

DOI: 10.5846/stxb201306101588

刘玉, 温翠屏, 李艳萍, 彭逸生, 洪泽珊, 曾彩虹, 袁宝茵. 红树植物对根域真菌生态的影响. 生态学报, 2015, 35(8): 2473-2480.

Liu Y, Wen C P, Li Y P, Peng Y S, Hong Z S, Ceng C H, Yuan B Y. A comparative study on rhizosphere and non-rhizosphere fungi in six mangrove communities. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(8): 2473-2480.

## 红树植物对根域真菌生态的影响

刘 玉<sup>1,2,\*</sup>, 温翠屏<sup>1</sup>, 李艳萍<sup>1,2</sup>, 彭逸生<sup>1,2</sup>, 洪泽珊<sup>1,2</sup>, 曾彩虹<sup>1</sup>, 袁宝茵<sup>1</sup>

1 中山大学环境科学与工程学院, 广州 510275

2 广东省环境污染控制与修复技术重点实验室, 广州 510275

**摘要:** 植物根系具有丰富的微生物种类和生物量, 为了掌握红树植物根系真菌的生态状况, 在广东湛江红树林国家级自然保护区 6 种红树植物群落中采集样品分离根际与非根际真菌, 分析红树植物对根域真菌生态的影响以及根域真菌与环境因子的关系。从分离培养的 6 种红树植物的根域样本中, 鉴定出 5 属 11 种真菌。桐花树、木榄、无瓣海桑和秋茄根际真菌的丰度与种类均高于非根际真菌, 说明这 4 种红树植物对根际真菌生长有促进作用, 而红海榄与白骨壤则相反, 说明其对根际真菌有抑制作用。总体上, 红树林林内真菌种类数远高于林外, 表明红树植物覆盖对促进真菌物种多样性有积极作用。根际真菌丰度与总有机碳(TOC)呈显著负性相关关系, 非根际真菌种类数与硝态氮(NO<sub>3</sub>-N)呈显著正相关关系, 说明根际 TOC 中可能含有抑制真菌生长作用的物质, 而在非根际, 红树植物根系分泌物影响较小。红树植物根系分泌物对根际微生物数量和种类数有一定的影响。

**关键词:** 红树植物; 根域真菌; 根际; 非根际; 生态

## A comparative study on rhizosphere and non-rhizosphere fungi in six mangrove communities

LIU Yu<sup>1,2,\*</sup>, WEN Cuiping<sup>1</sup>, LI Yanping<sup>1,2</sup>, PENG Yisheng<sup>1,2</sup>, HONG Zeshan<sup>1,2</sup>, CENG Caihong<sup>1</sup>, YUAN Baoyin<sup>1</sup>

1 School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China

2 Guangdong Provincial Key Laboratory of Environmental Pollution Control and Remediation Technology, Guangzhou 510275, China

**Abstract:** Rich and unique fungal resources exist in tropical and subtropical mangrove forests in the coastal intertidal zone. Fungi are involved in the decomposition of organic matter and regeneration of inorganic nutrient. They can degrade pollutants in the marine environment, promote marine self-purification, and play an important role in the marine ecosystem. The plant root system is rich in microbial species and biomass. However, research on the fungal ecological status in mangrove roots is limited. This study was conducted in the core zone of Zhanjiang Mangrove National Nature Reserve, Guangdong Province, namely Gaoqiao Mangrove Reserve with the area of 700.1 hm<sup>2</sup> (E 109 °40'—110 °35', N 20 °14'—21 °35') extending linearly along the 27 km long coast. Rhizosphere (0 cm to 2.5 cm) and non-rhizosphere (2.5 cm to 10 cm) fungal and environmental samples were collected from six species of mangrove communities to analyze the affect of mangrove root on fungal abundance and species composition and to examine the relationships of fungi with environmental factors. Results showed that a total of 35 different morphology colonies appeared in the culture medium, and 5 genera and 11 species of fungi were identified by fungal morphological identification technology. These species were *Aspergillus zhaoqingensis*, *Aspergillus japonicus* var. *japonicus*, *Aspergillus carneus*, *Cladosporium sphaerospermum*, *Aspergillus niveus*, *Trichoderma*

基金项目: 国家自然科学基金(41171416); 国家高技术研究发展(863)计划(2007AA091703)

收稿日期: 2013-06-10; 网络出版日期: 2014-05-16

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: eeslyu@mail.sysu.edu.cn

atroviride, *Cladosporium pallidum*, *Talaromyces flavus*, *Cladosporium cladosporioides*, *Penicillium minioluteum*, and *Penicillium variable*. The fungal abundance in the six species of mangrove rhizosphere was  $3.38 \times 10^3$  cfu/g to  $10.94 \times 10^3$  cfu/g dry soil, and the fungal abundance in non-rhizosphere was  $4.12 \times 10^3$  cfu/g to  $8.78 \times 10^3$  cfu/g dry soil. According to the plate count of fungi, the R/S ratios of the six mangrove species followed the order *Bruguiera gymnorhiza* (1.73) > *Kandelia candel* (1.25) > *Sonneratia apetala* (1.07) > *Aegiceras corniculatum* (1.02) > *Rhizophora stylosa* (0.71) > *Avicennia marina* (0.47). The abundance and species of rhizosphere fungi in *A. corniculatum*, *B. gymnorhiza*, *S. apetala*, and *K. obovata* forests were higher than those in non-rhizosphere fungi, whereas those in *R. stylosa* and *A. marina* forests were the opposite. This finding indicated that the former four species promoted rhizosphere fungal growth, whereas the latter two species inhibited rhizosphere fungal growth. The species number of rhizosphere fungi in the six mangrove species was 7—19, whereas that of non-rhizosphere fungi was 8—13. *A. corniculatum*, *B. gymnorhiza*, *S. apetala*, and *K. obovata* promoted rhizosphere fungal growth, whereas *R. stylosa* and *A. marina* inhibited rhizosphere fungal growth. Overall, the fungal species number in the mangrove forest was much higher than that outside the forest, which indicated that the coverage of mangrove plants promoted the species diversity of fungi. The fungal abundance in rhizosphere showed a significant negative correlation with total organic carbon (TOC), whereas the species number in non-rhizosphere fungi was significantly correlated with  $\text{NO}_3\text{-N}$ , which illustrated that TOC in rhizosphere may contain certain substances that can restrain fungal growth. While in the non-rhizosphere, root exudates of mangrove plants had less influence on fungi growth. In general, root exudates of mangrove plants have certain effects on the quantity and species number of rhizosphere microorganisms.

**Key Words:** mangrove plants; root fungi; rhizosphere; non-rhizosphere; ecology

目前红树林生态系统微生物学的研究热点主要集中在红树林生态系统微生物的物种多样性、生理活性物质多样性以及环境修复功能上<sup>[1]</sup>。红树林生态系统存在着丰富的微生物类群,是推动红树林生态系统物质循环和能量流动的主力军。研究结果<sup>[2-4]</sup>表明,细菌是最主要的类群,在数量占绝对优势,其次是真菌,而微型藻类和放线菌则相对较少。

真菌是一类具有典型的细胞核,不含叶绿素,由单细胞或多细胞组成、进行孢子繁殖的异养生物。在热带、亚热带海岸的潮间带的红树林植物群落中,有着丰富而独特的真菌资源,它们参与有机物质的分解和无机营养物的再生,能降解海洋环境中的污染物和促进海洋自净,在海洋生态系统中起着重要作用。红树林真菌在高盐、低氧等特殊环境中可以高效地产生相应陆栖微生物所不能产生的生物活性物质,极具开发利用价值,但我国对南海红树林滩涂真菌资源进行系统调查研究非常少,因此对这一独特的生境内的真菌资源进行研究具有重要的理论和实践意义。

一般认为,在植物根系区域,植物根际处微生物生物量要远高于非根际,但较缺少这方面的确切研究数据。本研究在广东湛江红树林国家级自然保护区内展开,在6种主要的红树植物建群群落中采集根际、非根际真菌样品及测定多项环境因子。本研究中,从根际和非根际区域采集的土壤样品中分离得到的真菌分别为根际真菌(rhizosphere fungi)和非根际真菌(non-rhizosphere fungi),统称根域真菌(root fungi)。

研究通过比较不同种类红树植物根域真菌数量和种类组成的差异,分析真菌构成与红树植物种类的关联性及红树植物根对真菌的影响作用;通过对环境因子与根域真菌数量、种类数进行相关性分析,探讨环境因子对根域真菌的影响。作为红树植物对根域真菌生态影响的初步实验,研究旨在找出影响红树林内根域真菌数量和种类的主要因素,结果将有助于今后对红树林生态系统更加全面、客观及深入的研究和了解,更好地为红树林的保护和恢复及真菌资源开发利用研究提供科学指导和建议。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样地点与采样

广东湛江红树林国家级自然保护区地理坐标为东经  $109^{\circ}40'—110^{\circ}35'$ , 北纬  $20^{\circ}14'—21^{\circ}35'$ , 地处广东

和广西交界的北部湾英罗港<sup>[5]</sup>,散状分布雷州半岛沿海滩涂上,总面积为 3615.6 hm<sup>2</sup>。其中高桥镇红树林地面积 700.1 hm<sup>2</sup>,分布最为密集,故也有称之为高桥红树林保护区。保护区内红树植物资源丰富,其中有真红树和半红树植物共 15 科 25 种,且大多为天然林。

选择其中主要的 6 种红树建群植物进行采样:木榄(*Bruguiera gymnorhiza*, Bg)、桐花树(*Aegiceras corniculatum*, Ac)、秋茄(*Kandelia candel*, Kc)、无瓣海桑(*Sonneratia apetala*, Sa)、白骨壤(*Avicennia marina*, Am)、红海榄(*Rhizophora stylosa*, Rs),在这六种红树群落中分别设置 3 个采样点,每个采样点均进行根际(rhizosphere)及非根际(non-rhizosphere)样品采集。定义为:从根际(根部 0—2.5 cm 范围内)和非根际区域(根部 2.5—10 cm 范围内)采集的土壤样品中分离得到的真菌分别为根际真菌(rhizosphere fungi)和非根际真菌(non-rhizosphere fungi),统称为根域真菌(root fungi),而>10 cm 范围,则为非根域真菌(non-root fungi)。另外选择外海的一个潮沟作为对照点进行样品采集。采样点分布情况见表 1。

表 1 高桥红树林保护区真菌采样点经纬度

Table 1 GPS dates of sampling sites of fungi in Gaoqiao Mangrove Reserve

| 采样地点<br>Sampling sites |   | 纬度<br>Latitude   | 经度<br>Longitude   | 采样地点<br>Sampling sites |   | 纬度<br>Latitude   | 经度<br>Longitude   |
|------------------------|---|------------------|-------------------|------------------------|---|------------------|-------------------|
| 白骨壤 Am                 | 1 | N21 °32 '33.04 " | E109 °46 '09.11 " | 木榄 Bg                  | 1 | N21 °34 '11.24 " | E109 °45 '18.88 " |
|                        | 2 | N21 °32 '33.05 " | E109 °46 '08.09 " |                        | 2 | N21 °34 '08.96 " | E109 °45 '18.56 " |
|                        | 3 | N21 °32 '34.07 " | E109 °46 '09.02 " |                        | 3 | N21 °34 '06.40 " | E109 °45 '18.88 " |
| 红海榄 Rs                 | 1 | N21 °32 '54.35 " | E109 °46 '08.16 " | 无瓣海桑 Sa                | 1 | N21 °34 '14.37 " | E109 °46 '11.62 " |
|                        | 2 | N21 °32 '56.49 " | E109 °46 '06.42 " |                        | 2 | N21 °34 '14.03 " | E109 °46 '11.30 " |
|                        | 3 | N21 °32 '58.35 " | E109 °46 '06.06 " |                        | 3 | N21 °34 '14.43 " | E109 °46 '11.62 " |
| 桐花树 Ac                 | 1 | N21 °34 '09.96 " | E109 °45 '23.69 " | 秋茄 Kc                  | 1 | N21 °34 '04.30 " | E109 °45 '21.33 " |
|                        | 2 | N21 °34 '09.02 " | E109 °45 '26.05 " |                        | 2 | N21 °34 '03.82 " | E109 °45 '22.15 " |
|                        | 3 | N21 °34 '07.04 " | E109 °45 '29.05 " |                        | 3 | N21 °34 '03.05 " | E109 °45 '26.02 " |
| 对照点 Control            | 1 | N21 °32 '34.07 " | E109 °46 '09.08 " |                        |   |                  |                   |

## 1.2 样品采集与保存

于 2012 年 10 月 17 日—2012 年 10 月 23 日进行采样。采集林内水样时,退潮时进入林内将 5 L 的采样容器绑定在采样点,待涨潮时潮水自然漫入采样容器,下一次低潮期进入林区回收样品,每个采样点放置两个容器作为平行样。对照点水样直接在潮沟中取水。

采集土壤样品时,将 60 mL 的医用塑料注射器割掉头端,改装成为柱状土壤样品采集用具,垂直插入土壤中,然后用铲子抵住下端从土壤中抽出装满土壤的针筒,利用注射器的推杆将柱状土样推出,用刀片截取表层 0.5—1 cm 的土壤样品,采集后的样品除去可见碎石、植物根系后装入密封采样袋中并注明采集地点、日期、植物名称、经纬度等。每次采样均在退潮后进行,所有采样物品事先做好无菌处理。除对照点外各个采样点均采集根际和非根际两组样品,每个采样袋均匀混合 3 个平行样。将采集的土壤样品置于采样袋中,并置于 4 ℃ 的冰箱内暂存。

## 1.3 真菌分离

称取新鲜土壤样品 1 g 加入到盛有盐度为 25 的 10.0 mL 无菌海水中<sup>[6-7]</sup>,充分混匀后将制成的 1:10 的土壤稀释液进一步稀释,制成 10<sup>-2</sup>、10<sup>-3</sup>、10<sup>-4</sup> 的土壤溶液。用无菌移液管分别从 10<sup>-2</sup>、10<sup>-3</sup>、10<sup>-4</sup> 3 管土壤稀释液中各吸取 0.1 mL,放入孟加拉红培养基(Rose Bengal Agar)平板中,涂布,室温下静置 5—10 min,然后置于 28 ℃ 恒温培养箱中,定期观察记录菌落的形成与生长,培养 5 d 后进行菌落计数<sup>[8]</sup>。

## 1.4 真菌鉴定

真菌培养过程中,每天观察真菌的菌落形态,并拍照记录生长情况。5 d 后取出计数并记录菌落特征,用接种环挑出菌丝置于载玻片上进行显微观察,描述真菌菌落特征和显微特征,记录并拍照。根据《土壤微生

物研究法》<sup>[9]</sup>以及《真菌鉴定手册》<sup>[10]</sup>所介绍的分类方法,结合《中国真菌志》<sup>[11-13]</sup>、《半知菌分属图册》<sup>[14]</sup>等资料,对六种红树的根系真菌进行真菌种类形态学鉴定。

1.5 环境因子测定

采用仪器法和化学法测定多项环境因子。用 AZ 8731 盐度计测定孔隙水盐度;AZ8403 溶解氧仪分析水样中的溶解氧(DO)含量;Hydrolab DS-5 水质多功能探头分析水样中 pH 值、盐度、硝态氮浓度(NO<sub>3</sub>-N)、氨氮浓度(NH<sub>4</sub>-N)四项指标;SECOMAN PASTEL-UV 六因子仪测定水中总悬浮颗粒物(TSS)、化学需氧量(COD)、生物化学需氧量(BOD)和总有机碳(TOC)四项指标。实验室内采用烘干法测定土壤含水率,油浴加热重铬酸钾氧化-容量法测定土壤有机质含量<sup>[15]</sup>。

1.6 数据分析方法

本论文中,所有数据利用 Microsoft Excel 2010 进行统计和制图,相关性分析通过 IBM SPSS Statistics 19 完成。

2 结果和讨论

2.1 六种红树植物根际和非根际真菌的主要种类

本研究共培养分离出真菌菌落 482 个,包括不同形态的真菌 35 种,通过形态观察可鉴定出根系真菌 2 纲 3 目 3 科 5 属 11 种(表 2),具体种类如下:肇庆曲霉 *A. zhaoqingensis*,日本曲霉原变种 *A. japonicus* var. *japonicus*,肉色曲霉 *A. carneus*,雪白曲霉 *A. niveus*,深绿木霉 *T. atroviride*,朱黄青霉 *P. minioluteum*,变幻青霉 *P. variable*,球孢枝孢 *C. sphaerospermum*,苍白枝孢 *C. pallidum*,枝状枝孢 *C. cladosporioides*,黄色篮状菌 *T. flavus*。还有 24 种须进行生化等方法鉴定。

表 2 已鉴定真菌种类的生物学分类

Table 2 Results of fungi identification

| 纲<br>Class             | 目<br>Order           | 科<br>Family         | 属<br>Genus          | 种<br>Species | 种<br>Species | 种<br>Species | 种 Species |
|------------------------|----------------------|---------------------|---------------------|--------------|--------------|--------------|-----------|
| 半知菌纲<br>Imperfecti     | 丛梗孢目<br>Moniliales   | 丛梗孢科<br>Moniliella  | 曲霉属<br>Aspergillus  | 肇庆曲霉         | 日本曲霉原变种      | 肉色曲霉         | 雪白曲霉      |
|                        |                      |                     | 木霉属<br>Trichoderma  | 深绿木霉         |              |              |           |
|                        |                      |                     | 青霉属<br>Penicillium  | 朱黄青霉         | 变幻青霉         |              |           |
|                        |                      |                     |                     |              |              |              |           |
|                        | 丝孢目(丛梗孢目) Moniliales | 暗色孢科<br>Dematiaceae | 枝孢属<br>Cladosporium | 球孢枝孢         | 苍白枝孢         | 枝状枝孢         |           |
| 散囊菌纲<br>Eurotiomycetes | 散囊菌目<br>Eurotiales   | 散囊菌科<br>Eurotiaceae | 篮状菌属<br>Talaromyces | 黄色篮状菌        |              |              |           |

Cribb 等<sup>[16]</sup>等在澳大利亚昆士兰红树林中分离出海洋真菌 43 种,首次报道了红树林真菌的研究成果。Kohlmeyer 统计出 42 种红树真菌<sup>[17]</sup>。Hyde 和 John 总结红树林真菌已报道的有 89 种,包括担子菌 2 种,半知菌类真菌 25 种以及子囊菌 62 种。Maria 和 Sridhar 在印度海洋红树林中分离出 91 种真菌。Schmit J P & Shear 统计大西洋海岸红树林中已被报道和记载的真菌有 106 种<sup>[18]</sup>,在印度洋和太平洋沿岸红树林中分别达到 128 种和 173 种。目前,已记录的红树林真菌超过 200 种,成为海洋真菌的第二大类群。已报道的红树林内生真菌主要类群是链格孢霉(*Alternaria*)、叶点霉(*Phyllosticta*)、曲霉(*Aspergillus*)、拟茎点霉(*Phomopsis*)、芽枝霉(*Cladosporium*)、茎点霉(*Phoma*)、炭疽菌(*Colletotrichum*)、青霉(*Penicillium*)、镰孢霉(*Fusarium*)、拟盘多毛孢(*Pestalotiopsis*)、拟青霉(*Paecilomyces*)、和木霉(*Trichoderma*)等属<sup>[19]</sup>。

本次研究中,并未分离到部分常见的土壤真菌,如毛霉属,链格孢属等,原因可能是海洋环境不适宜这些陆地常见的真菌生存<sup>[20]</sup>。在已鉴定出的真菌中半知菌占大多数,其中曲霉属最多。就已鉴定菌种来看,曲霉

属、枝孢属、青霉属真菌出现频率较高,与前人研究结果<sup>[21]</sup>较一致。也可看出,传统的形态学鉴定法(菌落形态和无性阶段分生孢子)存在局限性,形态学特征会受到温度、培养基等因素的影响,后续研究有待进一步改进,比如进行真菌有性态人工诱培和分离纯化及进行分子生物学鉴定技术,进一步提高鉴定准确性和确定性。此外,采用稀释平板法进行计数和培养,对于部分无法在实验条件下培养的真菌研究未有涉及。总体来看,湛江红树林根系真菌多样性比较丰富,有研究和开发的潜力。我国红树林根系真菌研究水平及深度非常有限,亟待加强。

## 2.2 真菌丰度比较

6 种红树植物群落与对照点的真菌丰度比较结果见图 1。6 种红树植物根际真菌丰度为  $3.38 \times 10^3$ — $10.94 \times 10^3$  cfu/g 干土,非根际真菌丰度为  $4.12 \times 10^3$ — $8.78 \times 10^3$  cfu/g 干土。

根际效应指根际环境对微生物的影响,可以从根微生物的丰度(数量)上反映出来,一般用“ $I = \text{根际 R} / \text{非根际 S}$ ”的比值来反映。如果  $I > 1$ ,说明根对根际生物生长有正效应,为促进作用;反之,如果  $I < 1$ ,说明根对根际生物生长有负效应,为抑制作用。

根据真菌平板计数结果,6 种红树植物 R/S 比值大小顺序如下:木榄(1.73) > 秋茄(1.25) > 无瓣海桑(1.07) > 桐花树(1.02) > 红海榄(0.71) > 白骨壤(0.47)。说明,木榄、秋茄、无瓣海桑和桐花树这四种红树植物根际真菌丰度大于非根际,表现出正的根际效应,即这 4 种红树植物根际对真菌生长有促进作用。红海榄与白骨壤根际真菌丰度小于非根际,根际对真菌生长有抑制作用,产生负根际效应。

Rupam Kapoor 研究<sup>[22]</sup>表明,植物根际微生物的数量、种类、优势种等存在很大差异,这主要与植物根系分泌物的数量、种类随植物种类的不同有直接关系。

植物根系分泌物是指在一定的生长条件下,活的且未被扰动的根释放到根际环境中的有机物的总称<sup>[23]</sup>。根系分泌物是植物影响湿地微环境的重要途径之一<sup>[24]</sup>,植物能够通过根系分泌物改变微生物群落结构。根系分泌物的种类繁多,不同植物的根系分泌物组成不同,对根际微生物群落结构的影响必然有所差异<sup>[25]</sup>。6 种红树植物对根际微生物数量和种类数产生影响<sup>[26]</sup>,可能与红树植物根系分泌物有关。桐花树、木榄、无瓣海桑和秋茄四种红树植物产生的根系分泌物可能对根际真菌增加有促进作用,而红海榄与白骨壤的根系分泌物可能对根际真菌有抑制作用。根系真菌的数量和种类会随着根系分泌物数量和种类的变化而变化,长期作用下,不同植物根际会形成独特的微生物群落。因此,植物种类是决定根际微生物群落结构的主要因子<sup>[27]</sup>。本研究验证了植物种类影响根际微生物群落结构这一观点。

## 2.3 真菌种类数量的比较

6 种红树植物群落与对照点的真菌种类数比较结果见图 2。6 种红树植物根际真菌种类数为 7—19 种,非根际真菌种类数为 8—13 种。桐花树、木榄、无瓣海桑、秋茄中根际真菌种类数高于非根际,表现为根际促进作用;而白骨壤、红海榄根际真菌种类数低于非根际,表现为根际抑制作用。

进一步,本研究定义根系真菌为根际真菌与非根际真菌之和,6 种红树植物根系真菌种类数见图 3,在种类数方面,大小顺序为:桐花树 > 木榄 = 无瓣海桑 > 秋茄 > 白骨壤 > 红海榄,但 6 种红树植物根系的真菌种类均高于无红树植物覆盖的对照点(对照点为取计数结果的 2 倍后作比较),且差距明显,真菌种类至少多出 250%,这与任健<sup>[28]</sup>研究结果一致,红树植物的存在对林内真菌的物种多样性起到促进作用。

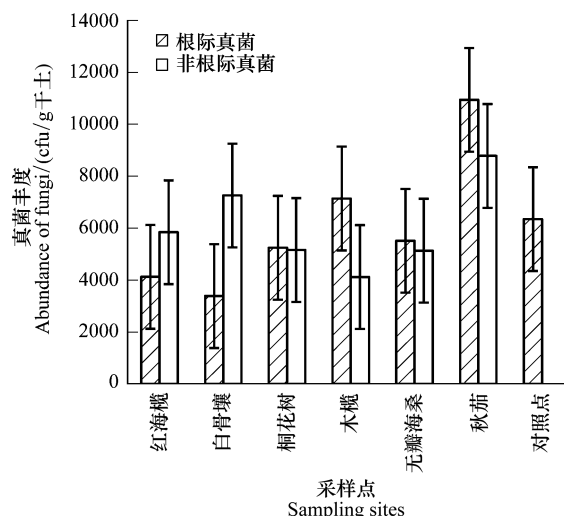


图 1 6 种红树植物根际和非根际真菌丰度比较

Fig.1 Comparison of the abundance of rhizosphere and non-rhizosphere fungi in 6 different mangrove communities

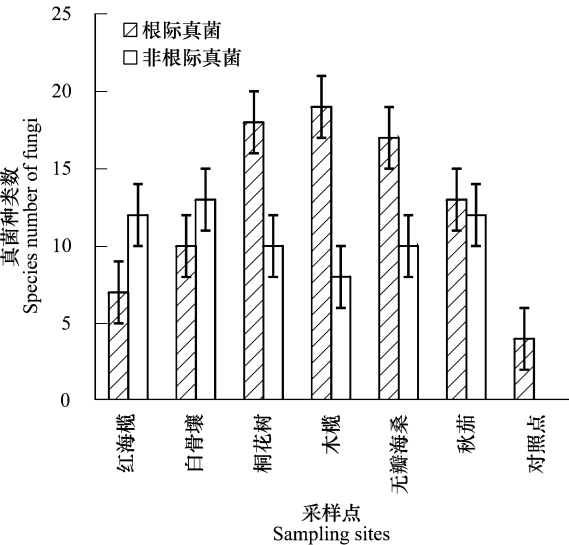


图2 6种红树植物根际和非根际真菌种类数比较

Fig.2 Comparison of species number of rhizosphere and non-rhizosphere fungi in 6 different mangrove communities

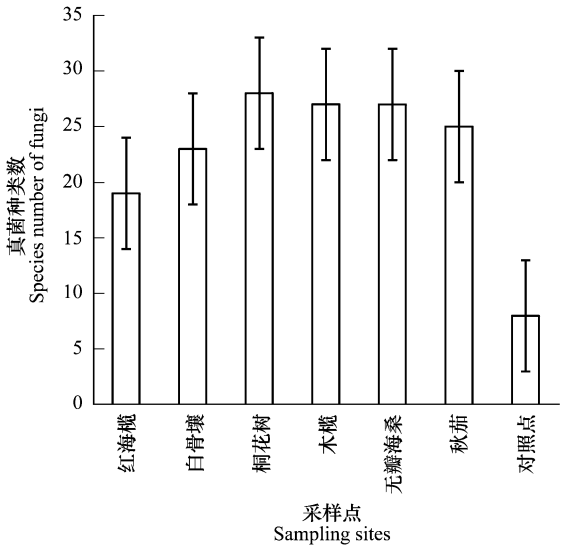


图3 不同红树植物群落间根系真菌种类数比较

Fig.3 Comparison of species number of root fungi in 6 mangrove communities

在相似的大环境下,随着植物群落类型的不同,微生物在其行为和组成上也表现出不同的活性趋势<sup>[29]</sup>。植被覆盖使微生物群落多样性更高,使生物种类更丰富。植被通过影响土壤环境,从而影响到土壤微生物群落的结构和多样性<sup>[30]</sup>,受植被影响的土壤环境中土壤微生物群落的多样性比不受植被影响或者没有植被的土壤环境中的微生物群落的多样性要高很多。

2.4 根系真菌与环境因子的相关性分析

本次采集的真菌样品深度为地表下 0.5—1 cm,非常接近地面,土壤孔隙水主要由地表水补给,故研究中采用地表水水质因子作为根系真菌生存环境的水环境因子。各个林区内的采样点位置都比较接近,环境条件相似,本研究中视为平行样,分析环境因子数据时取 3 个样点的平均值,对照点则做单独分析,对照点不区分根际与非根际区域。6 种红树植物群落与对照点的 12 项环境因子测定结果平均值见表 3。

表 3 环境因子测定结果

Table 3 Data of environmental factors

| 采样点<br>Sampling sites | 地表水盐度         |                                 |      | NH <sub>4</sub> -N<br>/(mg/L) | NO <sub>3</sub> -N<br>/(mg/L) | TSS<br>/(mg/L) | COD<br>/(mg/L) | BOD<br>/(mg/L) | TOC<br>/(mg/L) | 孔隙水盐度<br>Salinity of<br>pore water | 土壤<br>有机质<br>Soil organic<br>matter/<br>(g/kg) | 土壤含水率                  |                             |
|-----------------------|---------------|---------------------------------|------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------|-----------------------------|
|                       | DO/<br>(mg/L) | Salinity of<br>surface<br>water | pH   |                               |                               |                |                |                |                |                                    |                                                | Water contents of soil |                             |
|                       |               |                                 |      |                               |                               |                |                |                |                |                                    |                                                | 根际<br>Rhizo-<br>sphere | 非根际<br>Non rhizo-<br>sphere |
| 桐花树 <i>Ac</i>         | 5.34          | 23.20                           | 7.56 | 14.27                         | 29.47                         | 84.67          | 43.80          | 20.60          | 13.73          | 23.17                              |                                                | 1.01                   | 0.92                        |
| 红海榄 <i>Rs</i>         | 5.78          | 23.46                           | 7.35 | 15.64                         | 26.14                         | 89.33          | 46.33          | 21.73          | 14.50          | 24.87                              | 0.76                                           | 0.88                   | 0.86                        |
| 白骨壤 <i>Am</i>         | 6.00          | 24.58                           | 7.45 | 16.17                         | 28.38                         | 86.83          | 45.00          | 21.27          | 16.17          | 24.90                              | 0.86                                           | 1.01                   | 1.01                        |
| 木榄 <i>Bg</i>          | 5.84          | 20.75                           | 7.32 | 15.45                         | 23.00                         | 53.33          | 27.57          | 13.03          | 8.63           | 22.87                              | 0.53                                           | 1.22                   | 1.33                        |
| 无瓣海桑 <i>Sa</i>        | 5.33          | 19.21                           | 7.61 | 10.39                         | 26.79                         | 110.50         | 57.17          | 26.90          | 17.93          | 20.77                              | 0.76                                           | 1.01                   | 1.04                        |
| 秋茄 <i>Kc</i>          | 5.34          | 22.48                           | 7.78 | 11.66                         | 31.65                         | 54.00          | 28.03          | 13.17          | 8.77           | 23.17                              |                                                | 1.20                   | 1.10                        |
| 对照点 <i>Control</i>    | 6.56          | 16.04                           | 7.58 | 9.82                          | 18.87                         | 72.50          | 37.50          | 17.60          | 11.80          |                                    |                                                | 0.46                   |                             |

本研究分别将根际与非根际真菌的丰度和种类数与环境因子进行相关性分析,结果见表 4、表 5。表 4 相关性分析结果表明,根际和非根际真菌丰度除与表层水 pH 值、NO<sub>3</sub>-N、TSS 正性相关外,与其他因子均呈负性相关关系,其中与 TOC 呈显著负性相关关系,说明,虽然真菌大多为体表吸收式异养营养生物,但过高的营养

物特别是有机物会对其生长产生抑制作用,或者另一方面,可能 TOC 中含有抑制生长作用的物质对真菌丰度有负性相关作用,这有待进一步研究。

表 4 6 种红树植物根际与非根际真菌丰度与环境因子的相关性( $n=19$ )

Table 4 Correlation between the quantity of mangrove fungi and environmental factors ( $n=19$ )

|                              |     | DO     | 地表水<br>盐度<br>Salinity of<br>surface<br>water | pH    | NH <sub>4</sub> -N | NO <sub>3</sub> -N | TSS    | COD    | BOD    | TOC      | 土壤<br>含水率<br>Water<br>contents<br>of soil | 土壤<br>有机质<br>Soil<br>organic<br>matter | 孔隙水<br>盐度<br>Salinity<br>of pore<br>water |
|------------------------------|-----|--------|----------------------------------------------|-------|--------------------|--------------------|--------|--------|--------|----------|-------------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------|
| 根际真菌丰度 Fungi                 | $r$ | -0.271 | -0.221                                       | 0.629 | -0.457             | 0.678              | 0.193  | -0.703 | -0.706 | -0.765 * | -0.335                                    | -0.935                                 | -0.335                                    |
| abundance in rhizosphere     | $p$ | 0.557  | 0.634                                        | 0.130 | 0.303              | 0.455              | 0.078  | 0.078  | 0.076  | 0.045    | 0.517                                     | 0.065                                  | 0.517                                     |
| 非根际真菌丰度 Fungi                | $r$ | -0.001 | 0.234                                        | 0.634 | -0.197             | 0.305              | -0.248 | -0.244 | -0.245 | -0.156   | -0.139                                    | -0.917                                 | 0.350                                     |
| abundance in non-rhizosphere | $p$ | 0.998  | 0.614                                        | 0.126 | 0.671              | 0.305              | 0.592  | 0.598  | 0.596  | 0.738    | 0.766                                     | 0.083                                  | 0.496                                     |

\*表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关; \*\*表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关

表 5 相关性分析结果表明,根际和非根际真菌种类数与表层水 pH 值、盐度、NH<sub>4</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N 呈正性相关,与 COD、BOD、TOC 呈负性相关关系,说明真菌种类数与无机营养盐有较大关系,而有机营养物的存在会抑制真菌种类数的发展。真菌为非需氧生物,因此与 DO 为负性关系。可能根际和非根际无机营养盐、有机营养物的含量都很高,所以真菌种类数无显著性相关关系;而在非根际,NO<sub>3</sub>-N 含量适度,则与真菌种类数呈显著正相关。

表 5 6 种红树植物根际与非根际真菌种类与环境因子的相关性

Table 5 Correlation between the species abundance of mangrove fungi and environmental factors

|                                   |     | DO     | 地表水<br>盐度<br>Salinity of<br>surface<br>water | pH    | NH <sub>4</sub> -N | NO <sub>3</sub> -N | TSS    | COD    | BOD    | TOC    | 土壤<br>含水率<br>Water<br>contents<br>of soil | 土壤<br>有机质<br>Soil<br>organic<br>matter | 孔隙水<br>盐度<br>Salinity<br>of pore<br>water |
|-----------------------------------|-----|--------|----------------------------------------------|-------|--------------------|--------------------|--------|--------|--------|--------|-------------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------|
| 根际真菌种类数 Fungi                     | $r$ | -0.723 | 0.220                                        | 0.010 | 0.161              | 0.402              | -0.038 | -0.041 | -0.036 | -0.084 | 0.745                                     | -0.691                                 | -0.749                                    |
| species number in rhizosphere     | $p$ | 0.066  | 0.636                                        | 0.984 | 0.730              | 0.371              | 0.935  | 0.931  | 0.939  | 0.858  | 0.055                                     | 0.309                                  | 0.087                                     |
| 非根际真菌种类数 Fungi                    | $r$ | -0.603 | 0.900 **                                     | 0.004 | 0.542              | 0.860 *            | 0.223  | 0.227  | 0.230  | 0.306  | 0.605                                     | 0.923                                  | 0.613                                     |
| species number in non-rhizosphere | $p$ | 0.152  | 0.006                                        | 0.993 | 0.209              | 0.013              | 0.631  | 0.625  | 0.620  | 0.504  | 0.150                                     | 0.077                                  | 0.196                                     |

\*表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关; \*\*表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关

相关性分析只能检验根系真菌丰度和种类与环境因子之间存在的线性关系,但环境因子的作用往往是综合的,两者之间可能存在着极为错综复杂的关系,红树植物对根际真菌和非根际真菌的影响程度和效应有所不同,推断根际分泌物对根系真菌的丰度和种类是重要影响因素之一<sup>[31]</sup>,致使根际和非根际真菌显现明显不同,其影响机制有待后续深入的实验探究。

### 3 结论

桐花树、木榄、无瓣海桑和秋茄 4 种红树植物根际真菌的丰度与种类均高于非根际真菌,说明这 4 种红树植物对根际真菌有促进作用。而红海榄与白骨壤对根际真菌有抑制作用。红树林内真菌种类数远高于林外,表明红树植物根系分泌物对根际微生物数量和种类数有一定的影响,红树林对促进真菌物种多样性有积极作用。

根际真菌丰度与 TOC 呈显著负性相关关系,说明红树林中过高的营养物特别是有机物会对其生长产生抑制作用,特别是根际 TOC 中可能含有抑制真菌生长作用的物质。而在非根际,红树植物根系分泌物影响较小,真菌种类数与 NO<sub>3</sub>-N 呈显著正相关。

## 参考文献 (References):

- [1] 曹启民, 郑康振, 陈耿, 陈桂珠. 红树林生态系统微生物学研究进展. 生态环境, 2008, 17(2): 839-845.
- [2] 胡承彪, 梁秀棠. 合浦滨海滩涂森林土壤微生物区系及生化活性. 热带林业科技, 1987, (1): 1-7.
- [3] 庄铁诚, 林鹏. 红树林凋落叶自然分解过程中土壤微生物的数量动态. 厦门大学学报: 自然科学版, 1993, 32(3): 365-370.
- [4] 张瑜斌, 庄铁诚, 杨志伟, 林鹏. 海南东寨港红树林土壤微生物初探. 生态学杂志, 2001, 20(1): 63-64, 79-79.
- [5] 张莉, 赖坤汉, 陈正桃. 廉江高桥国家级红树林保护区建设的现状及对策. 海洋信息, 2002, (2): 18-20.
- [6] Cheng Z S, Tang W C, Chen Q J, Pan J H, Lin Y C. Biodiversity and biotechnological potential of mangrove-associated fungi. Journal of Forestry Research, 2009, 20(1): 63-72.
- [7] 张瑜斌, 林鹏, 邓爱英, 庄铁诚. 稀释平板技术应用于红树林区土壤微生物数量研究的方法学改进 // 张洪勋, 庄绪亮. 微生物生态学研究进展. 北京: 气象出版社, 2003: 86-89.
- [8] 李凤珍. 土壤微生物分析方法手册. 北京: 农业出版社, 1986: 314-314.
- [9] 中国科学院南京土壤研究所微生物室. 土壤微生物研究法. 北京: 科学出版社, 1985: 54-58.
- [10] 魏景超. 真菌鉴定手册. 上海科学技术出版社, 1979: 493-493.
- [11] 齐祖同. 中国真菌志 (第五卷) 曲霉属及其相关有性型. 北京: 科学出版社, 1997: 65-98.
- [12] 张中义. 中国真菌志 (第十四卷) 枝孢属 黑星孢属 梨孢属. 北京: 科学出版社, 2003: 69-233.
- [13] 孔华忠. 中国真菌志 (第三十五卷) 青霉属及其相关有性型属. 北京: 科学出版社, 2007: 124-203.
- [14] 喻璋, 张猛. 半知菌分属图册. 北京: 科学出版社, 2009: 222-222.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 638-638.
- [16] Cribb A B, Cribb J W. Marine fungi from Queensland-I. Pap Univ Queensl Dept Bot, 1955, 3: 77-81.
- [17] Kohlmeyer J, Cribb A B, Joan W. Cribb, Marine Mycology: The Higher Fungi. New York: Papers, University Queensland Department of Botany, 1979: 690-690.
- [18] Schmit, John Paul, Carol A Shearer, Kohlmeyer Jan, Kohlmeyer Erika. A checklist of mangrove-associated fungi, their geographical distribution and known host plants. Mycotaxon, 2003, 85: 423-477.
- [19] 刘爱荣, 吴晓鹏, 徐同. 红树林内生真菌研究进展. 应用生态学报, 2007, 18(4): 912-918.
- [20] 徐婧. 湛江红树林滩涂海洋真菌资源初步研究 [D]. 广东: 广东海洋大学, 2011: 81-81.
- [21] 林璐, 谭雄英, 刘凌霄, 牛莉娜, 裴华, 王华民, 饶朗毓. 海南红树林土壤真菌群落的初步研究. 科技通报, 2012, 28(9): 217-219, 225-225.
- [22] Rupam Kapoor. Root exudation and its implication on rhizosphere mycoflora // Gupta R, Singh J, Lakhanpal T N, Jewari J P, eds. Advances in Microbial Biotechnology. New Delhi: APH Publishing Corporation, 1999: 351-362.
- [23] Zhang F S, Shen J, Li L, Liu X. An overview of rhizosphere processes related with plant nutrition in major cropping systems in China. Plant and Soil, 2004, 260(1/2): 89-99.
- [24] 陆松柳, 张辰, 徐俊伟. 植物根系分泌物分析及对湿地微生物群落的影响研究. 生态环境学报, 2011, 20(4): 676-680.
- [25] 朱丽霞, 章家恩, 刘文高. 根系分泌物与根际微生物相互作用研究综述. 生态环境, 2003, 12(1): 102-105.
- [26] 洪泽珊. 湛江红树林国家级自然保护区浮游及底栖微藻生态研究 [D]. 广东: 中山大学, 2008: 34-34.
- [27] 王光华, 金剑, 徐美娜, 刘晓冰. 植物, 土壤及土壤管理对土壤微生物群落结构的影响. 生态学杂志, 2006, 25(5): 550-556.
- [28] 任健, 阎冰, 洪葵. 海南东寨港红树林不同植被土壤微生物群落结构比较. 微生物学报, 2012, 52(6): 736-743.
- [29] 王慧敏. 不同森林植被下土壤微生物与土壤生化性质的研究 [D]. 湖南: 湖南农业大学, 2005: 57-57.
- [30] 夏北成, Zhou J Z, Tiedje J M. 土壤微生物群落及其活性与植被的关系. 中山大学学报: 自然科学版, 1998, 37(3): 94-98.
- [31] 伍丽, 余有本, 周天山, 李冬花, 冯雪, 蒋堃. 茶树根际土壤因子对根际微生物数量的影响. 西北农业学报, 2011, 20(4): 159-163.