进行黏菌目、

科、属、种的物种数目和相对丰度统计,对物种组成和群落结构进行分析,比较黏菌各属在两种基物和 4 个季节的分布状况。黏菌的物种多样性分析采用 α -多样性指数,包括:物种数量 (S)、多样性指数 (Shannon-Wiener index)、均匀度指数 (Pielou index) 和优势度指数 (Simpson index) 等。物种的相对丰度 (relative abundance, RA) 定义为某一物种的记录数占物种总数的比值;多样性指数 (Shannon-Wiener index) 计算公式为 $H' = -\sum(P_i) \ln P_i$, 式中 P_i 为物种 i 在整个群落中所占的比例;丰富度指数以物种数量代表;均匀度指数 (Pielou index) 计算公式为 $J = H'/H'_{max}$, H' 为实际观察的物种多样性指数, H'_{max} 为最大的物种多样性指数, $H'_{max} = \ln S$ (S 为群落中的总物种数);优势度指数 (Simpson index) 计算公式为 $D = \sum P_i^2$, $P_i^2 = n_i(n_i - 1)/(N(N - 1))$, n_i 为第 i 个物种的个体数, N 为群落的所有物种的个体数之和 (马克平 1994; 马克平和刘玉明 1994)。利用 one-way ANOVA 中的 Duncan's 检验法和独立样本 T 检验对数据进行差异性显著分析。采用 SPSS Statistics 20.0 软件统计分析。

采用主成分分析 (principal component analysis, PCA) 探讨不同基物和不同季节黏菌群落的分布规律 (Rojas & Stephenson 2007), 采用 Sørensen 相似性系数 (C_s) 分别对两种基物和 4 个季节黏菌群落的相似性进行分析 (Costa *et al.* 2014)。采用典型对应分析 (canonical correspondence analyses, CCA) 探讨黏菌分布与环境因子的关系 (Gao *et al.* 2018)。环境因子包括基物 (类型和 pH) 和气候因素 (温度、湿度、降雨量)。选用 Canoco5 软件进行 PCA 和 CCA 作图, 结合分析中的特征值、 P 值和 F 值等探讨影响黏菌分布的主要环境因子。

2 结果与分析

2.1 后河保护区柳杉林中黏菌的物种组成

在 120 个湿室中, 发生黏菌的湿室 68 个, 占 56.67%。其中, 培养活树树皮发生黏菌的湿室为 38 个, 占 31.67%; 培养凋落物发生黏菌的湿室为 30 个, 占 25.00%。根据形态特征鉴定后河保护区柳杉林中有黏菌 6 目 7 科 12 属 24 种 (表 1), 其中, 鹅绒菌目 Ceratiomyxales 1 种, 刺轴菌目 Echinosteliales 1 种, 无丝菌目 Liceales 6 种, 团毛菌目 Trichiales 9 种, 绒泡菌目 Physarales 3 种, 发网菌目 Stemonitales 4 种。以相对丰度来看, 优势种为混淆筛菌 *Cribraria confusa*, 相对丰度为 19.01%, 其次是灰团网菌 *Arcyria cinerea* 为 15.70%, 黑发菌 *Comatracha nigra*、蛇形半网菌 *Hemitrichia serpula* 和果形团网菌 *Arcyria pomiformis*, 相对丰度均为 8.26%。优势属为盖碗菌属 *Perichaena* (4 种), 占总物种数的 16.67%, 其次为团网菌属 *Arcyria*、筛菌属 *Cribraria* 和无丝菌属 *Licea* (各 3 种), 各占物种总数的 12.50%。优势科为团毛菌科 Trichiaceae (9 种), 占物种总数的 37.50%; 含有较多属的科有发网菌科 Stemonitaceae 和团毛菌科 Trichiaceae (各 3 属), 各占总属数量的 23.08%。优势目为团毛菌目 Trichiales, 含 9 个物种, 占物种总数的 37.50%; 含有最多属的目为团毛菌目 Trichiales 和发网菌目 Stemonitales, 各含有 3 个属, 分别占总属数量的 23.08%。

2.2 后河保护区柳杉林中黏菌的群落结构

2.2.1 两种基物上发生的黏菌群落的物种组成和分布状态: 柳杉活树树皮上发生的黏菌物种为 4 目 5 科 6 属 9 种, 相对丰度为 37.50%; 柳杉树下凋落物上发生的黏菌为 5 目 6 科 11 属 19 种, 相对丰度为 79.17%。其中刺轴菌 *E. minutum*、果形团网菌 *A. pomiformis*、混淆

表 1 后河保护区柳杉林中黏菌的物种组成及群落结构

Table 1 Species composition and community structure of myxomycetes in *Cryptomeria fortunei* forest of the Houhe National Nature Reserve

目 Order	科 Family	属 Genus	种 Species	基物类型 Substrate type	相对丰度 RA (%)
鹅绒菌目 Ceratiomyxales	鹅绒菌科 Ceratiomyxaceae	鹅绒菌属 <i>Ceratiomyxa</i>	鹅绒菌 <i>Ceratiomyxa fruticulosa</i>	凋落物 Litter	0.83
刺轴菌目 Echinosteliales	刺轴菌科 Echinosteliaceae	刺轴菌属 <i>Echinostelium</i>	刺轴菌 <i>Echinostelium minutum</i>	树皮 Bark	2.48
发网菌目 Stemonitales	发网菌科 Stemonitaceae	发菌属 <i>Comatracha</i>	黑发菌 <i>Comatracha nigra</i>	树皮、凋落物 Bark, litter	8.26
			粗壮发菌	凋落物	0.83
			<i>Comatracha suksdorfii</i>	Litter	
		亮皮菌属	闪光亮皮菌	凋落物	2.48
		<i>Lamproderma</i>	<i>Lamproderma scintillans</i>	Litter	
		颈环菌属	弧线颈环菌	凋落物	4.13
		<i>Collaria</i>	<i>Collaria arcyrionema</i>	Litter	
绒泡菌目 Physarales	绒泡菌科 Physaraceae	绒泡菌属 <i>Physarum</i>	钙丝绒泡菌 <i>Physarum decipiens</i>	凋落物 Litter	0.83
			鲜黄绒泡菌 <i>Physarum luteolum</i>	凋落物 Litter	1.65
		双皮菌属	垫形双皮菌	凋落物	1.65
		<i>Diderma</i>	<i>Diderma effusum</i>	Litter	
团毛菌目 Trichiales	团毛菌科 Trichiaceae	半网菌属 <i>Hemitrichia</i>	细柄半网菌 <i>Hemitrichia calyculata</i>	树皮、凋落物 Bark, litter	5.79
			蛇形半网菌 <i>Hemitrichia serpula</i>	树皮、凋落物 Bark, litter	8.26
		盖碗菌属	盖碗菌	凋落物	6.61
		<i>Perichaena</i>	<i>Perichaena corticalis</i>	Litter	
			扁盖碗菌 <i>Perichaena depressa</i>	凋落物 Litter	2.48
			掌状盖碗菌 <i>Perichaena pedata</i>	凋落物 Litter	1.65
			金孢盖碗菌 <i>Perichaena chrysosperma</i>	凋落物 Litter	0.83
		团网菌属	灰团网菌	树皮、凋落物	15.70
		<i>Arcyria</i>	<i>Arcyria cinerea</i>	Bark, litter	
			果形团网菌 <i>Arcyria pomiformis</i>	树皮 Bark	8.26
			暗红团网菌 <i>Arcyria denudata</i>	凋落物 Litter	0.83

待续

续表 1

无丝菌目	筛菌科	筛菌属	混淆筛菌	树皮	19.01
Liceales	Cribrariaceae	Cribraria	<i>Cribraria confusa</i>	Bark	
			紫筛菌	凋落物	2.48
			<i>Cribraria violacea</i>	Litter	
			小筛菌	凋落物	0.83
			<i>Cribraria microcarpa</i>	Litter	
	无丝菌科	无丝菌属	极小无丝菌	树皮	1.65
	Liceales	Licea	<i>Licea minima</i>	Bark	
			扁无丝菌	凋落物	1.65
			<i>Licea deplanata</i>	Litter	
			暗褐无丝菌	树皮	0.83
			<i>Licea belmontiana</i>	Bark	

筛菌 *C. confusa*、极小无丝菌 *Li. minima* 和暗褐无丝菌 *Li. belmontiana* 5 种黏菌仅在活树树皮上获得。鹅绒菌 *C. fruticulosa*、粗壮发菌 *C. suksdorfii* 和闪光亮皮菌 *La. scintillans* 等 15 种黏菌仅在凋落物基物上获得（表 1）。柳杉活树树皮与凋落物上的共有属为 3 属（图 1），共有物种为 4 种，分别是黑发菌 *C. nigra*、细柄半网菌 *H. calyculata*、蛇形半网菌 *H. serpula* 和灰团网菌 *A. cinerea*。两种基物上黏菌群落的 Sørensen 相似性系数较低（ $C_s=0.333$ ），表明柳杉林中活树树皮和凋落物上发生与分布的黏菌物种组成和群落结构存在明显差异。

图 2 为反映后河保护区柳杉林中 24 种黏菌在不同基物上的分布格局的主成分分析（PCA）结果。前两个轴的特征值分别是 35.83%和 23.34%。在凋落物上发生的黏菌群落距离较近，差异较小；在活树树皮上发生的黏菌群落距离也较近，差异较小。而凋落物与活树树皮两种基物上发生的黏菌群落之间距离较远，差异较大。

2.2.2 在 4 个季节中发生的黏菌群落的物种组成和分布状态：柳杉林中黏菌物种组成在不同季节间的发生存在差异（图 3），在春、夏、秋、冬 4 个季节间，黏菌物种数量发生最

多的是春季和冬季，都为 4 目 6 科 9 属 15 种，各占总物种数的 62.5%。其中，春季发生的黏菌物种中，团毛菌目 Trichiales 物种数量最多，为 1 科 3 属 8 种，占总物种数的 33.3%；冬季发生的黏菌物种中，同样以团毛菌目 Trichiales 物种数量最多，包含 1 科 3 属 7 种，占总物种数量的 29.2%。4 个季节中皆有发生的科为发网菌科 Stemonitaceae 和团毛菌科

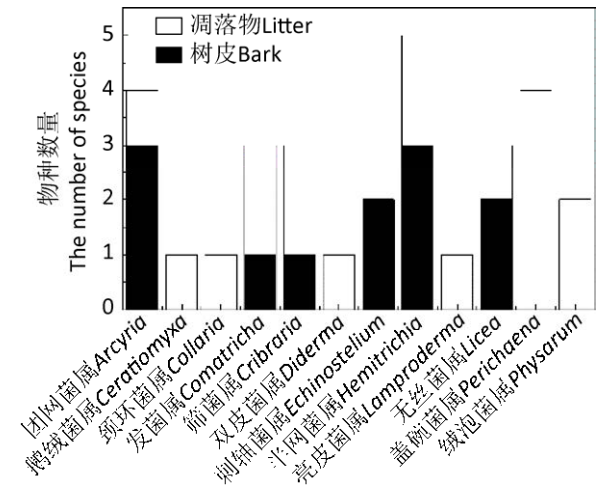


图 1 后河保护区柳杉林中不同基物上的黏菌属的物种数量

Fig. 1 Number of species of myxomycete genera on different substrates in *Cryptomeria fortunei* forest of the Houhe National Nature Reserve.

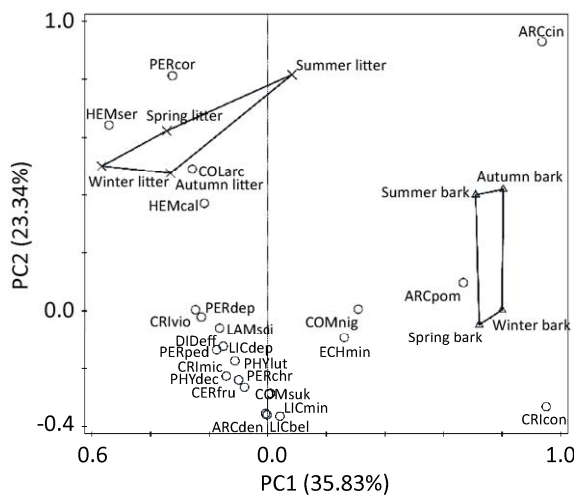


图 2 后河保护区柳杉林中黏菌与不同基物的主成分分析 CERfru: 鹅绒菌; ECHmin: 刺轴菌; COMnig: 黑发菌; COMsuk: 粗壮发菌; LAMsci: 闪光亮皮菌; COLarc: 弧线颈环菌; PHYdec: 钙丝绒泡菌; PHYlut: 鲜黄绒泡菌; DIDEff: 垫形双皮菌; HEMcal: 细柄半网菌; HEMser: 蛇形半网菌; PERcor: 盖碗菌; PERdep: 扁盖碗菌; PERped: 掌状盖碗菌; PERchr: 金孢盖碗菌; ARCCin: 灰团网菌; ARCpom: 果形团网菌; ARCDen: 暗红团网菌; CRIcon: 混淆筛菌; CRIvio: 紫筛菌; CRImic: 小筛菌; LICmin: 极小无丝菌; LICdep: 扁无丝菌; LICbel: 暗褐无丝菌。下同

Fig. 2 PCA of myxomycetes and different substrates in *Cryptomeria fortunei* forest of the Houhe National Nature Reserve. CERfru: *Ceratiomyxa fruticulosa*; ECHmin: *Echinostelium minutum*; COMnig: *Comatracha nigra*; COMsuk: *Comatracha suksdorfii*; LAMsci: *Lamproderma scintillans*; COLarc: *Collaria arcyrionema*; PHYdec: *Physarum decipiens*; PHYlut: *Physarum luteolum*; DIDEff: *Diderma effusum*; HEMcal: *Hemitrichia calyculata*; HEMser: *Hemitrichia serpulata*; PERcor: *Perichaena corticalis*; PERdep: *Perichaena depressa*; PERped: *Perichaena pedata*; PERchr: *Perichaena chrysosperma*; ARCCin: *Arcyria cinerea*; ARCpom: *Arcyria pomiformis*; ARCDen: *Arcyria denudata*; CRIcon: *Cribraria confusa*; CRIvio: *Cribraria violacea*; CRImic: *Cribraria microcarpa*; LICmin: *Licea minima*; LICdep: *Licea deplanata*; LICbel: *Licea belmontiana*. The same below.

Trichiaceae, 皆有发生的属为发菌属 *Comatracha*、半网菌属 *Hemitrichia*、盖碗菌属 *Perichaena* 和团网菌属 *Arcyria*, 皆有发生的种为黑发菌 *C. nigra*、盖碗菌 *P. corticalis*、灰团网菌 *A. cinerea* 和果形团网菌 *A. pomiformis*。仅在春季发生的黏菌物种为粗壮发菌 *C. suksdorfii*、鲜黄绒泡菌 *P. luteolum*、暗红团网菌 *A. denudata* 和极小无丝菌 *Li. minima*。夏季没有单独发生的物种。仅在秋季发生的黏菌物种为鹅绒菌 *C. fruticulosa*、金孢盖碗菌 *P. chrysosperma* 和扁无丝菌 *Li. deplanata*。仅在冬季发生的黏菌物种为钙丝绒泡菌 *P. decipiens*、小筛菌 *C. microcarpa* 和暗褐无丝菌 *Li. belmontiana*。

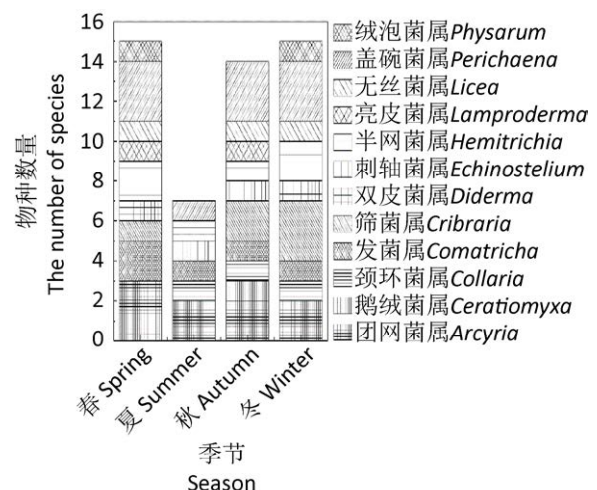


图 3 后河保护区柳杉林中不同季节发生的黏菌属的物种数量

Fig. 3 Number of species of myxomycete genera in *Cryptomeria fortunei* forest of the Houhe National Nature Reserve in different seasons.

图 4 为反映后河自然保护区柳杉林中 24 种黏菌在 4 个季节的分布格局的主成分分析 (PCA) 结果。前两个轴的特征值分别为 28.38% 和 20.70%。春季和冬季、夏季和秋季发生的黏菌群落距离较近, 差异较小。春季和冬季发生的黏菌群落与夏季和秋季发生的黏菌群落距离较远, 差异较大。

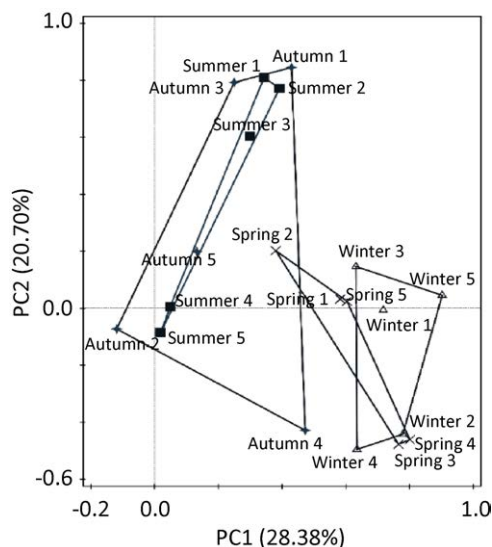


图 4 后河保护区柳杉林中黏菌与不同季节的主成分分析

Fig. 4 PCA of myxomycetes and different seasons in *Cryptomeria fortunei* forest of the Houhe National Nature Reserve.

4 个季节的黏菌群落 Sørensen 相似性系数 (C_s) 中 (表 2), 春季和冬季的群落相似性最高 ($C_s=0.333$, 共有种为 10 种), 春季和夏季的群落相似性最低 ($C_s=0.227$, 共有种为 5 种)。此外, 春季和秋季的群落相似性 $C_s=0.276$, 共有种为 8 种, 夏季和秋季的群落相似性 $C_s=0.286$, 共有种为 6 种, 夏季和冬季的群落相似性 $C_s=0.273$, 共有种为 6 种, 秋季和冬季的群落相似性 $C_s=0.310$, 共有种为 9 种。

2.2.3 后河保护区柳杉林中的黏菌物种多样性: 柳杉林中活树树皮和凋落物上的黏菌物种多样性存在差异 (表 3)。柳杉林中黏菌群落的物种多样性指数为 $H'=2.684$, 优势度指数为 $D=0.087$, 均匀度指数为 $J=0.559$ 。凋落物上出现的黏菌物种数量 (S) 高于活树树皮, Shannon-Wiener 物种多样指数 ($H'=0.4127 \pm 0.1097$) 也高于活树树皮 ($H'=0.3739 \pm 0.1217$), 表明在柳杉林中黏菌的发生对地面凋落物的偏好性大于活树树皮。凋落物和活树树皮两

种基物共有的黏菌物种为 4 种, 占活树树皮基物上发生黏菌物种数的 44.4%, 占凋落物基物上发生黏菌的 21.1%。凋落物上发生的黏菌群落的均匀度 ($J=0.0859 \pm 0.0228$) 高于活树树皮 ($J=0.0778 \pm 0.0253$), 优势度指数 ($D=0.0006 \pm 0.0004$) 低于活树树皮 ($D=0.0025 \pm 0.0012$), 但差异均不显著。

表 2 四个季节发生的黏菌群落间的相似性

Table 2 Similarities among myxomycete communities in four seasons

季节	春	夏	秋	冬
Season	Spring	Summer	Autumn	Winter
春 Spring		0.227	0.276	0.333
夏 Summer	5		0.286	0.273
秋 Autumn	8	6		0.310
冬 Winter	10	6	9	

注: 右上部为季节间相似性系数, 左下部为季节间的共有种数

Note: Sørensen's coefficient of community for pairwise myxomycetes assemblages from four seasons (upper right) and the number of species shared in common (lower left).

在四季中, 柳杉林中以春季发生的黏菌的物种多样性最高, 而以夏季发生的黏菌的物种多样性最低 (表 3)。春季的 Shannon-Wiener 物种多样指数 H' 为 0.2987 ± 0.1564 , 物种丰富度 (物种数量) S 为 15, 物种的相对丰度为 62.50%。夏季的 Shannon-Wiener 物种多样指数 H' 为 0.1105 ± 0.0949 , 物种丰富度 (物种数量) S 为 7, 物种的相对丰度为 29.17%。春季与夏季黏菌物种多样性差异显著, 与秋季和冬季黏菌物种多样性差异不显著。

2.3 后河保护区柳杉林中黏菌物种与环境因素之间的关系

黏菌物种与环境因素的典型对应分析 (CCA) (图 5), 前两个轴的特征值分别是 77.75% 和 36.00%, 累计值占特征值总和的 76.39%。物种坐标靠近中心说明物种对所有

表 3 后河保护区柳杉林中黏菌的物种多样性

Table 3 Species diversity of myxomycetes in *Cryptomeria fortunei* forest of the Houhe National Nature Reserve

指数	春	夏	秋	冬	树皮	凋落物
Index	Spring	Summer	Autumn	Winter	Bark	Litter
多样性指数	0.2987±0.1564 ^a	0.1105±0.0949 ^b	0.1967±0.0589 ^{ab}	0.2726±0.0875 ^{ab}	0.3739±0.1217 ^a	0.4127±0.1097 ^a
Shannon-Wiener index (<i>H'</i>)						
丰富度指数	15	7	14	15	9	19
Number of species (<i>S</i>)						
物种相对丰度	62.50	29.17	58.33	62.50	37.50	79.17
Relative abundance (%)						
均匀度系数	0.0622±0.0326 ^a	0.0230±0.0197 ^b	0.0410±0.0123 ^{ab}	0.0567±0.0182 ^{ab}	0.0778±0.0253 ^a	0.0859±0.0228 ^a
Pielou index (<i>J</i>)						
优势度指数	0.0004±0.0003 ^a	0.0001±0.0002 ^a	0.0002±0.0004 ^a	0.0036±0.0065 ^a	0.0025±0.0012 ^a	0.0006±0.0004 ^a
Simpson index (<i>D</i>)						

注：同列标有不同小写字母者表示组间差异显著 ($P<0.05$)
Note: The same column with different lowercase letters means significant difference between groups ($P<0.05$).

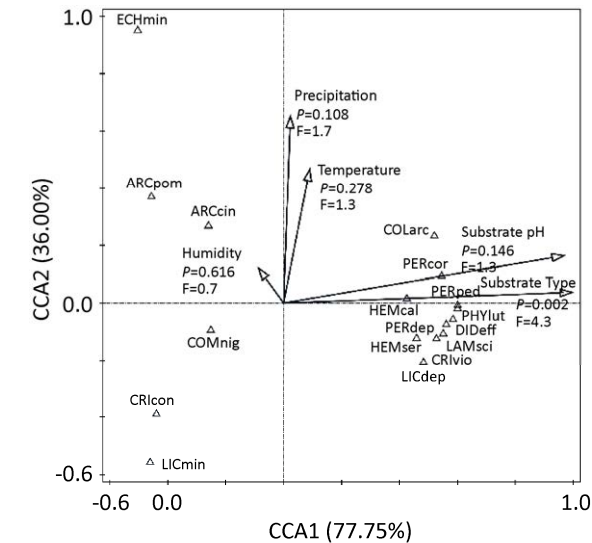


图 5 后河保护区柳杉林中黏菌与环境因素的 CCA 分析
Fig. 5 CCA plots of myxomycetes in relation to environmental variables in *Cryptomeria fortunei* forest in the Houhe National Nature Reserve.

环境因素适应能力强，坐标位于边缘说明物种适应在某一特殊环境中生长，坐标相近表示生长环境有相似。结果表明，柳杉林中黏菌分布受基物类型 ($P=0.002$) 的影响显著，

其中鲜黄绒泡菌 *P. luteolum*、扁盖碗菌 *P. depressa* 和细柄半网菌 *H. calyculata* 等 11 个物种与基物类型相关，而黑发菌 *C. nigra*、灰团网菌 *A. cinerea* 和果形团网菌 *A. pomiformis* 等 6 种与基物类型不相关。黏菌分布受降雨量 ($P=0.108$)、基物 pH ($P=0.146$)、温度 ($P=0.278$) 和湿度 ($P=0.616$) 的影响不显著。

3 讨论

柳杉的形态特征是树高且直，树干粗壮，树皮红棕色并开裂成长条纤维状，柳杉叶内向弯曲以螺旋状排列（余林 2019），这种树皮特征比榉树 *Zelkova serrata* 等所具有的光滑的树皮更适合黏菌孢子的附着以及黏菌生活周期的进行（Takahashi 2014）。通过在后河国家级自然保护区柳杉林中采集基物进行温室培养，共获得 24 种黏菌，其中丰富度最高的物种为混淆筛菌 *C. confusa*。这与 Takahashi（2014）从日本柳杉 *C. japonica* 树皮上获得的黏菌数目相似（23 种）。随后 Takahashi *et al.*（2018）在日本九州岛和本州岛的 24 个不同

区域采集 188 棵柳杉 *C. japonica* 树皮, 培养获得黏菌 38 种, 其中丰富度最高物种是刚丝叉丝菌 *Paradiacheopsis rigida* 和混淆筛菌 *C. confusa*, 与我们的结果基本一致, 且有 7 种与中国后河保护区柳杉林中获得黏菌相同, 分别为紫筛菌 *C. violacea*、混淆筛菌 *C. confusa*、灰团网菌 *A. cinerea*、果形团网菌 *A. pomiformis*、盖碗菌 *P. corticalis*、小筛菌 *C. microcarpa* 和刺轴菌 *E. minutum*。其中发生在柳杉树皮上的黏菌 9 种, 与日本柳杉 *C. japonica* 树皮上发生的黏菌共有物种数为 4 种, 分别为混淆筛菌 *C. confusa*、灰团网菌 *A. cinerea*、果形团网菌 *A. pomiformis* 和刺轴菌 *E. minutum*。中国后河保护区柳杉林与日本柳杉 *C. japonica* 林中活树树皮上黏菌物种组成的相似性较小。

有研究结果表明, 与活树树皮相关的黏菌物种组成常常与凋落物不同 (Stephenson 1989)。本研究中基物类型对柳杉林中黏菌分布有较大影响, 林地中凋落物上发生的黏菌种类和数量多于柳杉活树树皮, 活树树皮基物上发生无丝菌属 *Licea* 物种相对较多, 而双皮菌属 *Diderma* 和绒泡菌属 *Physarum* 等含有石灰质的黏菌物种则很少发生; 在凋落物上的情况则相反, 双皮菌属 *Diderma* 和绒泡菌属 *Physarum* 等含有石灰质的黏菌物种以及盖碗菌属 *Perichaena* 等的发生相对较多, 这与 Stephenson (1989) 和 Takahashi (2014) 研究结果相似, 表明活树树皮和凋落物具有适合不同黏菌群落组成分布的营养和环境条件。在不同基物类型之间, 黏菌群落结构与分布组成的不同, 反映的是微生境条件差异的影响。一些研究表明 pH 对树皮黏菌分布的影响和重要性 (Everhart *et al.* 2008; Vaz *et al.* 2017), 本研究的结果进一步证实基物的 pH 对其上黏菌群落组成具有影响, 柳杉活树树皮的 pH 较低呈明显酸性, 不利于含石灰质的黏菌子实体形成, 而柳杉林地中凋落物的 pH

则是近中性。

有研究表明, 黏菌的发生模式、物种组成和物种多样性都受到季节的影响, 暖湿季的黏菌物种组成和物种多样性高于冷干季 (Ko *et al.* 2011)。本研究中, 季节因素对黏菌群落的影响也呈现出差异。柳杉林中黏菌物种多样性在春季、秋季、冬季的差异不明显, 只有在夏季物种多样性明显较低, 与 Ko *et al.* (2011) 的结果略有不同。产生这种差异的原因可能是采样地点夏季多暴雨, 降雨对黏菌孢子的冲刷作用使其难以附着在树皮、落叶等基物上。在不同季节, 黏菌群落组成与结构的不同, 反映的是整个环境包括温度、湿度、降雨量等的变化对黏菌群落的影响 (Takahashi & Hada 2010), 本研究结果中这种环境因素的影响并不显著 (图 5)。

日本柳杉遍布除北海道外的日本全境。Takahashi *et al.* (2018) 发现日本柳杉 *C. japonica* 林中活树树皮上发生的黏菌共有 38 种。在我国, 柳杉广泛分布于东部亚热带山地 (于永福 1995), 然而此前只有徐美琴等 (2006) 对柳杉树皮进行湿室培养获得 7 种黏菌的报道, 本研究目前在柳杉林中获得 24 种黏菌, 我们对柳杉林中黏菌的物种群落组成研究还很局限。今后, 应在柳杉分布的广大区域系统研究黏菌的物种分布、群落组成和时空变化, 为比较柳杉与日本柳杉 *C. japonica* 林中黏菌区系分布和物种演替奠定基础, 从而进一步探索黏菌在柳杉林这一独特生境中的生态功能。

[REFERENCES]

- Costa AAA, Bezerra ACC, Lima VXD, Cavalcanti LDH, 2014. Diversity of myxomycetes in an environmentally protected area of Atlantic Forest in northeastern Brazil. *Acta Botanica Brasilica*, 28(3): 445-455
- Dai D, Okorley BA, Li Y, Zhang B, 2020. Life cycles of

- myxogastria *Stemonitopsis typhina* and *Stemonitis fusca* on agar culture. *Journal of Eukaryotic Microbiology*, 67(1): 66-75
- Dai D, Xu XQ, Wang SY, Li Y, Zhang B, 2021. Life cycle and microstructure formation during sporulation of *Physarum cinereum*. *Mycosystema*, 40(2): 379-386 (in Chinese)
- Everhart SE, Keller HW, Ely JS, 2008. Influence of bark pH on the occurrence and distribution of tree canopy myxomycete species. *Mycologia*, 100(2): 191-204
- Gao Y, Yan SZ, Wang GW, He G, Chen SL, 2018. Myxomycete diversity and ecology in the Baotianman National Nature Reserve, a subtropical mountain forest in central China. *Fungal Ecology*, 35: 10-19
- Kamono A, Meyer M, Cavalier-Smith T, Fukui M, Fiore-Donno AM, 2013. Exploring slime mould diversity in high-altitude forests and grasslands by environmental RNA analysis. *FEMS Microbiology Ecology*, 84: 98-109
- Ko TWK, Stephenson SL, Hyde KD, Lumyong S, 2011. Influence of seasonality on the occurrence of myxomycetes. *Chiang Mai Journal of Science*, 38(1): 71-84
- Lado C, 2005-2021. An on-line nomenclatural information system of Eumycetozoa. <http://www.nomen.eumycetozoa.com> (accessed 20 July 2021)
- Li M, Chen SL, 2021. Research progress on species diversity of myxomycetes and its relationship with influencing factors. *Mycosystema*, 40(2): 270-281 (in Chinese)
- Li M, Gao Y, Zhang X, Wang R, Chen SL, Yan SZ, 2021. Specific composition and ecological characteristics of myxomycetes in Xingshan County, Hubei Province. *Mycosystema*, 40(2): 357-371 (in Chinese)
- Li ZZ, Wang LJ, Huang HW, Tang DK, Pu YH, Zheng CY, 2005. Situation and strategy of biodiversity conservation in the Houhe National Nature Reserve, Hubei Province, China I. Situation and study of biodiversity. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 23(6): 592-600 (in Chinese)
- Ma KP, 1994. Measurement of biotic community diversity. I. α diversity (Part 1). *Chinese Biodiversity*, 2(3): 162-168 (in Chinese)
- Ma KP, Liu YM, 1994. Measurement of biotic community diversity. I. α diversity (Part 2). *Chinese Biodiversity*, 2: 231-239 (in Chinese)
- Ndiritu GG, Spiegel FW, Stephenson SL, 2009. Distribution and ecology of the assemblages of myxomycetes associated with major vegetation types in Big Bend National Park, USA. *Fungal Ecology*, 2: 168-183
- Neubert H, Nowotny W, Baumann K, 1993. Die Myxomyceten Deutschlands und des angrenzenden Alpenraumes unter besonderer Berücksichtigung Österreichs. Bd.1. Karlheinz Baumann Verlag, Gomaringen. 1-343
- Neubert H, Nowotny W, Baumann K, 1995. Die Myxomyceten Deutschlands und des angrenzenden Alpenraumes unter besonderer Berücksichtigung Österreichs. Bd.2. Karlheinz Baumann Verlag, Gomaringen. 1-368
- Neubert H, Nowotny W, Baumann K, 2000. Die Myxomyceten Deutschlands und des angrenzenden Alpenraumes unter besonderer Berücksichtigung Österreichs. Bd.3. Karlheinz Baumann Verlag Gomaringen. 1-391
- Rojas C, Stephenson SL, 2007. Distribution and ecology of myxomycetes in the high-elevation oak forests of Cerro Bellavista, Costa Rica. *Mycologia*, 99(4): 534-543
- Rojas C, Stephenson SL, 2012. Rapid assessment of the distribution of myxomycetes in a southwestern Amazon forest. *Fungal Ecology*, 5: 726-733
- Ronikier A, Ronikier M, 2009. How 'alpine' are nivicolous myxomycetes? A worldwide assessment of altitudinal distribution. *Mycologia*, 101: 1-16
- Schnittler M, Erastova DA, Shchepin ON, Heinrich E, Novozhilov YK, 2015. Four years in the Caucasus—observations on the ecology of nivicolous myxomycetes. *Fungal Ecology*, 14:

105-115

- Schnittler M, Stephenson SL, 2000. Myxomycete biodiversity in four different forest types in Costa Rica. *Mycologia*, 92: 626-637
- Stephenson SL, 1989. Distribution and ecology of myxomycetes in temperate forests. II. Patterns of occurrence on bark surface of living trees, leaf litter, and dung. *Mycologia*, 81(4): 608-621
- Takahashi K, 2014. Influence of bark characteristics on the occurrence of corticolous myxomycetes in western Japan. *Journal of Japanese Botany*, 89: 35-47
- Takahashi K, Hada Y, 2010. Geographical distribution of myxomycetes on coniferous deadwood in relation to air temperature in Japan. *Mycoscience*, 51(4): 281-290
- Takahashi K, Harakon Y, Fukasawa Y, 2018. Geographical distribution of myxomycetes living on *Cryptomeria japonica* bark in Japan. *Mycoscience*, 59(5): 379-385
- Vaz ABM, dos Santos DS, Cardoso D, Van DBC, De QLP, Badotti F, Fonseca PLC, Cavalcanti LH, Goes-Neto A, 2017. Corticolous myxomycetes assemblages in a seasonally dry tropical forest in Brazil. *Mycoscience*, 58(4): 282-289
- Velloso JRP, Putzke J, Schmitz D, Pereira AB, Schaefer CEGR, Cavalcanti LD, 2020. *Dianema nivale*—a myxomycete (Amoebozoa) new to the Antarctic. *Polar Science*, 26: 100598
- Wrigley de Basanta D, Lado D, Estrada-Torres C, Stephenson LS, 2010. Biodiversity of myxomycetes in subantarctic forests of Patagonia and Tierra del Fuego, Argentina. *Nova Hedwigia*, 90: 45-79
- Xu MQ, Chen P, Li Y, Chen SL, 2006. Preliminary study on the moist chamber culture of myxomycetes from conical bark. *Journal of Fungal Research*, 4(1): 14-19 (in Chinese)
- Yu L, 2019. Discussion on ecological characteristics and cultivation techniques of *Cryptomeria fortunei*. *Forestry Exploration and Design*, 48(4): 89-90 (in Chinese)
- Yu YF, 1995. Origin, evolution and distribution of the Taxodiaceae. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 33(4): 362-389 (in Chinese)

[附中文参考文献]

- 戴丹, 徐晓琪, 王赛禹, 李玉, 张波, 2021. 灰绒泡菌生活史及其子实体发育过程的显微观察. *菌物学报*, 40(2): 379-386
- 李敏, 陈双林, 2021. 黏菌物种多样性及其与影响因子关系的研究进展. *菌物学报*, 40(2): 270-281
- 李敏, 高扬, 张鲜, 王睿, 陈双林, 闫淑珍, 2021. 湖北省兴山县黏菌的物种组成与生态特征. *菌物学报*, 40(2): 357-371
- 李作洲, 王力钧, 黄宏文, 唐登奎, 蒲云海, 郑昌毅, 2005. 湖北后河国家级自然保护区生物多样性及其保护对策 I. 生物多样性现状及其研究. *武汉植物学研究*, 23(6): 592-600
- 马克平, 1994. 生物群落多样性的测度方法: I α 多样性的测度方法(上). *生物多样性*, 2(3): 162-168
- 马克平, 刘玉明, 1994. 生物群落多样性的测度方法: I α 多样性的测度方法(下). *生物多样性*, 2: 231-239
- 徐美琴, 陈萍, 李玉, 陈双林, 2006. 湿室培养针叶树皮生黏菌的初步研究. *菌物研究*, 4(1): 14-19
- 于永福, 1995. 杉科植物的起源、演化及其分布. *植物分类学报*, 33(4): 362-389
- 余林, 2019. 柳杉的生态学特性与栽培方法探讨. *林业勘查设计*, 48(4): 89-90

(本文责编: 王敏)