

清澜港红树植物分布与土壤环境因子的相关关系

郭菊兰¹, 秦英英², 朱耀军¹, 郭志华^{1*}, 武高洁¹

(1. 中国林业科学研究院湿地研究所,北京 100091; 2. 北京林业大学省部共建森林培育与保护重点实验室,北京 100083)

摘要:在清澜港红树林湿地, 布设 18 个样地, 运用典范对应分析(CCA)分析了土壤 pH 值、盐基总量(TS)、有机质(SOM)、S、TN、P、K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Al³⁺、Fe³⁺、Zn、Cu、Mn、Pb、Sc、Sr、V、As、Ba、Cr 等共计 22 个因子与红树林植被分布的相关关系。结果表明:(1)清澜港红树植物种类分布与潮滩高程有关, 随潮滩高程的升高, 植物种类逐渐增多, 红树群落结构趋于复杂。(2)土壤 S、pH 值、TN、Al³⁺ 及盐基是土壤化学因子中影响清澜港红树林湿地植被分布的关键因子; S (-0.594 4) 和 pH 值 (-0.532 0) 与第 1 排序轴显著相关, TN (0.512 5) 与第 2 排序轴显著相关, Al³⁺ (0.530 5) 与第 3 排序轴显著相关, pH 值 (-0.566 7) 则与第 4 排序轴显著相关, 盐基总量(TS) 与 4 个排序轴的相关性都比较显著。(3)土壤微量元素 Fe³⁺、Zn、Cu、Mn、As、Cr 对红树植物群落及红树植物的分布有较高的影响作用; Fe³⁺、Cu、Mn、Cr 与第 1 排序轴显著相关, 相关系数分别为 -0.358 7、-0.352 6、0.487 7、0.378 0; Fe³⁺、Zn、As 与第 2 排序轴具有较高的负相关性, 相关系数分别为 -0.358 8、-0.412 8 和 -0.399 8。研究还表明: 清澜港八门湾外(组 I)和八门湾内(组 II)红树林群落与土壤微量元素的相关性明显不同, 反映出 2 种不同类型植物群落间物种组成的差异。组 I 的 3 号断面(八门湾入海口)是组 I 与组 II 的过渡区域, 表现出植物群落的过渡性特点。

关键词:清澜港; 红树林; 环境因子; 典范对应分析

中图分类号: S727.2

文献标识码: A

Correlation Between Mangrove Species Distribution and Soil Environmental Factors at Qinglan Harbour, Hainan Province, China

GUO Ju-lan¹, QIN Ying-ying², ZHU Yao-jun¹, GUO Zhi-hua¹, WU Gao-jie¹

(1. Research Institute of Wetland, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

2. Key Laboratory for Silviculture and Forest Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: The distribution pattern of mangrove species and its impact factors (pH, BS, SOM, S, TN, P, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Al³⁺, Fe³⁺, Zn, Cu, Mn, Pb, Sc, Sr, V, As, Ba, Cd, Cr) were analyzed with the method of Canonical Correspondence Analysis (CCA) at Qinglan Harbour, Hainan Province, China. There were total 18 plots in the study area. The mangrove species and soil factors in CCA analysis showed that the distribution of the mangrove plant species was related with the tidal flat elevation. With the increasing of the tidal flat elevation, the mangrove plant species gradually increased, and the mangrove community structure became more complex. Soil S, pH, TN, Al³⁺ and BS were the main soil chemical factors which affected the plant species distribution. S (-0.594 4) and pH (-0.532 0) were both significantly associated with the first axis. TN (0.512 5) was significantly associated with the second axis. Meanwhile, Al³⁺ (0.530 5) was significantly associated with the third axis. pH (-0.566 7) was significantly associated with the fourth axis. While, BS was significantly associated with all of the four axes.

收稿日期: 2013-04-24

基金项目: 林业公益性行业科研专项项目(20114072); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(CAFINT2010K08)

作者简介: 郭菊兰, 大学本科, 高级工程师, 主要研究方向: 湿地资源管理与湿地生态学研究。电话: 010-62888419 E-mail: guojulan@

163.com

* 通讯作者: E-mail: guo_zhi_hua@123.com

Soil trace elements (Fe^{3+} , Zn, Cu, Mn, Cr and As) had higher effects on the distribution of mangrove species. Fe^{3+} , Cu, Mn, Cr were significantly correlated with the first axis, the correlation coefficient was -0.3587 , -0.3526 , -0.4877 and 0.3780 , respectively. Soil Fe^{3+} , Zn and As were significantly negatively correlated with the second axis, and the correlation coefficient was -0.3588 , -0.4128 and -0.3998 , respectively. The correlation of the mangrove community and soil trace elements between Bamen Bay (group I) and Bamen Bay outside (group II) was clearly different, which showed that the differences of mangrove species composition between the two different plant community types. The third sample of group I (Bamen Bay estuary) was the transition area between group I and group II, which showed the transitional characteristics of mangrove plant communities.

Key words: Qinglan Harbour; mangrove; environmental factors; CCA

红树林湿地作为独特的海陆边缘生态系统,在维护和改善海湾、河口地区生态环境,抵御海潮、风浪、台风等自然灾害和防治近海海洋污染及保护沿海湿地生物多样性等方面发挥着森林和湿地的强大生态功能。我国第七次全国森林资源清查报告中显示,我国红树林各地类总面积 $8.2 \text{ 万 } \text{hm}^2$,其中,红树林 $2.20 \text{ 万 } \text{hm}^2$ ^[1],尚不到 20 世纪 50 年代的一半^[2]。恢复重建红树林的工作迫在眉睫,对红树林种群分布格局的研究是红树林湿地生态恢复与重建的重要基础。红树种群的分布格局受多种因素影响,其中,红树林湿地土壤(沉积物)是直接影响红树植物生长发育最重要的环境因素之一^[3]。

红树林是热带、亚热带沿海滩涂一种特殊植被类型,由于红树成分较为特殊,其林下土壤与一般的盐土有明显差异^[4],要求有特定的土壤条件。土壤化学因子中的土壤盐分^[5]、土壤养分含量^[6]等往往起重要作用。许多研究强调了土壤化学性质对植被分布及多样性的影响^[7-8]。有关土壤理化性质对不同红树植物分布和生长发育的影响,已有不少报道^[9-15]。本文在前人研究的基础上,试图应用典范对应分析(CCA)这一直接梯度排序方法,通过对清澜港红树林湿地 18 个样地植物的调查和土壤环境数据的测定,分析清澜港红树林植被分布与土壤环境化学因子及土壤微量元素之间的相关性,以期红树林湿地保护管理及恢复提供参考。

1 研究区概况

海南清澜港红树林自然保护区位于海南省东北部文昌市界内($110^{\circ}30' \sim 110^{\circ}02' \text{ E}$, $19^{\circ}15' \sim 20^{\circ}09' \text{ N}$),属热带季风气候^[15]。保护区年平均气温 $24.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$,最冷月平均最低气温 $18 \text{ }^{\circ}\text{C}$,历史极端最高气温 $39.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$,极端最低气温 $4.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。潮汐属于不规则全日潮,平均潮差 0.75 m ,最大潮差 2.06 m 。土壤淤泥质,土

壤及水体含盐量变化很大。

保护区总面积 $2\,906.57 \text{ hm}^2$,其中,红树林面积 $1\,223.3 \text{ hm}^2$,主要由 3 部分组成,第 1 部分位于文昌市八门湾后港湾,是保护区面积最大、生长最好的主要红树林生长区;第 2 部分分布于文昌市北部铺前港罗豆海域沿海一带;第 3 部分分布于文昌市南部冠南沿海(图 1)。该保护区林木面积大,树龄长,许多林相显示了原生林的特征。如有树龄达百年以上的海莲(*Bruguiera sexangula* (Lour) Poir)林,还有独特的成片正红树(*Rhizophora apiculata* Blume)林,小片的木果楝(*Xylocarpus granatum* Koenig)群落。除红榄李(*Lumnitzera littorea* (Jack) Voigt)外,国内所有的红树植物都可以在本保护区找到,且是海南海桑(*Sonneratia hainanensis* Ko et Chen)的唯一分布区,这里拥有全国最高大的红树林^[2]。

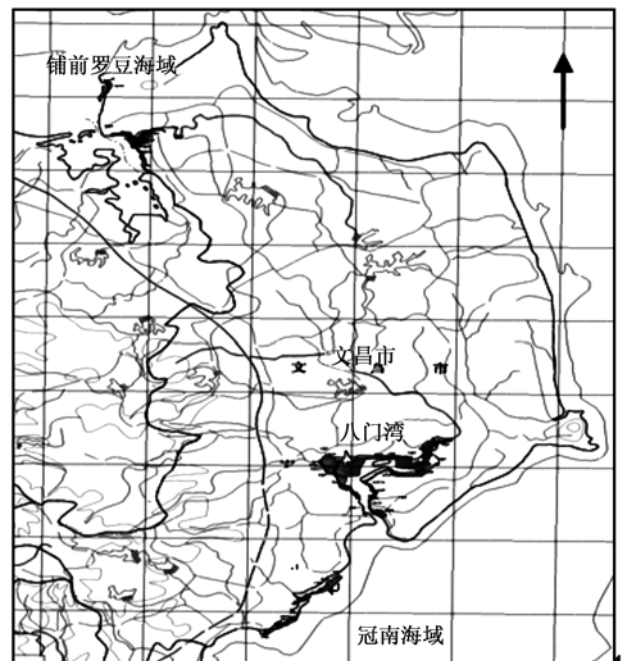


图 1 清澜港保护区红树林分布图

2 研究方法

2.1 调查方法

2.1.1 断面、样地设计

2.1.1.1 断面设计 样地调查数据采集于2011年4月下旬。本研究在布设断面时,对研究区内的红树林植被的自然生长状况及人为活动如养殖、围垦、放牧等情况作了充分的调查。选择没有砍伐、围垦、养殖、放牧等人为干扰、生态分布序列完整的近自然红树林区域,沿红树林向陆延伸方向布设断面。鉴于清澜港红树林湿地地形、地貌特点,断面线分别选择在八门湾内后港湾(断面1~4)、冠南沿海(断面5)及铺前罗豆海域(断面6)红树林湿地,共设6条断面线(图2~4)。

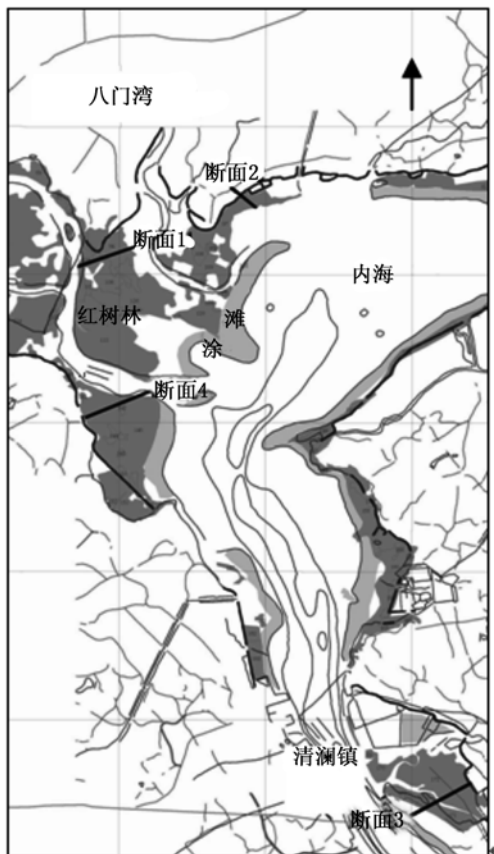


图2 八门湾土壤采样断面示意图

2.1.1.2 样地设置 在前期对该地区植被广泛考察的基础上,依据测得的红树植物在滩涂位置(高程)及潮汐对红树植物的浸淹深度(植物主干水痕线至地面的距离),对研究区内的红树林种群进行潮带(高潮带、中潮带、低潮带)划分,并再次对断面所在红树林湿地的自然度进行测评,如果人为活动痕迹显著,则放弃该断面,重新选择断面。在此基础



图3 冠南土壤采样断面示意图

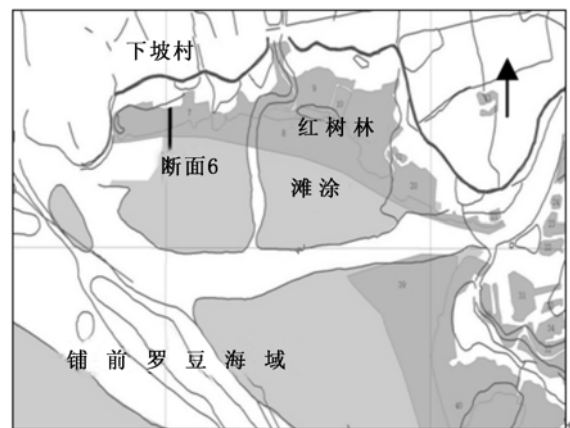


图4 铺前港土壤采样断面示意图

上,沿高、中、低3个潮滩位各布设1个 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 的样地,用GPS定位样地中心点。如果样地内树林密度小,则扩大样地面积,使每一样地至少有100棵树。断面线及样地设置见表1及图2~4。

2.1.2 数据采集及测定

2.1.2.1 植物样地调查 样地植物调查内容包括:种名、高度、数量和多度等。

2.1.2.2 植物浸淹高度调查 在进行样地植物调查的同时,观察植物主干被潮水浸淹的最高水痕线,测量记录其距地面的高度。

2.1.2.3 土壤化学因子调查 退潮后在每个红树林样地内,随机钻取土样3个,采土深度至地面以下45 cm,分0~10、10~20、20~30、30~45 cm等4层采集,同一样地3个土样的对应层混合后带回室内分析。

2.1.2.4 土壤化学因子测定 根据红树林生境的特性^[15-16]确定土壤化学因子的测定指标,测定指标包括土壤pH值、盐基总量(TS)、有机质(SOM)、S、TN、P、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 、Zn、Cu、Mn、

Pb、Sc、Sr、V、As、Ba、Cr 等共 22 个土壤化学因子。

2.1.2.5 测定方法 土壤 pH 值采用电位法;有机质采用重铬酸钾氧化-外加热法;土壤 S 用采燃烧碘量法;交换性盐基总量采用乙酸铵交换-中和滴定法;全 P 采用氢氟酸-高氯酸消煮-钼锑抗比色法;全 N 采用扩散法;全 K 采用氢氧化钠碱熔-火焰光度

法。沉积物中其它金属 (Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 、Zn、Cu、Mn、Pb、Sc、Sr、V、As、Ba、Cr) 采用电感耦合等离子体发射光谱法(ICP)。详细实验方法参见《中华人民共和国林业行业标准-森林土壤分析方法》^[17]及《土壤农业化学分析方法》^[18]。

表 1 18 个样地分布情况

潮位	断面 1	断面 2	断面 3	断面 4	断面 5	断面 6
高	样地 1(1-1)	样地 4(2-1)	样地 7(3-1)	样地 10(4-1)	样地 13(5-1)	样地 16(6-1)
中	样地 2(1-2)	样地 5(2-2)	样地 8(3-2)	样地 11(4-2)	样地 14(5-2)	样地 17(6-2)
低	样地 3(1-3)	样地 6(2-3)	样地 9(3-3)	样地 12(4-3)	样地 15(5-3)	样地 18(6-3)

2.2 数据分析

2.2.1 红树林植物种类垂直于海岸横断面梯度的变化 以样地植物调查和潮汐浸淹高度数据,分析红树林滩涂垂直于海岸的横断面特征,即红树植物随潮位带的变化趋势。

2.2.2 红树林植物物种分布与土壤因子的关系

在 18 个样地调查中共得到 18 种植物(表 2),剔除频度小于 5% 的 3 个种后,构成一个 18×15 的物种数据矩阵,由于该矩阵的量级有较大差别,因此在进行分析之前先使用 $\ln(X+1)$ 函数对其进行转换。

表 2 清澜港主要红树植物名录

科名	种名	拉丁学名
卤蕨科	Acrostichaceae	1 尖叶卤蕨 <i>Acrostichum speciosum</i> Willd.
紫葳科	Bignoniaceae	2 滨海猫尾木 <i>Dolichandrone spathacea</i> (L. f.) K. Schum
使君子科	Combretaceae	3 榄李 <i>Lumnitzera racemosa</i> Willd.
大戟科	Euphorbiaceae	4 海漆 <i>Excoecaria agallocha</i> L.
锦葵科	Malvaceae	5 黄槿 <i>Hibiscus tiliaceus</i> L.
楝科	Meliaceae	6 木果楝 <i>Xylocarpus granatum</i> Koenig
紫金牛科	Myrsinaceae	7 桐花树 <i>Aegiceria corniculatum</i> (L.) Blanco
红树科	Rhizophoraceae	8 尖瓣海莲 <i>Bruguiera sexangula</i> (Lour.) Poiret var. <i>rhynchopetalla</i> Ko
		9 木榄 <i>B. gymnorrhiza</i> (L.) Lam.
		10 海莲 <i>B. sexangula</i> (Lour.) Poiret.
		11 角果木 <i>Ceriops tagal</i> (Perr.) C. B. Robinson.
		12 秋茄树 <i>Kandelia obovata</i> Sheue, Liu et Yong
		13 正红树 <i>Rhizophora apiculata</i> Bl.
		14 红海榄 <i>R. stylosa</i> Griff
茜草科	Rubiaceae	15 瓶花木 <i>Scyphiphora hydrophyllacea</i> Gaertn.
海桑科	Sonneratiaceae	16 拟海桑 <i>Sonneratia paracaseolaris</i> Ko
		17 杯萼海桑 <i>S. alba</i> J. Smith
马鞭草科	Verbenaceae	18 白骨壤 <i>Avicennia marina</i> (Forsk) Vierh.

在对数据分析之前,先进行除趋势对应分析(DCA),判断是使用线性模型还是单峰模型,分析得到的第 1 轴数值为 3.682,介于 3.0~4.0 间,说明选择冗余(RDA)分析和典范对应分析(CCA)均可,经过 RDA 与 CCA 对比得出,CCA 分析的效果更好。因此,本文选择使用 CCA 排序方法。

利用典范对应分析(CCA)^[19]分别对土壤因子及微量元素等与红树林物种的相关关系进行分析,得出对应的 CCA 排序图。在排序图中,箭头代表环境因子,箭头连线的长度代表相应环境因子与样方

或物种相关程度的大小,长度越长代表其对样方或物种的影响越大,越短则代表这个影响越小;箭头连线与排序轴夹角的余弦值代表这个环境因子与排序轴的相关性的程度;样方中的相异度以卡方距离为依据,如果 2 个样方内各个物种的相对多度一样,那么这 2 个样方在图上的位置是一样的;样方之间的距离代表样方之间的差异程度,物种点之间的距离代表分布差异程度,两物种点之间距离越小,说明这两物种的分布差异越小;作物种和环境因子连线的垂直线,该垂直线与环境因子连线的交点距离箭头

越近表示该物种与该环境因子的正相关性越大。

3 结果与分析

3.1 红树植物种类垂直于海岸的横断面梯度变化 由 18 种红树植物在潮间带(高、中、低)的分布

(表 3) 可看出:清澜港红树植物物种分布与潮滩高程有关,随潮滩高程升高(由低潮位到高潮位)物种多样性增加,红树群落结构趋于复杂;半红树植物黄槿和滨海猫尾木在高潮位出现;在不同潮位,出现了不同的优势种。

表 3 主要红树植物种群垂直于海岸的横断面梯度变化潮位

潮位	树种组成	树种数量/个	优势种
高	角果木 33.04%、海莲 19.78%、杯萼海桑 8.04%、红海榄 5.65%、红树 5.43%、海漆 4.78%、木果楝 4.57%、白骨壤 4.34%、榄李 3.70%、黄槿 3.04%、滨海猫尾木 2.83%、桐花树 1.96%、尖瓣海莲 1.20%、木榄 0.91%、拟海桑 0.54%、尖叶卤蕨 0.3%	16	角果木、海莲
中	桐花树 32.05%、角果木 25.89%、红树 12.68%、白骨壤 8.13%、红海榄 5.89%、木果楝 3.30%、杯萼海桑 3.21%、榄李 2.77%、海莲 1.70%、海漆 1.70%、秋茄 1.10%、尖瓣海莲 0.68%、木榄 0.6%、瓶花木 0.3%	15	桐花树、角果木
低	桐花树 35.3%、角果木 26.7%、红树 19.1%、榄李 13.2%、杯萼海桑 2.41%、红海榄 2.27%、白骨壤 0.77%、海莲 0.1%、尖瓣海莲 0.08%、木榄 0.07%	10	桐花树、角果木

在样地调查中发现,低潮位样地的红树植物种类较少,结构简单。在 6 个低潮位样地植物群落中,红树种类最多的样地有 4 个树种,最少的有 2 个树种,有的低潮位植物群落样地几乎为红海榄纯林,偶有角果木混生;有的样地角果木、桐花树和榄李呈聚集的灌木丛;在海岸线的浪击前沿,低潮位样地生长着大乔木白骨壤。

从表 3 还看出:角果木虽然是先锋树种,但在高、中、低潮带都是优势树种,桐花树是中、低潮带的优势树种。由此可见,这几个红树种有较强的适生性。

3.2 红树植物种类分布与土壤环境因子的关系

3.2.1 红树林分布与土壤因子的相关关系 利用典范对应分析(CCA)分析了红树林物种分布与 pH 值(E1)、盐基总量(E2)、有机质(E3)、TN(E4)、 Al^{3+} (E5)、 Ca^{2+} (E6)、 K^+ (E7)、 Mg^{2+} (E8)、 Na^+ (E9)、P(E10)、S(E11)等元素的关系。从图 5、6 及表 4 可看出:S(-0.594 4)和 pH 值(-0.532 0)与第 1 排序轴显著相关,TN(0.512 5)与第 2 排序轴显著相关, Al^{3+} (0.530 5)与第 3 排序轴显著相关,pH 值(-0.566 7)则与第 4 排序轴显著相关,盐基总量与 4 个排序轴的相关性都比较显著,尤其与第 3 排序轴(0.380 4)和第 4 排序轴(-0.394 1)显著相关, Ca^{2+} 也类似于盐基,与 4 个排序轴的相关性都比较显著,尤其与第 1 排序轴(-0.458 6)和第 4 排序轴(-0.396 7)显著相关。

根据 CCA 排序结果可知:土壤 S、pH 值、TN、 Al^{3+} 及盐基总量是土壤化学因子中影响清澜港红树林湿地植被分布的关键因子。

从排序图 5 可看出 18 个样地红树植物群落的相对位置,其中,11 个样地位于第 2 排序轴的左侧,这些样地与土壤因子 pH 值、盐基总量(TS)、 Al^{3+} 、 Ca^{2+} 、S 相对应,表征了这些样地土壤低 TN、P、 K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 含量及低有机质含量的特征;另外 7 个样地位于第 2 排序轴的右侧,与土壤因子 TN、P、 K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 及有机质相对应,表征了这些样地土壤 pH 值、盐基总量(TS)、 Al^{3+} 、 Ca^{2+} 、S 含量低的特征。

从排序图 6 可看出 15 种红树林植物与土壤因子之间的相互关系,其中,木榄和红海榄受 pH 值、S、 Ca^{2+} 含量的影响较大;红树、杯萼海桑、白骨壤受盐基总量的影响较大;黄槿主要受 TN 含量的影响;尖瓣海莲主要受 Na^+ 含量的影响;海莲和榄李主要受有机质含量的影响;尖叶卤蕨主要受 K^+ 含量的影响;角果木受 Al^{3+} 的影响较大,而桐花和瓶花木则受 Al^{3+} 的负面影响较大。木榄和红海榄之间、桐花和瓶花木之间在排序图上的距离较小,说明它们在样方中的分布差异较小。

从表 5 可看出:每个排序轴反映的特征值逐渐下降,前 3 个排序轴所反应的红树植物累计百分比方差达 46.4%,反应了较多的红树植物信息。CCA 排序的前 2 个轴所体现的红树植物-环境的累计百分比方差已达到 55.5%。Gauch^[20] 指出,如果前 3 个主要特征向量的方差占总方差的 40% 以上,则排序效果满意。这说明这个排序结果相对较好,前 2 个排序轴已经可以较好的反应红树植物与土壤因子间的相互关系。

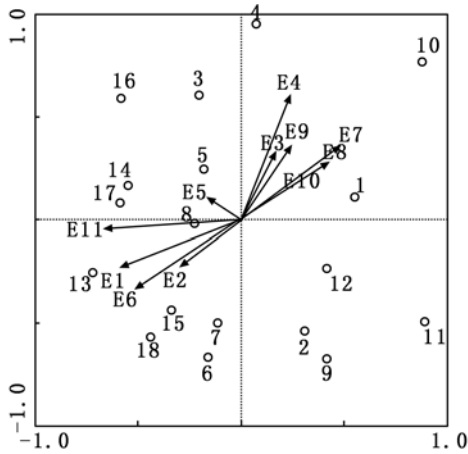
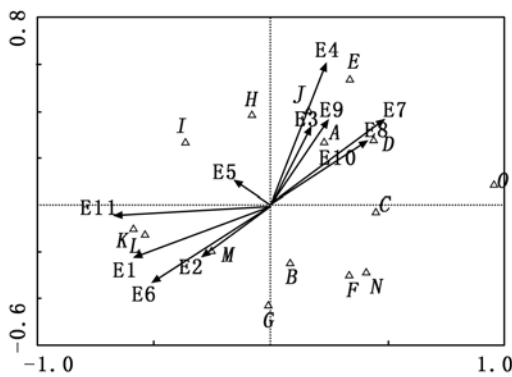


图5 样地与土壤因子的 CCA 二维排序图



A 海莲, B 红树, C 海漆, D 木果楝, E 黄槿, F 桐花, G 杯萼海桑, H 榄李, I 角果木, J 尖瓣海莲, K 木榄, L 红海榄, M 白骨壤, N 瓶花木, O 尖叶卤蕨

图6 红树植物与土壤因子的 CCA 二维排序图

表4 土壤因子与 CCA 排序轴的相关系数

土壤因子	编号	第1排序轴	第2排序轴	第3排序轴	第4排序轴
pH	E1	-0.532 0	-0.194 1	-0.052 2	-0.566 7
TS	E2	-0.267 5	-0.184 5	0.380 4	-0.394 1
SOM	E3	0.149 7	0.278 0	0.394 6	0.181 4
TN	E4	0.213 1	0.512 5	-0.033 6	0.405 7
Al ³⁺	E5	-0.143 4	0.086 7	0.530 5	-0.130 8
Ca ²⁺	E6	-0.458 6	-0.280 6	0.314 7	-0.396 7
K ⁺	E7	0.436 8	0.303 3	-0.263 4	-0.082 0
Mg ²⁺	E8	0.367 9	0.234 6	-0.263 6	-0.004 0
Na ⁺	E9	0.223 4	0.303 3	-0.362 5	0.045 5
P	E10	0.204 0	0.134 6	0.150 9	0.070 4
S	E11	-0.594 4	-0.036 8	-0.045 1	0.062 5

表5 CCA 排序统计结果

项目	第1排序轴	第2排序轴	第3排序轴	第4排序轴
特征值	0.425	0.300	0.193	0.136
红树植物-环境相关系数	0.903	0.846	0.908	0.877
红树植物的累计百分比方差	21.5	36.6	46.4	53.3
红树植物-环境的累计百分比方差	32.5	55.5	70.3	80.8

3.2.2 红树林分布与土壤微量元素的相关关系
 利用典范对应分析(CCA)分析 As(E12)、Ba(E13)、Cr(E14)、Pb(E15)、Sc(E16)、Sr(E17)、V(E18)、Zn(E19)、Fe³⁺(E20)、Cu(E21)、Mn(E22)等土壤微量元素对红树林植物群落及红树植物分布的影响。从图7、8及表6可知:第1排序轴主要反映了 Fe³⁺、Cu、Mn、Cr 元素,相关系数分别为 -0.358 7、-0.352 6、-0.487 7、0.378 0;Zn 与第2排序轴具有较高的负相关性,相关系数为 -0.412 8,其次为 As 和 Fe³⁺,相关系数分别为 -0.399 8 和 -0.358 8;V 和第4排序轴具有较高的相关性,相关系数为 0.603 1。

根据 CCA 排序结果可知:Fe³⁺、Zn、Cu、Mn、As 及 Cr 等微量元素对红树植物群落及红树植物的分布具有较高的影响,则 Sr 对群落及红树植物的影响较小。

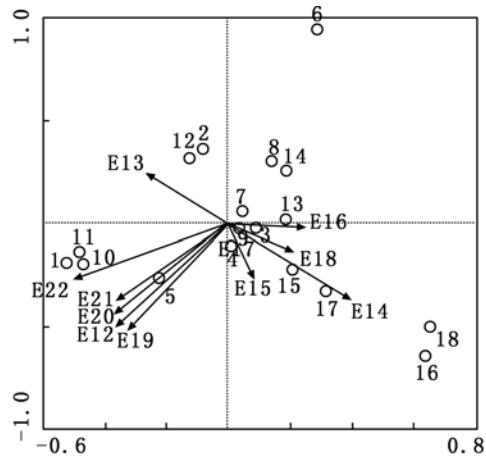
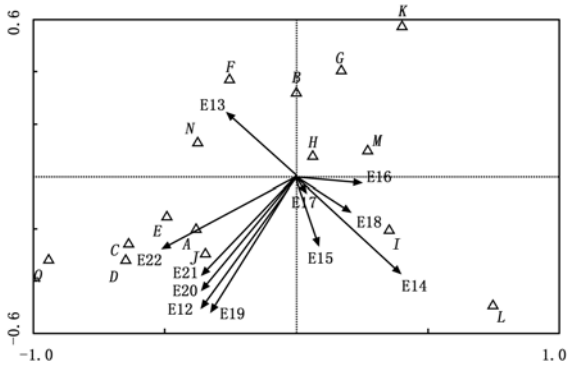


图7 样地与土壤微量元素的 CCA 二维排序图

从图7可知:断面3(样地7~9)、断面5(样地13~15)及断面6(样地16~18)分布在第2排序轴的右侧,表征了这3个断面所在研究区域与 Cr、Pb、Sc、V、Sr 的显著相关性;断面4(样地10~12)分布在第2排序轴的左侧,与 Zn、Fe³⁺、Cu、Mn、As、Ba 相对应,并表现出了与 Mn、Ba 的显著相关性。

从图7还看出:6条断面可粗略地分成两大组:组I和组II。组I包括断面3(样地7~9)、断面5(样地13~15)及断面6(样地16~18);组II包括断面1(样地1~3)、断面2(样地4~6)及断面4(样地10~12)。组I的6号断面(铺前红树林湿地)与5号断面(冠南红树林湿地)位于清澜港八门湾以外的沿海岸线滩涂,3号断面位于八门湾入海口处;组II断面分布在清澜港八门湾以内的内湾滩涂(2号断面)和文昌江(1号、4号断面)区域滩涂。

说明在清澜港红树林湿地,八门湾以内的红树林植物种类组成和群落结构表现出一种连续变异的特点,这与植物有较多的共有种有关;但组 I(八门湾外)与组 II(八门湾内)相比,红树林群落组成则有较大的差异,而 3 号断面表现出植物群落的过渡性特点,这在排序图上得到清楚的反映。



A 海莲, B 红树, C 海漆, D 木果楝, E 黄槿, F 桐花, G 杯萼海桑, H 榄李, I 角果木, J 尖瓣海莲, K 木榄, L 红海榄, M 白骨壤, N 瓶花木, O 尖叶卤蕨

图 8 红树植物与土壤微量元素的 CCA 二维排序图

表 6 微量元素与 CCA 排序轴的相关系数

微量元素	编号	第 1 排序轴	第 2 排序轴	第 3 排序轴	第 4 排序轴
As	E12	-0.348 8	-0.399 8	0.282 6	-0.207 4
Ba	E13	-0.260 0	0.194 6	-0.193 7	0.096 3
Cr	E14	0.378 0	-0.295 4	-0.243 4	0.214 0
Pb	E15	0.079 5	-0.214 8	-0.237 4	0.513 5
Sc	E16	0.239 2	-0.015 9	-0.061 3	0.472 5
Sr	E17	0.034 9	-0.042 1	-0.165 0	0.004 8
V	E18	0.204 7	-0.114 2	-0.108 2	0.603 1
Zn	E19	-0.319 0	-0.412 8	0.235 0	-0.354 1
Fe ³⁺	E20	-0.358 7	-0.358 8	0.248 6	-0.283 0
Cu	E21	-0.352 6	-0.302 6	0.253 2	-0.210 8
Mn	E22	-0.487 7	-0.218 8	-0.021 6	-0.164 6

从图 8 可看出:红树植物海莲、黄槿和尖瓣海莲受 Fe³⁺、Zn、Cu、Mn 及 As 元素的影响较大,且这 3 个红树植物在排序图上的距离较近,说明在这些微量元素的影响下,这 3 个红树植物具有较为相似的分佈情况;海漆、木果楝主要受 Fe³⁺、Zn、As 的影响;红树和瓶花木则受 Ba 元素的影响较大。另外,Cr 元素对角果木也有较大的影响;土壤微量元素对白骨壤、杯萼海桑、木榄、红树、桐花树、尖叶卤蕨、红海榄没有明显的影响。

表 7 的统计结果显示:第 1 排序轴反应的特征值较高,为 0.501;第 1 排序轴的红树植物-环境的相

关性也最高,达 0.963。前 3 个排序轴所反应的红树植物百分比方差达 46.9%,第 1 个排序轴和第 2 排序轴所体现的红树植物-环境的累计百分比方差达 59.5%,体现了较好的排序效果。这说明,仅保留前 2 个排序轴就可很好的反应该地区红树林物种与微量元素间的相互关系。

表 7 CCA 排序统计结果

项目	第 1 排序轴	第 2 排序轴	第 3 排序轴	第 4 排序轴
特征值	0.501	0.273	0.154	0.142
红树植物-环境相关性	0.963	0.799	0.880	0.930
红树植物的累计百分比方差	25.3	39.1	46.9	54.1
红树植物-环境的累计百分比方差	38.2	59.5	70.8	81.6

4 结论与讨论

4.1 红树林植物垂直于海岸横断面梯度的变化

红树林生长在沿海潮间带滩涂,群落中不同植物种群在潮滩上的分佈位置(高程)主要反映了对潮汐浸淹程度^[21]及与浸淹有关的一系列物理和化学环境梯度的适应过程^[20,22],是红树林总体受潮汐浸淹控制的重要表现^[21,23-24]。美国的戴维斯^[25]亦根据佛罗里达红树林分佈的特点,提出了红树林群落分佈的决定论,认为红树植物种类按高程分带明显。潮带的划分反映了红树群落的演替系列^[26]。3.1 节的结论显示,随着高程的升高和潮位由低向高的演变,植物种类由低潮位的 10 种增加至高潮位的 16 种植物,群落结构由低潮位的真红树群落演替到高潮位的真红树和半红树混生群落;同时还发现,有些红树植物的分佈对高程和潮汐的变化未表现出明显的响应,如角果木和桐花树等,它们在高、中、低潮位皆为优势种。由此认为,红树植物除了受高程和潮汐的控制外,土壤理化性质及植物本身的生理特性对红树植物的分佈亦有重要影响。

4.2 土壤化学因子与红树林植被分佈的相关关系分析

土壤化学因子与植被分佈的相关关系已经被广泛讨论^[27-32],一些湿地的具体研究也证明了土壤化学因子在影响滨海湿地植被的分佈上起关键作用^[32-33]。本文中選擇土壤 pH 值、盐基总量(TS)、有机质(SOM)、S、TN、P、K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Al³⁺等指标,分析了土壤化学因子对清澜港红树林湿地植被空间分佈的影响,分析结论进一步证明了这一点。

由3.2.1节的结论可以看出:红树植物没有呈现出与土壤盐分很好的相关关系。这与目前的一些有关滨海湿地研究结论(土壤盐分是影响滨海湿地植被分布的关键因子,高盐土壤环境限制了大多数植物种在这一类地区的分布、繁殖和生长)不太一致^[34];但土壤盐分与4个排序轴均有不同程度的显著相关性,说明了土壤盐分对红树植物分布的控制作用及红树植物耐盐能力的差异性。图6表明,红树、杯萼海桑、白骨壤受盐基总量的影响最大。

从S与CCA第1排序轴的紧密关系及pH值与CCA第1、4排序轴的紧密关系可看出,土壤S、pH值对清澜港红树林植被分布起着重要作用。从CCA排序图(图6)还可看出,木榄、红海榄和白骨壤耐碱性及对S的耐受力最强,其它红树植物与土壤pH值呈负相关关系。这与红树林的酸性硫酸盐土壤性质相吻合^[35-37]。

红树林植被分布还可能与土壤化学因子之中的 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 、TN、TP、SOM等因子存在一定的关系^[34]。本研究虽然也说明了TN、 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 等与清澜港红树林湿地植被分布有显著相关(图5、6,表4),但相对于土壤盐分(TS)、S和pH值而言,这些土壤化学因子的作用较弱;本研究没有发现土壤SOM与植被分布的显著关系。

4.3 土壤微量元素与红树林植被分布的相关关系分析

红树林生态系统作为一种水陆交界处的森林植被,其组成、结构及分布格局除受大的水热环境影响外,也受其所在区域小环境的影响。本研究表明,由于清澜港红树林自然保护区内湾湿地(组II)与沿海前缘浪击湿地(组I)环境的差异,在一定程度上影响红树林物种的分布。这与郑德璋等^[21]的研究结果一致。

由图8可看出,土壤微量元素对白骨壤、杯萼海桑、木榄、红树、桐花树、红海榄等没有明显的影响。这说明了这几个红树植物的生理特性对它们的分布有着重要影响。这一结论与本研究3.1节的样地调查结果基本一致。

参考文献:

[1] 国家林业局. 中国森林资源报告(——第七次全国森林资源清查)[M]. 北京: 中国林业出版社, 2009
 [2] 王文卿, 王 瑁. 中国红树林[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 143-168
 [3] Snedaker S C. Mangrove species zonation: Why [J]. *Vegetation*

science, 1982, 2: 25-111
 [4] 廖金凤. 雷州半岛红树林盐土的某些理化性质[J]. *土壤*, 2004, 36(5): 561-564
 [5] Silvestri S, Defina A, Marani M. Tidal regime, salinity and salt marsh plant zonation [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2005, 62: 119-130
 [6] 崔丽娟, 张曼胤, 李 伟, 等. 湿地基质恢复研究[J]. *世界林业研究*, 2011, 24(3): 11-15
 [7] Bruelheide H, Udelhoven P. Correspondence of the fine-scale spatial variation in soil chemistry and the herb layer vegetation in beech forests [J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, 210: 205-223
 [8] Buisson J, Falkengren-Grerup U, Tyler G. Pattern and dynamics of the ground vegetation in south Swedish *Carpinus betulus* forests: importance of soil chemistry and management [J]. *Geography*, 1997, 20: 513-520
 [9] 蓝福生, 李瑞棠, 陈 平, 等. 广西海滩红树林与土壤的关系[J]. *广西植物*, 1994, 14(1): 54-59
 [10] 杨萍如, 何金海, 刘滕辉. 红树林及其土壤[J]. *自然资源学报*, 1987, 2(1): 32-37
 [11] 温肇穆. 广西红树林植物化学元素含量的初步研究[J]. *热带林业科技*, 1987(2): 9-24
 [12] 张希然, 罗 旋, 陈研华. 红树林和酸性潮滩土[J]. *自然资源学报*, 1991, 6(1): 55-62
 [13] 郑德璋, 郑松发, 廖宝文. 海南岛清澜港红树林发展动态研究[M]. 广州: 广东科学出版社, 1995
 [14] 崔丽娟, 赵欣胜, 张 岩, 等. 退化湿地生态系统恢复的相关理论问题[J]. *世界林业研究*, 2011, 24(2): 1-4
 [15] 廖宝文, 郑德璋, 郑松发. 海南岛清澜港红树林次生灌丛生物量与叶面积指数的测定[J]. *林业科学研究*, 1993, 6(6): 680-685
 [16] 张 弛, 王树功, 朱远辉, 等. 红树林湿地沉积物中AVS-SEM与重金属分布特征[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(4): 806-815
 [17] 国家林业局. 中华人民共和国林业行业标准-森林土壤分析方法[S]. 1999
 [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[S]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
 [19] 张金屯. 植被数量生态学方法[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2004: 120-177
 [20] Gauch H G. 群落生态学中的多元分析[M]. 杨 持译. 北京: 科学出版社, 1989: 22
 [21] 郑德璋, 廖宝文, 郑松发, 等. 海南岛清澜港红树林树种适应生境能力与水平分布[J]. *林业科学研究*, 1995, 8(1): 67-72
 [22] Smith III T J, Boto K G, Frusher S D, *et al.* Keystone species and mangrove forest dynamics: the influence of burrowing by crabs on soil nutrient status and forest productivity [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1991, 33: 419-432
 [23] 张乔民, 张叶春. 华南红树林海岸生物地貌过程研究[J]. *第四纪研究*, 1997(4): 344-353
 [24] 张乔民, 于红兵, 陈欣树, 等. 红树林生长带与潮汐水位关系的研究[J]. *生态学报*, 1997, 17(3): 258-264
 [25] Davis J H. The ecology and geological role of mangroves in Florida [C]. *Carnegie Incitation: Washington Publisher*, 1940, 32: 303

-412

- [26] 廖宝文,郑德璋,郑松发,等. 海南岛清澜港红树林群落演替系列的物种多样性特征[J]. 生态科学,2000, 19(3): 17-22
- [27] Abdel-Razik M, Bdel-Aziz M, Ayyad M. Environmental gradients and species distribution in a transect at Omayed (Egypt) [J]. Journal of Arid Environment, 1984, 7: 337-352
- [28] Schlesinger W, Raikes J, Hartley A, *et al*. On the spatial pattern of soil nutrients in desert ecosystems [J]. Ecology, 1996, 77: 364-374
- [29] Hook P B, Burke I C, Lauenroth W K. Heterogeneity of soil and plant and C associated with individual plants and opening in North America short grass steppe[J]. Plant Soil, 1991, 138: 247-256
- [30] St. Omer L. Small-scale resource heterogeneity among halophytic plant species in an upper salt marsh community [J]. Aquatic Botany, 2004, 78: 337-448
- [31] Lu T, Ma K M, Zhang W H, *et al*. Differential responses of shrubs and herbs present at the upper Min jiang River basin (Tibetan Plateau) to several soil variables [J]. Journal of Arid Environments, 2006, 67: 373-379
- [32] Alvarez Rogel J, Jimenez Carceles F L, Roca M J, *et al*. Changes in soils and vegetation in a Mediterranean coastal salt marsh impacted by human activities [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2007, 73: 510-526
- [33] Asril Y, Ghorbanli M. The halophilous vegetation of the Orumieh lake salt marshes, NW. Iran [J]. Plant Ecology, 1997, 132: 155-170
- [34] Shaltout K H, El-Kady H E, Al-Sodany Y M. Vegetation analysis of the Mediterranean region of Nile Delta [J]. Vegetation, 1995, 116: 73-83
- [35] 刘兆辉,王遵亲. 我国滨海酸性硫酸盐土壤中几种不同形态的酸[J]. 土壤学报,1992, 29(4): 401-407
- [36] 龚子同,张效朴. 中国的红树林与酸性硫酸盐土[J]. 土壤学报,1994, 31(1): 86-93
- [37] 何 斌,温远光,刘世荣. 广西英罗港红树植物群落演替阶段的土壤化学性质[J]. 广西科学,2001, 8(2): 148-151, 160