

DOI: 10.5846/stxb201412132487

宋焱, 刘贤赵, 张勇, 廖秀英, 李振国, 许观嫦, 马姣娇, 徐颂军. 寒害后珠海淇澳岛红树林群落水土生要素的 CCA 分析. 生态学报, 2016, 36(19): 6274-6283.

Song Y, Liu X Z, Zhang Y, Liao X Y, Li Z G, Xu G C, Ma J J, Xu S J. The CCA analysis of the hydrology, sediment and vegetation factors of mangrove communities in Zhuhai Qiao Island after a cold damage. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(19): 6274-6283.

寒害后珠海淇澳岛红树林群落水土生要素的 CCA 分析

宋 焱^{1,2}, 刘贤赵², 张 勇², 廖秀英², 李振国², 许观嫦¹, 马姣娇¹, 徐颂军^{1,*}

1 华南师范大学地理科学学院, 广州 411201

2 湖南科技大学地理科学系, 湘潭 510631

摘要:选取 2008 年寒害后和恢复重建 5 年后红树林群落水土生要素进行纵向对比, 选取水域 pH、化学需氧量(COD)、溶解氧(DO)、总悬浮物(TSS)、总无机氮(TIN)、正磷酸盐(PO₄-P)等水环境指标和(S)pH、氧化还原电位(Eh)、有机质(OM)等沉积物指标进行不同类型红树林群落间的横向对比。自变量指标中水环境指标所占比例较大, 约为 2—3, 弥补了红树林湿地植被、沉积物和水文等 3 个自然因素中水文条件研究较为缺乏的现状。结合各类红树林群落水、土、生三要素进行典范对应分析(CCA)的结果表明: 1) 典范对应分析方法用于分析淇澳岛大围湾各类红树林典型群落寒害后及寒害 5 年后的群落生物过程特征与各种生境因子间的相关关系, 效果良好, 前 4 组自变量的典型变量可以解释标准变量中绝大部分(约 80%以上)的信息。2) 恢复重建 5 年后, 淇澳岛大围湾各类红树林群落中中潮位的无瓣海桑(*Sonneratia apetala*)群落和高潮位的桐花树(*Aegiceras comiculatum*)群落拓展最快, 面积分别增加 26.58hm²和 23.1 hm², 而互花米草(*Spartina alterniflora*)群落因无瓣海桑群落的扩张而受到抑制, 面积下降 31.51hm²。3) 水域 pH、沉积物(S)pH、OM、DO、COD 等水土指标与冠幅、胸径、基径、盖度和高度等生物过程指标依次正相关, 而 PO₄-P、TSS 和 TIN 等水域指标与生物过程指标依次负相关。4) 珠海淇澳岛大围湾红树林湿地生态系统对水域悬浮物和营养元素的固定效果明显, 但其植被生物过程受水土因素, 尤其是水文因素, 影响较大, 其中影响最大的生境因素是 pH 值(包括水域 pH 值和沉积物(S)pH 值)。低中潮位、中性至弱碱性的表层沉积物生境条件较为适合无瓣海桑和老鼠簕(*Acanthus ilicifolius*)等红树植物群落的初期恢复。

关键词:红树林群落; 寒害; 恢复重建; 水土生要素; 典范对应分析; 珠海淇澳岛; 大围湾

The CCA analysis of the hydrology, sediment and vegetation factors of mangrove communities in Zhuhai Qiao Island after a cold damage

SONG Yan^{1,2}, LIU Xianzhao², ZHANG Yong², LIAO Xiuying², LI Zhenguo², XU Guanchang¹, MA Jiaojiao¹, XU Songjun^{1,*}

1 College of Geography Science, South China Normal University, Guangzhou 510631, China

2 Department of Geography Science, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China

Abstract: In this study, the hydrology, sediment and vegetation factors of mangrove communities in Qiao Island after a cold damage in 2008 and five years after the recovery and reconstruction were selected and compared longitudinally. Furthermore, the water environment indicators (e.g., water pH, COD, DO, TSS, TIN and PO₄-P) and the sediment indicators (e.g., sediment pH, Eh and OM) of different types of mangrove communities were compared laterally. With the

基金项目:国家自然科学基金项目(41271060); 广东省自然科学基金项目(8151063101000016); 广东省科技计划项目(2012B010500025)

收稿日期:2014-12-13; **网络出版日期:**2016-01-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xsjcnu@126.com

attempt to make up for the lack of research on hydrology, sediment and vegetation process factors (especially the hydrological) of the mangrove wetland, this paper selects some water environment indicators which account for a larger proportion (about two-thirds) of the independent variables. On this basis, the canonical correlation analysis was conducted by combining the hydrology, sediment and vegetation process indexes of various types of mangrove communities. The results shows that the canonical correlation analysis is used for explaining the relationship between biological process characteristics and habitat factors of the various types of mangrove communities in Qiao Island Dawei Bay after a cold damage and five years after the recovery and reconstruction. The effect is good. The first four canonical correlation coefficients of the independent variables could explain the vast majority (above 80%) of the information of standard variables. The various types of mangrove communities in Qiao Island Dawei Bay all exhibit different levels of growth after five years' reconstruction, among which *Sonneratia apetala* community in the medium tide and *Aegiceras corniculatum-Phragmites australis* community in the high tide expand the fastest. The area of them has increased 26.58hm² and 23.1hm² respectively. However, the area of *Spartina alterniflora* community has decreased 31.51hm², which is owing to the expansion and suppression of the mangrove communities of *Sonneratia apetala* etc. The water pH, sediment pH, OM, DO and COD show strong positive correlation with the crown breadth, diameter at breast height, base diameter, height and coverage, and other factors, while the water environment indicators such as PO₄-P, TSS and TIN are negatively related to the biological process variables successively. The suspended solids and nutrient elements of the waters could be fixed by the mangrove wetland ecosystem in Zhuhai Qiao Island Dawei Bay obviously. Nevertheless, the biological process of vegetation has been affected by hydrology and sediment factors (especially the hydrological) greatly, among which pH (including water pH and sediment pH) could make the greatest impact. The low-medium tide and surface sediment's habitat conditions of neutral and weak alkalinity are more suitable for the early recovery of mangrove plant community of *Sonneratia apetala*, *Acanthus ilicifolius* etc.

Key Words: mangrove communities; cold damage; recovery and reconstruction; hydrology, sediment and vegetation factors; canonical correlation analysis; Zhuhai Qiao Island; Dawei Bay

红树林生境问题研究是近年来生态学研究的重要内容和热点问题之一。红树林除了受工农业生产、城市交通建设和城乡生活污水排放等人为因素影响外,还受淤泥沉积、土壤发生、植被演替、水文、潮汐和河流冲积等自然因素的影响^[1-6]。文献资料显示,目前学者们研究红树林湿地人为影响因素的相对较多,而关注其自然影响因素的相对较少。在植被、沉积物和水文等 3 个自然因素中,研究较为丰富的是沉积物和植被,而水文条件,作为红树林湿地类型和过程维持的决定性因素之一,研究者较少,故有关红树林湿地植被生物过程如何受水文因素的影响,红树林湿地生态系统如何反馈与响应水文、沉积物和植被等过程因素方面的研究尚较缺乏^[7-8]。本研究选取全国近临城区恢复面积最大的人工次生红树林湿地——珠海淇澳岛大围湾作为研究区域,以其 2008 年 3 月至 2014 年 6 月红树林植被寒害后的恢复重建作为研究背景,试验监测包括水体、沉积物和植被样方等在内的数据指标,运用典范对应分析方法解析珠海淇澳红树林湿地生态系统对水、土、生三要素,尤其是水域要素,的反馈响应机制,弥补了上述研究的相对空白,也为该地区红树林扩种引种工作提供了理论依据。

1 研究区概况

淇澳岛大围湾地理坐标为 22°25'34"N—22°26'38"N, 113°36'42"E—113°37'54"E, 位于珠海市高新区唐家镇东北约 1.2km, 岛屿面积 23.8km², 是伶仃洋岛群中陆地面积最大的岛屿, 也是目前伶仃洋淤积最强烈的地区。该区域位于北回归线以南, 属热带-亚热带季风性海洋气候, 阳光充足, 年光照时间 1700—2000 h, 雨量集中, 4—9 月为雨季, 多年平均降雨量为 1700—2200mm。全年无霜, 多年平均气温为 22—23℃, 历年极端最低气温为 2.5℃, 历年极端最高气温 38.5℃。淇澳岛大围湾的主要土壤类型是滨海盐渍沼泽土, 热带-亚热带

带常绿季雨林为其地带性植被类型,拥有半红树植物 9 种 9 属 7 科,红树植物 15 种 13 属 10 科,其中以无瓣海桑、秋茄(*Kandelia candel*)、桐花树、老鼠簕等最为常见。淇澳岛大围湾扩大红树林资源,前景广阔,拥有适宜红树林生长的滨海裸滩湿地面积 276hm²,约占珠海市宜林滩涂湿地面积的 13.91%^[9-10]。

2 研究方法

2.1 样地调研

本次 2013 年 8 月—2014 年 6 月的红树林湿地调研范围涉及整个淇澳岛,本文仅选取与 2008 年—2009 年王树功课题组相同(包括群落类型、采样地点和采样季节等均相同)的采样点,主要分布在淇澳岛西北部大围湾由海向陆垂直于海岸线的方向上,分别为裸滩(P1)、互花米草滩(P2)、老鼠簕群落(P3)、无瓣海桑群落(P4)、桐花树群落(P5)和秋茄群落(P6)等(图 1^[11])。2008 年水土指标的试验监测于 10 月 4 日进行,每次采水、土样各 6 个,即每类群落采集水、土样各 1 个。2013 年水样采集时间为 9 月 21 日(平水期,9:30—11:00 涨

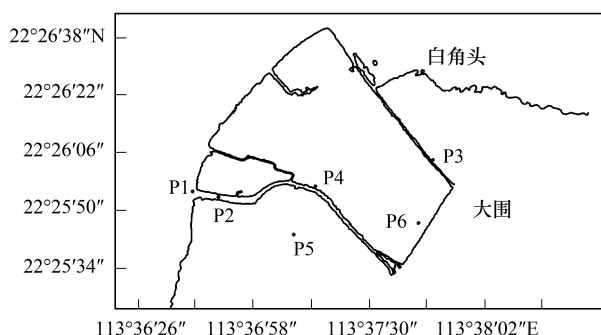


图 1 研究区采样点分布示意图^[11]

Fig.1 Map of the sampling sites in case study area^[11]

潮落潮交替时刻),低中潮位裸滩、互花米草滩、老鼠簕群落和无瓣海桑群落于船头位置采用有机玻璃采水器取样,高潮位桐花树群落和秋茄群落等处水样采用自制的简易直立式采水器采集水样,每次采样时需用蒸馏水先清洗聚乙烯瓶,再用采样点的水样冲洗 3 遍,再采集水样。采集时对于水深大于 0.5m 的采样点,在水面下 0.5m 处采样,水深小于 0.5m 时,在 1/2 水深处采样,水样采取冷藏方法进行保存待分析。2013 年表层沉积物采样时间为 9 月 29 日(18:00—19:00 涨潮落潮交替时刻),用 1/16 彼得森挖泥器采集表层沉积物样于 1000mL 的具塞广口瓶中,各采样点梅花状采取 5 个重复样(表层土壤 5—20cm),样品经风干、研磨、均匀混合后采用四分法取 1 个土样,过 10 目筛待分析。因红树林湿地独特的生境条件,2008 年的植物群落调查持续时间为 1a,每类群落选定 4 个代表性样方。2013 年植物群落调查时间从 8 月一直延续到 2014 年 6 月。乔木样方以 10m×10m 为主,宽度或长度不够的则采用 10m×5m 或 5m×5m,老鼠簕样方为 2m×2m,互花米草样方为 1m×1m,每类群落亦选定 4 个代表性样方,测定各样方内植物的盖度、植株密度、高度、胸径、基径、东西冠幅和南北冠幅等指标,标记个体分布并拍照。水样、沉积物和植物群落调查全程采用高精度 GPS 准确定位。

2.2 实验分析与遥感解译

水体、沉积物理化性质的监测分析按照《海洋监测规范》(GB 17378—2007)所规定的方法进行。采集水样样品当天带回后,取其中保存方式相同的水样 3 瓶,经 0.45μm Whatman GF/F 醋酸纤维滤膜抽滤,用分光光度法分别测定样品中 TIN 和 PO₄-P,不过滤的水样用来测定 COD 和 TSS,重复测 3 次,取其平均值。COD 采用碱性高锰酸钾法,TSS 采用重量法。水域 pH 和 DO 由美国 YSI 公司生产的 Proplus 便携式多参数水质测定仪现场测得。沉积物(S)pH 和 Eh 采用水浸、酸度计法(水土比 1:3),OM 含量采用重铬酸钾容量法。红树林面积数据由遥感解译获取,遥感影像源为 2013 年 1 月 16 日美国 GeoEye 公司的 GeoEye-1 卫星影像数据,包括 2m 空间分辨率的多光谱数据和 0.5m 空间分辨率的全色数据。解译辅助数据为研究区 1:25 万 DEM 数据、1:5 万行政界线图、地形图和水系矢量分布图等。

2.3 数据分析

植物群落与环境因子的排序分析,即典范对应分析方法(Canonical Correlation Analysis,CCA)借用主成分分析降维的思想,分别对自变量组和标准变量组提取典型变量,把原来两组变量之间整体的线性相关关系,转化为研究从各组中提取出的典型变量之间的典型相关关系的多元统计分析方法。自变量组和标准变量组提取出的典型变量之间相关程度最大,同一组内部提取的典型变量之间互不相关,且研究变量的个数得到合理

简化,常用来客观、定量地分析不同生物群落特征与其生境因子间的生态关系等^[12-14]。本文选取珠海红树林湿地水体和沉积物理化指标 9 个作为自变量组(X),植物群落生物过程指标 8 个作为标准变量组(Y),如表 1,采用 SPSS19.0 进行显著水平检验和典范对应分析。SPSS19.0 典范对应分析宏命令如下^[15]:

INCLUDE 'C:\Program Files\SPSS\CANONICAL CORRELATION.SPS.'

CANCORR SET1= $X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6 X_7 X_8 X_9$

/SET2= $Y_1 Y_2 Y_3 Y_4 Y_5 Y_6 Y_7 Y_8$.

单击 run/all 执行宏命令,可以得到典范对应分析的各种统计数据。

表 1 本文选取的指标变量
Table 1 Selected variables in this study

变量组 Variable group	筛选后的变量 Variables after screening
自变量组(X) Independent variables group	$Eh(X_1)$ 、 $TIN(X_2)$ 、 $PO_4-P(X_3)$ 、 $COD(X_4)$ 、 $DO(X_5)$ 、水域 pH(X_6)、沉积物(S) pH(X_7)、OM(X_8)、TSS(X_9)
标准变量组(Y) Standard variables group	各类型红树林群落盖度 C(Y_1)、密度 D(Y_2)、基径 BD(Y_3)、南北冠幅 SNP(Y_4)、胸径 DBH(Y_5)、东西冠幅 EWP(Y_6)、面积 S(Y_7)、树高 H(Y_8)

3 结果与分析

3.1 淇澳岛红树林湿地水域要素的年际差异分析

根据前人研究成果、本研究野外、室内实验监测结果及海水水质标准(GB3097—1997),淇澳岛大围湾红树林湿地 pH、DO、TSS、COD、TIN 和 PO_4-P 等水域要素的监测范围及所属水质标准如表 2 所示,其监测范围为所有采样点指标浓度的区间值,所属海水水质标准为 6 类群落采样点中绝大部分采样点监测范围所属的海水水质标准,排除个别采样点的特殊监测值。由表 2 可知,淇澳岛大围湾红树林湿地有机污染物(COD)和营养盐(PO_4-P)等有逐年增加的趋势,悬浮颗粒物亦增加明显。这可能与淇澳岛内石井湾、大围湾、金星湾等海湾靠近金星门水道一侧风力较小、淤泥深厚等因素有关,泥沙悬浮颗粒物、有机污染物和营养盐等主要来源于涨潮时金星门以及横门水道的小环流。pH、DO 和 TIN 等水质指标的浓度值好转则与红树林释放 O_2 、调节大气、固定营养元素、净化环境等特质有关,也体现出红树林湿地具有改善研究区水土环境状况的功能。

表 2 2008 年、2013 年珠海淇澳岛大围湾各类红树林群落水质指标的监测范围及所属水质标准
Table 2 Monitoring scope and water quality standard of mangrove in Qiao Island in 2008 and 2013

项目 Items	COD	TSS	PO_4-P	水域 pH Water pH	DO	TIN
2008 年监测范围 Monitoring scope in 2008	1.55—2.82 mg/L	26.4—104.5 mg/L	0.004—0.052 mg/L	6.75—8.38	2.12—7.46 mg/L	0.136—1.008 mg/L
所属海水水质标准 Affiliation of the sea water quality standard	第 1、2 类	第 1、2、3 类	第 1、2、3 类	第 3、4 类	第 3、4 类	第 3、4 类
2013 年监测范围 Monitoring scope in 2013	2.33—5.25 mg/L	≥ 150 mg/L	≥ 0.045 mg/L	7.23—8.33	5.22—7.23 mg/L	0.1343—0.2266 mg/L
所属海水水质标准 Affiliation of the sea water quality standard	第 3、4 类	第 4 类以上	第 4 类以上	第 2、3 类	第 1、2 类	第 1 类

数据来源于本研究实测及参考文献^[16]

3.2 淇澳岛红树林湿地沉积物要素的年际差异分析

根据沉积物 pH 分级标准(GB15618—2009)、实际调研与测试结果,淇澳岛西北部大围湾地区的湿地表层沉积物均呈中性至微碱性,且无论是红树林样地还是对照样地,2013 年 pH 监测值都稍高于 2008 年,表明随着红树林面积的扩展,样地酸碱度逐渐改变,由 2008 年的弱酸性至中性转变为 2013 年的中性至弱碱性(表

3), 中性至弱碱性的表层沉积物生境条件也较为适合无瓣海桑、桐花树和老鼠簕等红树植物群落的初期恢复, 与刘荣成(2011)等人的研究成果相一致^[17-20]。参考沉积物养分含量分级标准(1996)可知, 2008—2013 年淇澳岛各类红树林群落沉积物 OM 呈逐年累积状态, 符合红树林湿地沉积物养分累积规律(表 3)。2013 年淇澳岛大围湾各类红树林群落表层沉积物根系较少, Eh 基本都为负数, 且监测数据较 2008 年低, 如图 2, 从外海到内陆各类红树林群落表层沉积物 Eh 分布无一定规律可循。

表 3 2008 年、2013 年珠海淇澳岛大围湾各类红树林群落表层沉积物指标的监测范围及所属等级

Table 3 Monitoring scope and level of mangrove surface sediment in Qiao Island in 2008 and 2013

年份 Years	沉积物 pH Sediment pH		沉积物有机质/% Sediment organic matter	
	监测范围 Monitoring scope	酸碱度等级 pH level	监测范围 Monitoring scope	养分等级 Nutrient level
2008	5.84—7.47	弱酸性至中性	1.44—5.34	中等至丰富
2013	7.58—8.18	中性至弱碱性	2.39—4.61	丰富至极丰富

3.3 淇澳岛红树林湿地植被要素的年际差异分析

3.3.1 淇澳岛大围湾红树林湿地植被的面积变迁

2008 年 1 月 25 日至 2 月 16 日, 在持续性强冷空气的影响下, 淇澳岛受寒害较严重的红树林面积超过 200 hm², 约占到整个恢复面积的 30%^[21]。根据前人的研究成果^[21-22]和 2013 年 1 月 16 日 GeoEye-1 卫星影像的解译数据, 珠海淇澳岛大围湾各类型红树林群落 2008 年寒害后恢复初期至 2013 年初的面积变化情况如表 4。由表 4 可知, 恢复重建 5 年后, 淇澳岛大围湾无瓣海桑红树林群落面积拓展最快, 年均增长 6.65 hm², 其次是桐花树群落, 年均增长 5.78 hm², 互花米草群落因无瓣海桑群落的扩张而受到抑制, 面积年均下降 7.88 hm²。这些都与保护区自寒害后实施红树林人工恢复工程息息相关。无瓣海桑等红树林群落的扩张也部分的影响到老鼠簕、秋茄等本地红树林群落的恢复, 致使高潮位的秋茄群落年均萎缩 4.51 hm², 中潮位的老鼠簕群落年均萎缩约 0.07 hm², 故外来红树林树种对本地种的抑制作用需引起重视。

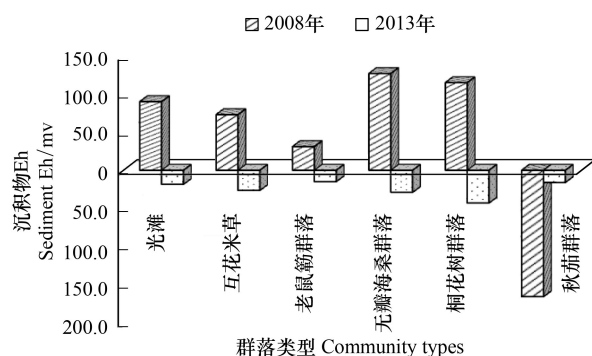


图 2 2008 年、2013 年淇澳岛西北部各类型红树林湿地及对照区域沉积物 Eh 对比图

Fig.2 The sediment Eh of various types' mangrove wetland and the contrast in northwest Qiao island in 2008, 2013

表 4 珠海淇澳岛大围湾 2009 年、2013 年各类红树林群落的面积变化

Table 4 All kinds of mangrove area changes in Qiao Island Dawei Bay in 2009 and 2013

项目 Items	裸滩 No plants' tidal flats	互花米草群落 <i>Spartina alterniflora</i> communities	老鼠簕群落 <i>Acanthus ilicifolius</i> communities	无瓣海桑群落 <i>Sonneratia apetala</i> communities	桐花树群落 <i>Aegiceras corniculatum</i> communities	秋茄群落 <i>Kandelia candel</i> communities
2009/hm ²	—	40.01	8.73	146.07	15.55	32.30
2013/hm ²	276.00	8.50	8.45	172.65	38.65	14.27
总增长量 Growth in total/hm ²	—	-31.51	-0.28	26.58	23.1	-18.03
年均增长量/hm ²	—	-7.88	-0.07	6.65	5.78	-4.51
Average annual growth	—	-7.88	-0.07	6.65	5.78	-4.51

3.3.2 淇澳岛大围湾红树林群落生态学指标的演替分析

历经 5 年的恢复重建, 淇澳岛大围湾无瓣海桑群落与互花米草群落生态学指标时间演替变化的主要特征(表 5, 表 6), 指标变化最快的是 1m×1m 互花米草单优群落植株密度和盖度, 其次是 1999 年种植

群落的基径和胸径等。由此可见,利用无瓣海桑的速生性以及生态位特点对互花米草进行生态控制是可能的。无瓣海桑林先锋群落不仅生长良好,且林内互花米草也因受到控制而有所衰退。

表 5 珠海淇澳岛大围湾 2008 年、2013 年无瓣海桑群落生物过程指标的演替变化

Table 5 Succession changes of biological process indicators of <i>Sonneratia apetala</i> communities in Qiao Island Dawei Bay in 2008 and 2013								
项目 Items	无瓣海桑群落 <i>Sonneratia apetala</i> communities							
	面积 Area/ hm ²	树高 Height/m	东西冠幅 East and west canopy/m	南北冠幅 North and south canopy/m	胸径 Diameter at breast height/cm	基径 Diameter at breast height/cm	植株密度 Plant density/ (株/m ²)	盖度 Cover degree/%
2008	146.07	11.7	3.6	4	23.50	30.60	0.19	95
2013	240.39	12.5	5	6	85.00	100.00	0.24	95
变化量 Growth in total	94.32	0.8	1.4	2	61.5	69.4	0.05	0
年均变化量 Average annual growth	23.58	0.16	0.28	0.4	12.3	13.88	0.01	0

表 6 珠海淇澳岛大围湾 2008 年、2013 年互花米草群落生物过程指标的演替变化

Table 6 Succession changes of biological process indicators of <i>Spartina alterniflora</i> communities in Qiao Island Dawei Bay in 2008 and 2013								
项目 Items	1m×1m 互花米草群落 <i>Spartina alterniflora</i> communities							
	面积 Area/ hm ²	高度 Height/m	东西冠幅 East and west canopy/m	南北冠幅 North and south canopy/m	基径 Diameter at breast height/cm	植株密度 Plant density/ (株/m ²)	盖度 Cover degree/%	
2008	40.01	1.84	0.3	0.25	0.65	161	95	
2013	8.5	0.48	0.15	0.1	0.4	45	25	
变化量 Growth in total	31.51	1.36	0.15	0.15	0.25	116	70	
年均变化量 Average annual growth	7.88	0.27	0.03	0.03	0.05	23.2	14	

3.4 红树林群落生物过程与水文、沉积物因子的典范对应分析

3.4.1 典型相关系数及显著性水平

两组变量中数目较少的那一组变量的个数等于通过典范对应分析所获得的典型变量对的数目,本研究通过对表 1 中标准变量和自变量进行典范对应分析,获得典型变量 8 对,其显著性水平及典型相关系数如表 7。通过比较 X^2 统计量临界值、计算值及 p 值,前 2 对典型变量通过 X^2 统计检验,相关系数分别为 0.999 和 0.995,自变量的典型变量对标准变量的典型变量的影响极为显著 ($P<0.01$)。其典型相关系数的平方为 0.998 和

表 7 典型相关系数及显著水平

Table 7 The canonical coefficient and the level of significance					
序号 Order numbers	典型相关系数 Canonical correlation coefficient	典型相关系数的平方 Square of the canonical correlation coefficient	卡方值 Chi-square value	df	显著性水平 Significance level
1	0.999	0.998	139.330	72	0.000
2	0.995	0.990	88.816	56	0.003
3	0.981	0.962	51.526	42	0.149
4	0.893	0.797	25.326	30	0.709
5	0.760	0.578	12.536	20	0.896
6	0.635	0.403	5.655	12	0.932
7	0.341	0.116	1.521	6	0.958
8	0.254	0.065	0.535	2	0.765

0.990,说明前2组群落生物过程典型变量99.8%和99%的信息可由相应的水土环境典型变量予以解释。第3对、第4对典型变量显著性水平稍差,但其典型相关系数的平方分别达到0.962和0.797,说明第3、4对标准变量的典型变量96.2%和79.7%的信息可由相应的自变量的典型变量进行解释;第5、6、7、8对典型变量的显著性水平、典型相关系数均较差,其解释能力也相应较差。

3.4.2 典型负载系数

图3为根据第1、2、3和4组典型变量的典型负载系数制作的4对典型负载图。运用典范对应分析方法,以折线图的形式较为直观地展示了珠海淇澳岛大围湾红树林群落生物过程如何受水土环境因素驱动的判别结果。第1对典型变量如图3a所示,水土指标中起主要作用的是OM(Corr=0.578)、DO(Corr=0.555)和水域pH(Corr=0.422),它们与自变量的典型变量都正相关;群落生物过程指标中起主要作用的是EWP(Corr=0.805)、DBH(Corr=0.728)、SNP(Corr=0.712)和BD(Corr=0.706),它们与标准变量的典型变量皆正相关;故第1对典型变量反映的是淇澳岛大围湾红树林群落冠幅、胸径、基径与OM、DO、水域pH之间的显著正相关关系。根据前人的研究成果^[9-10,19]、2013年水土生调查数据、《海水水质标准GB3097—1997》、《国家环境土壤质量标准(GB15618—2009)》和《全国1:400万土壤肥力质量评价方法与标准—1996》,如表2和表3,随着2008年至2014年水域pH由第3、4类标准上升至第2、3类标准,DO由第3、4类标准上升至第1、2类标准,沉积物OM养分等级由中等至丰富增加为丰富至极丰富,表5中无瓣海桑群落的东冠幅年均增长0.28m,南北冠幅年均增长0.4m,胸径年均增长12.3cm,基径年均增长13.88cm。此外,监测结果亦显示老鼠簕群落南北冠幅年均增长0.02m,基径年均增长0.41cm。

第2对典型变量如图3b所示,水土指标中起主要作用的是水域pH(Corr=0.545)和沉积物(S)pH(Corr=0.530),它们与自变量的典型变量都正相关;群落生物过程指标中起主要作用的是BD(Corr=0.548)、DBH(Corr=0.526)、H(Corr=0.312)和C(Corr=0.258),它们与标准变量的典型变量均正相关;故第2对典型变量反映的是淇澳岛大围湾红树林群落基径、胸径、高度和盖度与水域pH、沉积物(S)pH之间的正相关关系。如表2和表3,随着2008年至2014年水域pH值的增加,沉积物(S)pH由弱酸性至中性上升为弱碱性,表5中无瓣海桑群落除胸径、基径有所增长外,面积年均增长23.58hm²,树高年均增长0.16m,植株密度年均增长0.01株/m²。此外,监测结果亦显示桐花树群落树高年均增长0.2m,老鼠簕群落树高年均增长0.09m,植株密度年均增长2.05株/m²,盖度年均增长3%。

第3对典型变量如图3c所示,水土指标中起主要作用的是PO₄-P(Corr=-0.670)、TSS(Corr=-0.403)、COD(Corr=0.518)和水域pH(Corr=0.311),前2指标与自变量的典型变量负相关,后2指标与自变量的典型变量正相关;群落生物过程指标中C(Corr=0.568)、EWP(Corr=0.329)和SNP(Corr=0.319)与标准变量的典型变量均正相关;第3对典型变量反映的是淇澳岛大围湾红树林群落盖度、冠幅与COD、水域pH之间的正相关关系,随着水域pH值的增加,2008年至2014年COD由第1、2类标准上升至第3、4类标准(表2),1m×1m老鼠簕群落盖度由2008年的70%—80%增长至2014年85%左右,东西冠幅和南北冠幅的增幅约10cm;第3对典型变量亦反映淇澳岛大围湾红树林群落盖度、冠幅与PO₄-P、TSS等指标之间的负相关关系,这与红树林及其林下植物具有沉淀悬浮物、固定氮磷等营养物质的特性相符,红树林长势越好,其环境净化功能就越强,PO₄-P和TSS等指标在水中的含量就会随之降低。

第4对典型变量如图3d所示,水土指标中沉积物(S)pH(Corr=-0.297)与自变量的典型变量负相关;TIN(Corr=0.284)与自变量的典型变量正相关。群落生物过程指标中起主要作用的是SNP(Corr=-0.418)、BD(Corr=-0.302)和DBH(Corr=-0.285),它们与标准变量的典型变量均负相关。故淇澳岛大围湾红树林群落冠幅、基径、胸径和沉积物(S)pH之间正相关,与TIN之间负相关,说明研究区红树林的生态环境净化功能已非常明显,如表2所示,TIN浓度由2008年的第3、4类标准上升至2013年的第1类标准。

3.4.3 典型冗余度分析

典型冗余度分析,即标准方差解释或解释能力,是一种组间交叉共享比例,也是组间变差解释率与组内变

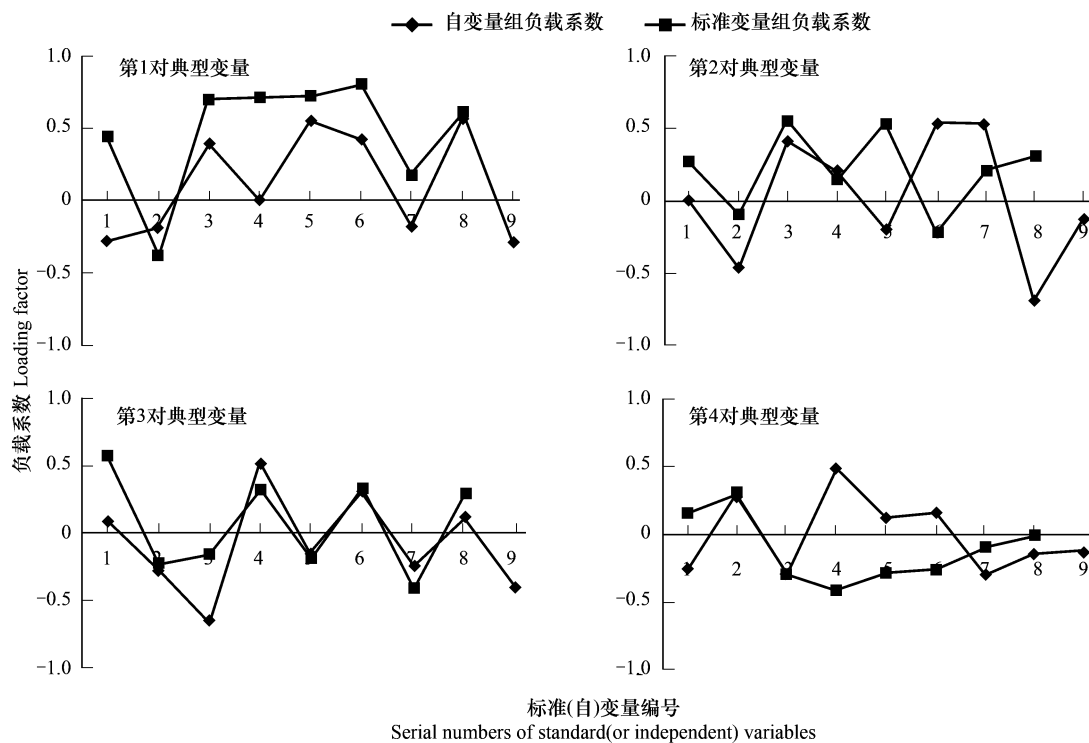


图3 四对典型变量的典型负载系数

Fig.3 Canonical loadings of four canonical variables

差解释率的比值,可以用来辅助判断自变量的典型变量对标准变量各观测变量的解释能力,即需要保留多少个典型相关系数^[15]。冗余度分析自变量的典型变量的标准方差解释如表8,第1个典型变量V1组内变差解释率为13.4%,组间变差解释率为13.4%;第2个典型变量V2组内变差解释率为17.2%,组间变差解释率为17.1%;第3个典型变量V3组内变差解释率为12.8%,组间变差解释率为12.4%;第4个典型变量V4组内变差解释率为6.9%,组间变差解释率为5.5%。这4组自变量的典型变量可以解释标准变量中100%、99.4%、96.9%和79.7%的信息,前3组典型变量的解释能力较强,均达到95%以上,第4组典型变量的解释能力较弱,也达80%,说明水土指标与群落生物过程指标之间的相关性较好,自变量的典型变量对标准变量的解释能力较强。

4 讨论

在典型冗余度分析中确定提取典型变量的个数时,一般按一组当中形成的典型变量解释对方组总变差与解释组内总变差的比例大于或等于80%来进行提取^[15]。红树林湿地水土理化指标的前4组典型变量对于群落生物过程指标的解释能力均在80%以上,此结果与之前依据典型相关系数的平方判定典型变量提取个数的研究结果完全一致,进一步验证冗余度分析可以用来辅助判断需要保留多少个具有实际意义的典型相关系数的结论。

恢复重建5年后的淇澳岛大围湾,由海向陆垂直于海岸线的方向上,中潮位的无瓣海桑群落和高潮位的桐花树群落面积拓展最快,年均增长面积分别达到6.65 hm²和5.78 hm²。随着2008年至2014年水域pH值、COD等含量的增加,OM的逐年累积,表层沉积物(S)pH由弱酸性至中性上升为中性至弱碱性,无瓣海桑群落和老鼠簕群落的生物过程指标有较为明显的变化。如无瓣海桑群落的胸径年均增长12.3cm,基径年均增长13.88cm;老鼠簕群落的基径年均增长0.41cm,年均高度增长9cm,年均植株密度增长2.05株/m²,盖度由2008年的70%—80%增长至2014年85%左右,东西冠幅和南北冠幅的增幅约10cm。这些说明低中潮位、中

性至弱碱性的表层沉积物生境条件也较为适合无瓣海桑和老鼠簕等红树植物群落的初期恢复;有机质的累积为红树林植物生长提供了丰富的营养元素;COD 含量增加则说明亚硝酸盐、亚铁盐和硫化物等物质还原性能的增强,而相对还原的湿地水环境更有利于红树林植物群落的恢复生长,与刘荣成等人的研究成果相一致^[17-20]。另外,恢复过程中红树林群落及其根际微生物能大量吸收、转化、固定、迁移水中 PO₄-P、TIN 等营养物质,而红树林密集区浮游植物的繁盛生长也可能会导致其所在水域营养盐浓度的降低,与王虎等人的研究成果相一致^[23-24]。

针对红树林湿地植被、沉积物和水文等 3 个自然因素中水文条件研究较为缺乏的现状,本研究选取水域 pH、COD、DO、TSS、TIN、PO₄-P 等水环境指标进行不同类型红树林群落间的横向对比,所选指标占自变量指标比例较大,约为 2/3,弥补了上述研究的相对空白。红树林恢复重建的环境因素相对复杂,除了本研究所涉及的水土环境外,还受气温、降水等大气候环境和人口、工农业生产等社会经济环境的影响,更进一步的研究需要予以补充^[25-27]。从选取的红树林植物群落来看,本研究主要包括无瓣海桑、秋茄、桐花树和老鼠簕等典型红树林植被,未能涉及水黄皮、海芒果、银叶树 (*Heritiera littoralis*)、杨叶肖槿、木榄等非典型红树或半红树植被类型,如需全方位、准确定量地恢复重建淇澳岛大围湾红树林湿地生态系统这些都是必要的参考因素。

表 8 自变量的典型变量的标准方差解释

Table 8 Standard variance explanation of the independent variables' canonical variables

序号 Order numbers	解释组内总变差/% Explain Total variation of the explain group	解释组内 累积总变差/% Cumulative total variation of the explain group	解释对方组 总变差/% Total variation of the other explain group	解释对方组 累积总变差/% Cumulative total variation of the other explain group	解释能力/% Explanatory ability
1	13.4	13.4	13.4	13.4	100
2	17.2	30.6	17.1	30.5	99.4
3	12.8	43.4	12.4	42.9	96.9
4	6.9	50.3	5.5	48.4	79.7
5	12.7	63	7.3	55.7	57.5
6	9.6	72.6	3.9	59.6	40.6
7	5.7	78.3	0.7	60.3	12.3
8	13.1	91.4	0.8	61.1	6.1

5 结论

1) 典范对应分析方法用于分析珠海淇澳岛大围湾各类红树林典型群落寒害后及寒害 5 年后的群落生物过程特征与各种生境因子间的相关关系,效果良好,前 4 组自变量的典型变量可以解释标准变量中 100%、99.4%、96.9%和 79.7%的信息,解释能力较强。

2) 珠海淇澳岛大围湾红树林湿地生态系统对水域悬浮物和营养元素的固定效果明显,但其植被生物过程受水土因素,尤其是水文因素,影响较大,其中影响最大的生境因素是 pH 值(包括水域 pH 值和沉积物(S) pH 值)。低中潮位、中性至弱碱性的表层沉积物生境条件也较为适合无瓣海桑和老鼠簕等红树植物群落的初期恢复。

3) 珠海淇澳岛大围湾红树林群落生物过程指标中冠幅、胸径、基径、盖度和高度等与水土指标中水域 pH、沉积物(S) pH、OM、DO、COD 等依次正相关,而与水域 PO₄-P、TSS 和 TIN 等指标依次负相关。

4) 寒害后 5a,珠海淇澳岛大围湾红树林的恢复重建工作成效显著,互花米草群落受到抑制,面积下降 31.51hm²,各类红树林群落面积均有不同程度的增长,其中位于中潮位的无瓣海桑群落和高潮位的桐花树群落拓展最快,年均增长分别达到 6.65hm²和 5.78hm²,其恢复过程与水文、沉积物和植被等生境因素密切相关。

参考文献 (References):

- [1] Valiela I, Bowen J L, York J K. Mangrove forests: one of the world's threatened major tropical environments. *Bioscience*, 2001, 51(10): 807-815.
- [2] Mckee K L, Faulkner P L. Restoration of biogeochemical function in mangrove forests. *Restoration Ecology*, 2000, 8(3): 247-259.
- [3] Ye Y, Chen Y P, Chen G C. Litter production and litter elemental composition in two rehabilitated *Kandelia obovata* mangrove forests in Jiulongjiang Estuary, China. *Marine Environmental Research*, 2013, 83: 63-72.
- [4] Kristensen E, Bouillon S, Dittmar T, Marchand C. Organic carbon dynamics in mangrove ecosystems: a review. *Aquatic Botany*, 2008, 89(2): 201-219.
- [5] 彭逸生, 周炎武, 陈桂珠. 红树林湿地恢复研究进展. *生态学报*, 2008, 28(2): 786-797.
- [6] 朱耀军, 郭志华, 郭菊兰, 武高洁, 吕烈标, 李文泉. 清澜港湾红树林景观变化过程及周边土地利用/覆盖动态. *林业科学*, 2013, 49(5): 169-175.
- [7] 张华兵, 刘红玉, 李玉凤, 安静, 薛星宇, 侯明行. 自然条件下盐城海滨湿地土壤水分/盐度空间分异及其与植被关系研究. *环境科学*, 2013, 34(2): 540-546.
- [8] 余丹. 九龙江口秋茄红树林土壤-大气温室气体通量随植被恢复变化的研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2014: 1-15.
- [9] 彭辉武, 郑松发, 刘玉玲, 胡明娇, 朱宏伟. 珠海淇澳岛红树林群落空气负离子浓度特征研究. *北京林业大学学报*, 2013, 35(5): 64-67.
- [10] 张留恩. 珠海淇澳岛寒害致死海桑林迹地恢复初期植被特征及其影响因子的研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2011: 9-36.
- [11] 陈玉军. 红树林消波效应观测与模拟[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2012: 20.
- [12] 周然, 覃雪波, 彭士涛, 石洪华, 邓仕槐. 渤海湾大型底栖动物调查及与环境因子的相关性. *生态学报*, 2014, 34(1): 50-58.
- [13] 肖庆聪, 魏源送, 王亚炜, 钟佳, 于森, 杨勇, 郁达伟, 曾凡刚, 郑祥, 孙贻超, 周滨. 天津滨海新区湿地退化驱动因素分析. *环境科学学报*, 2012, 32(2): 480-488.
- [14] 何晓群. 多元统计分析(第二版). 北京: 中国人民大学出版社, 2008: 255-282.
- [15] 孙培立. 辽宁省滨海湿地资源类型及时空演变的驱动力分析[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2007: 36-42.
- [16] 王树功, 郑耀辉, 彭逸生, 陈桂珠. 珠江口淇澳岛红树林湿地生态系统健康评价. *应用生态学报*, 2010, 21(2): 391-398.
- [17] 刘荣成. 泉州湾河口湿地植物环境适应性研究及其应用[D]. 苏州: 苏州大学, 2011: 77-84.
- [18] 曹知勉, 叶勇, 卢昌义, 郑逢中. 红树林恢复对海岸湿地土壤影响的初步研究. *生态科学*, 2004, 23(2): 110-113.
- [19] 邱明红. 红树林水产养殖与生态恢复对其环境的影响研究[D]. 海口: 海南师范大学, 2014: 45-46, 57-57.
- [20] 苗春玲. 珠江口鹤洲北红树林群落恢复对土壤、水体的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2012: 21-22, 27-28.
- [21] 李玫, 廖宝文, 管伟, 郑松发, 陈玉军. 广东省红树林寒害的调查. *防护林科技*, 2009, (2): 29-31.
- [22] 张弛, 王树功, 朱远辉, 邹建明. 红树林湿地沉积物中 AVS-SEM 与重金属分布特征——以珠江口淇澳岛为例. *环境科学学报*, 2011, 31(4): 805-815.
- [23] 王虎, 高航, 周怀阳, 郭卫东. 珠江口淇澳岛红树林区海水中营养盐和叶绿素 a 研究初探. *台湾海峡*, 2005, 24(4): 502-507.
- [24] Liu W Q, Zhang J L, Tian G H, Xu H L, Yan X H. Temporal and vertical distribution of microphytobenthos biomass in mangrove sediments of Zhujiang (Pearl River) Estuary. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 32(4): 82-88.
- [25] Rahaman S M B, Sarder L, Rahaman M S, Ghosh A K, Biswas S K, Siraj S S, Huq K A, Hasanuzzaman A F M, Islam S S. Nutrient dynamics in the Sundarbans mangrove estuarine system of Bangladesh under different weather and tidal cycles. *Ecological Processes*, 2013, (2): 29-429.
- [26] Marchand C, Lallier-Vergès E, Baltzer E. The composition of sedimentary organic matter in relation to the dynamic features of a mangrove-fringed coast in French Guiana. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2003, 56(1): 119-130.
- [27] 张乔民, 隋淑珍, 张叶春, 于红兵, 孙宗勋, 温孝胜. 红树林宜林海洋环境指标研究. *生态学报*, 2001, 21(9): 1427-1437.