

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 14 期 Vol.32 No.14 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 14 期

2012 年 7 月 (半月刊)

目 次

海滨沙地砂引草对沙埋的生长和生理适应对策.....	王 进,周瑞莲,赵哈林,等 (4291)
外源 K ⁺ 和水杨酸在缓解融雪剂对油松幼苗生长抑制中的效应与机理 ...	张 营,李法云,严 霞,等 (4300)
钱塘江中游流域不同空间尺度环境因子对底栖动物群落的影响.....	张 勇,刘朔孺,于海燕,等 (4309)
贡嘎山东坡非飞行小型兽类物种多样性的垂直分布格局.....	吴永杰,杨奇森,夏 霖,等 (4318)
基于斑块的红树林空间演变机理分析方法.....	李春干,刘素青,范航清,等 (4329)
亚热带六种天然林树种细根养分异质性.....	熊德成,黄锦学,杨智杰,等 (4343)
浙江省植被 NDVI 动态及其对气候的响应	何 月,樊高峰,张小伟,等 (4352)
亚热带 6 种天然林树种细根呼吸异质性.....	郑金兴,熊德成,黄锦学,等 (4363)
亚高山/高山森林土壤有机层氨氧化细菌和氨氧化古菌丰度特征	王 奥,吴福忠,何振华,等 (4371)
耕作方式对紫色水稻土轻组有机碳的影响.....	张军科,江长胜,郝庆菊,等 (4379)
火烧对长期封育草地土壤碳固持效应的影响.....	何念鹏,韩兴国,于贵瑞,等 (4388)
闽江河口潮汐湿地二氧化碳和甲烷排放化学计量比.....	王维奇,曾从盛,仝 川,等 (4396)
2010 年夏季珠江口海域颗粒有机碳的分布特征及其来源	刘庆霞,黄小平,张 霞,等 (4403)
新疆冷泉沉积物葡萄糖利用细菌群落多样性的稳定同位素标记分析.....	楚 敏,王 芸,曾 军,等 (4413)
土壤微生物群落多样性解析法:从培养到非培养.....	刘国华,叶正芳,吴为中 (4421)
伊洛河河岸带生态系统草本植物功能群划分	郭屹立,卢训令,丁圣彦 (4434)
濒危植物蒙古扁桃不同地理种群遗传多样性的 ISSR 分析	张 杰,王 佳,李浩宇,等 (4443)
强潮区较高纬度移植红树植物秋茄的生理生态特性.....	郑春芳,仇建标,刘伟成,等 (4453)
冬季高温对白三叶越冬和适应春季“倒春寒”的影响	周瑞莲,赵 梅,王 进,等 (4462)
中亚热带细柄阿丁枫和米槠群落细根的生产和死亡动态.....	黄锦学,凌 华,杨智杰,等 (4472)
欧美杨水分利用效率相关基因 <i>PdEPF1</i> 的克隆及表达	郭 鹏,金 华,尹伟伦,等 (4481)
再力花地下部水浸提液对几种水生植物幼苗的化感作用.....	缪丽华,王 媛,高 岩,等 (4488)
无致病力青枯雷尔氏菌对烟草根系土壤微生物脂肪酸生态学特性的影响.....	郑雪芳,刘 波,蓝江林,等 (4496)
基于更新和同化策略相结合的遥感信息与水稻生长模型耦合技术的研究.....	王 航,朱 艳,马孟莉,等 (4505)
温度和体重对克氏双锯鱼仔鱼代谢率的影响.....	叶 乐,杨圣云,刘 敏,等 (4516)
夏季西南印度洋叶绿素 a 分布特征.....	洪丽莎,王春生,周亚东,等 (4525)
大沽排污河生态修复河道水质综合评价及生物毒性影响.....	王 敏,唐景春,朱文英,等 (4535)
李肖叶甲成虫数量及三维空间格局动态.....	汪文俊,林雪飞,邹运鼎,等 (4544)
专论与综述	
基于景观格局的城市热岛研究进展	陈爱莲,孙然好,陈利顶 (4553)
沉积物质量评价“三元法”及其在近海中的应用	吴 斌,宋金明,李学刚,等 (4566)
问题讨论	
中国餐厨垃圾处理的现状、问题和对策	胡新军,张 敏,余俊锋,等 (4575)
研究简报	
稻秸蓝藻混合厌氧发酵沼液及其化学物质对尖孢镰刀菌西瓜专化型生长的影响.....	刘爱民,徐双锁,蔡 欣,等 (4585)
佛山市农田生态系统的生态损益.....	叶延琼,章家恩,秦 钟,等 (4593)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 314 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 33 * 2012-07



封面图说: 噶龙山南坡的高山湖泊——喜马拉雅山南坡的噶龙山光照强烈、雨量充沛,尽管是海拔 4500 多米的高寒地区,山上的草甸依然泛着诱人的翠绿色,冰川和雪山的融水汇集在山梁的低洼处形成了一个又一个的高山湖泊,由于基底的差别和水深的不同,使得纯净清澈的冰雪融水在湖里呈现出不同的颜色,湖面或兰或绿,颜色或深或浅,犹如一块块通透透明的翡翠镶嵌在绿色的绒布之中。兰天下面,白云落在山间,通往墨脱的公路像丝带一样随随便便地缠绕着,一幅美丽的自然生态画卷就这样呈现在你的面前。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201106240935

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.

Li C G, Liu S Q, Fan H Q, Dai H B. A patch-based method for mechanism analysis on spatial dynamics of mangrove distribution. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(14): 4329-4342.

基于斑块的红树林空间演变机理分析方法

李春干^{1,*}, 刘素青², 范航清³, 代华兵¹

(1. 广西林业勘测设计院, 南宁 530011; 2. 广东海洋大学农学院, 湛江 524088;

3. 广西红树林研究中心 北海 453600)

摘要: 现有红树林空间动态分析多是从整体的角度分析其面积的变化情况及其影响因素, 着重于面积变化的定量分析和影响因素的定性分析, 对其变化的发生途径缺乏深入分析, 也不研究其斑块数量的变化动态。由于一定区域范围内的红树林由成百上千甚至更多空间上相互分离的斑块组成, 各斑块边界和面积变化动态构成了区域红树林整体的空间分布变化动态, 因此, 只有深入摸清各个斑块的变化情况及其影响因素, 才能对区域红树林整体变化情况作出全面、详细和准确的分析评估。提出了基于斑块的红树林空间演变机理分析方法, 首先通过两期高空间分辨率遥感图像提取红树林空间分布信息, 在 GIS 支持下采用叠置分析方法, 根据前、后两期各个斑块的空间位置、形状和面积变化情况以及图像表征, 逐一分析确定每个斑块变化的主要驱动因子(即变化原因, 包括自然过程、围垦、养殖塘和盐田建设、工程建设和人工造林 5 种)和变化途径(即变化类型, 包括稳定、扩张、萎缩、碎化、消失和新增 6 种), 在此基础上构建斑块数量和面积变化的驱动因子-变化途径状态矩阵, 通过总驱动量、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系列指标定量地评估红树林斑块数量和面积的变化动态。该方法不但能够定量地表达了各个驱动因子对红树林斑块数量和面积变化的影响程度, 而且能够准确地阐明了红树林斑块数量和面积发生变化的途径, 并且还能够准确地反映了每个驱动因子通过何种途径影响斑块数量和面积的变化, 实现了红树林空间动态变化分析的定位化、定量化和精确化。

关键词: 红树林; 空间分布; 动态; 机理; 分析; 方法

A patch-based method for mechanism analysis on spatial dynamics of mangrove distribution

LI Chungan^{1,*}, LIU Suqing², FAN Huangqing³, DAI Huabing¹

1 Guangxi Forest Inventory and Planning Institute Nanning 530011, China

2 Agriculture College of Guangdong Ocean University Zhanjiang 524088, China

3 Guangxi Mangrove Research Center, Beihai 453600, China

Abstract: The traditional analysis methods of mangrove spatial dynamic are generally top-down approaches that only summarize the overall dynamic trends and their underlining mechanism. Those methods can help reveal how much area of mangrove has been lost or gained and what possible drivers are but don't deal with the change procedures and the patch number dynamic. The fact is that a contiguous region of mangrove can be composed with hundreds or thousands of interconnected patches and its overall dynamics is a summation of changes in those individual patches. Therefore, it is important to study patch dynamics, including changes in patch boundary and area, in order to accurately understand and assess mangrove's overall dynamic processes and mechanisms at a landscape scale. In this paper we introduce a patch-based method for analyzing and monitoring temporal changes in spatial distribution of mangrove. We used two-time, high-

基金项目: 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; 国家自然科学基金资助项目(41166001)

收稿日期: 2011-06-24; **修订日期:** 2011-11-18

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

resolution remote sensing imagery to quantify spatial distributions of mangrove and their changes over time. We used geographic information systems (GIS) to obtain patch-level spatial properties, including spatial position, shape, and area, at each time when the remote sensing data were acquired. We then compare patch-level mangrove between the two times to group mangrove patches into six categories: stable, expanded, shrank, fragmented, disappeared, and new patches. These six categories reflect the dynamic procedures for mangrove. Following similar remote sensing data interpretation, we identified five causes or drivers of mangrove dynamics, include nature process, innning, marineculture and saltern, construction, and plantation. We assigned each mangrove patch into one of the six dynamic procedures and one of the five drivers. By summing up mangrove patches of the same categories, we built a driver-procedure matrix for patch-numbrer and area, respectively. Thus we were able to calculate a series of indices, including the gross driving amount, gross driving rate, net driving amount, net driving rate, predicted driving rate, gross flowing amount, gross flowing rate, net flowing amount, net flowing rate, predicted flowing rate, and acting force, to assess mangrove patch dynamics in patch number and area. This analysis method is helpful to explicitly reveal changes in mangrove patches, in patch number or area, and what drivers trigger the changes and how the changes take place. The information obtained through such analysis provides important clues about the mechanisms involved in the changes in the mangrove landscape. This method means a site-specific, quantified, and precise analysis on mangrove's spatial distributions and has scientific values for the protection and restoration of mangrove.

Key Words: mangrove; distribution; dynamic; mechanism; analysis; methodology

红树林是分布于热带和亚热带地区受庇护的入海口、河岸、泻湖的海岸森林^[1],一般分布于 30°N—30°S 海洋和陆地之间的潮间带^[2]。红树林生态系统具有重要的社会经济和环境生态功能,包括诸多木质和非木质林产品,消减风、浪、洋流对海岸的侵蚀,维护海洋生物多样性,减少沉积以保护珊瑚礁、海草床和航道等,为大量鱼类和甲壳类动物提供栖息地、产卵场^[1]。

2005 年全球红树林面积为 1523.1 万 hm^2 ,分布于 124 个国家和地区。1980—2005 年间,全球红树林面积减少了 19%,亚洲减少了 25%^[1],主要原因是人口增长压力造成的传统利用者过度开发、木材采伐等商业利用、滩涂用途转换(盐田、农业、水产业、港口、码头等)、污染、自然灾害和管理失败^[3]。

在全球尺度上,很多组织、机构和学者对全世界红树林数量及其分布进行了估计^[1,4-10],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。也有一些研究采用统一的遥感方法进行,但由于采用的遥感数据空间分辨率过低(1 km 或更低),难以取得详细的红树林空间分布和毁林情况数据。Giri 等于 2010 年通过解译约 1000 景空间分辨率为 30 m 的 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,其方法是首先将红树林可能分布的区域裁剪出来,然后采用监督分类方法分离水体,最后采用 ISODATA 方法进行分类^[2]。Giri 等还采用多期 Landsat 数据对 2004 年 11 月印度洋海啸影响地区的红树林分布进行了动态监测,结果表明:1975—2005 年间红树林减少了 12%,其原因是农业扩张(81%)、水产养殖(12%)和城市发展(2%),但减少速率和原因在空间和时间上有所不同^[11]。很多地方尺度的红树林动态监测采用中分辨率遥感数据,如 Landsat, SPOT 和印度卫星 (IRS LISS III) 等^[12-16]。Krause 等利用 TM、ETM+、ASTER 和彩色航空像片(航高为 300 m)对亚玛逊河河口南部 Braganca 半岛的红树林时空变化及邻近农村经济社会的作用区域、红树林结构类型、土地利用变化等进行了分析^[17]。Vadlapudi 利用印度卫星 1:50000 图像对印度 I Polavaram mandal 地区的土地利用通过目视解译方法进行了研究,结果表明在 1994—1995 年,农业发展毁坏了 22.69 hm^2 红树林^[16]。在多云地区,光学数据和雷达数据结合的效果十分良好^[18-19]。实际上,地方尺度红树林监测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^[20-22],如 Fromard 等采用 1:25 000—1:30 000 的航空图像和空间分辨率为 20 m 的 SPOT3、4 卫星遥感数据,结合地面

调查,以研究海岸变化及其对红树林侵蚀和扩张影响为目的,对法属圭亚娜 Sinnamary 河口进行了长达 50a (1951—1999 年)的动态监测,结果表明,受海岸变化影响,红树林经历了净增长时期、减少时期和增长时期^[23]。美国环境保护部(DEP)和佛罗里达海洋研究所(FMRI)利用航空像片和卫星图像评估 20 世纪 40 年代、50 年代和 80 年代红树林的变化,认为红树林面积减少的主要原因是人为活动影响,过去 100a 间,佛罗里达西南海岸 Tampa 海湾的海洋湿地减少了 40%^[24]。

无论是全球尺度,还是区域尺度和地方尺度,现有研究多是从整体的角度分析红树林面积变化动态及其影响因素,所得结论为整体面积的减少(或增加)量是多少、影响因素是什么等,未从斑块的尺度对其边界和面积的变化情况及其影响因素进行深入细致的分析,难以对面积变化的途径和原因做出准确的、定量的阐述,也未对斑块数量的变化情况进行分析研究。一定区域范围内的红树林由成百上千甚至更多空间上相互分离的斑块组成,各斑块的边界和面积变化动态构成了区域红树林整体空间分布的变化动态,只有深入摸清各斑块的变化情况及其产生的原因,才能全面地、详细地和准确地描述区域红树林整体变化动态及评估其影响因素。为此,在研究广西北部湾 1960—2010 年红树林空间分布动态变化过程中,采用遥感和 GIS 相结合的方法,通过逐一斑块检测其边界变化情况,分析斑块数量和面积变化情况及其影响因素(驱动因子),在此基础上提出了基于斑块的红树林空间演变机理分析方法体系,该方法体系不但能够定量地表达了各个驱动因子对红树林斑块数量和面积变化的影响程度,而且能够准确地反映了红树林斑块数量和面积发生变化的途径,并且还能够准确地阐述了各个驱动因子通过何种途径影响斑块数量和面积的变化,实现了红树林空间动态分析的定位化、定量化和精确化。

1 红树林空间分布变化途径及其驱动因子的确定

1.1 红树林斑块及其变化途径分析

为全面阐述和深入分析红树林空间分布的动态变化情况,对红树林斑块、空间分布变化类型作如下定义。

红树林斑块:指覆盖度 $\geq 30\%$,地域空间上相连(隔断 ≤ 10 m,并且红树林个体或群体间存在物质和能量交换)的红树林片林,或带宽 ≥ 4 m 的红树林带,斑块面积 ≥ 0.1 hm^2 。面积 < 0.1 hm^2 的红树林斑块忽略不计。

受自然和人为因素的影响,红树林斑块在长期的演变过程中,边界位置和形状都会发生变化,并导致面积发生变化。根据监测期间斑块的空间位置、形状和面积变化情况,定义斑块的变化类型。

(1) 稳定斑块

指在监测期内,边界的空间位置和整体形状保持基本不变,并且满足以下条件的斑块:

1) 若期初斑块面积 < 5 hm^2 ,期末和期初的面积相差 $\pm \leq 10\%$,见图 1。

2) 若期初斑块面积 ≥ 5 hm^2 ,期末和期初的面积相差 $\pm \leq 5\%$ 。

(2) 扩张斑块

指在监测期内,边界局部或整体扩张,期初面积 < 5 hm^2 时面积增加 $\geq 10\%$ 的斑块,或期初面积 ≥ 5 hm^2 时面积增加 $\geq 5\%$ 的斑块,见图 1。斑块扩张一般不造成斑数量变化,但在某些特殊情况下,存在着两个或多个斑块扩张后变为一个斑块的情况。

(3) 萎缩斑块

指在监测期内,边界局部或全部萎缩,期初面积 < 5 hm^2 时面积减少 $\geq 10\%$ 的斑块,或期初面积 ≥ 5 hm^2 时面积减少 $\geq 5\%$ 的斑块。斑块萎缩一般限于某个单独的斑块,一般不存在斑块数量上的变化,见图 1。

(4) 碎化斑块

指在监测期内,期初一个斑块内部分红树林被破坏(清除),至期末时隔断为 2 个以上(含 2 个)在空间上相互分离(边界的最小距离 ≥ 10 m)斑块的情况,表现为斑块数量增加、总面积减小,见图 1。若隔断导致红树林个体或群体内部物质和能量交换完全或绝大部分停止时,不论其间隔距离是多少,都属斑块碎化。

(5) 消失斑块

指在监测期内,期初存在,但期末已经消失的斑块,见图 1。

(6) 新增斑块

指在监测期内,期初不存在,但期末存在的斑块,即在监测期内新增加的斑块,见图 1。

显然,若监测期内所有红树林斑块的边界都保持稳定,所有红树林斑块均为稳定斑块,则监测期内红树林斑块数量保持不变,面积变化幅度也很小,亦即是在监测期内红树林空间分布保持稳定状态。这种情况只有在研究区域很小、或监测期很短时才会出现,受各种自然和人为因素影响,红树林斑块在空间上肯定呈现扩张、萎缩、碎化、消失和新增等各种变化,其面积也因此出现增加和减少的动态变化过程。

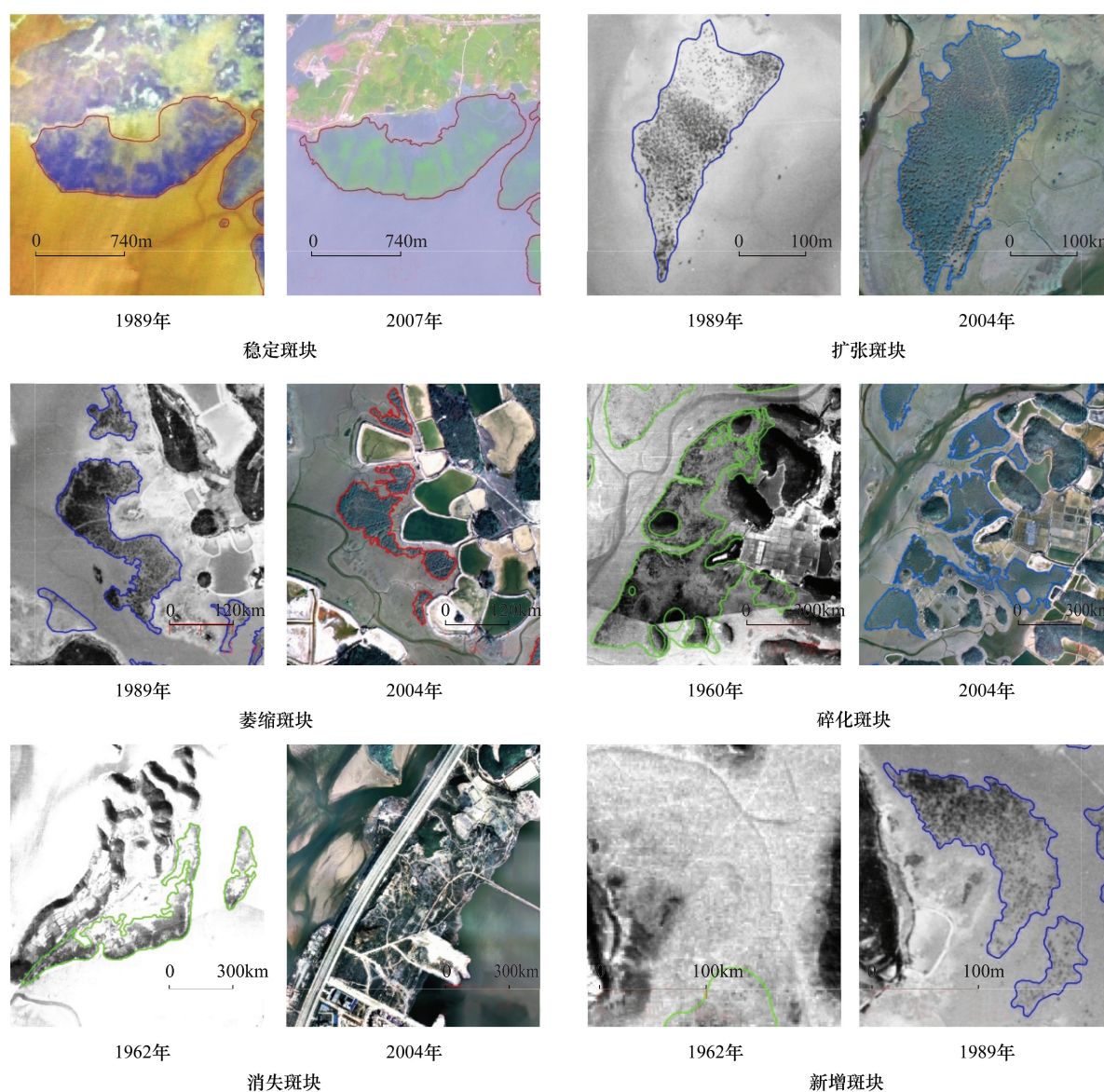


图 1 各种斑块变化类型的表征

Fig. 1 Characteristics of patch-change types

红树林空间分布的变化,是通过不同类型斑块的数量和面积的增加、减少来实现的,如斑块萎缩虽一般不造成斑块数量变化,但会造成面积减少,斑块碎化不但造成斑块数量增加,而且也会造成面积减少,因此,斑块变化类型可视为红树林空间分布的变化途径。

1.2 斑块变化的驱动因子分析

由于不同区域的经济水平、人口密度、沿海居民生产方式和生活方式,以及红树林的经济价值、利用方式等都不尽相同,因此,不同区域中造成红树林空间分布变化的影响因素有所差别。通过考察广西北部湾

红树林空间分布变化情况,总结、归纳影响红树林空间分布变化的直接因素。

(1) 自然过程

指在未受到直接的、明显的、具有破坏性的人为活动干扰影响,红树林斑块在自然状态下或保持稳定状态,或发生变化。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^[40],以及病虫害等。图 1 为自然状态下的斑块扩张。

(2) 养殖塘和盐田建设

指在滩涂上围海筑堤造塘,或在海汊上筑堤造塘,进行虾、蟹、鱼等水产养殖活动,以及在滩涂上筑造盐田制盐。图 1 示养殖塘建设导致的斑块萎缩。

(3) 围垦

指人工围海造田垦荒活动,主要是种植水稻及其它经济作物。

(4) 工程建设

包括港口、码头、公路、铁路、工矿企业和城市建设等活动。图 1 显示了工程建设(城市发展)导致的斑块消失。

(5) 人工造林

包括在裸滩上的人工造林和在红树林斑块内、斑块之间的裸地、红树林稀疏地的人工补植,如图 1 所示。

导致红树林斑块变化的影响因素亦称驱动因素或驱动因子。

1.3 主要驱动因子和变化途径的确定

在长期的演变过程中,某些情况下导致红树林斑块变化的原因是十分复杂的,表现为:1) 一个斑块在监测期内可能受到两个以上的因素影响而产生不同的变化,尤其见于面积较大或长度较长的斑块,如斑块的一端受到码头建设影响而萎缩,另一端受到养殖塘破坏而碎化;2) 两个以上不同因素对一个斑块施加作用,并产生相同的影响,如一个斑块同时受到人工造林和自然过程影响,出现扩张的现象;3) 一个因素在不同的位置对一个斑块施加多重影响,导致斑块出现不同类型的变化,如斑块的一端受到工程建设影响而萎缩,另一端受到工程建设(如道路等线状工程等)而碎化。各种驱动因子对斑块变化可能造成的影响如表 1 所示。

表 1 各个驱动因子对斑块变化可能造成的影响

Table 1 Possible changes of mangrove patch caused by various drivers

驱动因子 Driver	稳定 Stable	扩张 Expand	萎缩 Atrophy	碎化 Fragmentation	消失 Disappear	新增 New
自然过程 Nature process	√	√	√	√	√	√
围垦 Inning			√	√	√	
养殖塘和盐田 Marineculture and saltern			√	√	√	
工程建设 Construction			√	√	√	
人工造林 Plantation		√				√

在亚热带地区,如广西北部湾区域,红树林斑块破碎,小斑块比重大,虽然不乏一些斑块特别是大斑块的变化原因和途径较为复杂,但大多数斑块由于空间范围小,变化原因和途径较为单一,故在进行斑块空间演变分析时,每个斑块只考虑一个驱动因子和一个变化途径。当一个斑块同时受多个因子驱动、出现多种变化途径时,从因果关系的角度出发,首先分析确定其主要驱动因子,然后在主要驱动因子造成的多个变化途径中确定主要变化途径。主要驱动因子和主要变化途径的确定,综合考虑如下两个因素:

(1) 斑块恢复的难易程度;

(2) 面积变化的大小。

如某一斑块同时受工程建设和养殖塘建设影响,其中:工程建设导致部分边界萎缩使面积减少了 2.5

hm^2 , 导致部分地段碎化使面积减少了 1.5 hm^2 ; 养殖塘建设造成部分地段边界萎缩, 面积减少了 4.2 hm^2 。由于工程建设为永久性的, 斑块在很长时间内难以恢复, 而养殖塘则经一段时间利用后有可能废弃, 斑块在一定时间内恢复的可能性较大, 故工程建设为主要驱动因子。在工程建设影响导致的两个变化途径中, 边界萎缩导致面积的减少量最大, 故斑块萎缩为斑块变化的主要途径。

2 基于斑块的红树林空间分布变化信息提取

(1) 将两期遥感图像(航空图像或高空间分辨率卫星图像)进行几何精校正、空间和光谱增强。

(2) 对于航空图像, 在 GIS 支持下, 采用目视解译和屏幕矢量化方法, 提取红树林斑块边界。对于高空间分辨率卫星遥感图像(SPOT5、ALOS 等), 采用植被指数、监督分类、无监督分类和面向对象分类相结合的方法, 提取红树林斑块边界。对于通过各种方法尚难以准确确定其边界位置的斑块, 通过实地勘察确认, 并通过访问地方红树林管理部门和当地居民、查阅历史资料的方法, 深入了解红树林的历史分布情况, 修订边界定位结果, 最后得到监测期初、期末红树林空间分布专题图, 如图 1 所示。

(3) 在 GIS 环境中, 采用叠置分析方法, 将两期遥感图像、两期红树林空间分布专题图进行叠合, 逐一斑块进行比对分析, 通过前、后期红树林斑块的空间位置、形状、面积变化情况和图像表征, 确定并记录其主要驱动因子和变化类型。

为摸清斑块的变化规律, 将监测期初和期末的斑块都确定为同一驱动因子和变化类型(变化途径)。如某一斑块在监测期内由于养殖塘建设而被分割为 3 个斑块, 则前期 1 个、后期 3 个斑块均属碎化斑块, 其变化途径(变化类型)均为斑块碎化, 驱动因子(变化原因)均为养殖塘建设。

3 基于斑块的红树林空间动态定量分析方法体系

3.1 斑块数量变化的驱动量和流量计算方法

如前所述, 有 5 个驱动因子(即自然过程、围垦、养殖塘和盐田建设、工程建设、人工造林)通过 6 个途径(即稳定、扩张、萎缩、碎化、消失、新增)影响红树林斑块数量和面积变化。为使分析方法更具普适性, 考虑 d 个驱动因子、 p 个变化途径的情形。

将稳定看作为变化的特例, 则从监测期初(t_1)至期末(t_2)间, 每个斑块都受到了某个因子($i, i = 1, 2, \dots, d$)的驱动、通过某种途径($j, j = 1, 2, \dots, p$)发生了变化。对于整个研究区域, 某一时刻 t ($t = t_1$ 或 $t = t_2$) 在第 i 个因子驱动下第 j 个变化类型(变化途径)的斑块数量为 n_{ij}^t , 面积为 a_{ij}^t , 于是, 得到该时刻全部斑块个数和面积的驱动因子-变化途径状态矩阵 $\mathbf{N}^t$ 和 $\mathbf{A}^t$:

$$\mathbf{N}^t = \begin{pmatrix} n_{11}^t & n_{12}^t & \cdots & n_{1p}^t \\ n_{21}^t & n_{22}^t & \cdots & n_{2p}^t \\ \cdots & \cdots & n_{ij}^t & \cdots \\ n_{d1}^t & n_{d2}^t & \cdots & n_{dp}^t \end{pmatrix} \quad \mathbf{A}^t = \begin{pmatrix} a_{11}^t & a_{12}^t & \cdots & a_{1p}^t \\ a_{21}^t & a_{22}^t & \cdots & a_{2p}^t \\ \cdots & \cdots & a_{ij}^t & \cdots \\ a_{d1}^t & a_{d2}^t & \cdots & a_{dp}^t \end{pmatrix}$$

斑块的碎化、消失和新增, 不但造成斑块数量的变化, 而且也必定导致面积的变化, 虽然斑块稳定、扩张、萎缩不会引起斑块数量发生较大的变化, 但会造成斑块面积较大的变化。总之, 面积变化和斑块数量变化相伴而生。由于文中分析以斑块为基础进行, 斑块数量和面积动态机理的分析方法相同, 为简化分析方法表达, 故用 x_{ij}^t 代替 n_{ij}^t 和 a_{ij}^t , 当分析对象为斑块数量时, 有 $x_{ij}^t = n_{ij}^t$, 当分析对象为面积时, 有 $x_{ij}^t = a_{ij}^t$ 。

该时刻监测区域的斑块总个数(总面积) X_t 为:

$$X_t = \sum_{i=1}^d \sum_{j=1}^p x_{ij}^t = \mathbf{W}_d \mathbf{X}^t \mathbf{w}_p \quad (1)$$

式中: $\mathbf{W}_d = (1, 1, \dots, 1)_{d \times 1}$ 为 d 个驱动因子的乘积因子, $\mathbf{w}_p = (1, 1, \dots, 1)_{1 \times p}^T$ 为 p 种变化途径的乘积因子。

由 t_1 至 t_2 年, 监测区域的斑块数量(面积)发生了变化, 不同驱动因子通过不同变化途径的影响而引起的斑块数量(面积)变化的状态矩阵 $\Delta \mathbf{X}$ 为:

$$\Delta \mathbf{X} = \mathbf{X}^{t_2} - \mathbf{X}^{t_1} = \begin{pmatrix} x_{11}^{t_2} - x_{11}^{t_1} & x_{12}^{t_2} - x_{12}^{t_1} & \cdots & x_{1p}^{t_2} - x_{1p}^{t_1} \\ x_{21}^{t_2} - x_{21}^{t_1} & x_{22}^{t_2} - x_{22}^{t_1} & \cdots & x_{2p}^{t_2} - x_{2p}^{t_1} \\ \cdots & \cdots & x_{ij}^{t_2} - x_{ij}^{t_1} & \cdots \\ x_{d1}^{t_2} - x_{d1}^{t_1} & x_{d2}^{t_2} - x_{d2}^{t_1} & \cdots & x_{dp}^{t_2} - x_{dp}^{t_1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta x_{11} & \Delta x_{12} & \cdots & \Delta x_{1p} \\ \Delta x_{21} & \Delta x_{22} & \cdots & \Delta x_{2p} \\ \cdots & \cdots & \Delta x_{ij} & \cdots \\ \Delta x_{d1} & \Delta x_{d2} & \cdots & \Delta x_{dp} \end{pmatrix} = (\Delta x_{ij})_{d \times p} \quad (2)$$

并且有监测期内斑块数量(面积)的净总变化量 ΔX_{net} :

$$\Delta X_{net} = \sum_{i=1}^d \sum_{j=1}^p \Delta x_{ij} = \mathbf{W}_d \Delta \mathbf{X} \mathbf{w}_p \quad (3)$$

若 $\Delta X_{net} > 0$, 监测期内斑块数量(面积)净增加, 反之减少。

当监测区域不很小、监测间隔期不很短时, 受各种因素影响, 红树林整体空间分布肯定会发生变化。由于斑块数量一方面通过新增、碎化等途径而增加, 另一方面通过消失、扩张等途径而减少; 面积一方面通过扩张、新增而增加, 另一方面通过碎化、萎缩和消失而减少, 即 Δx_{ij} 或为正数, 或为负数, 当 $\Delta X_{net} = 0$ 时, 仅意味着监测期内增加的斑块个数(面积)等于减少的斑块个数(面积), 前、后期斑块数量(面积)不变, 而不表示监测期内斑块数量(面积)没有发生变化, 故仅通过 ΔX_{net} 并不能全面反映监测期内斑块数量(面积)变化的真实情况, 必须深入分析监测期内斑块数量(面积)增加、减少的情况, 为此, 定义监测期内斑块数量(面积)毛总变化量 ΔX_{gro} 为:

$$\Delta X_{gro} = \mathbf{W}_d \text{abs}(\Delta \mathbf{X}) \mathbf{w}_p = (1 \quad 1 \quad \cdots \quad 1) \begin{pmatrix} |x_{11}^{t_2} - x_{11}^{t_1}| & |x_{12}^{t_2} - x_{12}^{t_1}| & \cdots & |x_{1p}^{t_2} - x_{1p}^{t_1}| \\ |x_{21}^{t_2} - x_{21}^{t_1}| & |x_{22}^{t_2} - x_{22}^{t_1}| & \cdots & |x_{2p}^{t_2} - x_{2p}^{t_1}| \\ \cdots & \cdots & |x_{ij}^{t_2} - x_{ij}^{t_1}| & \cdots \\ |x_{d1}^{t_2} - x_{d1}^{t_1}| & |x_{d2}^{t_2} - x_{d2}^{t_1}| & \cdots & |x_{dp}^{t_2} - x_{dp}^{t_1}| \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ \cdots \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

且 $\Delta X_{gro} \geq \Delta X_{net}$ 。 ΔX_{gro} 与监测期初斑块数量(面积) (X_{t_1}) 之比反映了监测期内斑块数量(面积)的变化程度, 称斑块数量(面积)总变化率 ΔX_T , 其计算公式为:

$$\Delta X_T = \Delta X_{gro} \times 100 / X_{t_1} \quad (5)$$

显然, ΔX_T 越大, 斑块数量(面积)的变化程度越大。

$\Delta \mathbf{X}$ 中行的绝对值之和是在各个因子驱动下, 斑块数量(面积)的总变化量, 称为斑块数量(面积)总驱动物量, 于是, 有各个驱动因子的斑块数量(面积)总驱动物量 DX_i^{ga} 为:

$$\mathbf{DX}^{ga} = \text{abs}(\Delta \mathbf{X}) \mathbf{w}_p = \begin{pmatrix} |x_{11}^{t_2} - x_{11}^{t_1}| & |x_{12}^{t_2} - x_{12}^{t_1}| & \cdots & |x_{1p}^{t_2} - x_{1p}^{t_1}| \\ |x_{21}^{t_2} - x_{21}^{t_1}| & |x_{22}^{t_2} - x_{22}^{t_1}| & \cdots & |x_{2p}^{t_2} - x_{2p}^{t_1}| \\ \cdots & \cdots & |x_{ij}^{t_2} - x_{ij}^{t_1}| & \cdots \\ |x_{d1}^{t_2} - x_{d1}^{t_1}| & |x_{d2}^{t_2} - x_{d2}^{t_1}| & \cdots & |x_{dp}^{t_2} - x_{dp}^{t_1}| \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ \cdots \\ 1 \end{pmatrix} = (DX_i^{ga})_{d \times 1} \quad (6)$$

DX_i^{ga} 越大, 表明在该因子驱动下, 斑块数量(面积)增加、减少的数量越大, 即该驱动因子导致监测期内斑块数量(面积)变动剧烈。

显然, $\Delta \mathbf{X}$ 中行之和为各个因子驱动下斑块数量(面积)的净变化量, 称为斑块数量(面积)净驱动物量, 于是, 得到各个驱动因子的斑块数量(面积)净驱动物量 DX_i^{na} 为:

$$\mathbf{DX}^{na} = \Delta \mathbf{X} \mathbf{w}_p = \begin{pmatrix} \Delta x_{11} & \Delta x_{12} & \cdots & \Delta x_{1p} \\ \Delta x_{21} & \Delta x_{22} & \cdots & \Delta x_{2p} \\ \cdots & \cdots & \Delta x_{ij} & \cdots \\ \Delta x_{d1} & \Delta x_{d2} & \cdots & \Delta x_{dp} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ \cdots \\ 1 \end{pmatrix} = (DX_i^{na})_{d \times 1} \quad (7)$$

当 $DX_i^{na} > 0$ 时, 说明在第 i 因子驱动下, 斑块数量(面积)增加, 反之减少。

$\Delta \mathbf{X}$ 中列的绝对值之和为监测期内斑块数量(面积)通过各个途径产生的总变化量, 称为斑块数量(面

积)总流量,于是,得到斑块数量(/面积)在各个变化途径上的总流量 FX_j^{ga} 为:

$$\mathbf{FX}^{ga} = \mathbf{W}_d \mathbf{abs}(\Delta \mathbf{X}) = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |x_{11}^{t_2} - x_{11}^{t_1}| & |x_{12}^{t_2} - x_{12}^{t_1}| & \cdots & |x_{1p}^{t_2} - x_{1p}^{t_1}| \\ |x_{21}^{t_2} - x_{21}^{t_1}| & |x_{22}^{t_2} - x_{22}^{t_1}| & \cdots & |x_{2p}^{t_2} - x_{2p}^{t_1}| \\ \cdots & \cdots & |x_{ij}^{t_2} - x_{ij}^{t_1}| & \cdots \\ |x_{d1}^{t_2} - x_{d1}^{t_1}| & |x_{d2}^{t_2} - x_{d2}^{t_1}| & \cdots & |x_{dp}^{t_2} - x_{dp}^{t_1}| \end{pmatrix} = (FX_j^{ga})_{1 \times p} \quad (8)$$

$\sum_{i=1}^d DX_i^{ga} = \sum_{j=1}^p FX_j^{ga} = \Delta X_{gro}$ 。当 FX_j^{ga} 越大,说明通过第 j 个变化途径,斑块数量(/面积)的变化量越大。

$\Delta \mathbf{X}$ 中列之和为斑块数量(/面积)通过各个途径产生的净变化量,称为斑块数量(/面积)净流量,于是,得到斑块数量(/面积)在各个变化途径上的净流量 FX_j^{na} 为:

$$\mathbf{FX}^{na} = \mathbf{W}_d \Delta \mathbf{X} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x_{11} & \Delta x_{12} & \cdots & \Delta x_{1p} \\ \Delta x_{21} & \Delta x_{22} & \cdots & \Delta x_{2p} \\ \cdots & \cdots & \Delta x_{ij} & \cdots \\ \Delta x_{d1} & \Delta x_{d2} & \cdots & \Delta x_{dp} \end{pmatrix} = (FX_j^{na})_{1 \times p} \quad (9)$$

并有 $\sum_{i=1}^d DX_i^{na} = \sum_{j=1}^p FX_j^{na} = \Delta X_{net}$ 。当 $FX_j^{na} > 0$ 时,说明通过第 j 个变化途径,斑块数量(/面积)净增加,反之净减少。

以上从斑块数量(/面积)变化的绝对量的角度考察了不同因子驱动、不同途径下斑块数量(/面积)的变化情况,由于不同监测期期初的斑块数量(/面积)不同,故在分析不同监测期之间各种因子的驱动力、各个变化途径的作用时,斑块数量(/面积)总驱动量、总流量、净驱动量、净流量不具可比性,为此,需要考量上述各个指标的相对量。

与斑块数量(/面积)总驱动量相对应,定义第 i 因子的斑块数量(/面积)总驱动率 $DX_i^{gr}(\%)$ 为:

$$\mathbf{DX}^{gr} = \frac{\mathbf{DX}^{ga}}{\sum_{i=1}^d |\mathbf{DX}_i^{ga}|} 100 = \frac{DX^{ga}}{\mathbf{W}_d \mathbf{abs}(\mathbf{DX}^{ga})} 100 = (DX_i^{gr})_{d \times 1} \quad (10)$$

DX_i^{gr} 越大,则第 i 驱动因子对监测期间斑块数量(/面积)变化的扰动程度越大。

与 DX_i^{na} 相对应,第 i 因子的斑块数量(/面积)净驱动率 $DX_i^{nr}(\%)$ 为:

$$\mathbf{DX}^{nr} = \frac{\mathbf{DX}^{na}}{\sum_{i=1}^d |\mathbf{DX}_i^{na}|} 100 = \frac{\mathbf{DX}^{na}}{\mathbf{W}_d \mathbf{abs}(\mathbf{DX}^{na})} 100 = (DX_i^{nr})_{d \times 1} \quad (11)$$

DX_i^{nr} 越大,则第 i 因子驱动下,斑块数量(/面积)的净变化率越大。

类似地,第 j 途径斑块数量(/面积)的总流率 $FX_j^{gr}(\%)$ 为:

$$\mathbf{FX}^{gr} = \frac{\mathbf{FX}^{ga}}{\sum_{j=1}^p |\mathbf{FX}_j^{ga}|} 100 = \frac{\mathbf{FX}^{ga}}{\mathbf{abs}(\mathbf{FX}^{ga}) \mathbf{w}_p} 100 = (FX_j^{gr})_{1 \times p} \quad (12)$$

第 j 途径斑块数量(/面积)的净流率 $FX_j^{nr}(\%)$ 为:

$$\mathbf{FX}^{nr} = \frac{\mathbf{FX}^{na}}{\sum_{j=1}^p |\mathbf{FX}_j^{na}|} 100 = \frac{\mathbf{FX}^{na}}{\mathbf{abs}(\mathbf{FX}^{na}) \mathbf{w}_p} 100 = (FX_j^{nr})_{1 \times p} \quad (13)$$

FX_j^{nr} 越大,表明通过第 j 途径发生的斑块数量(/面积)变化率越大。并有 $\sum_{i=1}^d |DX_i^{nr}| = \sum_{j=1}^p |FX_j^{nr}| = 100$ 。

总驱动量、总驱动率、净驱动量、净驱动率和总流量、总流率、净流量、净流率分别从总变化量、净变化量的角度定量地描述了各个驱动因子对斑块数量(/面积)变化的影响程度和各个变化途径上斑块数量(/面积)变

化的通过量,并未反映在斑块数量(/面积)总量在净增加或净减少的情况下,何种驱动因子的影响程度最大,也未反映何种途径是斑块数量(/面积)总量净增加或净减少的主要途径。为此,定义驱动因子对斑块数量(/面积)总量变化的趋势驱动率 DX_i^{ar} (%) :

$$DX_i^{ar} = \begin{cases} \frac{DX_i^{na}}{\sum_{i=1}^d DX_i^{na}} 100 & (\Delta X_{net} > 0, DX_i^{na} > 0, \forall i, i = 1, 2, \dots, d) \\ 0 & (\Delta X_{net} = 0, \forall i, i = 1, 2, \dots, d) \\ \frac{DX_i^{na}}{\sum_{i=1}^d DX_i^{na}} 100 & (\Delta X_{net} < 0, DX_i^{na} < 0, \forall i, i = 1, 2, \dots, d) \end{cases} \quad (14)$$

定义第 j 途径对斑块数量(/面积)总量变化的趋势流率 FX_j^{ar} (%) :

$$FX_j^{ar} = \begin{cases} \frac{FX_j^{na}}{\sum_{j=1}^p FX_j^{na}} 100 & (\Delta X_{net} > 0, FX_j^{na} > 0, \forall j, j = 1, 2, \dots, p) \\ 0 & (\Delta X_{net} = 0, \forall j, j = 1, 2, \dots, p) \\ \frac{FX_j^{na}}{\sum_{j=1}^p FX_j^{na}} 100 & (\Delta X_{net} < 0, FX_j^{na} < 0, \forall j, j = 1, 2, \dots, p) \end{cases} \quad (15)$$

为进一步分析不同驱动因子通过不同途径对斑块数量(/面积)变化的影响程度,定义第 i 驱动因子通过第 j 途径对斑块数量变化的作用力 px_{ij} (%) 为:

$$\mathbf{PX} = \frac{100}{\Delta \mathbf{X}_{gro}} \Delta \mathbf{X} = \frac{100}{\Delta X_{gro}} \begin{pmatrix} \Delta x_{11} & \Delta x_{12} & \cdots & \Delta x_{1p} \\ \Delta x_{21} & \Delta x_{22} & \cdots & \Delta x_{2p} \\ \cdots & \cdots & \Delta x_{ij} & \cdots \\ \Delta x_{d1} & \Delta x_{d2} & \cdots & \Delta x_{dp} \end{pmatrix} = (px_{ij})_{d \times p} \quad (16)$$

$\sum_{i=1}^d \sum_{j=1}^p |px_{ij}| = 100$ 。当 $px_{ij} > 0$ 时,表示第 i 驱动因子通过第 j 途径引起斑块数量(/面积)增加,反之导致斑块数量(/面积)减少。 $|px_{ij}|$ 越大,表明第 i 因素通过第 j 途径引起斑块数量(/面积)的变化量越大。

4 案例分析

以 1960 年 1:16000—1:18000 航空图像和 2010 年 ALOS (HRV2.5m+XS10 m) 卫星图像为基础,对西起北仑河口、东至英罗港的广西北部湾(图 2)红树林空间分布进行动态监测,得到表 2 所示的两个年度斑块数量和面积变化的驱动因子-变化途径状态矩阵,作总驱动力、净驱动力、总驱动力、净驱动力、趋势驱动力和总流量、净流量、总流率、净流率、趋势流率以及作用力计算,得到表 3 和表 4。

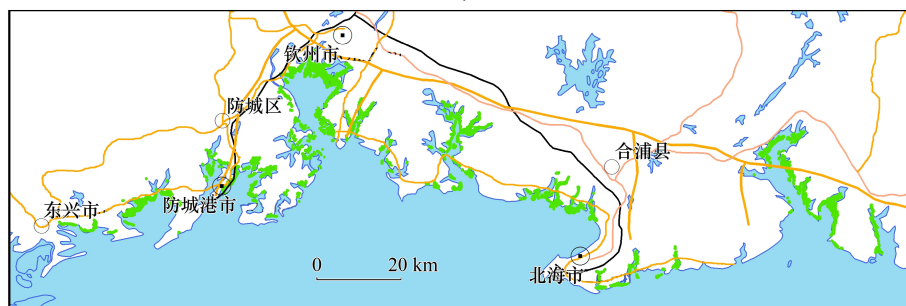


图 2 试验区域及 2010 年红树林空间分布图

Fig. 2 Study site and distribution of mangrove in 2010

表 2 1960 年和 2010 年不同驱动因子通过不同变化途径影响下斑块个数和面积状态矩阵^①

Table 2 Matrix of patch number and area affected by various drivers through various change procedures, 1960 and 2010															
年度 Year	驱动因子 Driver	斑块个数 Patch number/个						面积 Area/hm ²							
		稳定 Stable	扩张 Expand	萎缩 Atrophy	破碎化 Fragmentation	消失 Disappear	新增 New	合计 Total	稳定 Stable	扩张 Expand	萎缩 Atrophy	破碎化 Fragmentation	消失 Disappear	新增 New	合计 Total
1960	自然过程	18	228	72	35	138	10	501	189.5	1088.0	1211.4	1194.3	743.2	7.6	4434.0
	围垦 Inning			2		18		20			253.9		297.3		551.2
	养殖塘和盐田 Marineculture and salttern			109	104	311		524			959.6	2621.1	1003.0		4583.7
	工程建设 Construction			5	6	48		59			76.5	499.5	264.4		840.4
	人工造林 Plantation		5					5		81.4					81.4
2010	合计 Total	18	233	188	145	515	10	1109	189.5	1169.4	2501.4	4314.9	2307.9	7.6	10490.7
	自然过程	17	148	62	111		665	1003	189.7	1758.8	351.4	710.7		1092.9	4103.5
	围垦 Inning			1			1	2			118.1			2.1	120.2
	养殖塘和盐田 Marineculture			104	325	1		430			211.7	1159.3	0.2		1371.2
	工程建设 Construction			5	21			26			33.8	275.5			309.3
	人工造林 Plantation		4				13	17		113.1				68.7	181.8
	合计 Total	17	152	172	457	1	679	1478	189.7	1871.9	715.0	2145.5	0.2	1163.7	6086.0

1ST: Stable; EX: Expand; AT: Atrophy; FR: Fragment; DI: Disappear; NE: New

表 3 1960—2010 年斑块数量和面积变化的驱动量、驱动率和流量、流率^①

Table 3 Driving amount, driving rate and flowing amount, flowing rate of patch number and area, 1960—2010																											
影响因素 Driver		斑块个数 Patch number/个												面积 area/hm ²													
		ST	EX	AT	FR	DI	NE	DN st _i	DN ^{ex} _i	DN ^{at} _i	DN ^{fr} _i	DN ^{di} _i	DN ^{ne} _i	ST	OU	AT	FR	DI	NE	DA st _i	DA ^{ex} _i	DA ^{at} _i	DA ^{fr} _i	DA ^{di} _i	DA ^{ne} _i		
自然过程 Nature process		-1	-80	-10	76	-138	655	960	60.3	502	76.2	97.7	0.2	670.8	-860.0	-483.6	-743.2	1085.3	3843.1	47.3	-330.5	-7.2	-7.3				
围垦 Inning				-1		-18	1	20	1.3	-18	-2.7				-135.8		-297.3	2.1	435.2	5.4	-431.0	-9.4	-9.6				
养殖塘和盐田 Marineculture and salttern				-5	221	-310		536	33.6	-94	-14.3				-747.9	-1461.8	-1002.8		3212.5	39.6	-3212.5	-69.8	-71.3				
工程建设 Construction					15	-48		63	4.0	-33	-5.0				-42.7	-224.0	-264.4		531.1	6.5	-531.1	-11.5	-11.8				
人工造林 Plantation			-1				13	14	0.9	12	1.8	2.3		31.7				68.7	100.4	1.2	100.4	2.2					
FN st _i / FA st _i		1	81	16	312	514	669	1593	100.0				0.2	702.5	1786.4	2169.4	2307.7	1156.1	8122.3	100.0							
FN ^{ex} _i / FA ^{ex} _i		0.1	5.1	1.0	19.6	32.3	42.0	100.0					0.0	8.6	22.0	26.7	28.4	14.2	100.0								
FN ^{at} _i / FA ^{at} _i		-1	-81	-16	312	-514	669			369			0.2	702.5	-1786.4	-2169.4	-2307.7	1156.1									-4404.7
FN ^{fr} _i / FA ^{fr} _i		-0.1	-5.1	-1.0	19.6	-32.3	42.0						0.0	8.6	-22.0	-26.7	-28.4	14.2									
FN ^{di} _i / FA ^{di} _i					31.8		68.2								-28.5	-34.6	-36.8										

2ST: Stable; EX: Expand; AT: Atrophy; FR: Fragment; DI: Disappear; NE: New

相关分析指标: 1) $\Delta N_{\text{net}} = 369$; $\Delta N_{\text{geo}} = 1593$; $\Delta N_r = 143.6\%$; 2) $\Delta A_{\text{net}} = -4404.7$; $\Delta A_{\text{geo}} = 8122.3$; $\Delta A_r = 77.4\%$

1960—2010 年间,斑块数量和面积的总变化率分别为 143.6% 和 77.4%,表明监测期内斑块增加、减少的扰动剧烈。

由表 4 可以看出,导致斑块数量变化的主要原因是自然状态下的斑块新增(41.1%)和消失(-8.7%),养殖塘和盐田建设造成的斑块消失(-19.5%)和碎化(13.9%)。造成面积变化的主要原因是自然状态下的斑块新增(13.4%)、萎缩(-10.6%)、扩张(8.3%)及养殖塘和盐田建设导致的斑块碎化(-18.0%)、消失(-12.3%)和萎缩(-9.2%)。

5 讨论

5.1 影响红树林空间演变的因素

全球红树林减少是公认的事实,众多学者一致认为其原因是人类活动对海岸生态系统造成的巨大压力,主要原因包括水产养殖、农业开发、城市扩张、基础设施建设、采伐木材、采矿等对红树林栖息地的破坏^[1,24-33]。亚洲红树林减少的主要原因是过度开发和虾类养殖的发展,由于经济效益较高,虾类养殖作为当地社区的潜在资源和消灭贫困的手段,推动了国家经济的发展^[1]。污染、人为引起的沉积和水动力改变也会造成红树林面积减少^[32]。病虫害、海岸侵蚀和全球变暖引起的海平面上升也是红树林面积减少的原因之一^[33]。泥沙沉积和温度上升则可能有利于红树林扩张^[21]。有研究表明,除非作为一种可持续资源进行有效管理,否则红树林现有减少速率将持续至 2025 年,自此之后,红树林的命运将取决于多树种造林、基因和林业技术和生态学进展,但最大希望在于人口增长压力的减少^[33]。

很多学者对导致中国红树林减少的原因进行了深入研究,可归纳为:人为砍伐、填海造陆或围海造田、开挖养殖塘和盐田、海岸工程及环境污染^[34-40]。

以上研究表明,在不同的国家和地区,由于经济发展水平不同、人口密度不同、红树林经济价值不同,其遭受破坏的原因有所差别,但人为活动对红树林造成的破坏最大。

在案例研究中,将影响红树林空间分布的影响因素确定为自然过程、围垦、养殖塘和盐田、工程建设和人工造林 5 种,主要是出于如下理由:

(1) 本研究是通过遥感图像对监测期内红树林空间分布进行定量监测,属追溯性监测,并且是基于斑块的监测,因此,在确定影响因素时,必须是能够通过遥感图像解译能够辨识的,而围垦、养殖塘和盐田建设、工程建设对红树林空间分布变化的影响均可通过图像比对能够明确识别。研究区域内人工造林面积少,且株行距均匀、排列整齐,通过实地观察和访问当地红树林主管部门结合图像解译能够准确定位。

(2) 由于经济发展、市场波动和病害等原因,养殖塘和盐田常交替出现。历史以来研究区域为产盐之地,20 世纪 50 年代,仅防城港市区域就先后较大规模建设了企沙、光坡和江平 3 个盐场,其中企沙盐场 7 个制盐工区占地就达 600 多公顷。一些盐田由养殖塘改建而成。20 世纪 80 年代后,海水养殖经济效益看好,一些盐田改作养殖塘饲养对虾、蟹和鱼等。经多年养殖后,一些养殖塘因各种病害频发而遭废弃,改作盐田。由于监测间隔期较长,无法准确判定何时发生变换,故将两者合并为一个影响因素。

(3) 虽然经访问沿海居民和当地相关政府部门,确认研究区域内无大面积连片砍伐红树林的现象,但局部小面积的、零星的砍伐肯定存在,这种现象很难通过图像进行定位、定量的确认,而且这种少量采伐对红树林整体空间分布影响有限,因此,不考虑人为采伐这一在很多研究中认为是很重要的影响红树林空间分布变化的因素。

(4) 2001 年以前,研究区域只有少数几个大型工矿企业,海水污染主要为城市生活污水污染,自此之后,陆续建设了钢铁厂、大型石化基地、大型粮油加工基地和大型港口等,出现了较为严重的污染源。一方面,由于时间短,未发现工业企业的污染对红树林空间分布构成影响(图 4),另一方面,由于监测的技术手段所限,无法确认其周边红树林空间分布的变化是否由这些污染源造成? 因此,未考虑污染对红树林的影响。

海水养殖是研究区域内一个重要产业,对于促进地方经济发展和增加沿海地区居民经济收入具有极为重要的意义。由于经济效益驱动,长期以来,海水养殖呈无序快速发展趋势,非法占用滩涂修筑养殖塘和占用海

域放置养殖网箱的现象屡禁不止。经图像解译,1960—2010年,仅研究区域西段的防城港市,养殖塘面积增加4.5倍,见表5。

表5 1960—2010年防城港市海水养殖塘面积
Table 5 Area of shrimp pond in Fangchenggang City, 1960—2010

年度 Year	全市 Whole district/hm ²	西湾 West gulf / hm ²	东湾 East gulf / hm ²
1960	1582.2	214.4	227.0
1989		221.9	690.4
2001	3276.5	597.0	1090.8
2004			1388.5
2010	7120.3	776.3	1420.5

填海造陆或围海造田、筑养殖塘和盐田、海岸工程等人为干扰造成红树林栖息地丧失,是影响红树林空间分布变化的重要因素,但通过研究发现,在无围垦、围塘养殖、修建盐田、港口码头和市政建设等明显的、直接的人为影响下,红树林斑块也存在着斑块萎缩、碎化、消失等导致面积减少的现象,在本研究中,造成这些现象的原因统称为“自然过程”。

在自然状态下(或者是无明显人为干扰下),红树林斑块变化的原因是十分复杂的,其机理也难以阐明,具体原因及其作用机理可能包括:①海平面上升引起斑块外边界后移而导致斑块萎缩或消失;②海洋环流改变,或修筑堤坝,或入海河流的流量、流速改变等引起海水动力改变或者形成潮沟,引起海洋地貌改变而导致斑块萎缩、碎化或消失;③土壤物理结构和化学性质改变导致生境改变,引起斑块萎缩、碎化或消失;④泥沙沉积引起海岸地形改变,尤其是地形抬升、扩张,促使斑块扩张和新增;⑤严重病虫害,特别是毁灭性病虫害导致斑块萎缩、碎化或消失。然而,要准确阐明自然状态下红树林空间分布的变化机理,需要进行长期深入的研究。

5.2 红树林空间演变分析方法

在各个尺度上,现有红树林动态变化研究大多是从整体的角度研究各种影响因素对其面积变化(通常为减少)的影响和作用,所得结论通常是定性的,如“导致红树林面积减少的原因是农业、水产、城市扩展、...”,很少得到定量的结论^[1],即使进行定量分析,也只考虑人为因素影响造成的红树林面积减少量^[2],并未全面阐明红树林在长期演替过程中,面积增加和减少的动态过程。虽然在各个尺度上,红树林面积减少都是普遍现象,但即使在某一区域(任何尺度)红树林面积整体上呈净减少趋势,也不意味在此区域内红树林斑块不扩张、不新增,面积不增加,只是增加的面积小于减少的面积而已,表3定量地显示了广西海岸红树林面积一方面在自然过程和人工造林影响下增加,另一方面在人为破坏下减少的情况。

红树林空间演变包括斑块数量和面积的增加、减少两个效果互为相反的过程,是在各种影响因素的共同驱动下,通过不同类型斑块的数量和面积变化实现的。因此,要全面摸清红树林空间演变规律,需要厘清下列3个问题:

- (1) 什么因素造成斑块数量和面积发生变化? 每个因素造成的斑块数量和面积变化量是多少?
- (2) 斑块数量和面积通过何种途径发生变化? 通过每个途径发生的斑块数量和面积变化量是多少?
- (3) 在某个因素影响下,通过各个变化途径发生的斑块数量和面积变化量分别是多少?

文中提出了以斑块分析为基础,通过斑块数量和面积的驱动因子-变化途径状态矩阵计算驱动量、驱动率、流量、流率等系列指标的方法,较好地回答了上述问题。与现有分析方法相比,文中提出的分析方法不但考虑了人为因素对斑块数量和面积变化的影响,也考虑了自然过程对斑块数量和面积变化的影响,而且能够做到精确的定量评估,因此也更能清晰地描述了各种因素对红树林斑块数量和面积变化的影响程度。

现有研究很少涉及红树林是通过什么渠道发生变化的,更无法进行定量的表达。斑块碎化、萎缩和消失都引起红树林面积的减少,但变化发生后,红树林的空间分布状态、生态功能、恢复的难易程度等都是不同的。

一般而言,斑块碎化和萎缩后,原有红树林尚部分存在,还具有一定的生态功能,只要干扰停止,即使不采取人工干预,红树林也有可能较快地得以恢复,但一旦斑块消失,生态功能全无,若无人工措施,红树林则很难恢复。同样,斑块扩张和新增斑块都会引起红树林面积的增加,但其生态功能也有差异,新增斑块意味着红树林空间分布范围扩大,影响范围更广,斑块扩张只限于原有范围的扩展,影响范围小。文中提出的分析方法,不但精确地反映了红树林斑块数量和面积的变化情况,而且定量地阐述了红树林斑块数量和面积变化发生的途径,有利于全面了解红树林空间分布的动态变化情况,有利于红树林的保护管理。

此外,文中提出的方法也定量描述了不同因素通过不同途径对斑块数量和面积变化的影响程度,使红树林空间演变的描述更为深入、更为精确。

总之,文中提出的基于斑块的红树林空间演变分析方法,比现有研究方法更能全面地、深入地和准确地反映红树林空间分布的变化情况。

6 结论

本研究方法体系不但能够定量地表达了各个驱动因子对红树林斑块数量和面积变化的影响程度,而且能够准确地反映了红树林斑块数量和面积发生变化的途径,并且还能够准确地阐述了各个驱动因子通过何种途径影响斑块数量和面积的变化,实现了红树林空间动态机理分析的定位化、定量化和精确化,其结果对红树林的保护管理和恢复更具有科学价值。

致谢:美国普渡大学林业和自然资源系邵国凡教授对本研究工作给予大力帮助,周梅、蔡琼瑜、付强和薛晓坡参与部分图像预处理和红树林空间信息提取工作,特此致谢。

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] 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 and Biogeography*, 2011, 20(1): 154-159.
- [3] Macintosh D J, Ashton E C. A review of mangrove biodiversity conservation and management. 2002. [accessed Oct. 10, 2010]. http://mit.biology.au.dk/cenTER/MCB_Files/2002_Review_WB_MCB_Final.pdf.
- [4] FAO, UNEP. Tropical Forest Resources Assessment Project: Forest Resources of Tropical Asia. Rome: FAO, 1981.
- [5] Saenger P, Hegerl E J, Davie J D S. Global status of mangrove ecosystems // Commission on Ecology Papers No. 3. Switzerland: World Conservation Union (IUCN), 1983.
- [6] 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.
- [7] Fisher P, Spalding M D. Protected Areas with Mangrove Habitat. Draft Report. Cambridge: World Conservation Centre, 1993.
- [8] FAO. Mangrove forest management guidelines // FAO Forestry Paper 117. Rome: FAO, 1994.
- [9] Spalding M D, Blasco F, Field C D. World mangrove atlas // The International Society for Mangrove Ecosystems, Okinawa. 1997.
- [10] Aizpuru M, Achard F, Blasco F. Global assessment of cover change of the mangrove forests using satellite imagery at medium to high resolution // EEC Research Project No. 15017-1999-05 FIED ISP FR. Ispra: Joint Research Centre, 2000.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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(6): 794-798.
- [15] 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.
- [16] Vadlapudi S. Identification and quantification of changes in mangrove forest using remote sensing-a case study near Kakinada Bay, Andhra

- Pradesh, India. Noida, India: GIS Development Pvt. Ltd. 2003. [accessed May 20, 2011]. <http://www.GISdevelopment.net/application/environment/wetland/mi03075.htm>.
- [17] Krause G, Bock M, Weiers S, Braun G. Mapping land-cover and mangrove structures with remote sensing techniques: a contribution to a synoptic GIS in support of coastal management in North Brazil. *Environmental Management*, 2004, 34(3): 429-440.
- [18] Aksornkoae S. Ecology and Management of Mangroves. Switzerland: IUCN, Wetlands and Water Resources Programme, 1993.
- [19] Giri C, Delsol J P. Mangrove forest cover mapping using remote sensing data in conjunction with GIS. *Asian and Pacific Remote Sensing Journal*, 1995, 8: 13-26.
- [20] Blasco F, Aizpuru M, Gers C. Depletion of the mangroves of Continental Asia. *Wetlands Ecology and Management*, 2001, 9(3): 245-256.
- [21] Boer W F. The rise and fall of the mangrove forests in Maptuto Bay, Mozambique. *Wetland Ecology and Management*, 2002, 10(4): 313-322.
- [22] 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.
- [23] Fromard F, Vega C, Proisy C. Half a century of dynamic coastal change affecting mangrove shorelines of French Guiana. A case study based on remote sensing data analyses and field survey. *Marine Geology*, 2004, 208(2/4): 265-280.
- [24] DEP (Department of Environmental Protection), FMRI (Florida Marine Research Institute). Florida's Mangroves "Walking Trees". [accessed Oct. 10, 2010]. <http://www.floridaplants.com/horticulture/mangrove.htm>.
- [25] Lugo A E, Snedaker S C. The ecology of the mangrove swamps at Inhaca Island, Moçambique. *Journal of Ecology*, 50: 19-34.
- [26] Blasco F, Saenger P, Janoder E. Mangrove as indicators of coastal change. *Catena*, 1974, 27(3): 167-178.
- [27] Ellison A M, Farnsworth E J. Anthropogenic disturbance of Caribbean mangrove ecosystems: past impacts, present trends, and future predictions. *Biotropica*, 1996, 28(4a): 549-565.
- [28] Skilleter G A. Validation of rapid assessment of damage in urban mangrove forests and relationships with molluscan assemblages. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 1996, 76(3): 701-716.
- [29] Farnsworth E J, Ellison A M. The global conservation status of mangroves. *Ambio-A Journal of the Human Environment*, 1997, 26(2): 328-334.
- [30] Tam N F Y, Wang Y S, Lu C Y, Berry R. Mapping and characterization of mangrove plant communities in Hongkong. *Hydrobiologia*, 1997, 352(1/3): 25-27.
- [31] Semesi A K. Mangrove management and utilization in Eastern Africa. *Ambio-A Journal of the Human Environment*, 1998, 27(8): 620-626.
- [32] Mitchell A L, Lucas R M, Donnelly E B, Pflitzner 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.
- [33] Alongi D M. Present state and future of the world's mangrove forests. *Environmental Conservation*, 2002, 29(3): 331-349.
- [34] Fan H Q, Li G C. Effect of sea dike on the quantity, community characteristics and restoration of mangrove forest along Guangxi coast. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1997, 8(3): 240-244.
- [35] Chen S P, Liang Z X, Deng Y. Mangrove in southern China coast. *Guihaia*, 1988, 8(3): 215-224.
- [36] Chen Y S, Gan X H, Wu Z H, Zhong D Q. The mangrove on the coast of Guangdong. *Forestry Science and Technology of Guangdong Province*, 2001, 17(1): 20-26.
- [37] Zhang Q M, Sui S Z. The mangrove wetland resources and their conservation in China. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(1): 28-36.
- [38] Li X, Liu K, Wang S G. Mangrove wetland changes in the Pearl River estuary using remote sensing. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(1): 26-34.
- [39] Cao L, Han W D, Li F F, Zhang Y J. Change of mangrove wetland landscape pattern and its driving forces in Leizhou Bay. *China Forestry Science and Technology*, 2010, 24(4): 18-23.
- [40] Wang Y, Zuo P, Huang Z Q, Zou X Q. Study of the change of mangrove wetland ecosystem and driving forces in Dongzhaigang. *Sichuan Environment*, 2006, 25(3): 44-49.

参考文献:

- [34] 范航清, 黎广钊. 海堤对广西沿海红树林的数量、群落特征和恢复的影响. *应用生态学报*, 1997, 8(3): 240-244.
- [35] 陈树培, 梁志贤, 邓义. 中国南海海岸的红树林. *广西植物*, 1988, 8(3): 215-224.
- [36] 陈远生, 甘先华, 吴中享, 钟德群. 广东省沿海红树林现状和发展. *广东林业科技*, 2001, 17(1): 20-26.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 曹林, 韩维栋, 李凤凤, 张裕娇. 雷州湾红树林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.
- [40] 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.

CONTENTS

Growth and physiological adaptation of <i>Messerschmidia sibirica</i> to sand burial on coastal sandy	WANG Jin, ZHOU Ruilian, ZHAO Halin, et al (4291)
Alleviation effect and mechanism of exogenous potassium nitrate and salicylic acid on the growth inhibition of <i>Pinus tabulaeformis</i> seedlings induced by deicing salts	ZHANG Ying, LI Fayun, YAN Xia, et al (4300)
Influence of different spatial-scale factors on stream macroinvertebrate assemblages in the middle section of Qiantang River Basin	ZHANG Yong, LIU Shuoru, YU Haiyan, et al (4309)
Species diversity and distribution pattern of non-volant small mammals along the elevational gradient on eastern slope of Gongga Mountain	WU Yongjie, YANG Qisen, XIA Lin, et al (4318)
A patch-based method for mechanism analysis on spatial dynamics of mangrove distribution	LI Chungan, LIU Suqing, FAN Huangqing, et al (4329)
Nutrient heterogeneity in fine roots of six subtropical natural tree species	XIONG Decheng, HUANG Jinxue, YANG Zhijie, et al (4343)
Variation of vegetation NDVI and its response to climate change in Zhejiang Province	HE Yue, FAN Gaofeng, ZHANG Xiaowei, et al (4352)
Heterogeneity in fine root respiration of six subtropical tree species	ZHENG Jinxing, XIONG Decheng, HUANG Jinxue, et al (4363)
Characteristics of ammonia-oxidizing bacteria and ammonia-oxidizing archaea abundance in soil organic layer under the subalpine/alpine forest	WANG Ao, WU Fuzhong, HE Zhenhua, et al (4371)
Effect of tillage systems on light fraction carbon in a purple paddy soil	ZHANG Junke, JIANG Changsheng, HAO Qingju, et al (4379)
Effects of prescribed fire on carbon sequestration of long-term grazing-excluded grasslands in Inner Mongolia	HE Nianpeng, HAN Xingguo, YU Guirui, et al (4388)
Stoichiometry of carbon dioxide and methane emissions in Minjiang River estuarine tidal wetland	WANG Weiqi, ZENG Congsheng, TONG Chuan, et al (4396)
Distribution and sources of particulate organic carbon in the Pearl River Estuary in summer 2010	LIU Qingxia, HUANG Xiaoping, ZHANG Xia, et al (4403)
The glucose-utilizing bacterial diversity in the cold spring sediment of Shawan, Xinjiang, based on stable isotope probing	CHU Min, WANG Yun, ZENG Jun, et al (4413)
Culture-dependent and culture-independent approaches to studying soil microbial diversity	LIU Guohua, YE Zhengfang, WU Weizhong (4421)
The classification of plant functional types based on the dominant herbaceous species in the riparian zone ecosystems in the Yiluo River	GUO Yili, LU Xunling, DING Shengyan (4434)
Genetic diversity of different eco-geographical populations in endangered plant <i>Prunus mongolica</i> by ISSR Markers	ZHANG Jie, WANG Jia, LI Haoyu, ZHANG Huirong, et al (4443)
Ecophysiological characteristics of higher-latitude transplanted mangrove <i>Kandelia candel</i> in strong tidal range area	ZHENG Chunfang, QIU Jianbiao, LIU Weicheng, et al (4453)
The effect of artificial warming during winter on white clover (<i>Trifolium repens</i> Linn): overwintering and adaptation to coldness in late spring	ZHOU Ruilian, ZHAO Mei, WANG Jin, et al (4462)
Estimating fine root production and mortality in subtropical <i>Altingia grilipes</i> and <i>Castanopsis carlesii</i> forests	HUANG Jinxue, LING Hua, YANG Zhijie, et al (4472)
The cloning and expression of WUE-related gene (<i>PdEPF1</i>) in <i>Populus deltoides</i> × <i>Populus nigra</i>	GUO Peng, JIN Hua, YIN Weilun, et al (4481)
The allelopathy of aquatic rhizome and root extract of <i>Thalia dealbata</i> to seedling of several aquatic plants	MIAO Lihua, WANG Yuan, GAO Yan, et al (4488)
Effect of the avirulent strain of <i>Ralstonia solanacearum</i> on the ecological characteristics of microorganism fatty acids in the rhizosphere of tobacco	ZHENG Xuefang, LIU Bo, LAN Jianglin, et al (4496)
Coupling remotely sensed information with a rice growth model by combining updating and assimilation strategies	WANG Hang, ZHU Yan, MA Mengli, et al (4505)
Effects of water temperature and body weight on metabolic rates of Yellowtail clownfish <i>Amphiprion clarkii</i> (Pisces: Perciformes) during larval development	YE Le, YANG Shengyun, LIU Min, et al (4516)
The distribution of chlorophyll a in the Southwestern Indian Ocean in summer	HONG Lisha, WANG Chunsheng, ZHOU Yadong, et al (4525)
Evaluation of the effects of ecological remediation on the water quality and biological toxicity of Dagou Drainage River in Tianjin	WANG Min, TANG Jingchun, ZHU Wenyong, et al (4535)
Quantitative dynamics of adult population and 3-D spatial pattern of <i>Ceoporus variabilis</i> (Baly)	WANG Wenjun, LIN Xuefei, ZOU Yunding, et al (4544)
Review and Monograph	
Studies on urban heat island from a landscape pattern view: a review	CHEN Ailian, SUN Ranhao, CHEN Liding (4553)
Sediment quality triad and its application in coastal ecosystems in recent years	WU Bin, SONG Jinming, LI Xuegang, et al (4566)
Discussion	
Food waste management in China: status, problems and solutions	HU Xinjun, ZHANG Min, YU Junfeng, et al (4575)
Scientific Note	
Effects of microchemical substances in anaerobic fermented liquid from rice straw and cyanobacteria on <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>niveum</i> growth	LIU Aimin, XU Shuangsoo, CAI Xin, et al (4585)
Ecological benefit-loss analysis of agricultural ecosystem in Foshan City, China	YE Yanqiong, ZHANG Jiaen, QIN Zhong, et al (4593)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 14 期 (2012 年 7 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 14 (July, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100071	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元