

红树林生态系统中不同生境不同深度土壤的可培养真菌的多样性

刘敏 黄惠琴 徐友林 孙前光 朱军 邹潇潇 鲍时翔*

(中国热带农业科学院热带生物技术研究所 农业部热带作物生物学与遗传资源利用
重点实验室 海南 海口 571101)

摘要:【目的】了解八门湾红树林生态系统中不同生境(潮间带、海洋到红树区的过渡带、海桑红树区)和不同深度土壤的可培养真菌的多样性。【方法】采用稀释涂布平板法分离土壤中的真菌,利用形态学观察和 ITS rDNA 序列分析技术研究可培养真菌的表观和遗传多样性。【结果】从八门湾红树林生态系统的 3 个不同生境中分离到 257 株真菌,分别属于 21 属 28 种,其中青霉属(*Penicillium*)、曲霉属(*Aspergillus*)和木霉属(*Trichoderma*)为优势类群。来自不同生境或者同一生境不同采样深度的土壤真菌种类组成不同,并且有些真菌类群只出现在特定的样品中。从空间角度看,红树区土壤样品的真菌多样性高于其他两个生境的土壤样品;从垂直角度看,潮间带和过渡带的表层土壤样品的真菌多样性高于深层土壤样品,而红树区的深层土壤样品真菌多样性高于表层土壤样品。【结论】八门湾红树林生态系统中的可培养真菌资源丰富,种类多样性较高,但不同生境或不同深度的可培养真菌分布存在较大的差异。这些结果揭示了红树林土壤中可培养真菌的生态分布特点,也为红树林真菌资源的开发利用提供了基础的背景资料。

关键词: 热带, 海洋真菌, 生物多样性, 形态分类, 分子系统发育

Diversity of culturable soil fungi in different habitats and depths in mangrove ecosystem

LIU Min HUANG Hui-Qin XU You-Lin SUN Qian-Guang ZHU Jun ZOU Xiao-Xiao
BAO Shi-Xiang*

(Key Laboratory of Biology and Genetic Resources of Tropical Crop, Institute of Tropical Bioscience and Biotechnology, CATAS, Haikou, Hainan 571101, China)

Abstract: [Objective] To understand the diversity of culturable fungal resource isolated from soil in different habitats (intertidal zone, transitional zone from sea to mangrove, mangrove forest zone) of mangrove ecosystem. [Methods] Diluted sediment suspensions were spread on plates to isolate fun-

基金项目: 国家科技支撑计划项目(No. 2012BAC18B04-5); 国家 973 计划项目(No. 2011CB200900); 海南省重大科技项目(No. ZDZX2013023-1)

*通讯作者: Tel: 86-898-66988564; ✉: baoshixiang@itbb.org.cn

收稿日期: 2014-01-14; 接受日期: 2014-02-17; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2014-02-20

gi. The phylogenetic and genetic diversity of fungal isolates was analyzed using morphology and ITS rDNA sequences, respectively. **[Results]** In total 257 fungi belonging to 21 genera and 28 species were isolated from soils in 3 different habitats of mangrove ecosystem. *Penicillium*, *Aspergillus* and *Trichoderma* were the dominant fungal populations. Fungal populations from different habitats or different depths were different. Spatially, diversity index from the mangrove forest zone were higher than those from the other two habitats; vertically, diversity index of surface-layer samples were higher than those of deep-layer samples in intertidal and transitional zones, while diversity index of deep-layer samples were higher than those of surface-layer samples in mangrove forest zone. **[Conclusion]** The ecological distribution characteristics of culturable soil fungi in mangrove ecosystem provided background data of fungal resource for us to explore potential applications.

Keywords: Tropical zone, Marine fungi, Biodiversity, Morphological taxonomy, Molecular phylogeny

红树林生态系统是陆地向海洋过度的特殊湿地生态系统,是全球变化的生态敏感区之一,这是一个相对开放且复杂的体系,因潮水和淡水注入等因素,它与其他环境间存在频繁的交流^[1]。红树林在降解污染物、净化海水、维持生物多样性、维护河口海岸食物链、促进近海渔业、促淤和防浪护堤等方面发挥着重要作用^[1-2]。

红树林植物每年向临近水域或沉积物中贡献大量的有机碳(主要为红树林植物的凋落物),这使得红树林生态系统中的微生物大量滋生。微生物被认为是红树林生态系统中各营养元素(包括碳、氮、硫、磷)转化和再循环的最重要生物因素,它们与红树林植物间复杂而有效的相互作用,使得红树林生态系统的能量流动和物质循环高速运转。红树林沉积物具有强还原性、低 pH 值、高含盐量、营养丰富等特征,蕴藏了巨大并富有特色的微生物资源^[3-4]。丝状真菌是红树林微生物中的一个主要类群,海洋真菌的第二大类群^[5]。澳大利亚的真菌学家 Cribb 于 1955 年首次对红树林真菌进行了报道^[6]。Schmit 等^[7]统计了全球范围内来自红树林生境的真菌 280 种,并且利用统计分析方法分析了生物地理和宿主植物对潮间带红树林丝状真菌分布的影响,形成大西洋(106 种)、太平洋(173 种)和印度洋(128 种) 3 个明显的地理分支。近几年,我国学者也纷纷对红树林真菌做了相关的研究,主要集中于内生真菌^[8-9]、病原真菌^[10]、漂流木、固着木和腐叶真菌^[11]、以及红树林底泥真菌的资源调查^[12-13]。但是对于红树林生态系统

不同生境的比较研究还没有报道。本研究采用真菌形态学和分子生物学相结合的方法,对红树林 3 个不同生境中不同深度的可培养真菌的多样性及分布特点进行了比较分析,为红树林真菌资源的开发利用提供了理论依据,同时也有助于了解真菌的分布与环境的关系。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 样品的采集:样品采集于海南省文昌市八门湾红树林保护区及毗邻海域,设立了 3 个采样地点,分别为潮间带(距离红树植物约 30 m)、海洋到红树林区的过渡带(距离红树植物约 10 m)及海桑红树区内,采集表层土壤(0-5 cm)和深层土壤(25-30 cm),总计 6 份土壤样品,置于采样冰盒中,及时带回实验室进行相关分析。

1.1.2 培养基:为了分离到更多的真菌菌株,选用 4 种不同的培养基,分别为马丁氏培养基、PDA 培养基、察氏培养基和 A 培养基^[13]。

1.2 方法

1.2.1 真菌的分离纯化及形态学鉴定:采用稀释平板分离法对土壤样品进行真菌的分离培养。先将采集的土壤样品除去大的杂质,然后分别称取 10 g 土壤样品置于装有 90 mL 无菌水的三角瓶中,在涡旋振荡器上混匀,置于 200 r/min 的摇床上振荡 30 min,然后稀释成 10^{-1} 、 10^{-2} 、 10^{-3} 三个梯度,每个稀释梯度设 3 个重复,取 200 μ L 涂布培养基上,置于 28 $^{\circ}$ C 培养箱中培养并定期观察。不同的菌株

分别在马丁氏培养基平板上划线稀释, 在高倍体式镜下进行单孢分离, 然后纯化保存。采用插片法观察各菌株的形态特征, 参考《真菌鉴定手册》^[14]、《真菌的形态和分类》^[15]、《中国真菌志》^[16-17]及《半知菌属图解》^[18]等书籍, 进行形态学鉴定。

1.2.2 真菌 ITS 序列分析的分子鉴定: 真菌总 DNA 提取: 用接种针挑取菌体置于装有石英砂并灭菌好的破碎管中, 加入 500 μL 的无菌水和等体积的氯仿/异戊醇(24:1, 体积比)抽提液, 置于 FastPrep 核酸快速提取仪上振荡破碎, 转速为 5.0 m/s, 时间为 45 s, 12 000 r/min 离心 10 min, 取上清液, 将上清与 0.6 倍体积的异丙醇混匀, 4 $^{\circ}\text{C}$ 过夜, 12 000 r/min 离心 10 min, 沉淀用 70%乙醇洗涤, 12 000 r/min 离心 10 min, 弃上清, 自然风干, 加入 20 μL 无菌水, -20 $^{\circ}\text{C}$ 保存待用。

真菌 ITS 序列分析采用 ITS 通用引物(ITS5: 5'-GGAAGTAAAAGTCGTAACAAGG-3', ITS4: 5'-TCCTCCGCTTATTGATATGC-3')^[19]。符合测序要求的 PCR 产物送上海生工生物工程技术服务有限公司进行纯化并测序。在 GenBank 中进行 BLAST 搜索, 找出同源性最高且已知分类地位的真菌菌株, 结合形态学观察, 分析鉴定待测菌株的种属。

1.2.3 真菌的多样性和分布特征分析方法: 多样性和分布特征主要是通过对多样性指数、均匀度指数、丰富度指数进行分析^[20]。多样性分析采用

Shannon-Wiener 多样性指数: $H' = -\sum_{i=1}^n P_i \times \ln P_i$, 其

中 $P_i = N_i/N$ 即第 i 种占总个体数 N 的比例; 均匀度分析采用 Pielou 指数 $J = H'/H'_{\max}$, 其中 $H'_{\max} = \ln S$ (S 为物种数); 丰富度分析采用 Margalef 指数: $D = (S-1)/\ln N$, 式中 S 为分离得到的真菌属的数量, N 为所分离真菌的总数。

2 结果与分析

2.1 真菌鉴定结果

通过在 4 种不同真菌培养基上分离培养, 分离得到 257 株海洋真菌, 其中通过马丁氏培养基分离

到 84 株、PDA 培养基分离到 56 株、察氏培养基分离到 53 株和 A 培养基分离到 64 株。通过真菌的 ITS 序列分析和形态学鉴定, 这些海洋真菌分别属于 21 属 28 种, 主要包括青霉属(*Penicillium*)、曲霉属(*Aspergillus*)、木霉属(*Trichoderma*)、头孢霉属(*Cephalosporium*)、枝顶孢属(*Acremonium*)、小克银汉霉属(*Cunninghamella*)、镰刀霉属(*Fusarium*)、正青霉属(*Eupenicillium*)、克鲁维酵母属(*Kluyveromyces*)、拟青霉属(*Paecilomyces*)、假霉样真菌属(*Pseudallescheria*)等(表 1)。

2.2 红树林不同生境的土壤中可培养真菌的种类组成与分布

来自不同采样地点以及同一地点的不同采样深度的土壤真菌种类和数量都不同(表 2)。红树区深层土壤中的真菌数量和种类最多, 有 15 个属, 主要包括青霉属(32%)、曲霉属(16%)、木霉属(11%)、头孢霉属(7%)、枝顶孢属(5%)和镰刀霉属(5%)等; 海洋到红树林过渡带的表层土壤中的真菌数量和种类其次, 有 10 个属, 主要包括青霉属(31%)、曲霉属(31%)、木霉属(22%)和枝顶孢属(4%)等; 海洋潮间带深层土壤中的真菌数量和种类最少, 仅有 4 个属(表 2), 主要包括青霉属(49%)、曲霉属(40%)、木霉属(9%)和拟青霉(9%)。青霉属、曲霉属和木霉属在所有样品中都存在, 并且所占比例较高。然而, 有些真菌类群只出现在特定的样品中, 如镰刀霉属只出现在红树区土壤(包括表层和深层)样品中, 球托霉属(*Gongronella*)和 *Geosmithia* 只出现在海洋潮间带表层土壤样品中, 裸子囊菌属(*Gymnoascus*)、*Hortaea*、假霉样真菌属和齿梗孢属(*Scolecobasidium*)只出现在海洋到红树林区的过渡带的表层土壤样品中。

2.3 红树林不同生境的土壤中可培养真菌的多样性分析

从空间角度上看, 红树区土壤样品的真菌多样性指数、均匀度指数和丰富度指数均高于其他两个生境的土壤样品。其中红树区的深层土壤样品的真

表 1 从红树林不同生境土壤中分离到的真菌的鉴定结果
Table 1 Identification of fungi isolated from soil of different mangrove habitats

真菌属 Fungal genera	种类 Fungal species	代表性菌株 Representative strains	登录号 GenBank accession No.	相似性 Similarity (%)	形态鉴定 Morphology
<i>Acremonium</i>	<i>Acremonium macroclavatum</i>	HF12720	JQ889702	96	Y
<i>Aspergillus</i>	<i>Aspergillus nomius</i>	HF12437	JQ889693	99	Y
	<i>Aspergillus terreus</i>	DF12079	JQ889700	99	Y
<i>Cephalotheca</i>	<i>Cephalotheca</i> sp.	HF12071	JQ889707	83	Y
<i>Cunninghamella</i>	<i>Cunninghamella bainieri</i>	DF12098	JQ889699	93	Y
<i>Eupenicillium</i>	<i>Eupenicillium shearii</i>	HF12728	JQ863221	99	Y
<i>Fusarium</i>	<i>Fusarium solani</i>	HF12735	JQ889701	99	Y
	<i>Fusarium larvarum</i>	HF12365	JQ863220	92	Y
<i>Geosmithia</i>	<i>Geosmithia microcorthyli</i>	HF12048	JQ863228	90	Y
<i>Gongronella</i>	<i>Gongronella butleri</i>	HF12085	JQ889697	99	Y
<i>Graphium</i>	<i>Graphium basitruncatum</i>	HF12719	JQ889703	98	Y
<i>Gymnoascus</i>	<i>Gymnoascus punctatus</i>	HF12182	JQ889706	99	Y
<i>Hortaea</i>	<i>Hortaea werneckii</i>	HF12474	JQ863218	99	Y
<i>Hypocrea</i>	<i>Hypocrea lixii</i>	HF12384	JQ889694	99	Y
<i>Kluyveromyces</i>	<i>Kluyveromyces</i> sp.	HF12172	JQ863227	99	Y
<i>Massarina</i>	<i>Massarina</i> sp.	HF12700	JQ889692	86	Y
<i>Metarhizium</i>	<i>Metarhizium anisopliae</i>	HF12682	JQ889704	99	Y
<i>Paecilomyces</i>	<i>Paecilomyces lilacinus</i>	DF12064	JQ863231	99	Y
<i>Penicillium</i>	<i>Penicillium gallaicum</i>	HF12254	JQ863224	97	Y
	<i>Penicillium verruculosum</i>	HF12230	JQ889696	96	Y
	<i>Penicillium decumbens</i>	HF12348	JQ889705	99	Y
	<i>Penicillium verruculosum</i>	HF12058	JQ889708	99	Y
	<i>Penicillium</i> sp.	HF12014	JQ889710	99	Y
<i>Pseudallescheria</i>	<i>Pseudallescheria boydii</i>	HF12208	JQ863226	99	Y
	<i>Pseudallescheria boydii</i>	DF12100	JQ889698	99	Y
<i>Scolecobasidium</i>	<i>Scolecobasidium</i> sp.	HF12231	JQ863225	87	Y
<i>Trichoderma</i>	<i>Trichoderma</i> sp.	DF12075	JQ863230	99	Y
<i>Viridispora</i>	<i>Viridispora alata</i>	DH12071	JQ863229	91	Y

注：Y：已经过形态学鉴定。

Note: Y: Morphological identification has been carried out.

菌多样性指数和丰富度指数在所有土壤样品中都是最高的, 分别为 2.26 和 3.46; 过渡带的表层土壤样品的这 2 个生态指数其次, 分别为 1.67 和 2.31; 潮间带的深层土壤样品最小, 分别为 1.03 和 0.84 (表 3)。所有样品的均匀度指数, 红树区深层土壤样品的最高(为 0.83), 潮间带和过渡带土壤

样品中的相差不大(介于 0.72–0.74, 表 3)。从垂直角度上看, 潮间带和过渡带的表层土壤样品的真菌多样性指数和丰富度指数都高于深层土壤样品, 但是均匀度指数表层和深层土壤样品的相当; 红树区的深层土壤样品的 3 个生态学指数皆高于表层土壤样品(表 3)。

表 2 红树林不同生境土壤中可培养真菌的种类数量分布
Table 2 Distribution of the number of culturable fungi in soil of different mangrove habitats

真菌属 Fungal genera	潮间带		过渡带		红树区	
	Intertidal zone		Transitional zone		Mangrove zone	
	表层	深层	表层	深层	表层	深层
	Surface layer	Deep layer	Surface layer	Deep layer	Surface layer	Deep layer
<i>Acremonium</i>	–	–	2	1	–	3
<i>Aspergillus</i>	12	14	15	6	16	9
<i>Cephalosporium</i>	–	–	–	1	3	4
<i>Cunninghamella</i>	–	–	–	–	3	2
<i>Eupenicillium</i>	2	–	–	–	–	2
<i>Fusarium</i>	–	–	–	–	2	3
<i>Geosmithia</i>	1	–	–	–	–	–
<i>Gongronella</i>	1	–	–	–	–	–
<i>Graphium</i>	–	–	–	–	–	2
<i>Gymnoascus</i>	–	–	1	–	–	–
<i>Hortaea</i>	–	–	1	–	–	–
<i>Hypocrea</i>	–	–	–	–	–	1
<i>Kluyveromyces</i>	–	–	1	1	–	–
<i>Massarina</i>	–	–	–	–	–	2
<i>Metarhizium</i>	–	–	–	–	–	1
<i>Paecilomyces</i>	1	1	1	–	1	2
<i>Penicillium</i>	21	17	15	14	15	18
<i>Pseudallescheria</i>	–	–	1	–	–	1
<i>Scolecobasidium</i>	–	–	1	–	–	–
<i>Trichoderma</i>	8	3	11	3	4	6
<i>Viridispora</i>	–	–	–	–	–	1

注: –: 没有分离到。

Note: –: No isolate was observed.

表3 红树林不同生境土壤中可培养真菌的多样性分析
Table 3 Diversity of culturable fungi in soil of different mangrove habitats

多样性分析 Diversity analysis	潮间带 Intertidal zone		过渡带 Transitional zone		红树区 Mangrove zone	
	表层 Surface layer	深层 Deep layer	表层 Surface layer	深层 Deep layer	表层 Surface layer	深层 Deep layer
	多样性指数 H'	1.40	1.03	1.67	1.30	1.55
丰富度指数 D_{MA}	1.57	0.84	2.31	1.53	1.59	3.46
均匀度指数 J_{SW}	0.72	0.74	0.72	0.72	0.79	0.83

3 讨论

红树林不同生境土壤样品中真菌的数量和种类不同,对营养基质的需求也不尽相同,本研究在分离红树林土壤真菌时采用4种培养基(马丁氏培养基、察氏培养基、PDA培养基和A培养基),力求最大限度地分离红树林土壤中的可培养真菌。不同的培养基上分离得到的真菌菌株数量存在差异性,马丁氏培养基分离真菌效果最好,数量最多;其次是A培养基;察氏培养基分离的菌株数最少并且从该培养基上分离得到的主要是一些霉菌类的真菌。可见,为了尽可能接近客观的了解可培养真菌的多样性及分布情况,应当选择多种不同的培养基,从而尽可能将样品中的可培养真菌分离出来。本研究共分离获得257株海洋真菌,分属于21个属28个种,可见八门湾红树林生态系统中的海洋真菌资源丰富,种类多样性较高。

红树林由于独特而优质的自然环境,该生境中的真菌资源表现出极其丰富的多样性,既有适应高盐环境的海洋真菌类群也有适应陆生环境的真菌类群^[21]。衡量某一生境中物种的多样性可以通过多样性指数、均匀度指数、丰富度指数等进行统计分析。周志权等^[10]研究了广西沿海3个主要红树林分布区的病原真菌,共鉴定红树林病原真菌14属26种,3个分布区的红树林病原真菌的物种多样性指数 H' 为 0.97–1.28, 丰富度指数 D_{MA} 为

2.83–4.70, 均匀度指数 J_{SW} 为 0.90–0.92。本文对红树林不同生境土壤样品中可培养真菌的多样性分析表明,多样性指数 H' 为 1.03–2.26, 丰富度指数 D_{MA} 为 0.84–3.46, 均匀度指数 J_{SW} 为 0.72–0.83, 红树林区土壤样品的可培养真菌多样性高于潮间带和过渡带,表现出不同生境中可培养真菌的多样性分布存在较大的差异。

林鹏等^[12]报道了九龙江口秋茄林和白骨壤林两个红树林土壤微生物的类群,半知菌为绝对优势类群,木霉、曲霉和青霉是最常见的属。徐婧等^[22]从湛江红树林滩涂分离到可培养真菌19个属39种,其中曲霉属、青霉属和木霉属是优势类群。徐友林等^[13]研究了八门湾红树林海莲林区和海漆林区土壤样品的可培养真菌的优势类群为青霉属、曲霉属和木霉属。蒋云霞在对红树林土壤微生物研究的综述中阐明了红树林土壤中丝状真菌最常见的属是青霉属、曲霉属、木霉属、镰刀霉属等^[23]。本实验的结果与以上报道得出的结论是一致的,青霉属、曲霉属和木霉属也是优势类群,可见这3个类群是红树林生态系统中的优势类群,具有广泛分布的特点。然而不同生境中真菌的种类及其丰度不同,如本研究中潮间带、过渡带和红树区土壤真菌的优势种类虽然相同,但是丰度不同,并且有些类群只出现在特定的土壤环境中,如镰刀霉属只出现在红树区土壤样品中而球托霉属(*Gongronella*)和 *Geosmithia* 只出现在海洋潮间带表层土壤样品中;

此外,同一生境中不同深度的土壤样品的类群也存在差异。徐婧等的结果发现不同潮位带中真菌的种类和数量存在明显的差异^[22],这可能是不同微生物种类对环境的适应性不同造成的。

本论文分离得到的红树林真菌类群中的青霉属、曲霉属、木霉属、镰刀霉属、拟青霉属、正青霉属、枝顶孢属等在海南、广西、广东等地区的红树林地区都有发现和报道^[12-13,22-23],而 *Geosmithia*、裸子囊菌属、齿梗孢属、*Hortaea*、假霉样真菌属、小克银汉霉属等在海南红树林地区还未见分离报道。而前人在红树林生境中分离到的茎点霉属(*Phoma*)、毛霉属(*Mucor*)、地霉属(*Geotrichum*)、刺盘孢属(*Colletotrichum*)、盘多毛孢属(*Pestalotia*)等属的真菌,在本论文研究过程并未分离到,这可能与采样的地理位置、红树的种类及周围环境(如海水盐度)有关^[7]。总之,本研究分离到的真菌种类丰富,包括一些未曾报道的类群,可能是潜在的真菌新种,为红树林真菌资源的开发和利用奠定了基础。然而,本研究虽然揭示了红树林不同生境不同深度中土壤可培养真菌的分布及其差异,但通过传统微生物分离培养方法研究微生物种群结构还存在一定的局限性,在下一步的研究中有必要结合分子生物学的方法,以更加全面准确地获取不同生境土壤中真菌的多样性信息。

参 考 文 献

- [1] Alongi DM. Present state and future of the world's mangrove forests[J]. *Environmental Conservation*, 2002, 29(3): 331-349.
- [2] Pernetta JC. Mangrove forests, climate change and sea level rise: Hydrological influences on community structure and survival, with examples from the Indo-West Pacific[M]. Switzerland: International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, 1993.
- [3] 林鹏. 中国红树林生态系[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 12-235.
- [4] 林鹏. 中国红树林研究进展[J]. 厦门大学学报, 2001, 40(2): 592-603.
- [5] Sridhar KR. Diversity of fungi in mangrove ecosystem

- [A]//Microbial Diversity: Current Perspectives and Potential Applications[M]. New Delhi: I.K. International Pvt. Ltd., 2005: 129-148.
- [6] Cribb AB, Cribb JW. Marine Fungi from Queensland[M]. Brisbane: University of Queensland Press, 1955: 10-21.
- [7] Schmit JP, Shearer CA. A checklist of mangrove-associated fungi, their geographical distribution and known host plant[J]. *Mycotaxon*, 2003, 85: 423-477
- [8] 王桂文, 李海鹰. 钦州湾红树植物根部内生真菌初步研究[J]. *广西林业科学*, 2003, 32(3): 121-124.
- [9] 邓祖军, 曹理想, Vrijmoed Lilian LP, 等. 红树林植物桐花树内生真菌类群分布的研究[J]. *热带海洋学报*, 2010, 29(3): 1-5.
- [10] 周志权, 黄泽余. 广西红树林的病原真菌及生态学特点[J]. *广西植物*, 2001, 21(2): 157-162.
- [11] 殷明亮. 湛江红树林滩涂真菌群落的分离鉴定和资源调查研究[D]. 湛江: 广东海洋大学硕士学位论文, 2010.
- [12] 林鹏, 张瑜斌, 邓爱英, 等. 九龙江河口红树林土壤微生物的类群及抗菌活性[J]. *海洋学报*, 2005, 27(3): 133-141.
- [13] 徐友林, 刘敏, 黄惠琴, 等. 八门湾红树林土壤可培养真菌的多样性分析[J]. *热带作物学报*, 2013, 34(1): 181-187.
- [14] 魏景超. 真菌鉴定手册[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1979.
- [15] 戴芳澜. 真菌的形态和分类[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [16] 孔华忠. 中国真菌志(第三十五卷)-青霉属及其相关有性型属[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [17] 齐祖同. 中国真菌志(第五卷)-曲霉属及其相关有性型属[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [18] 巴尼特 HL, 亨特 BB. 半知菌属图解[M]. 北京: 科学出版社, 1977.
- [19] White TJ, Bruns T, Lee S. Analysis of Phylogenetic Relationships by Amplification and Direct Sequencing of Ribosomal RNA Genes[M]. New York: Academic Press, 1990: 315-322.
- [20] 刘灿然, 马克平. 生物群落多样性的测度方法[J]. *生态学报*, 1997, 17(6): 601-610.
- [21] Hyde KD, Jones EBG. Marine mangrove fungi[J]. *Marine Ecology*, 1988, 9(1): 15-35.
- [22] 徐婧, 于莉, 刘可杰, 等. 湛江红树林滩涂可培养真菌种群多样性分析[J]. *微生物学通报*, 2013, 40(3): 476-482.
- [23] 蒋云霞, 郑天凌, 田蕴. 红树林土壤微生物的研究: 过去、现在、未来[J]. *微生物学报*, 2006, 46(5): 848-851.