

东寨港红树林丛枝菌根真菌侵染和孢子密度及其影响因子研究^{*}

胡文武¹, 吴勇¹, 郭健桦¹, 彭雪¹, 辛国荣¹, 钟才荣²

(1. 广东省热带亚热带植物资源与利用重点实验室, 生物多样性演化与保护广东普通高校重点实验室, 中山大学生命科学学院, 广东 广州 510275;
2. 海南东寨港国家级自然保护区管理局, 海南 海口 571129)

摘要: 丛枝菌根(AM)结构存在于多种红树植物根内,但目前对于红树林中AM真菌的研究还未能完全揭示其存在的原因和状况。研究通过对海南东寨港红树林中不同潮位16种红树植物根内AM侵染情况、AM真菌孢子密度以及土壤理化因子开展调查,以了解东寨港红树林中AM真菌的存在状况及其影响因素。结果表明12种红树植物与AM真菌存在共生关系,其中海漆(*Excoecaria agallocha*)、许树(*Clerodendrum inerme*)、水黄皮(*Pongamia pinnata*)和黄槿(*Hibiscus tiliaceus*)侵染率较高,均高于55%;16种植物根际土壤中均检测到AM真菌孢子,每25g土壤的平均孢子密度为(25.7 ± 2.7)个。方差分析表明,不同宿主植物根内AM侵染情况差异显著;潮位对AM侵染率和孢子密度均具有显著影响,表现为高潮位显著高于中、低潮位,而中低潮位间无显著差异。线性回归分析表明土壤含水率、电导率和有效磷含量可能是影响东寨港红树林生境中AM侵染率和孢子密度的主要土壤因子。

关键词: 东寨港;红树林;丛枝菌根;侵染率;孢子密度;影响因子

中图分类号: Q938.1⁺3 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579(2015)02-0106-06

Arbuscular Mycorrhizal Fungi Colonization and Spore Density in Mangrove Species and Their Influence Factors in Dongzhaigang Nature Reserve

HU Wenwu¹, WU Yong¹, GUO Jianhua¹, PENG Xue¹, XIN Guorong¹, ZHONG Cairong²

(1. Guangdong Key Laboratory of Plant Resources, Key Laboratory of Biodiversity Dynamics and Conservation of Guangdong Higher Education Institutes, School of Life Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
2. Administration department, Dongzhaigang National Nature Reserve, Haikou 571129, China)

Abstract: Arbuscular mycorrhizal (AM) fungi exist in the root of a variety of mangrove plants, but our current research has failed to explain the reason and situation of their existence. This study intended to explore the AM fungi status and their influencing factors in mangrove species in Dongzhaigang National Nature Reserve. 16 mangrove species were investigated for their AM colonization rate, rhizosphere soil AM fungi spore density and soil parameters. The results showed that 12 of the total 16 plant species existed AM colonization, among which *Excoecaria agallocha*, *Clerodendrum inerme*, *Pongamia pinnata* and *Hibiscus tiliaceus* showed higher colonization rate than others (above 55%). AM fungi spores were detected from all rhizosphere soil samples, and the average AM fungi spore density was 25.7 ± 2.7 spores per

* 收稿日期: 2014-09-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31371567); 广东省自然科学基金资助项目(9251027501000010)

作者简介: 胡文武(1989年生),男;研究方向:菌根生态学;通讯作者:辛国荣;E-mail: lssxgr@mail.sysu.edu.cn

25 g air dried soil. One-way analysis of variance (ANOVA) revealed that AM colonization status was significantly different among different host plants. Tide level could also significantly influence AM colonization rate and spore density. Both AM colonization rate and spore density were significantly higher in high tide level than middle or low tide level, but no difference existed between middle and low tide level. Linear regression analysis showed that soil moisture content, electrical conductivity and available P content may be the main influencing soil factors of AM fungi in Dongzhaigang mangrove ecosystem.

Key words: Dongzhaigang; mangrove; arbuscular mycorrhiza; colonization rate; spore density; influence factors

红树林是热带海岸特有的湿地生态系统，蕴藏着非常丰富的生物资源^[1]。红树植物分布具有明显地带性，随着纬度升高，红树植物多样性和分布范围明显减小^[2]。全球红树植物共 24 科 80 余种，其中，中国有红树植物 20 科 26 属共 37 种。海南地处中国红树林自然分布最南端，是我国红树植物资源最丰富的地区，包括 26 种真红树和 11 种半红树^[3]。

由于红树林生境具有高盐、周期性水淹等特点，不利于 AM 真菌与红树植物形成共生关系^[4]，红树林生境中 AM 研究也因此长期处于停滞状态。Sengupta et al.^[5]首先在印度恒河入海口红树群落中发现 AM 侵染现象，后续研究证实大部分红树植物根内均存在 AM 侵染^[6-8]。在中国，关于红树林的研究多集中于景观和天然化合物开发等方面^[9-10]。王桂文等^[11]首先进行红树林中 AM 研究，本实验室 Wang et al.^[12-13]研究也进一步表明，AM 真菌不仅广泛存在于红树林生境中，并能对宿主生长等起到一定作用，而土壤理化因子和水文状况等非生物因子对红树林中 AM 真菌分布具有显著影响。

然而，目前关于红树林生态系统中 AM 研究的报道还非常有限，国内相关研究更是处于起步阶段。试验旨在通过对海南东寨港红树林自然保护区内红树植物 AM 真菌的调查，进一步了解中国红树林生境中 AM 侵染及分布状况；同时通过对宿主植物、潮位和土壤因子对红树林中 AM 的影响进行分析，研究对红树林中 AM 真菌的存在及侵染起主要作用的因素，为深入阐明红树林中 AM 真菌的功能提供基础。

1 试验地点和方法

1.1 研究地概况

海南东寨港红树林自然保护区位于海南省东北部，地处海口市和文昌市交界处，地理坐标为 19°51′-20°01′N，110°32′-110°37′E，是我国第一个

以红树林为主要保护对象的国家级自然保护区。该地区属典型的热带季风海洋性气候，是我国红树物种资源最为丰富的地区之一。试验根据红树植物不同潮位分布，共采集 16 种植物样本进行研究，其中高潮位 4 种，中潮位 3 种，低潮位 9 种（表 1）。

表 1 试验调查红树植物种类及采样地潮位
Table 1 Investigated mangrove plant species and estimated tide level

潮位	植物
高	海漆 <i>Excoecaria agallocha</i>
	许树 <i>Clerodendrum inerme</i> *
	水黄皮 <i>Pongamia pinnata</i> *
	黄槿 <i>Hibiscus tiliaceus</i> *
中	白骨壤 <i>Avicennia marina</i>
	卤蕨 <i>Acrostichum aureum</i>
	角果木 <i>Ceriops tagal</i>
低	秋茄 <i>Kandlia candel</i>
	桐花树 <i>Aegiceras corniculatum</i>
	木榄 <i>Bruguiera gymnorhiza</i>
	老鼠簕 <i>Acanthus ilicifolius</i>
	海莲 <i>Bruguiera sexangula</i>
	无瓣海桑 <i>Sonneratia apetala</i>
	红海榄 <i>Rhizophora stylosa</i>
	红树 <i>Rhizophora apiculata</i>
	海桑 <i>Sonneratia caseolaris</i>

*：半红树植物；潮位水平（高、中、低）由采样时根据采样地淹水时间估计；低潮位：每天淹水时间超过 7 h；中潮位：每天淹水时间约为 2~4 h；高潮位：每天淹水时间低于 1 h

1.2 试验方法

样品采集：试验样品采集时间为 2012 年 12 月，采集在东寨港红树林自然保护区内进行，每种植物样本重复次数为 3 次，每个样本空间间隔 30 m 以上。采样前，去掉土壤表面落叶层，用小铲挖取红树植物根部 5~30 cm 深直径小于 2 mm 的侧根及附带土壤，分别装入样品袋，并贴好标签带回实验室。

侵染率统计和 AM 孢子密度测定: 试验 AM 染色参考王幼珊等所述步骤^[14]。在 40 倍显微镜下, 每个根样统计 200 个视野以计算侵染率。采用湿筛倾析-蔗糖离心法从 25 g 风干根际土壤中筛取 AM 孢子并进行孢子密度统计^[15]。

土壤理化因子测定: 试验测定含水率、pH 值、有机质、电导率、全磷、有效磷、全氮和速效氮等土壤理化因子指标, 测定方法参照《土壤农业化学分析方法》^[16]。

1.3 数据统计与分析

试验数据采用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 结合最小显著差法 (Least Significant Difference) 在 0.05 水平比较不同植物 AM 侵染率、根际土壤 AM 真菌孢子密度和土壤理化因子的均值差异, 采用线性回归 (Linear Regression Analysis) 方法评价土壤理化因子与 AM 总侵染率和孢子密度的相关性。

2 试验结果

2.1 红树植物根内 AM 侵染率

试验调查的 16 种红树植物中, 共 12 种植物根内观察到 AM 侵染 (图 1)。不同潮位植物侵染率表现为高潮位植物侵染率显著高于中 ($F = 58.7, P = 0.000$)、低潮位 ($F = 65.2, P = 0.000$)。侵染率最高的海漆、水黄皮、黄槿和许树 4 种植物根样均采自高潮位, 其总侵染率均高于 55%, 而白骨壤、角果木、秋茄、桐花树、木榄、老鼠簕和海莲等中、低潮位植物样本总侵染率均低于 5%, 另有从低潮位采样的红海榄、红树、海桑和无瓣海桑 4 种植物根内未观察到 AM 侵染。存在 AM 侵染的植物中, 菌丝是主要的侵染形式, 除卤蕨和海莲根内泡囊侵染率高于丛枝侵染率外, 其余红树植物根内均是丛枝侵染率高于泡囊侵染率。

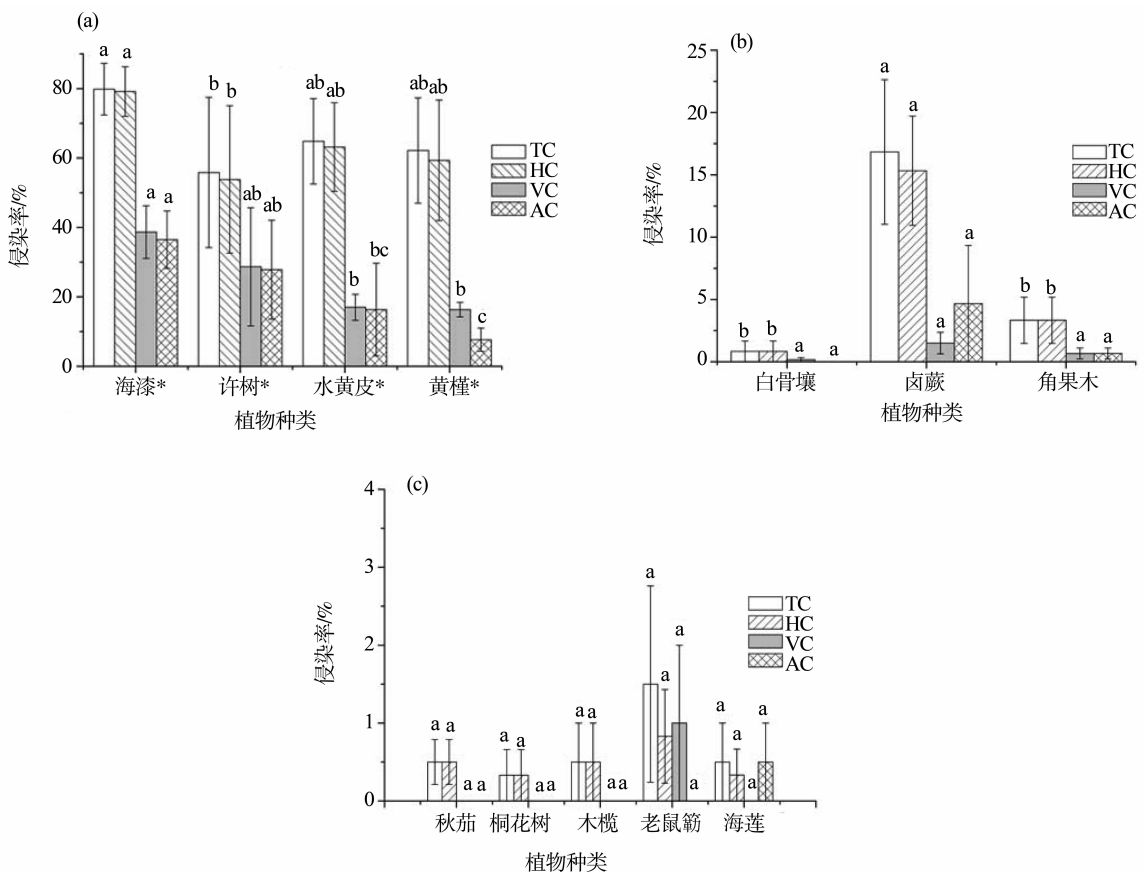


图 1 不同潮位红树植物 AM 侵染率

Fig. 1 AM colonization rate under different tide level

(a)、(b)、(c) 分别为高、中、低潮位红树植物 AM 侵染情况; TC: 总侵染率; HC: 菌丝侵染率; VC: 泡囊侵染率; AC: 丛枝侵染率; *: 半红树植物; 不同字母表示不同植物间侵染率差异显著

2.2 红树植物根际土壤 AM 真菌孢子密度

试验采集的 16 种红树植物根际土壤中均筛出了 AM 真菌孢子，在红海榄等 4 种未观察到根内 AM 侵染的植物根际土壤中，也发现了 AM 真菌孢子（图 2）。不同植物根际土壤孢子密度差别较大，25 g 根际土壤孢子密度最大的植物是水黄皮 74.8

± 8.3 ，最小的是秋茄 11.3 ± 3.0 。高潮位植物根际土壤 AM 真菌孢子密度高于中（ $F = 20.8, P = 0.006$ ）、低潮位（ $F = 23.1, P = 0.000$ ），低潮位有侵染和无侵染植物根际土壤中 AM 真菌孢子密度无差异（ $F = 2.8, P = 0.664$ ）。

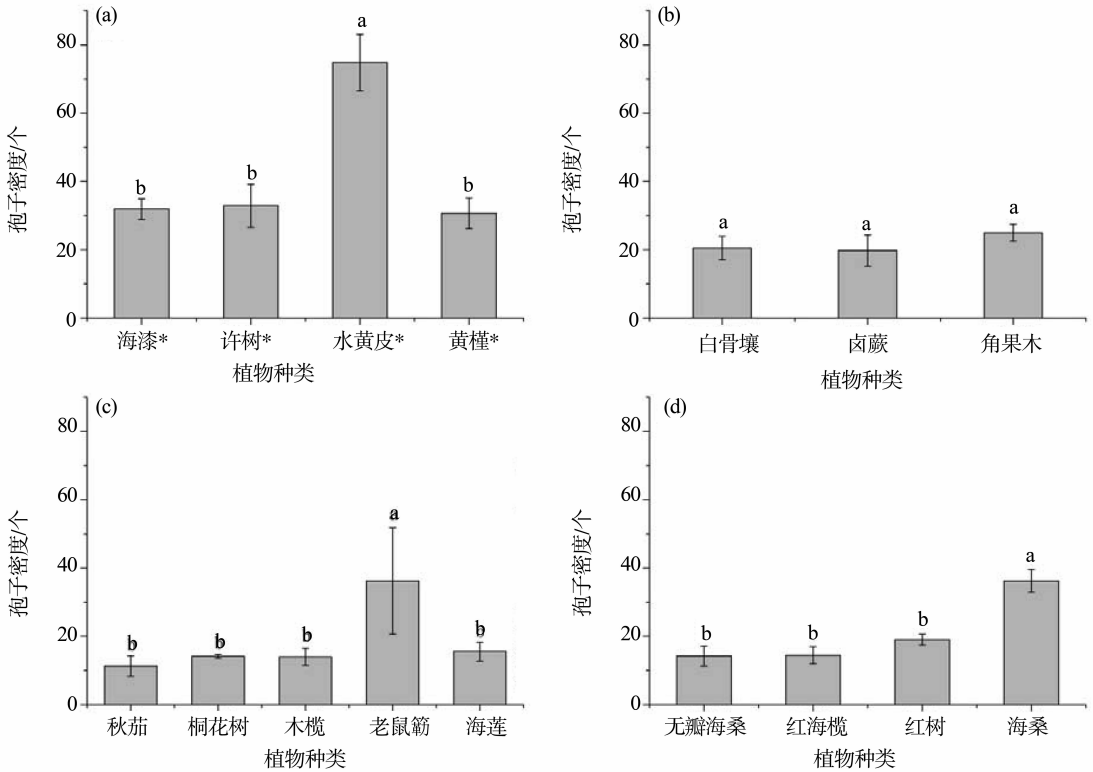


图 2 不同红树植物根际 25 g 土壤 AM 真菌孢子密度

Fig. 2 AM spore density in 25 g rhizosphere soil for different mangrove plant species

(a)、(b)、(c)、(d) 依次为高潮位、中潮位、低潮位有侵染和低潮位无侵染红树植物根际土壤孢子密度；*：半红树植物；不同字母表示不同植物间侵染率差异显著

2.3 土壤理化因子

东寨港红树林中不同植物根际土壤海水盐度变化不大，介于 15.2‰（海莲）到 28.7‰（红海榄）之间。土壤含水率较高，pH 均呈酸性，电导率变化较大。土壤养分水平差异较大，有机质含量较高，全氮和速效氮含量均较高，而全磷和有效磷含量较低（表 2）。

2.4 土壤理化因子与 AM 相关性

通过线性回归计算发现，与 AM 侵染率和孢子密度显著相关的土壤理化因子有 3 个：土壤含水率、电导率和有效磷含量（表 3），表明这 3 个因子可能是影响红树林中 AM 真菌分布的主要土壤理化因子。

3 讨论

试验调查的 16 种红树植物中，仅红海榄、红树、海桑和无瓣海桑等 4 种植物根内未观察到 AM 侵染结构，存在侵染的红树植物比例占调查总数的 75%，表明这些红树植物与 AM 真菌共生现象比较普遍^[6,8]；试验调查的所有植物根际土壤中均存在 AM 真菌孢子，进一步表明 AM 真菌普遍存在于红树林生境中^[12,17-18]。单因素方差分析结果显示不同植物根内 AM 侵染率（ $F = 14.4, P = 0.000$ ）存在显著性差异，不同植物根际土壤孢子密度（ $F = 4.5, P = 0.000$ ）间也存在显著性差异，表明宿主植物能够显著影响红树林中 AM 侵染和根际土壤

表 2 不同红树植物根际土壤理化因子¹⁾

Table 2 Soil properties for each mangrove species

潮位	物种	盐度/‰	含水率	pH	电导率/ (mS · cm ⁻¹)	w(有机质)/ %	w(速效氮)/ (mg · kg ⁻¹)	w(全氮)/ (g · kg ⁻¹)	w(有效磷)/ (mg · kg ⁻¹)	w(全磷)/ (g · kg ⁻¹)
高	海漆 <i>E. agallocha</i>	24.6 ± 5.1a	0.43 ± 0.12a	5.90 ± 0.34a	4.21 ± 0.78a	4.6 ± 1.4a	318.0 ± 133.3a	2.77 ± 1.45a	9.6 ± 5.4a	0.72 ± 0.23a
	许树 * <i>Cle. inerme</i>	22.2 ± 3.7a	0.31 ± 0.02a	5.84 ± 0.31a	2.54 ± 0.53a	3.2 ± 0.4a	300.1 ± 78.9a	1.33 ± 0.20a	4.7 ± 1.3a	0.54 ± 0.10a
	水黄皮 * <i>P. pinnata</i>	28.3 ± 2.1a	0.30 ± 0.03a	6.07 ± 0.17a	2.97 ± 0.60a	4.0 ± 0.1a	204.2 ± 19.1a	1.60 ± 0.20a	5.2 ± 2.1a	0.75 ± 0.19a
	黄槿 * <i>H. tiliaceus</i>	22.5 ± 3.7a	0.43 ± 0.15a	5.81 ± 0.26a	3.26 ± 0.52a	4.2 ± 1.1a	269.5 ± 85.1a	2.14 ± 1.00a	8.4 ± 5.8a	0.69 ± 0.29a
中	白骨壤 <i>Avi. marina</i>	32.5 ± 0.0a	0.58 ± 0.13a	5.82 ± 0.16a	9.07 ± 0.70a	6.3 ± 0.1a	586.1 ± 145.9a	5.07 ± 1.23a	54.2 ± 18.7a	3.05 ± 0.10a
	卤蕨 <i>Acr. aureum</i>	21.0 ± 5.8b	0.62 ± 0.10a	5.36 ± 0.38a	5.14 ± 0.60b	3.0 ± 0.8a	384.1 ± 107.8a	1.33 ± 1.01ab	15.0 ± 5.8b	1.37 ± 0.56ab
	角果木 <i>Cer. tagal</i>	26.1 ± 0.0ab	0.47 ± 0.03a	5.63 ± 0.30a	5.05 ± 0.14b	4.0 ± 1.0a	256.9 ± 36.8a	1.58 ± 0.24b	10.5 ± 1.4b	0.51 ± 0.01b
低	秋茄 <i>K. candel</i>	22.9 ± 3.9a	0.52 ± 0.09a	6.46 ± 0.16a	5.38 ± 0.52a	4.6 ± 0.8a	302.4 ± 44.9a	2.06 ± 0.83a	25.5 ± 7.8a	0.82 ± 0.25b
	桐花树 <i>Aeg. corniculatum</i>	25.0 ± 5.1a	0.55 ± 0.12a	5.75 ± 0.19ab	5.51 ± 1.52a	4.7 ± 1.2a	376.4 ± 55.3a	3.15 ± 1.17a	26.2 ± 8.0a	2.81 ± 0.98a
	木榄 <i>B. gymnorhiza</i>	24.7 ± 5.1a	0.61 ± 0.00a	4.95 ± 0.42b	6.47 ± 1.11a	7.1 ± 0.9a	384.3 ± 48.0a	2.86 ± 1.01ab	24.9 ± 5.4a	1.01 ± 0.22ab
	老鼠簕 <i>Aca. ilicifolius</i>	21.0 ± 5.8a	0.60 ± 0.10a	5.27 ± 0.38b	5.57 ± 0.29a	5.9 ± 0.9a	363.5 ± 59.2a	3.57 ± 0.81a	18.3 ± 4.6a	1.45 ± 0.60ab
	海莲 <i>B. sexangula</i>	15.2 ± 0.0a	0.67 ± 0.02a	5.07 ± 0.45b	6.19 ± 0.31a	6.4 ± 0.0a	340.9 ± 23.9a	3.14 ± 0.13a	28.3 ± 9.9a	1.48 ± 0.51ab
低 -	无瓣海桑 <i>S. apetala</i>	26.4 ± 0.1a	0.37 ± 0.03a	6.07 ± 0.23a	3.89 ± 0.80a	2.4 ± 0.5a	87.7 ± 38.1a	0.88 ± 0.22a	7.9 ± 1.8a	0.72 ± 0.11a
	红海榄 <i>R. stylosa</i>	28.7 ± 1.9a	0.46 ± 0.10a	5.65 ± 0.13a	5.81 ± 2.01a	4.1 ± 1.4a	356.8 ± 170.8a	2.76 ± 1.87a	24.6 ± 12.3a	0.74 ± 0.25a
	红树 <i>R. apiculata</i>	27.2 ± 0.0a	0.40 ± 0.03a	5.76 ± 0.21a	4.02 ± 0.54a	2.4 ± 0.6a	161.0 ± 61.2a	0.96 ± 0.24a	11.5 ± 2.8a	0.58 ± 0.09a
	海桑 <i>S. caseolaris</i>	23.2 ± 4.0a	0.48 ± 0.10a	6.09 ± 0.30a	4.80 ± 0.39a	4.0 ± 1.2a	269.5 ± 82.9a	1.72 ± 0.73a	15.9 ± 9.3a	0.58 ± 0.11a

1) 不同小写字母表示不同采样地点根际土壤理化因子在 $P = 0.05$ 水平差异显著; - : 试验未观察到 AM 侵染

表 3 土壤理化因子与 AM 侵染率和孢子密度线性回归分析¹⁾

Table 3 Linear regression analysis of soil properties and AM colonization rate and spore density

因变量	自变量	标准化系数	<i>t</i>	Sig.
侵染率	含水率	-0.41	-2.82	0.007
	电导率	-0.51	-3.74	0.001
	有效磷	-0.40	-2.80	0.008
孢子密度	含水率	-0.48	-3.44	0.001
	电导率	-0.42	-2.92	0.006
	有效磷	-0.31	-2.09	0.043

1) 仅列出与 AM 侵染有显著相关性的土壤理化因子分析结果

AM 真菌孢子密度。本试验存在 AM 侵染的植物中,菌丝是主要的侵染形式,孢囊和丛枝结构较少出现,可能与红树林生境中湿度和盐度有关^[18]。

本实验室在珠海淇澳岛和深圳福田红树林中调查中,发现海桑和无瓣海桑 2 种红树植物也存在 AM 侵染^[18],但本试验并未在海桑和无瓣海桑根内观察到 AM 侵染,主要原因可能是由于采样地处于低潮位(表 1),水淹情况比较严重,限制了 AM 真菌与红树植物的共生关系形成,与之相反,在高潮位采样的海桑等 4 种红树植物侵染率较高,孢子密度统计结果(图 2)也表明高潮位带植物根内 AM 真菌孢子密度要高于中、低潮位植物。单因素方差分析表明不同潮位红树植物根内 AM 总侵染率 ($F = 117.6, P = 0.000$) 和根际土壤孢子密度 ($F = 8.8, P = 0.001$) 均存在显著性差异,说明淹水情况是影响红树林 AM 分布的重要非生物因素^[12,19]。

除植物种类和水文状况外,土壤因子也会对 AM 真菌孢子和侵染率产生影响^[20]。试验与 AM 侵

染显著相关的 3 个土壤因子中,土壤含水率与 AM 侵染率和孢子密度的负相关关系可能是由于较长的水淹周期降低了土壤中的氧气含量,不利于好氧的 AM 真菌与宿主植物共生关系的形成^[4],也表明水文状况是影响红树林中 AM 真菌与植物共生关系的重要非生物因子^[12]。土壤电导率和有效磷含量与 AM 之间的相关性在前人的研究中均有发现^[21-23],土壤是一个复杂的系统,其中影响 AM 真菌分布的生物和非生物因子较多,因而入侵植物根际 AM 状况更可能是多种因素综合作用的结果。

4 结 论

试验结果表明,海南东寨港红树林生态系统中普遍存在 AM 真菌分布,大部分红树植物与 AM 真菌存在共生关系,但 AM 侵染情况和土壤孢子密度均比大部分陆地生境中要低。不同宿主植物根内 AM 侵染情况差异显著,潮位对 AM 侵染率和孢子密度均具有显著影响,土壤含水率、电导率和有效磷含量是影响东寨港红树林生境中 AM 侵染率和孢子密度的主要土壤因子。

参考文献:

- [1] LUGO A E, SNEDAKER S C. The ecology of mangroves [J]. *Ann Rev Syst*, 1974, 5: 39-64.
- [2] 赵萌莉, 林鹏. 红树植物多样性及其研究进展 [J]. *生物多样性*, 2000, 8(2): 192-197.
- [3] 傅秀梅, 王亚楠, 邵长伦, 等. 中国红树林资源状况及其药用研究调查 II. 资源现状、保护与管理 [J]. *中国海洋大学学报*, 2009, 39(4): 705-710.
- [4] JUNIPER S, ABBOTT L K. Soil salinity delays germination and limits growth of hyphae from propagules of arbuscular mycorrhizal fungi [J]. *Mycorrhiza*, 2006, 16: 371

- 379.
- [5] SENGUPTA A, CHAUDHURI S. Arbuscular mycorrhizal relations of mangrove plant community at the Ganges river estuary in India [J]. *Mycorrhiza*, 2002, 12: 169 - 174.
- [6] KUMAR T, GHOSE M. Status of arbuscular mycorrhizal fungi (AM) in the Sundarbans of India in relation to tidal inundation and chemical properties of soil [J]. *Wetl Ecol Manag*, 2008, 16: 471 - 483.
- [7] CHOUDHURY B, KALITA M C, AZAD P. Distribution of arbuscular mycorrhizal fungi in marshy and shoreline vegetation of Deepar Beel Ramsar Site of Assam, India [J]. *World J Microbial Biotechnol*, 2010, 26: 1965 - 1971.
- [8] D'SOUZA J, RODRIGUES B F. Biodiversity of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi in mangroves of Goa in West India [J]. *J For Res*, 2013, 24: 515 - 523.
- [9] 陈保瑜, 宋悦, 咎启杰, 等. 深圳湾景观类型转移强度分析 [J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2013, 52(3): 93 - 102.
- [10] 李春远, 黄松, 余志刚, 等. 两株红树内生真菌共培养正丁醇萃取部位化学成分研究 [J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2014, 53(2): 78 - 81.
- [11] 王桂文, 李海鹰, 孙文波. 钦州湾红树林丛枝菌根初步研究 [J]. *广西植物*, 2003, 23(5): 445 - 449.
- [12] WANG Y T, HUANG Y L, QIU Q, et al. Flooding greatly affects the diversity of arbuscular mycorrhizal fungi communities in the roots of wetland plants [J]. *PloS one*, 2011, 6(9): e24512.
- [13] WANG Y T, LI T, LI Y W, et al. Distribution of arbuscular mycorrhizal fungi in four semi-mangrove plant communities [J]. *Ann Microbiol*, 2014: 1 - 8. Doi: 10.1007/s13213-014-0896-x.
- [14] 王幼珊, 张淑彬, 张美庆. 中国丛枝菌根真菌资源与种质资源 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2012: 166 - 168.
- [15] AN Z Q, HENDRIX J W, HERSHMAN D E, et al. Evaluation of the most probable number (MPN) and wet sieving methods for determining soil-borne populations of endogonaceous mycorrhizal fungi [J]. *Mycologia*, 1990, 82: 516 - 518.
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 12 - 185.
- [17] YPSILANTIS I, SYLVIA D M. Interactions of assemblages of mycorrhizal fungi with two Florida wetland plants [J]. *Appl Soil Ecol*, 2007, 35: 261 - 271.
- [18] WANG Y T, QIU Q, YANG Z Y, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi in two mangroves in South China [J]. *Plant Soil*, 2010, 331: 181 - 191.
- [19] GAI J P, TIAN H, YANG F Y, et al. Arbuscular mycorrhizal fungal diversity along a Tibetan elevation gradient [J]. *Pedobiologia*, 2012, 55: 145 - 151.
- [20] SIVAKUMAR N. Effect of edaphic factors and seasonal variation on spore density and root colonization of arbuscular mycorrhizal fungi in sugarcane fields [J]. *Ann Microbiol*, 2013, 63: 151 - 160.
- [21] AZCON R, AMBROSANO E, CHAREST C. Nutrient acquisition in mycorrhizal lettuce plants under different phosphorous and nitrogen concentration [J]. *Plant Sci*, 2003, 165: 1137 - 1145.
- [22] 辛国荣, 孙斌, 黎国喜, 等. 广东不同地区冬种意大利黑麦草根际 AM 生理生态研究 [J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2008, 47(2): 80 - 83.
- [23] CHEN Y, YUAN J G, YANG Z Y, et al. Associations between arbuscular mycorrhizal fungi and *Rhynchelyrum repens* in abandoned quarries in southern China [J]. *Plant Soil*, 2008, 304: 257 - 266.