

DOI: 10.5846/stxb201401160119

李春干, 代华兵. 1960—2010 年广西红树林空间分布演变机制分析. 生态学报, 2015, 35(18): - .

Li C G, Dai H B. Mechanism analysis of temporal dynamics in mangrove spatial distribution in Guangxi, China: 1960—2010. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(18): - .

## 1960—2010 年广西红树林空间分布演变机制分析

李春干\*, 代华兵

广西林业勘测设计院, 南宁 530011

**摘要:**为全面摸清 1960—2010 年广西红树林空间分布及其演变机制,采用多源遥感数据提取不同年度的红树林空间分布信息,分析了广西红树林空间分布动态特点,采用基于斑块的红树林空间演变机理分析方法,研究了 1960/1976—2010 年广西红树林空间演变机制。结果表明:1960/1976 年、1990s 年、2001 年、2007 年和 2010 年广西红树林斑块数量分别为 1 020 个、829 个、1 094 个、1 718 个和 1 712 个,面积分别为 9 062.5 hm<sup>2</sup>、7 430.1 hm<sup>2</sup>、7 015.4 hm<sup>2</sup>、6 743.2 hm<sup>2</sup>、7 054.3 hm<sup>2</sup>,近 50 年间红树林面积减少了 22.16%,年均减少 0.53%,斑块数量增加了 67.8%;斑块平均面积由 1960/1976 年的 8.9 hm<sup>2</sup>减小至 2010 年的 4.1 hm<sup>2</sup>,大斑块数量显著减少,斑块破碎化严重;不同时期、不同区域和海湾,红树林面积和斑块数量的变化情况、变化速率均不同;1960/1976 年的斑块中,只有 24 个斑块至 2010 年时尚保持稳定,占 2.4%,绝大部分斑块都发生了某种程度的变化。进一步分析结果表明:1960/1976—2010 年,斑块消失(46.1%)、碎化(40.4%)、萎缩(13.5%)是面积减少的主要途径,新增(70.0%)和碎化(29.9%)是斑块数量增加的主要途径,但在不同时期,斑块数量和面积在各个途径上发生的变化量不尽相同;养殖塘和盐田建设(80.0%)、工程建设(10.9%)和围垦(9.1%)是面积净减少的驱动因子,自然过程(92.6%)和人工造林(7.4%)是斑块数量净增加的驱动因子,不同驱动因子在不同时期对斑块数量和面积变化的影响程度不同;斑块数量变化主要由自然过程作用下通过新增(39.6%)、消失(-9.1%)两个途径,以及养殖塘和盐田作用下通过消失(-15.3%)、碎化(14.5%)两个途径发生,斑块面积变化主要由自然过程影响下通过新增(17.5%)、扩张(12.6%)、消失(-6.1%),以及养殖塘和盐田建设驱动下通过斑块消失(-14.8%)、碎化(-13.9%)、萎缩(-6.6%)3 个途径发生。

**关键词:**红树林; 空间分布; 演变; 景观生态学; 斑块分析

## Mechanism analysis of temporal dynamics in mangrove spatial distribution in Guangxi, China: 1960—2010

LI Chungan\*, Dai Huabing

Guangxi Forest Inventory and Planning Institute, Nanning 530011, China

**Abstract:** Mangrove ecosystems are important for socioeconomic development and environmental protection but are experiencing sharp declines around the world. Asia has the most mangroves in area around the world but also has the largest human populations that threaten the ecosystem. Where mangrove is distributed and how its range changes are important topics for research throughout the world. Although many efforts have been made to study mangrove, more detailed information is still needed for better managing and protecting mangrove ecosystems. To analyze the mechanism of spatial dynamics of mangrove in Guangxi Beibu Gulf, China, from 1960 to 2010, multi-source remote sensing data were used to extract spatial information on mangroves in various years. The spatial distribution characteristics were analyzed and the spatial dynamic mechanisms of mangroves from 1960/1976 to 2010 were analyzed with a patch-based method. The results indicated that there were 1020, 829, 1094, 1718, and 1712 patches of mangrove in 1960/1976, 1990s, 2001, 2007, and

**基金项目:**国家自然科学基金(41166001); 中央财政林业科技推广示范资金(GXTG200904); UNEP-GEF-SCS-防城港红树林国际示范区

**收稿日期:**2014-01-16; **网络出版日期:**2014-11-19

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

2010, respectively, and the areas were 9062.5, 7430.1, 7015.4, 6743.2, and 7054.3  $\text{hm}^2$  in these 5 years, respectively. The region lost 22.16% of its mangrove area from 1960/1976 to 2010, with an annual loss rate of 0.53%. In the meantime, the patch-number increased 67.8%; the average patch-area decreased from 8.9  $\text{hm}^2$  in 1960/1976 to 4.1  $\text{hm}^2$  in 2010, and the number of big patches became smaller over time. Only 24 of 1020 patches (2.4%) in 1960/1976 remained unchanged till 2010, almost all the patches had changed to a certain degree. The results also indicated that lost (46.1%), fragmented (40.4%), and shrunken (13.5%) mangroves were the major components of the loss in mangrove area, whereas new (70.0%) and fragmented (29.9%) patches of mangrove were the main reasons for patch-number increases from 1960/1976 to 2010. The dynamics of patch-number and area changes varied both spatially and temporally. Shrimp and salt pond construction (80.0%), infrastructure construction (10.9%), and agriculture (9.1%) were the major causes of mangrove loss, and incensement of patch-number was due to natural processes (92.6%) such as extreme weather, flooding, sediment deposition, and growth/succession and plantations (7.4%) The causes of lost area varied both spatially and temporally. Changes in patch-number were mainly due to the natural processes and procedures of new patch (39.6%) and disappeared (-9.1%), and shrimp and salt pond construction and procedures of disappeared (-15.3%) and fragmented (14.5%); changes in mangrove areas were caused mainly by natural processes acted on the new (17.5%), expanded (12.6%), and disappeared (-6.1%) patches; shrimp and salt pond construction contributed to the disappeared (-14.8%), fragmented (-13.9%), and shrunken (-6.6%) mangrove patches. This study demonstrates the effectiveness of methodology that integrates natural processes and human activities into analysis of mangrove spatial distribution and its changes over time, and such a method can be used for in-depth mangrove research in other regions of the world.

**Key Words:** mangrove; spatial distribution; mangrove dynamic; landscape ecology; patch analysis.

红树林是重要的海洋生态系统,具有重要的社会经济和环境生态功能。2005 年全球红树林面积为 1523.1 万  $\text{hm}^2$ , 分布于 124 个国家和地区,其中亚洲面积最大,占全球的 38.5%。由于人类活动对海岸生态系统造成的压力及水产、农业、基础设施和旅游对红树林栖息地的破坏,1980—2005 年,全球红树林减少了 19%<sup>[1]</sup>。

很多学者对红树林动态监测做了大量的研究工作。在全球尺度上,很多组织、机构和学者对红树林数量及其分布进行了估计<sup>[1-8]</sup>,但大多是基于区域尺度和地方尺度数据的汇总,基础数据来源多样、获取技术不同、地理空间投影不一致、数据不相容,不能提供足够详细的空间信息,因此估计结果相差较大<sup>[9]</sup>。Giri 等于 2010 年通过解译近 1 000 景 Landsat 遥感图像,完成了第一次真正意义上的全球红树林空间分布监测<sup>[9]</sup>。区域尺度红树林动态监测,大多采用 Landsat、SPOT1-4、IRS LISS III 等中分辨率遥感数据<sup>[10-14]</sup>;地方尺度则主要采用航空像片和高空间分辨率卫星遥感数据,包括 SPOT、IKONOS、QuickBird 等<sup>[15-18]</sup>。20 年来,很多学者对我国红树林动态变化进行了很多研究,初步揭示了我国主要分布区红树林变化动态及其驱动因素<sup>[19-29]</sup>,但监测区较小,大多局限于一个港湾或一个河口,并且大多采用 Landsat TM/ETM+ 等中分辨率遥感数据,监测结果精度较低。另一方面,虽然很多学者对各个尺度上红树林空间分布动态进行了研究,但这些研究多是从整体的角度研究面积的变化情况,缺乏由斑块而起的深入研究,未能全面阐明在长期演变过程中红树林斑块数量和面积增加、减少的动态过程。此外,有关红树林面积变化的驱动因子,大多只是定性分析,少见定量分析。总之,现有红树林空间分布动态分析并未触及红树林空间分布的演变机制。

广西沿海是中国大陆重要的红树林分布区,红树林面积占全国的 38%<sup>[30]</sup>。历史以来,区域的经济水平、发展方式以及沿海居民生产生活方式、环境保护意识等,与毗邻的广东省雷州半岛及粤西海岸、海南省北部和东北海岸等中国红树林主要分布区基本相似。为此,采用航空图像、SPOT1-5、ALOS 等中高分辨率遥感图像,对广西北部湾 1960—2010 年红树林空间分布进行动态监测,采用基于斑块的分析方法<sup>[31-32]</sup>,深入研究其空间演变机理,不但有助于探明该区域红树林空间分布的变化规律,揭示经济社会发展和人为干扰对红树林空间分布的影响,也可由此管窥中国大陆红树林的历史变化及其空间演变机制,为国家和各级政府以及社

会公众的红树林湿地保护管理提供科学依据。

## 1 研究区概况

### 1.1 地理位置

广西北部湾位于北部湾北缘,大陆岸线东起合浦县与广东省廉江县交界的英罗港洗米河口,西至东兴市与越南交界的北仑河口,海岸线全长 1 500 km,有大小岛屿 697 个,总面积 66.90 km<sup>2</sup>,滩涂面积 1 005 km<sup>2</sup>。岸线曲折,具有众多天然海湾,主要有铁山港湾、廉州湾、钦州湾、防城港湾和珍珠港湾。为对区域红树林空间分布作深入分析,将研究区进一步细分为北仑河口、珍珠港、英罗港等 14 个海湾(图 1)。

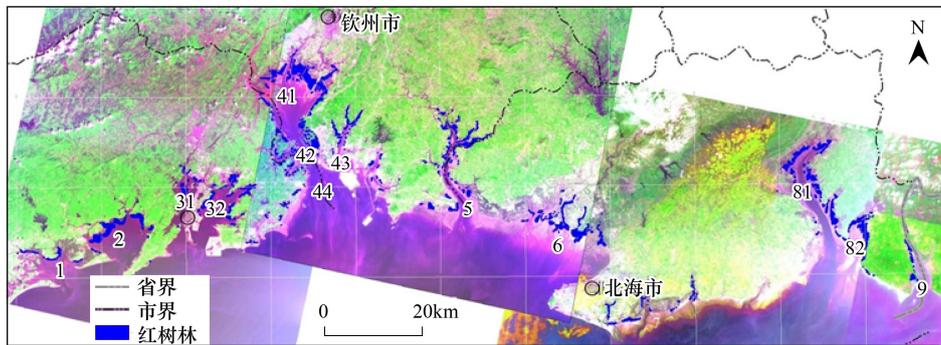


图 1 研究区及海湾分区与 2010 年红树林分布图

Fig.1 Study site and location of sub-gulf and distribution of mangrove in 2010

海湾名称:1.北仑河口;2.珍珠港;31.防城港西湾;32.防城港东湾;41.茅尾海;42.七十二泾;43.金鼓江;44.钦州湾外湾;5.大风江;6.廉州湾;7.北海东岸;81.铁山港;82.丹兜海;9.英罗港

### 1.2 生境条件

位于北回归线以南,属边缘热带海洋气候,主要特点为:①季风明显,全年盛行季风;②温差小,相对湿度约为 80%;③干湿季明显,年降雨量 1 500—2 000 mm,最高年降雨量达 3 512 mm,6—8 月雨量约占全年雨量的 55%—60%;④无严寒天气,年平均气温 22.0—23.4 ℃,最冷月(1 月)平均温度不低于 13.4 ℃,最热月(7 月)平均气温 28.0 ℃,极端最高气温可达 37.5 ℃;⑤灾害天气多,主要有台风、热带风暴、风暴潮、暴雨、低温阴雨、寒露风、干旱等,年均受台风侵袭 2—3 次,最大风力达 32.7 m/s。

海底地形平坦,其坡向自西北向东南倾斜,一般坡度为 2°左右。浅海属半封闭型大陆架海域,海底沉积物以粉砂为主。

潮汐为非正规全日潮和正规全日潮,其中全日潮时间占 60%—70%。沿岸各地潮差较大,最大潮差 6.25 m,平均潮差 2.42 m。沿岸有中小河流 123 条,其中独流入海的较大河流有南流江、钦江、大风江、茅岭江、防城河等 22 条,年均径流量约 250 亿 m<sup>3</sup>。6—8 月地表水资源量占全年水资源量的 50%—60%,12 月至次年 2 月仅占 20%。年平均水温为 23.0 ℃,7 月水温最高,达 30.6 ℃,1 月水温最低,为 13.8 ℃。水温的季节性变化与气温一致。海水平均盐度为 28.81,12 月至次年 2 月盐度最高,为 31.14,9—11 月次之,为 29.08,3—5 月为 27.85,6—8 月盐度最低,为 27.15。

### 1.3 经济社会概况

广西沿海地区包括北海市、钦州市、防城港市,2010 年总人口 645.73 万人。有大小商港、渔港 24 个,其中防城港、钦州港、北海港是广西对外贸易的三大港口,2010 年货物吞吐量达 1.19 亿 t。沿岸滩涂开发利用方式包括海水养殖、港口建设、开辟盐田、围海造地、海水浴场等。1950 年以来,围海造地和盐田及临海工业、城镇用海面积总计约 100 km<sup>2</sup>,海水养殖面积 643 km<sup>2</sup>,分别约占广西沿海滩涂总面积的 10%和 64%。2010 年经批准的工程建设项目用海 44 宗,涉海面积 22 010.42 hm<sup>2</sup>,其中填海面积 1 275.85 hm<sup>2</sup>。

沿海地区有 2 个国家级(北仑河口、山口)、1 个自治区级(茅尾海)红树林自然保护区,合浦儒艮国家级

自然保护区和北海滨海国家湿地公园。

## 2 红树林遥感信息提取及空间分布演变机制分析方法

### 2.1 遥感信息提取方法

#### 2.1.1 遥感数据

用于红树林信息提取的遥感数据有航空图像和卫星图像,各种图像的拍摄(成像)年度、数量、覆盖海湾和比例尺、空间分辨率见表 1。局部区域还采用了由 Google Earth 下载的 2009、2010 年 Quickbird 卫星图像。此外,还采用一定数量的 2004—2007 年 1:10000 全色正射航空图像,用于遥感图像几何精校正。

表 1 用于信息提取的遥感数据种类及其覆盖区域<sup>[31]</sup>

年度 Year	图像种类 Image type	数量/景 Scene	覆盖海湾 Bay of image covered													比例尺/空间分辨率 Scale or resolution	
			1	2	31	32	41	42	43	44	5	6	7	81	82		9
1960	全色航空图像	357	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√				1:1.4—2.0 万
1976	全色航空图像	114												√	√	√	1:0.5—1.4 万
1989	全色航空图像	17			√	√											1:1.4 万
1989	SPOT1	2	√	√	√	√	√		√					√	√	√	HRV10m/XS20m
1991	SPOT2	1									√	√	√				HRV10m/XS20m
1995	SPOT2	1							√								HRV10m/XS20m
2001	SPOT4/TM5	4	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	SPOT HRV10m/TM XS30 m
2007	SPOT5/ALOS	6	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	HRG 2.5m/XS 10m
2007	无人机真彩图像	21															约 1:2 000
2010	ALOS	5	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	HRG 2.5m / XS 10m

1989 年的 SPOT1 图像不覆盖金鼓江等 4 个海湾,用 1991 年和 1995 年的 SPOT2 图像补充。由于数据年度的跨度不长,并且这 4 个海湾的红树林面积只约占研究区的 25%,为便于动态分析,采用各年度红树林面积加权平均计算得到的平均年度为 1989.6,故 1989—1995 年的数据可视为 1990 年的数据,后述分析中常用“1990s”或“1990s 年”表示,意指这个时间段的红树林数据为 20 世纪 90 年代的数据,而非严格意义上的 1990 年的数据。1960 年的图像未覆盖铁山港及以东海湾,用 1976 年的图像补充,按上述方法得到的数据平均年度为 1963 年。由于年度相差较远,因此除在作面积和斑块数量变化速率分析时取其数据年度为 1963 年外,其数据年度一律用“1960/1976 年”表示。

#### 2.1.2 图像预处理

(1) 采用正射全色航空图像对各期卫星遥感图像进行几何精校正,并作分辨率融合。为提高可读性,对其进行边缘增强;

(2) 以海湾为单元拼接各期航空图像,以经精校正后的 2010 年卫星遥感图像为参考图像进行几何精校正,然后进行整体拼接。

#### 2.1.3 斑块信息提取与地面验证

(1) 航空遥感图像信息提取采用在 GIS 支持下通过目视解译、屏幕矢量化方法进行。在确保地物清晰可辨的前提下,在屏幕矢量化过程中尽可能将图像放大,至少放大到 1:5 000 以上,并严格做到矢量线与图像上红树林边界重合。

(2) 卫星遥感图像信息提取采用以下方法进行:①将图像按海湾范围切割,并尽可能去除水体和陆地区域;②进行波谱运算、监督分类和面向对象分类;③根据红树林空间分布情况,将图像进一步切割为众多小区域(最小区域为一个较大的斑块),然后施行无监督分类(一般分为 20 类以上),根据图像表征和地面调查数据和经验,对分类图像进行赋值;④参考波谱运算图像和各种分类图像,采用屏幕矢量化方法提取红树林斑块

边界。边界提取一般在比例尺 $\geq 1:3\ 000$ 的分类图像上进行。

(3) 为确保各期红树林斑块边界的变化符合逻辑,在提取斑块边界过程中,需逐一斑块参考同一位置的前、后期图像及其相应斑块的边界信息。

(4) 将 2010 年红树林斑块边界提取结果输入 PDA+GPS 和输出纸质图,进行实地验证、校对和修正,并根据 2010 年修正结果对各期数据进行空间变化逻辑检查和修正。对面积较大斑块或典型斑块分别远景、中景和近景拍摄照片,记录其群落结构状况。

采用从 Google Earth 下载的 2010 年 QuickBird 图像对由 2010 年 ALOS 提取的珍珠港 49 个斑块进行精度检验,结果为:面积总误差为 $-2.5\%$ ,表示空间位置精度的平均重叠率<sup>[31]</sup>为 $96.5\%$ ,说明监测结果可靠。

## 2.2 斑块数量和面积在不同因素驱动下通过不同途径发生的变化量计量方法

红树林斑块变化的驱动因素(因子)包括自然过程、养殖塘和盐田建设、围垦、工程建设和人工造林 5 种,变化途径有稳定、扩张、萎缩、碎化、消失和新增 6 种<sup>[31-32]</sup>。由于遥感数据种类不一、传感器不同、空间分辨率相差较大,难以做到各期遥感图像的精确配准,故采用整体计量法对斑块数量和面积在不同因素驱动下通过不同途径发生的变化量进行计量,方法要点如下<sup>[31]</sup>:

(1) 在 GIS 环境中,将前、后两期斑块分布图、遥感图像进行叠合,采用视觉信息叠合方法,将研究区划分为众多具有相同主要驱动因子和变化途径且相邻斑块组成的分析单元,并予以逐一编号。由于在不同的监测期,同一斑块变化的驱动因素和变化途径都不尽相同,因此,对于不同的监测期,需单独划分分析单元。

(2) 对于每个分析单元,根据斑块恢复的难易程度、面积和斑块数量变化量的大小,确定其主要驱动因子和主要变化途径。监测期内该分析单元前、后期的斑块数量和面积之差分别为该分析单元由该因子驱动、通过该途径发生的斑块数量和面积的变化量。

## 2.3 空间分布演变机制分析方法<sup>[31-32]</sup>

(1) 编写计算机程序,构建各个分析单元斑块数量和面积变化量的驱动因子-变化途径状态矩阵。

(2) 通过计算机程序,由驱动因子-变化途径状态矩阵出发,计算各个监测期的总驱动量、总驱动率、净驱动量、净驱动率、趋势驱动率、总流量、总流率、净流量、净流率、趋势净流率和作用力等反映斑块数量和面积空间演变的系列指标。

# 3 红树林数量及其变化趋势

## 3.1 斑块数量和面积数量及其变化趋势

1960/1976 年,研究区有 1 020 个红树林斑块,总面积为 $9\ 062.5\ \text{hm}^2$ ,至 2010 年,斑块数量增加至 1 712 个,面积减少为 $7\ 054.3\ \text{hm}^2$ 。2010 年研究区红树林分布图见图 1,各个海湾、各个市辖区不同时期的红树林面积和斑块数量见表 2。

1960/1976—2010 年,红树林面积减少了 $22.16\%$ ,采用复利准则计算的年均变化率<sup>[33]</sup>为 $-0.53\%$ ;斑块数量增加了 $67.8\%$ ,年均变化率为 $1.10\%$ 。

1960/1976—2007 年,广西红树林面积以年均 $0.50\%$ — $0.75\%$ 变化率逐期减少,至 2010 年较 2007 年小幅度增加。斑块数量由 1960/1976—1990s 年长时期小幅度减少,经 1990s—2007 年呈大幅度增加后,2007—2010 年保持基本稳定。

红树林面积变化速率随着时间、空间的不同而不同(表 3)。虽然在 1960/1976—2007 年 3 个监测期中,广西红树林面积的年均变化率较为接近,但各个海湾、区域的变化率相差很大。同一监测期,不同区域和海湾的变化情况差异更大,即使在大多数海湾红树林面积均减少的情况下,也有一些海湾出现红树林面积增加的现象,并且,虽然同样是面积减少,但其减少的速率也相差较大。以上反映了研究区在不同的历史时期、不同的海湾和市域,人为活动干扰对红树林的影响程度不同。

表 2 1960/1976—2007 年广西红树林斑块数量和面积变化趋势

Table 2 Current and past extent of mangrove by district or bay in Guangxi (1960/1976—2010)

海湾或市域 District or bay	1960/1976		1990s		2001		2007		2010	
	面积 Area/ hm <sup>2</sup>	斑块数 量/个 Patch- number								
北仑河口	90.0	12	101.1	22	94.3	41	88.1	36	92.4	41
珍珠港	1 098.9	42	1 026.9	46	920.5	68	883.5	59	891.8	68
防城港西湾	338.7	28	274.2	49	249.4	46	173.6	44	162.7	46
防城港东湾	627.3	52	597.7	117	557.4	111	532	110	509.6	111
茅尾海	1086.3	79	1291.6	120	1290.1	244	1151.3	250	1223.2	244
七十二泾	686.3	186	369.1	112	336.8	206	295.7	214	295.9	206
金鼓江	665.9	68	216.1	48	182.9	130	152.3	126	137.3	130
钦州湾外湾	223.1	66	173.3	31	216.7	90	221.0	97	214.5	90
大风江	847.0	125	653.9	102	576.1	268	591.0	281	565.0	268
廉州湾	753.4	65	656.5	47	574.8	155	610.6	148	707.5	151
北海东岸	964.0	84	372.6	33	394.2	95	314	101	308.1	95
铁山港	1 152.9*	132*	1018.8	62	927.3	183	987.1	178	1 019.3	183
丹兜海	322.6*	49*	493.4	19	497.8	47	529.0	46	555.1	47
英罗港	206.1*	32*	184.9	21	197.1	28	214.1	28	221.4	28
防城港市域	2 437.4	209	2 218.0	306	2 068.1	419	1 879.7	397	1 845.9	419
钦州市域	3 008.1	425	2 257.8	317	2 203.8	718	2 042.5	747	2 082.3	718
北海市域	3 617.0 <sup>#</sup>	386 <sup>#</sup>	2 954.3	206	2 743.5	315	2 821.0	574	3 126.1	575
全广西	9 062.5 <sup>#</sup>	1 020 <sup>#</sup>	7 430.1	829	7 015.4	1 094	6 743.2	1 718	7 054.3	1 712

表中 1960/1976 年、2010 年的斑块数量和面积与引文[32]有差异,是因为在[32]文完成后,笔者继续进行深入研究,修正了原监测结果。有关 1960/1976—2010 年广西红树林面积和斑块数量,以本文为准;(2) 1960/1976 年的数据中,带\*者为 1976 年的数据,带<sup>#</sup>者为 1960/1976 年的数据,其余为 1960 年的数据

表 3 1960/1976—2010 年不同监测期广西红树林斑块面积变化量和年均变化率<sup>[31]</sup>

Table 3 Change and average annual change rate of mangrove area by district or bay in Guangxi (1960/1976—2010)

区域及海湾 District or bay	1960/1976—1990 年		1990s—2001 年		2001—2007 年		2007—2010 年	
	变化量 Change of area /hm <sup>2</sup>	年均变化率 Avg. annual rate of change/%	变化量 Change of area /hm <sup>2</sup>	年均变化率 Avg. annual rate of change/%	变化量 Change of area /hm <sup>2</sup>	年均变化率 Avg. annual rate of change/%	变化量 Change of area /hm <sup>2</sup>	年均变化率 Avg. annual rate of change/%
北仑河口	11.1	0.40	-6.8	-0.58	-6.2	-1.13	4.3	1.59
珍珠港	-72.0	-0.23	-106.4	-0.91	-37.0	-0.68	8.3	0.31
防城港西湾	-64.5	-0.73	-24.8	-0.79	-75.8	-6.04	-10.9	-2.16
防城港东湾	-29.6	-0.17	-40.3	-0.58	-25.4	-0.78	-22.4	-1.43
茅尾海	205.3	0.60	-1.5	-0.01	-138.8	-1.90	71.9	2.02
七十二泾	-317.2	-2.14	-32.3	-0.76	-41.1	-2.17	0.2	0.02
金鼓江	-449.8	-3.22	-33.2	-2.78	-30.6	-3.05	-15.0	-3.46
钦州湾外湾	-49.8	-0.87	43.4	1.86	4.3	0.33	-6.5	-1.00
大风江	-193.1	-0.83	-77.8	-1.27	14.9	0.43	-26.0	-1.50
廉州湾	-96.9	-0.44	-81.7	-1.33	35.8	1.01	96.9	4.91
北海东岸	-591.4	-3.07	21.6	0.56	-80.2	-3.79	-5.9	-0.63
铁山港	-134.1	-0.95	-91.5	-0.78	59.8	1.04	32.2	1.07
丹兜海	170.8	3.27	4.4	0.07	31.2	1.01	26.1	1.61
英罗港	-21.2	-0.83	12.2	0.53	17.0	1.38	7.3	1.12
防城港市域	-219.4	-0.33	-149.9	-0.58	-188.4	-1.59	-33.8	-0.60
钦州市域	-750.3	-0.96	-54.0	-0.22	-161.3	-1.27	39.8	0.64
北海市域	-662.7	-0.90	-210.8	-0.67	77.5	0.46	305.1	3.42
全广西	-1 632.4	-0.75	-414.7	-0.50	-272.2	-0.66	311.1	1.50

表中计算各区域的年均变化率时,根据各海湾的数据年度(表 1)、2010 年红树林面积,采用加权平均法计算各区域的数据年度。如全广西 1960/1976 年的数据年度为 1963.0,1990s 年的数据年度为 1989.6;北海市区域 1960/1976 年的数据年度为 1967.4,1990s 年的数据年度为 1989.9

在大尺度区域尺度上,1960/1976—2010 年研究区红树林面积的年均减少速率,低于 1980—2005 年全球的 0.77%、亚洲的 0.98%、越南全国的 1.37%、中国全国的 1.37%<sup>[1]</sup>,高于 2004 年印度洋海啸影响地区 1975—2005 年的 0.4%<sup>[34]</sup>;在海湾尺度的区域上,研究区红树林面积年均减少速率低于 1977—2008 年湛江雷州湾通明海的 0.58%<sup>[29]</sup>,高于 1989—2002 年海南东寨港的 0.49%<sup>[26]</sup>,低于同属北部湾的越南主要海湾和地区的 1943 年以来的红树林减少速率<sup>[35]</sup>。

### 3.2 斑块面积特征变化趋势

由于面积大幅度减少、斑块数量大量增加,1960/1976—2010 年广西红树林斑块平均面积呈大幅度减少的趋势,2010 年斑块平均面积只为 1960/1976 年的 46.1%,斑块面积变化的另一个特征是大斑块的数量明显减少,详见表 4。

表 4 不同年度斑块面积特征<sup>[31]</sup>

Table 4 Characteristic of patch-area in various year

年度 Year	斑块平均面积 Average area of patch/hm <sup>2</sup>	最大斑块面积 Area of the biggest patch/hm <sup>2</sup>	面积大于或等于下列数值的斑块数量/个 Patch-number which area is bigger than value bellows							
			200 hm <sup>2</sup>	100 hm <sup>2</sup>	50 hm <sup>2</sup>	20 hm <sup>2</sup>	10 hm <sup>2</sup>	5 hm <sup>2</sup>	2 hm <sup>2</sup>	1 hm <sup>2</sup>
1960/1976	8.9	391.5	7	13	37	93	161	286	467	649
1990s	9.0	244.8	2	13	30	83	149	252	433	579
2001	6.4	192.9		8	25	69	150	266	492	697
2007	3.9	205.7	1	5	22	74	142	243	493	752
2010	4.1	209.9	1	6	26	75	148	255	491	735

### 3.3 斑块的稳定性

1960/1976 年 1 020 个红树林斑块中,至 2010 年时只有 24 个斑块保持稳定(边界和面积基本不变),占 1960/1976 年斑块数量的 2.4%,而扩张、萎缩、碎化和消失斑块的比重分别为 23.8%、12.7%、17.4%和 43.7%,期间新增的斑块数量占 2010 年斑块数量的 49.8%。这种斑块数量一方面大量减少,另一方面大量增加的变化,表明区域红树林斑块处于极不稳定的状态。将稳定、扩张视为斑块的良性变化,萎缩、碎化和消失视为非良性变化,则 1960/1976—2010 年,呈良性、非良性变化的斑块数量比重分别为 26.2%和 73.8%,总体上呈非良性变化。

进一步分析结果表明,1960/1976—2010 年斑块数量增加了 1 230 个,减少了 538 个,斑块数量总变化量为 1 768 个,净变化量为 692 个,总变化率和净变化率分别为 64.7%、25.3%,表明红树林斑块处于大幅度增加、大幅度减少的极不稳定状态。不同海湾斑块数量和面积的总变化率基本相同,但净变化率相差较大,说明各个海湾的红树林斑块都处于增加、减少的动态过程之中。

由于消失的斑块和新增的斑块在空间位置上基本不重叠,因此,红树林空间分布结构发生了很大的变化,很多 1960/1976 年有红树林分布的地段,至 2010 年时已经变成了光滩,而很多 1960/1976 年为光滩的地段,至 2010 年时出现了红树林。

## 4 红树林空间分布演变机制分析

### 4.1 变化途径分析

变化途径分析的目的在于阐明红树林斑块数量和面积通过各个途径发生变化量(绝对量和相对量)的大小,用总流量、总流率、净流量、净流率和趋势流率 5 个流量(率)指标定量反映斑块数量和面积通过各个途径发生的变化情况,其中:总流量(率)表示斑块数量和面积通过某个途径发生的总变化量(率);净流量(率)表示斑块数量和面积通过某个途径发生的净变化(增加或减少)量(率);趋势流率表示监测期内斑块数量和面积净增加/净减少的情况下,通过某个变化途径发生的净变化量的相对量<sup>[31-32]</sup>。研究区斑块数量和面积变化

的途径分析结果见表 5。

表 5 1960/1976—2010 年不同途径的斑块数量和面积流量(率)分析<sup>[31]</sup>

Table 5 Flow amount and flow rate of patch-number and area change through various procedure (1960/1976—2010)

监测期 Year	项目 Item	斑块数量 Patch-number/个						面积 Area/hm <sup>2</sup>					
		稳定 ST	扩张 EX	萎缩 SH	碎化 FR	消失 DI	新增 New	稳定 ST	扩张 EX	萎缩 SH	碎化 FR	消失 DI	新增 New
1960/1976—	总流量		150	20	105	451	297	5.5	919.0	690.9	945.2	1 945.4	1 080.8
1990	总流率/%		14.7	2.0	10.3	44.1	29.0	0.1	16.4	12.4	16.9	34.8	19.3
	净流量		-140	-2	105	-451	297	-2.3	850.2	-672.1	-943.6	-1 945.4	1 080.8
	净流率/%		-14.1	-0.2	10.6	-45.3	29.8		15.5	-12.2	-17.2	-35.4	19.7
	趋势流率/%		-23.6	-0.3		-76.1		-0.1		-18.9	-26.5	-54.6	
1990s—2001	总流量	1	52	4	126	189	359	41.6	512.9	265.2	785.7	423.1	489.0
	总流率/%	0.1	7.1	0.5	17.2	25.9	49.1	1.7	20.4	10.5	31.2	16.8	19.4
	净流量	-1	-28		124	-189	359	-4.4	502.3	-259.6	-718.9	-423.1	489.0
	净流率/%	-0.1	-4.0		17.7	-27.0	51.2	-0.2	21.0	-10.8	-30.0	-17.6	20.4
	趋势流率/%				25.7		74.3	-0.3		-18.5	-51.1	-30.1	
2001—2007	总流量		36	20	317	124	453	25.8	400.6	358.1	483.5	207.1	316.5
	总流率/%		3.8	2.1	33.4	13.1	47.7	1.4	22.4	20.0	27.0	11.6	17.7
	净流量		-26	6	315	-124	453	1.8	391.6	-354.5	-420.5	-207.1	316.5
	净流率/%		-2.8	0.6	34.1	-13.4	49.0	0.1	23.1	-21.0	-24.9	-12.2	18.7
	趋势流率/%			0.8	40.7		58.5			-36.1	-42.8	-21.1	
2007—2010	总流量	6	58	3	72	94	69	44.3	421.2	122.6	43.5	33.7	71.2
	总流率/%	2.0	19.2	1.0	23.8	31.1	22.8	6.0	57.2	16.6	5.9	4.6	9.7
	净流量	4	-50	-1	66	-94	69	0.3	414.8	-122.0	-19.5	-33.7	71.2
	净流率/%	1.4	-17.6	-0.4	23.2	-33.1	24.3		62.7	-18.4	-2.9	-5.1	10.8
	趋势流率/%		-34.5	-0.7		-64.8		0.1	85.3				14.6
1960/1976—	总流量	1	83	16	364	452	852	1.7	778.4	656.8	1 872.8	1 982.1	1 532.4
2010	总流率/%	0.1	4.7	0.9	20.6	25.6	48.2		11.4	9.6	27.4	29.0	22.5
	净流量	1	-63	-10	364	-452	852	-0.5	763.6	-583.0	-1738.6	-1982.1	1 532.4
	净流率/%	0.1	-3.6	-0.6	20.9	-25.9	48.9		11.6	-8.8	-26.3	-30.0	23.2
	趋势流率/%	0.1			29.9		70.0			-13.5	-40.4	-46.1	

ST: Stable; EX: Expand; SH: Shrank; FR: Fragment; DI: Disappear; New: New patch

由表 5, 研究区 1960/1976—2010 年斑块数量的变化具有如下特点: ①虽然在稳定、萎缩、扩张、碎化、消失和新增 6 个途径上都出现斑块数量变化, 但后 3 个途径的变化量最大, 其总流率之和达到了 77.7%—94.2%, 是斑块数量变化的主要途径, 斑块稳定、萎缩对斑块数量变化影响不大; ②不同监测期, 各个途径上发生的斑块数量变化量相差较大, 当斑块数量净减少时(1960/1976—1990s 年、2007—2010 年), 消失途径的总流率最大, 扩张途径也较大, 当斑块数量净增加时(1990s—2001 年、2001—2007 年), 新增途径的总流率最大, 碎化途径也较大, 说明在不同的监测期, 斑块受到干扰的行为不同; ③各个监测期中, 无论其斑块数量净增加还是净减少, 新增和消失途径上的总流率都较大, 说明同时出现斑块数量一方面增加、另一方面减少两个结果互为相反的现象; ④各个途径上斑块数量变化的总流率和净流率具有极高相关性, 说明各个途径上斑块总变化与净变化基本上保持一致性; ⑤趋势流率分析结果表明, 斑块消失、扩张是斑块数量减少的主要途径, 而新增、碎化是斑块数量增加的主要途径。

斑块面积的变化情况与斑块数量变化不同, 表现为:

①除稳定途径较小外, 扩张、萎缩、碎化、消失和新增 5 个途径的面积总流率都较大, 且面积净增加的 2007—2010 年外, 其余面积净减少的 3 个监测期中, 各个途径间总流率的差异远小于斑块数量总流率的差异, 说明红树林面积的变化途径更具多样性和均匀性。

②同一监测期,除面积净增加的 2007—2010 年外,其余面积净减少的 3 个监测期中,扩张、萎缩、碎化、消失、新增 5 个途径的总流率相差不太大,说明各个途径上面积的变动情况较为相近。

③监测期不同,同一途径上的面积总流率相差较大,如斑块消失在 1960/1976—2010 年 4 个监测期的总流率分别为 34.8%、16.8%、11.6%、4.6%,最大相差近 5 倍。扩张途径在 1960/1976—1990 年、2007—2010 年的总流率分别为 16.4%、57.2%,两者相差更大,说明不同监测期,红树林面积在不同途径上的变化程度不同,其原因是斑块受到干扰的方式、程度不同。

④不同监测期,良性变化途径(扩张、新增)、非良性变化途径(萎缩、碎化、消失)的总流率分别为 35.8%—72.9%、27.1%—58.6%,净流率分别为 35.2%—73.5%、-58.4%—-26.4%,均较大,说明面积变化处于一方面大量减少、一方面大量增加的剧烈变化之中,此外,1960/1976—1990s 年、1990s—2001 年、2001—2007 年三个监测期,良性变化的净变化量分别比非良性变化的净变化率小 29.6、17.2、16.2 个百分点,故红树林面积净减少,2007—2010 年,良性变化的净变化量分别比非良性变化的净变化率大 47.1 个百分点,故面积净增加。

⑤由趋势流率可以看出,斑块碎化、消失、萎缩是 1960/1976—2007 年红树林面积减少的主要途径,其中 1960/1976—1990s 年以斑块消失(-54.6%)为主,其次是碎化(-26.5%),1990s—2001 年以斑块碎化(-51.1%)为主,其次是消失(-30.1%),2001—2007 年,碎化和萎缩途径的趋势流率分别为-42.8%和-36.1%,斑块扩张(85.3%)和新增(14.6%)是 2007—2010 年红树林面积增加的主要途径。

⑥间隔期越短,斑块扩张途径上的净流率越大,而消失途径上的净流率越小,其他途径上的净流率在不同监测期内无明显的规律性。

## 4.2 驱动因子分析

驱动因子分析实质是评估各个影响因子(因素)对斑块数量和面积变化的影响程度,为红树林保护管理中采取相应措施削减(或增强)这些因素的影响提供科学依据。

### 4.2.1 驱动因子的影响范围

1960/1976 年的 1020 个斑块中,至 2010 年时有 532 个受到养殖塘和盐田建设影响(如图 2a),占 52.2%,受到围垦、工程建设(如图 2b)和人工造林影响的斑块数量分别为 9 个、69 个和 28 个,分别占 1960/1976 年斑块数量的 0.9%、6.8%和 2.7%,有 37.5%的斑块未受到明显的人为干扰影响。就面积而言,受围垦、养殖塘和盐田建设、工程建设和人工造林影响的比重分别为 2.4%、61.2%、9.0%和 2.8%。1960/1976—2010 年,研究区只有 37.5%的斑块、24.6%的面积未受到明显的人为活动干扰,或者说是人为活动未造成这些斑块发生变化。无论是斑块数量和面积,养殖塘和盐田建设影响涉及的范围最广,其次是工程建设,围垦和人工造林对研究区红树林影响的范围较小。不同监测间各个驱动因素影响涉及的斑块数量和面积见表 6。

表 6 不同监测间各个驱动因素影响涉及的斑块数量和面积

Table 6 Patch-number and area affected by various drivers in various year

监测期 Term	年度 Year	斑块数量 Patch-number/个						面积 Area /hm <sup>2</sup>					
		自然 过程 NP	围垦 AG	养殖塘 和盐田 SSC	工程 建设 IC	人工 造林 PL	合计 Total	自然 过程 NP	围垦 AG	养殖塘 和盐田 SSC	工程 建设 IC	人工 造林 PL	合计 Total
1960/1976—	1960/1976	701	59	214	40	6	1020	5 286.6	1 189.6	1 914.8	557.3	114.2	9 062.5
1990s	1990s	632	17	133	13	34	829	5 740.3	379.7	619.1	371.0	320.0	7 430.1
1990s—2001	1990s	514	6	260	30	19	829	4 078.5	22.0	2 725.9	430.7	173.0	7 430.1
	2001	789	1	235	14	55	1094	4 673.9	1.3	1 777.1	254.2	308.9	7 015.4
2001—2007	2001	634	3	386	32	39	1094	4 399.6	5.4	1 825.5	434.3	350.6	7 015.4
	2007	1053		533	41	91	1718	4 491.5		1 334.1	374.4	543.2	6 743.2
2007—2010	2007	1361	1	278	38	40	1718	5 533.4	0.9	890.2	69.8	242.9	6 743.2
	2010	1346		276	28	62	1712	5 683.3		781.5	48.7	540.8	7 054.3

NP: Nature process; AG: Agriculture; SSC: Shrimp and salt pond construction; IC: Infrastructure construction; PL: Plantation

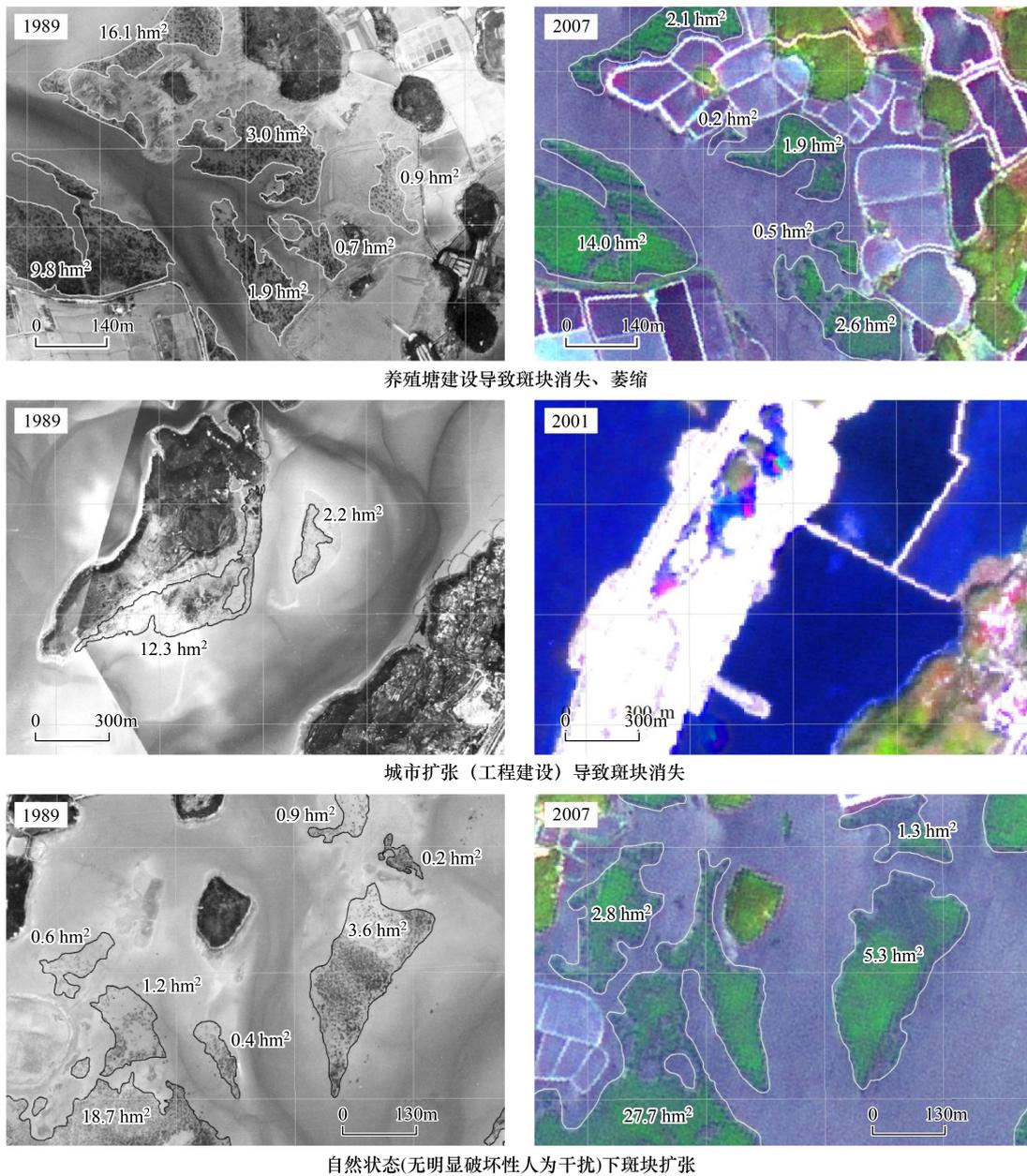


图2 养殖塘建设、城市扩张和自然过程驱动下斑块的变化

Fig.2 Patch dynamic derived by natural process, shrimp-pond and urban expand

各种人为活动在不同监测期对红树林空间分布影响范围的不同,反映了研究区不同历史时期政治和政策导向、经济发展方式与水平及公众环境保护意识对滩涂开发利用、红树林保护管理的影响状况。广西沿海主要海湾的滩涂开发历史悠久,汉武帝(公元前110年)就置官管理广西盐务,1087年宋朝皇帝曾令广西白石、石康两盐仓每年煮盐75万 $kg^{[36]}$ ,至1937年,整个海岸有10个盐厂。1954年后北海市区域组建了多个盐场,总面积近3000 $hm^2$ 。由于经济效益不高,20世纪80年代后,大部分盐场逐步改为养殖塘。广西沿海围垦也有较长历史。20世纪30年代,修筑了防城港江山乡谭蓬围、两头龙围和钦州坚心围等,围垦面积达万亩以上。至1949年,防城港市、钦州市区域滩涂围垦面积达1.13万 $hm^2$ ,用于种植水稻和建设盐田。1964年防城县江平镇修筑东西直堤,全长3.29 km,使京族三岛与大陆连接而成为半岛,增加围垦面积330 $hm^2$ ,开辟盐田和稻田<sup>[37]</sup>。滩涂养殖始于20世纪60年代初,但发展缓慢,至1987年,全海岸滩涂围塘养殖约200 $hm^2^{[36]}$ 。90年代后,海水养殖迅速发展,至2004年超过6万 $hm^2$ ,其中滩涂养殖3万多 $hm^2^{[38]}$ 。广西北部湾沿岸大规

模工程建设始于 1968 年防城港的动工兴建,经 40 多年建设,昔日的小渔村已发展成为一个现代化港口(局部见图 2b)。1992 年,钦州港动工兴建,现已建成为一个现代化港口。

对表 6 进一步分析发现,1960/1976—2007 年的 3 个监测期内,各种人为干扰的影响范围具有如下三个特点:①养殖塘和盐田建设涉及的斑块数量比重呈逐期增大趋势,这与研究区海水养殖的发展态势十分吻合;②工程建设涉及的范围呈逐期减少,这是由于工程建设主要为防城港(影响范围为防城港东湾)和钦州港(影响范围为七十二泾、钦州湾外湾)建设,及北海市城市发展(影响范围为北海东海岸),这些地区的红树林由于工程建设面积不断减少;③人工造林涉及范围逐期增大,这与 1990s 年以后特别是 2000 年以后地方政府和主管部门有组织的人工造林力度不断加大表现一致,人工造林地多见于珍珠港、茅尾海、廉州湾和铁山港。

#### 4.2.2 驱动因子的驱动量(率)分析

总驱动量(率)表示监测期内在某一因子驱动下斑块数量和面积的总变化量(率)<sup>[31-32]</sup>,反映了各个驱动因子对斑块数量和面积变化(扰动)的影响程度,总驱动率越大,表明了在该因子驱动下斑块数量和面积的变化量越大。1960/1976—2010 年,自然过程对红树林斑块数量和面积变化的总驱动率分别为 55.0%、36.2%,说明即使无明显的破坏性人为活动干扰,红树林斑块数量和面积也会发生较大变化(如图 2c)。在人为干扰因素中,养殖塘和盐田建设对斑块数量和面积变化的影响最大,其斑块数量和面积的总驱动率分别达到了 35.8%和 44.7%,远大于其他 3 种人为干扰的影响。见表 7。

表 7 1960/1976—2010 年不同驱动因素的斑块数量和面积驱动量(率)分析<sup>[31]</sup>

Table 7 Driver amount and rate of patch-number and area caused by various driver (1960/1976—2010)

监测期 Term	项目 Item	斑块数量 Patch-number / 个					面积 Area / hm <sup>2</sup>				
		自然 过程 NP	围垦 AG	养殖塘 和盐田 SSC	工程 建设 IC	人工 造林 PL	自然 过程 NP	围垦 AG	养殖塘 和盐田 SSC	工程 建设 IC	人工 造林 PL
1960/1976—1990s	总驱动量	715	56	185	39	28	3054.9	852.2	1295.3	178.6	205.8
	总驱动率/%	69.9	5.5	18.1	3.8	2.7	54.7	15.3	23.2	3.2	3.7
	净驱动量	-73	-42	-77	-27	28	487.9	-852.2	-1295.3	-178.6	205.8
	净驱动率/%	-29.6	-17.0	-31.2	-10.9	11.3	16.2	-28.2	-42.9	-5.9	6.8
	趋势驱动率/%	-33.3	-19.2	-35.2	-12.3			-36.6	-55.7	-7.7	
1990s—2001	总驱动量	452	4	206	25	44	1243.1	17.4	945.0	172.8	139.2
	总驱动率/%	61.8	0.5	28.2	3.4	6.0	49.4	0.7	37.5	6.9	5.5
	净驱动量	282	-4	-32	-15	34	576.5	-17.4	-924.4	-172.8	123.4
	净驱动率/%	76.8	-1.1	-8.7	-4.1	9.3	31.8	-1.0	-50.9	-9.5	6.8
	趋势驱动率/%	89.2				10.8		-1.6	-82.9	-15.5	
2001—2007	总驱动量	576	4	272	38	60	986.3	6.0	548.8	63.7	186.8
	总驱动率/%	60.6	0.4	28.6	4.0	6.3	55.1	0.3	30.6	3.6	10.4
	净驱动量	426	-4	146	8	48	140.7	-6.0	-529.0	-60.1	182.2
	净驱动率/%	67.4	-0.6	23.1	1.3	7.6	15.3	-0.7	-57.6	-6.5	19.8
	趋势驱动率/%	67.8		23.2	1.3	7.6		-1.0	-88.9	-10.1	
2007—2010	总驱动量	135	1	98	20	48	316.0	0.9	111.4	20.8	287.4
	总驱动率/%	44.7	0.3	32.5	6.6	15.9	42.9	0.1	15.1	2.8	39.0
	净驱动量	-15	-1	-2	-8	20	152.8	-0.9	-107.6	-20.6	287.4
	净驱动率/%	-32.6	-2.2	-4.3	-17.4	43.5	26.8	-0.2	-18.9	-3.6	50.5
	趋势驱动率/%	-57.7	-3.8	-7.7	-30.8		34.7				65.3
1960/1976—2010	总驱动量	972	13	633	77	73	2473.7	338.3	3050.3	451.2	510.7
	总驱动率/%	55.0	0.7	35.8	4.4	4.1	36.2	5.0	44.7	6.6	7.5
	净驱动量	710	-1	-49	-25	57	1204.5	-338.3	-2978.9	-406.2	510.7
	净驱动率/%	84.3	-0.1	-5.8	-3.0	6.8	22.1	-6.2	-54.8	-7.5	9.4
	趋势驱动率/%	92.6				7.4		-9.1	-80.0	-10.9	

各个监测期的总驱动率分析结果表明,各种驱动因素对斑块数量和面积变化的影响具有较为明显的规律性:①自然过程是斑块数量和面积变化最主要的影响因素,斑块数量变化总驱动率达到 44.7%—69.9%,面积变化总驱动率为 42.9%—55.1%,其次养殖塘和盐田建设,斑块数量和面积变化的总驱动率分别为 18.1%—32.5%、15.1%—37.5%,人工造林在 2007—2010 年对斑块数量和面积变化影响也达到一定程度,围垦、工程建设对斑块数量和面积变化的影响程度有限;②自然过程和围垦对斑块数量和面积变化的影响程度逐期减小,养殖塘和盐田建设的影响程度逐期增大;③监测期不同,各个驱动因子对红树林斑块数量和面积变化的影响程度不同。1960/1976—1990s 年,围垦对斑块数量和面积变化的总驱动率分别达到了 5.5% 和 15.3%,说明了在该时期,围垦造成较大的斑块数量和面积变化,2001—2007 年和 2007—2010 年,人工造林对面积变化的影响迅速增大,反映了研究区红树林人工造林努力的成效。

净驱动量(率)表示监测期内在某一因子驱动下斑块数量和面积的净变化量(率)<sup>[31-32]</sup>,反映了各个驱动因子对斑块数量净变化(增加或减少)的影响程度,净驱动率的绝对值越大、表明了在该因子驱动下斑块数量和面积的净变化量越大。由表 7 可以看出:①各个驱动因子对斑块数量净变化的影响较为复杂,同一因子在一些时期导致斑块数量净减少,在另一些时期导致斑块数量净增加,如自然过程在 1960/1976—1990s 年、2007—2010 年引起斑块数量净减少,在 1990s—2001 年、2001—2007 年引起斑块数量净增加,养殖塘和盐田、工程建设也存在相以情况,而对面积净变化的影响则不存在这种情况;②在不同的监测期,各个驱动因子对斑块数量和面积净变化的影响程度差异较大,如养殖塘和盐田在 1960/1976—1990s 年、2001—2007 年对斑块数量变化的净驱动率分别为 -31.2%、23.1%,自然过程在 1990s—2001 年、2001—2007 年对面积变化的净驱动率分别为 31.8%、15.3%,均相差较大;③各个驱动因子对面积净变化的影响具有良好的一致性,自然过程和人工造林引起面积净增加,养殖塘和盐田、工程建设、围垦引起面积净减少;④在 1960/1976—1990s 年、1990s—2001 年、2001—2007 年 3 个红树林面积净减少时期,养殖塘和盐田对面积变化的净驱动率都很大,并呈逐期加大的趋势,是这些时期面积净减少的最主要驱动因素,人工造林在 2007—2010 年对面积变化的净驱动率达到 50.5%,是该时期面积净增加最主要的驱动因素;⑤工程建设对面积变化的净驱动率为 -3.6%—9.5%,影响程度有限,与其影响范围不大相一致,围垦只在 1960/1976—1990s 年对面积净变化的影响较大,其余监测期均较小。

趋势驱动率表示监测期内斑块数量和面积在监测期内净增加/净减少的情况下,某个驱动因子对净增加/净减少量的贡献率,趋势驱动率越大,则该驱动因子对斑块数量和面积的增加/减少所起的作用越大<sup>[31-32]</sup>。分析结果表明:①不论斑块数量净减少还是净增加,自然过程都是最重要的影响因素之一(1960/1976—2010 年 4 个监测期的趋势驱动率分别为 -33.3%、89.2%、67.8%、-57.7%),养殖塘和盐田(1960/1976—1990s 年、2001—2007 年的趋势驱动率分别为 -35.2%、23.2%)、工程建设(2007—2010 年的趋势驱动率为 -30.8%)只在一些监测期对斑块数量的净变化造成重要影响;②养殖塘和盐田是面积净减少最主要的影响因素(1960/1976—2007 年 3 个监测期的趋势驱动率分别为 -55.7%、-82.9%、-88.9%),人工造林是面积净增加的最主要因素(2007—2010 年的趋势驱动率为 65.3%);③一些因素只在个别监测期对面积净变化具有重要影响,如围垦在 1960/1976—1990s 年是面积减少的重要驱动因素(趋势驱动率为 -36.6%),自然过程在 2007—2010 年是面积增加的主要驱动因素(趋势驱动率为 34.7%);④工程建设在 1960/1976—2007 年 3 个监测期中都是面积减少的驱动因素之一。

不同的区域,各个驱动因子对斑块数量的面积变化的影响程度不同,表现为毛驱动量(率)、净驱动量(率)和趋势驱动率均有差异。1960—1989 年,养殖塘和盐田、自然因素是防城港市区域面积变化的主要驱动因素,而在相应监测期的钦州市、北海市区域,围垦、养殖塘和盐田则为主要因素。1989—2001 年,自然因素、养殖塘和盐田建设、人工造林和工程建设都是防城港区域红树林斑块数量变化的重要驱动因子,而面积净变化主要受养殖塘和盐田、自然因素和工程建设驱动,而在钦州市和北海市区域,自然因素是斑块数量变化的绝对驱动因素,自然因素、养殖塘和盐田建设是面积净变化的两个主要驱动因子。

### 4.3 作用力分析

作用力表示在某个因子驱动下通过某个变化途径发生的斑块数量/面积的相对变化量<sup>[31-32]</sup>,作用力的绝对值越大,表明在该驱动因子-变化途径组合发生的斑块数量/面积的变化量越大。对研究区各个驱动因子的作用力的分析结果(表 8)表明:①1960/1976—2010 年各个监测期间,不同驱动因子和变化途径组合

表 8 1960/1976—2010 年斑块数量和面积变化的作用力(%)分析<sup>[31]</sup>  
Table 8 Acting force for patch-number and area change (196/1976—2010)

监测期 Term	驱动因素 Driver	斑块数量 Patch-number						面积 Area					
		稳定 ST	扩张 EX	萎缩 SH	碎化 FR	消失 DI	新增 New	稳定 ST	扩张 EX	萎缩 SH	碎化 FR	消失 DI	新增 New
1960/1976— 1990s	自然过程	0.1	-5.6	-0.1	4.3	-8.3	40.2		12.2	-4.0	-4.3	-5.7	17.5
	围垦				0.3	-1.2				-0.1	-2.7	-4.1	
	养殖塘和盐田			-0.1	15	-15.5				-6.8	-14.3	-15.2	
	工程建设				1.4	-2.9				-0.4	-2	-2.8	
1990s—2001	自然过程	0.1	-6.3	-0.1	4.3	-9.6	39.1		12.5	-4.5	-4.2	-6.3	17.5
	围垦				0.3	-1.5				-0.1	-3.2	-4.7	
	养殖塘和盐田			-0.1	14.2	-15.3				-6.5	-13.4	-14.9	
	工程建设				1.4	-2.9				-0.3	-1.9	-2.8	
2001—2007	自然过程	0.1	-6.2	-0.1	4.3	-9.4	39.4		12.8	-4.4	-4.2	-6.2	17.5
	围垦				0.3	-1.5				-0.1	-3	-4.4	
	养殖塘和盐田			-0.1	14	-15.4				-6.5	-13.8	-14.7	
	工程建设				1.3	-2.9				-0.4	-2	-2.7	
2007—2010	自然过程	0.1	-5.9		4.7	-9.1	39.7		12.9	-4.7	-4.3	-6.2	17.4
	围垦				0.3	-1.4				-0.1	-2.9	-4.3	
	养殖塘和盐田			-0.1	14.6	-14.8				-6.6	-13.9	-14.4	
	工程建设				1.4	-2.8				-0.4	-2	-2.7	
	人工造林		-0.5				4.5		3.9				3.5

的作用力十分接近,如养殖塘和盐田-消失在 4 个监测期的斑块数量作用力分别为-15.5%、-15.3%、-15.4%和-14.8%,表明了在不同监测期,某一驱动因子通过某一变化途径对斑块数量和面积变化的影响程度基本相同;②自然因素主要通过新增、消失、扩张 3 个变化途径影响斑块数量的变化,通过新增和扩张两个途径影响面积变化;③围垦对斑块数量和面积变化的途径较为单一,主要是斑块消失;④养殖塘和盐田建设主要通过斑块消失、碎化两个途径影响斑块数量变化,通过碎化、消失和萎缩 3 个途径影响面积变化;⑤工程建设造成斑块数量和面积变化的途径基本相同;⑥人工造林主要通过新增斑块一个途径影响斑块数量变化,通过新增斑块和斑块扩张两个途径影响面积变化。

### 5 讨论与结论

(1)1960/1976—2010 年近 50 年间,广西红树林面积由 9062.5 hm<sup>2</sup>减少至 7 054.3 hm<sup>2</sup>,减少了 22.16%,年均减少率达 0.53%,斑块数量由 1 020 个增加至 1 712 个,增加了 67.8%。在 1960/1976—2010 年 4 个监测期中,红树林面积先呈长期大幅度减少后小幅度回升的趋势;斑块数量经长期小幅度减少后,呈大幅度增加的趋势。斑块破碎化程度明显,表现为斑块平均面积大幅度变小,大斑块数量减少。1960/1976—2010 年研究区红树林空间分布变化的另一个特点是随着时间、空间的不同,面积变化情况(增加或减少)、变化速率均有所不同,与研究区内不同的历史时期、不同的区域和海湾,人为活动干扰对红树林的影响程度不同密切相关。

(2) 1960/1976—2010 年红树林面积减少主要通过斑块消失(46.1%)、碎化(40.4%)和萎缩(13.5%) 3 个途径发生,斑块数量增加主要通过新增(70.0%)、碎化(29.9%)两个途径发生。碎化、消失、新增是斑块数量变化的主要途径;扩张、萎缩、碎化、消失和新增 5 个途径上面积变化量都较大,且各个途径间变化量的差异较小,说明红树林面积的变化途径具有多样性和均匀性。不同监测期,同一途径上发生的斑块数量和面积变化量相差较大;同一监测期,不同途径上发生的斑块数量变化量相差较大,而面积变化量相差较小。若监测期内斑块数量减少,斑块消失、扩张是主要变化途径,反之,新增和碎化是监测期内斑块数量增加的主要途径。

(3) 养殖塘和盐田建设(80.0%)、工程建设(10.9%)和围垦(9.15%)是 1960/1976—2010 年红树林面积净减少的驱动因素;自然过程(92.6%)、人工造林(7.4%)是该期间斑块数量净增加的驱动因子。不同的监测期,养殖塘和盐田建设、工程建设及围垦都是红树林面积减少的主要驱动因子,但各个因子在不同监测期的影响程度有较大差别,反映了研究区在不同的历史时期各种人为活动对红树林干扰的程度不同。各个驱动因子在不同监测期对斑块数量变化的影响较为复杂,主要表现为其影响程度相差较大。

(4) 自然过程主要通过新增斑块和斑块消失两个变化途径影响斑块数量的变化,通过新增和扩张两个途径影响面积变化;围垦通过斑块消失影响斑块数量和面积的变化;养殖塘和盐田建设主要通过斑块消失、碎化两个途径影响斑块数量变化,通过碎化、消失和萎缩 3 个途径影响面积变化;工程建设主要通过斑块消失、萎缩和碎化造成斑块数量和面积变化;人工造林主要通过新增斑块一个途径影响斑块数量变化,通过新增斑块和斑块扩张两个途径影响面积变化。

(5) 1960/1976 年 1020 个斑块中,至 2010 年时仍保持稳定的只有 24 个,仅占 2.4%,期间消失的斑块多达 452 个,新增了 852 个,说明在长期的演变过程中,红树林斑块处于大量增加、大量减少的剧烈变动过程。另一方面,仅研究红树林面积的净变化不足以全面阐述监测期内红树林变化的真正过程,必须对监测期内斑块数量和面积在不同因子驱动下通过不同途径发生的变化情况(包括增加、减少)进行全面深入的研究。

(6) 在自然状态下(无明显的人为活动干扰下),红树林斑块数量和面积也会发生变化,并且还发生斑块碎化的变化—这种变化难以解释,因此,不但需研究人为活动干扰对红树林变化的影响,也应研究红树林在自然过程作用下的变化,才能全面、深入阐明红树林空间分布变化的机制。自然过程包括温度、降雨量、盐度、洪水的频率、沉积过程、土壤化学等环境物理化学因素和繁殖体的散布、演替阶段、繁殖体和种类的竞争等生物因素<sup>[26]</sup>,及病虫害、雷击等,对红树林空间分布演变的影响更为复杂,有待深入研究。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). The world's mangroves 1980—2005 // FAO Forestry Paper 153. Rome: FAO, 2007.
- [ 2 ] FAO, UNEP. Tropical Forest Resources Assessment Project; forest resources of tropical Asia. Rome: FAO, 1981.
- [ 3 ] Saenger P, Hegerl E J, Davie J D S. Global status of mangrove ecosystems. Commission on Ecology Papers No. 3. Gland, Switzerland, World Conservation Union (IUCN), 1983.
- [ 4 ] Groombridge B. Global biodiversity: status of the earth's living resources // UNEPWCMC/The National History Museum/IUCN/Worldwide Fund for Nature/World Resources Institute. London: Chapman and Hall, 1992.
- [ 5 ] Aksornkoae S, Paphavasit N, Wattayakorn G. Mangroves of Thailand; Present status of conservation use and management. Technical Report of the Project; The Economic and Environmental Values of Mangroves Forests and Their Present State of Conservation in the South-East Asia/Pacific Region, Clough, B.F. (Ed.), PD 71/89 1(F), 1993: 83-134.
- [ 6 ] FAO. Mangrove forest management guidelines. FAO Forestry Paper 117. Rome: FAO, 1994.
- [ 7 ] Spalding M, Kainuma M, Collins L. World Atlas of Mangroves. Earthscan, London, 2010.
- [ 8 ] Aizpuru M, Achard F, Blasco F. Global assessment of cover change of the mangrove forests using satellite imagery at medium to high resolution. In *EEC research project n 15017-1999-05 FIED ISP FR*, Joint Research Center, Ispra, 2000.
- [ 9 ] Giri C, Ochieng E, Tieszen L L, Zhu Z, Singh A, Loveland T, Masek J, Duke N. Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. *Global Ecology Biogeography*, 2010, 20(1): 154-159.
- [ 10 ] Silapong C, Blasco F. The application of geographic information systems to mangrove forest management; Khlung, Thailand. *Asia Pacific Remote*

- Sensing Journal, 1992, 5(1): 97-104.
- [ 11 ] Ramsey E W III, Jansen J R. Remote sensing of mangrove wetlands: relating canopy spectra to site-specific data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1996, 62(8): 939-948.
- [ 12 ] Blasco F, Aizpuru M, Gers C. Depletion of the mangroves of Continental Asia. *Wetlands Ecology and Management*, 2001, 9(3): 245-256.
- [ 13 ] Selvam V, Ravichandran K K, Gnanappazham L, Navamuniyammal M. Assessment of community based restoration of Pichavaram mangrove wetland using remote sensing data. *Current Science*, 2003, 85: 794-798.
- [ 14 ] Ramasubramanian R, Gnanappazham L, Ravishankar T, Navamuniyammal M. Mangroves of godavari-analysis through remote sensing approach. *Wetlands Ecology and Management*, 2006, 14(1): 29-37.
- [ 15 ] Blasco F, Gauquelin T, Rasolofoharino M, Denis J, Aizpuru M, Caldairou V. Recent advances in mangrove studies using remote sensing data. *Marine and Freshwater Research*, 1998, 49(4): 287-296.
- [ 16 ] Boer W F. The rise and fall of the mangrove forests in Maputo Bay, Mozambique. *Wetlands Ecology and Management*, 2002, 10(4): 313-322.
- [ 17 ] Verheyden A, Dahdouh-Guebas F, Thomaes K, de Genst W, Hettiarachchi S, Koedam N. High-resolution vegetation data for mangrove research as obtained from aerial photography. *Environment, Development and Sustainability*, 2002, 4(2): 113-133.
- [ 18 ] Mitchell A L, Lucas R M, Donnelly B E, Pfitzner K, Milne A K, Finlayson M. A new map of mangroves for Kakadu National Park, Northern Australia, based on stereo aerial photography. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2007, 17(5): 446-467.
- [ 19 ] 张乔民, 隋淑珍. 中国红树林湿地资源及其保护. *自然资源学报*, 2001, 16(1): 28-36.
- [ 20 ] 李天宏, 赵智杰, 韩鹏. 深圳河口红树林变化的多时相遥感分析. *遥感学报*, 2002, 6(5): 364-369.
- [ 21 ] 陈凌云, 胡伯宁, 钟仕全, 梁文 石剑龙. 应用遥感信息分析广西红树林动态变化特征. *广西科学*, 2005, 12(4): 308-311.
- [ 22 ] 刘凯, 黎夏, 王树功, 钟凯文, 钱峻屏. 珠江口近 20 年红树林湿地的遥感动态监测. *热带地理*, 2005, 25(2): 111-116.
- [ 23 ] 黎夏, 刘凯, 王树功. 珠江口红树林湿地演变的遥感分析. *地理学报*, 2006, 61(1): 26-34.
- [ 24 ] 王树功, 黎夏, 周永章, 刘凯, 陈桂珠. 珠江口淇澳岛红树林湿地变化及调控对策研究. *湿地科学*, 2005, 3(1): 13-20.
- [ 25 ] 林巧莺, 林广发, 陈志鸿, 杨陈照, 游丽平. 1993-2003 年厦门市湿地动态变化及其驱动因素分析. *湿地科学*, 2006, 4(4): 298-303.
- [ 26 ] 王胤, 左平, 黄仲琪, 邹欣庆. 海南东寨港红树林湿地面积变化及其驱动力分析. *四川环境*, 2006, 25(3): 44-49.
- [ 27 ] 张怀清, 赵峰, 崔丽娟. 红树林湿地恢复遥感动态监测技术研究. *林业科学研究*, 2008, 21(增刊): 32-36.
- [ 28 ] 辛琨, 黄星. 海南东寨港红树林景观变化与原因分析. *湿地科学与管理*, 2009, 5(2): 56-57.
- [ 29 ] 曹林, 韩维栋, 李凤凤, 张裕娇. 雷州湾红树湿地景观格局演变及驱动力分析. *林业科技开发*, 2010, 24(4): 18-23.
- [ 30 ] 国家林业局. 中国林业统计年鉴. 北京: 中国林业出版社, 2003.
- [ 31 ] 李春干. 红树林遥感信息提取与空间演变机理研究. 北京: 科学出版社, 2013.
- [ 32 ] 李春干, 刘素青, 范航清, 代华兵. 基于斑块的红树林空间演变机理分析方法. *生态学报*, 2012, 32(14): 4329-4342.
- [ 33 ] Puyravaud J P. Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management*, 2003, 177(1/3): 593-596.
- [ 34 ] Giri C, Zhu Z, Tieszen L L, Singh A, Gillette S, Kelmelis J A. Mangrove forest distributions and dynamics (1975-2005) of the tsunami-affected region of Asia. *Journal of Biogeography*, 2008, 35(3): 519-528.
- [ 35 ] Huang C, Davis L S, Townshend J R G. An assessment of support vector machines for land cover classification. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(4): 725-749.
- [ 36 ] 李树华, 黎广钊. 中国海湾志·第十二分册(广西海湾). 北京: 海洋出版社, 1993.
- [ 37 ] 欧柏清. 广西钦州地区沿海滩涂开发利用概况和建议. *广西水利水电*, 1991, (2): 23-26.
- [ 38 ] 钟志坚, 钟强. 广西海水养殖业可持续发展思考. *南方水产*, 2005, 1(3): 73-76.