

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

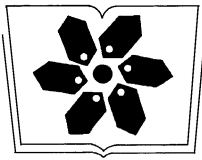
Acta Ecologica Sinica



第33卷 第15期 Vol.33 No.15 **2013**

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 33 卷 第 15 期 2013 年 8 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 红树林生态系统遥感监测研究进展..... 孙永光,赵冬至,郭文永,等 (4523)
- 基于能值分析方法的城市代谢过程研究——理论与方法 刘耕源,杨志峰,陈 彬 (4539)
- 关于生态文明建设与评价的理论思考 赵景柱 (4552)

个体与基础生态

- 长江口及邻近海域秋冬季小型底栖动物类群组成与分布..... 于婷婷,徐奎栋 (4556)
- 灌河口邻近海域春季浮游植物的生态分布及其营养盐限制..... 方 涛,贺心然,冯志华,等 (4567)
- 春季海南岛近岸海域尿素与浮游生物的脲酶活性..... 黄凯旋,张云,欧林坚,等 (4575)
- 模拟酸雨对蒙古栎幼苗生长和根系伤流量的影响..... 梁晓琴,刘 建,丁文娟,等 (4583)
- 有机酸类化感物质对甜瓜的化感效应..... 张志忠,孙志浩,陈文辉,等 (4591)
- 稻田土壤氧化态有机碳组分变化及其与甲烷排放的关联性..... 吴家梅,纪雄辉,霍莲杰,等 (4599)
- 双氰胺单次配施和连续配施的土壤氮素形态和蔬菜硝酸盐累积变化..... 王煌平,张 青,翁伯琦,等 (4608)
- 不同类型土壤中分枝杆菌噬菌体分离率的比较..... 徐凤宇,苏胜兵,马红霞,等 (4616)
- 模拟酸雨对小麦产量及籽粒蛋白质和淀粉含量及组分的影响 卞雅姣,黄 洁,孙其松,等 (4623)
- 麻花秦艽种子休眠机理及其破除方法 李兵兵,魏小红,徐 严 (4631)
- 4 种金色叶树木对 SO_2 胁迫的生理响应 种培芳,苏世平 (4639)
- 硫丹及其主要代谢产物对紫色土中酶活性的影响..... 熊佰炼,张进忠,代 娟,等 (4649)

种群、群落和生态系统

- 群落水平食物网能流季节演替特征..... 徐 军,周 琼,温周瑞,等 (4658)
- 千岛湖岛屿社鼠的种群数量动态特征..... 张 旭,鲍毅新,刘 军,等 (4665)
- 黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征..... 朱秋莲,邢肖毅,张 宏,等 (4674)
- 青藏高原高寒草甸退化与人工恢复过程中植物群落的繁殖适应对策..... 李媛媛,董世魁,朱 磊,等 (4683)
- 杉木人工林土壤质量演变过程中土壤微生物群落结构变化..... 刘 丽,徐明恺,汪思龙,等 (4692)
- 不同玉米品种(系)对玉米蚜生长发育和种群增长的影响 赵 曼,郭线茹,李为争,等 (4707)
- 伏牛山自然保护区森林冠层结构对林下植被特征的影响..... 卢训令,丁圣彦,游 莉,等 (4715)
- 内蒙古武川县农田退耕还草对粪金龟子群落的影响 刘 伟,门丽娜,刘新民 (4724)
- 铜和营养缺失对海州香薷两个种群生长、耐性及矿质营养吸收的差异影响 柯文山,陈世俭,熊治廷,等 (4737)
- 新疆喀纳斯国家自然保护区植被叶面积指数观测与遥感估算..... 咎 梅,李登秋,居为民,等 (4744)

景观、区域和全球生态

基于 LUCC 的生态系统服务空间化研究——以张掖市甘州区为例 梁友嘉,徐中民,钟方雷,等 (4758)

人工管理和自然驱动下盐城海滨湿地互花米草沼泽演变及空间差异 张华兵,刘红玉,侯明行 (4767)

基于 PCA 的滇西北高原纳帕海湿地退化过程分析及其评价 尚 文,杨永兴,韩大勇 (4776)

基于遥感和地理信息系统的图们江地区生态安全评价..... 南 颖,吉 喆,冯恒栋,等 (4790)

呼中林区森林景观的历史变域模拟及评价..... 吴志丰,李月辉,布仁仓,等 (4799)

降水时间对内蒙古温带草原地上净初级生产力的影响..... 郭 群,胡中民,李轩然,等 (4808)

研究简报

我国中东部不同气候带成熟林凋落物生产和分解及其与环境因子的关系.....

..... 王健健,王永吉,来利明,等 (4818)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 304 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 32 * 2013-08



封面图说:石质山区的退耕还林——桂西北地区是我国喀斯特集中分布的地区之一,这里的石漠化不仅造成土地退化、土壤资源逐步消失、干旱缺水和土地生产力下降,而且还导致生态系统退化和植被消亡。桂西北严重的地质生态环境问题,威胁着当地居民的基本生存,严重制约了当地社会经济的发展。增加植被覆盖是防治石漠化的重要举措。随着国家退耕还林、生态移民等治理措施的实施,区域植被碳密度显著增加,生态环境有所好转。图为喀斯特地区农民见缝插针用来耕种的鸡窝地(指小、碎、分散的土地),已经退耕还林了。

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

DOI: 10.5846/stxb201205150715

孙永光, 赵冬至, 郭文永, 高阳, 苏岫, 卫宝泉. 红树林生态系统遥感监测研究进展. 生态学报, 2013, 33(15): 4523-4538.

Sun Y G, Zhao D Z, Guo W Y, Gao Y, Su X, Wei B Q. A review on the application of remote sensing in mangrove ecosystem monitoring. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(15): 4523-4538.

红树林生态系统遥感监测研究进展

孙永光¹, 赵冬至^{1,*}, 郭文永², 高 阳³, 苏 岫¹, 卫宝泉¹

(1. 国家海洋环境监测中心, 大连 116023; 2. 奥胡斯大学生物科学学院, 奥胡斯 8000C 丹麦;

3. 国家海洋局南海环境监测中心, 广州 510300)

摘要:随着现代遥感技术的迅速发展, 遥感监测已经成为红树林生态系统变化监测的重要手段和方法。从遥感技术在生态系统变化监测应用领域入手, 综述了国内外红树林遥感监测的发展历程, 系统总结了遥感技术在红树林湿地动态、种间分类、群落结构(叶面积指数、冠幅、树高等)、生物量、灾害灾情(病虫害、风暴潮等)、景观格局动态、驱动力、红树林湿地保护与管理等领域应用现状, 归纳了不同应用领域遥感监测的理论、方法及研究现状。指出我国在红树林遥感监测中存在的不足。提出红树林遥感监测应在分类标准体系规范化、分类精度提升、红树林生态学特征参数(物种多样性、优势度等)、生态系统环境空间演变过程及遥感监测的尺度效应方面加大研究力度。充分发挥区域综合监测模型在红树林生态系统变化遥感监测中的作用。

关键词:红树林; 遥感技术; 应用领域; 展望

A review on the application of remote sensing in mangrove ecosystem monitoring

SUN Yongguang¹, ZHAO Dongzhi^{1,*}, GUO Wenyong², GAO Yang³, SU Xiu¹, WEI Baoquan¹

1 National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China

2 Department of Bioscience, Plant Biology, Aarhus University Ole Worms Allé 1, 8000 Aarhus C, Denmark

3 South China Sea Environmental Monitoring Center, Guangzhou 510300, China

Abstract: Mangrove trees form a community of woody plants in intertidal areas periodically immersed by sea water, and are located in tropical and sub-tropical zones. Mangrove forests are complicated ecological systems with characteristics of both land and sea, and form coastal ecologically critical areas (ECA). Monitoring ecological parameters of mangrove ecological systems has gained increased attention from governments and scholars. Ground-based investigation can lead to comprehensive understanding of the structure and functions of the mangrove ecosystem. However, because of spatial and temporal limitations, information on ecological changes of mangrove trees over long periods and large regions cannot be obtained in this way. Advancements in modern remote sensing technology, modeling and simulation, and landscape pattern analysis have provided important technological means for discerning spatiotemporal ecological ecosystem changes. In particular, remote sensing has become an important tool for obtaining temporal and spatial dimensions of ecological parameters of the mangrove forest ecological system. Statistics show that by May 2012, a total of 233 academic papers had been published outside China on remote sensing for monitoring mangrove forests, a number which is increasing yearly. This research mainly focuses on dynamic monitoring, inter-species classification, and structural monitoring of those forests. Especially since 2000, structural monitoring of mangrove communities and investigation of their driving forces and other aspects (sea level changes and comprehensive investigations) have become primary research topics. The application of

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41201179); 海洋公益性行业科研专项(DOME(MEA)-01-03)

收稿日期: 2012-05-15; **修订日期:** 2013-06-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dzzhao@nmemc.gov.cn

remote sensing to mangrove forest ecosystem monitoring in China began in the 1990s and has been increasing remarkably in recent years, particularly during the period 2008—2011. This paper summarizes the status of such application and current problems. Specifically, the work expounds on the following aspects: 1) Theories and methods of dynamic monitoring of mangrove-covered wetlands. 2) Theories and methods of inter-species classification technology, as well as requirements of image data. In particular, classification of mangrove trees does not rely only on spectral characteristics, but also requires consideration of structural information that helps enhance classification precision. 3) Theories and methods of remote monitoring of structural parameters of mangrove communities (LAI, crown diameter, tree height and others). In addition, investigations of the relationship between the radar backscattering coefficient and crown diameter and vertical structure of mangrove trees, through establishing a model of their quantitative relationships; this facilitates remote monitoring of mangrove forest growth by applying C-band, L-band, P-band, C-VV and C-HH bands of NASA/JPL. 4) Theories and methods of remote monitoring and inversion of primary production of mangrove forests. Comparative analysis shows that the radar backscattering coefficient is more precise than the NDVI model in estimating vegetation biomass. 5) The status of disasters affecting mangrove forests (diseases, insect infestation and storm surges) and of monitoring theories. 6) Remote dynamic monitoring of and comments on the mangrove-covered region and inter-species landscape patterns. 7) Remote sensing of and comments on driving mechanisms of dynamic evolution of mangrove-covered wetlands. 7) Status and methods of application of remote sensing technology in protection and management of mangrove-covered wetlands. This paper points out existing deficiencies and challenges in remote monitoring of elements of the mangrove forest ecosystem, and emphasizes the need for more research into standardization of classification systems and enhancement of classification precision. Also needed is research into parameters of the ecological characteristics of mangrove forests (diversity and species dominance), spatial evolution of the ecological system, and dimensional effects of remote monitoring. Remote monitoring of the mangrove forest ecosystem lags behind in China, so more such studies should be undertaken in the country.

Key Words: mangrove; remote sensing; application fields; outlook

红树林是生长于热带亚热带海岸潮间带、受到海水周期性浸没的木本植物群落,是兼具陆地和海洋特性的复杂生态系统^[1]、海岸重要生态关键区(ECA)^[2-3]。在改善海湾、防浪护堤、净化污染和保护湿地多样性等方面发挥不可替代的功能^[4]。然而,随着国民经济的发展和沿海经济区的开发,围海造田、滩涂养殖、城市化建设等多种人为活动的侵占和众多因素的干扰,红树林资源出现日益严重的面积萎缩、环境恶化、结构简单等退化现象^[5-7]。国家海洋局 2001 年制定了《中国海岸湿地保护行动计划》^[5],将红树林生态系统的保护列为优先项目之一,红树林生态系统变化监测逐渐成为政府和学者们关注的焦点。地面调查能够比较全面地了解生态系统的结构、过程和功能状况及其变化,但是这种观测需要长期持续的投入,所能达到的时空尺度也有一定局限性^[8]。随着现代遥感技术、模型技术、仿真技术与景观格局分析方法的不断成熟,为生态系统变化时空尺度数据获得提供了重要的技术手段和方法^[9]。遥感技术因其覆盖面积大、数据更新周期短、空间分辨率高等特点,已成为国内外红树林监测的主要技术之一^[10]。本文将系统总结遥感技术在红树林生态系统变化监测中的国内外应用进展,探讨红树林遥感监测理论发展和应用新方向,为遥感在红树林生态系统变化监测中的应用拓展提供借鉴,对实现红树林时空尺度生态系统变化遥感监测具有重要意义。

1 红树林遥感监测的发展历程

1.1 国外红树林遥感监测发展历程

截至 2012 年 05 月国外红树林遥感监测研究文献总计约为 233 篇,呈逐年递增趋势(图 1);主要集中于红树林动态监测、种间分类、结构监测等方面(图 2),特别是自 2000 年以后,国外红树林群落结构监测、驱动力研究以及其他(海平面变化、综合研究)逐渐成为红树林遥感监测的热点,研究数量呈上升趋势(图 2),研究者主要来源于美国(57 名)、印度(37 名)、法国(20 名)、比利时(19 名)、中国(19 名)、澳大利亚(16 名)等

国家(图3),这也说明红树林遥感研究在一定程度上受到经济发展水平和技术水平的限制。

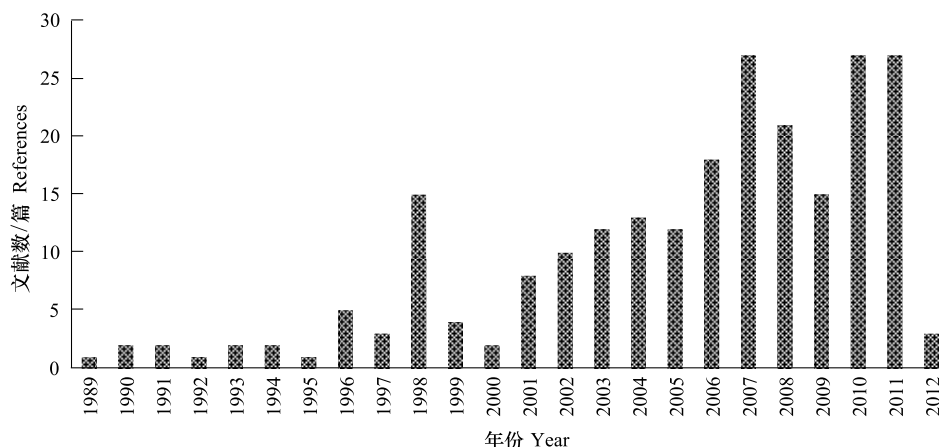


图1 国外红树林遥感研究文献年度统计

Fig.1 Statistics abroad mangrove research papers basing on remote sensing at different years

选取 Web of Science 数据库 SCI-E, 1899-现在;SSCI, 1956-现在;A&HCI, 1975-现在;CPCI-S, 1990-现在(会议, 自然科学);CPCI-SSCI, 1990-现在(会议, 社会科学), 利用复合主题“mangrove”和“remote sensing 或 RS”在所有年份内搜索, 共得到相关文献 233 篇

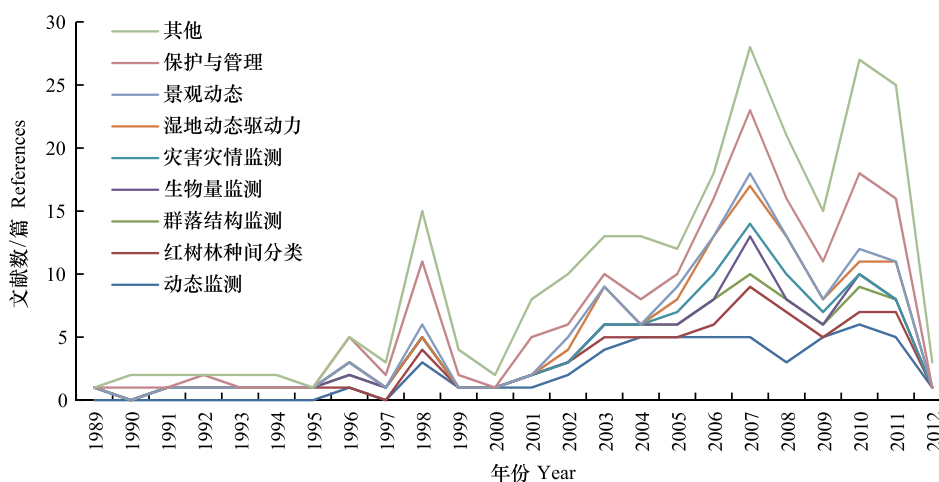


图2 国外红树林遥感不同应用领域文献量统计

Fig.2 Different application fields statistics of mangrove research papers basing on remote sensing at different years abroad

美国、法国等发达国家因其技术领先,在利用遥感技术对湿地资源进行调查与保护方面的研究起步较早^[11-12]。1979年 Lorenzo 等首次借助遥感技术对的红树林进行了动态监测^[13];20世纪80年代世界各国卫星遥感事业的蓬勃发展,红树林遥感监测也出现了大发展时期,随着1980年联合国粮农组织(The United Nations Food and Agricultural Organization FAO)将遥感技术用于估算红树林面积^[13],遥感技术逐渐被广泛应用于红树林湿地分布、面积、动态、制图等领域^[13-20]。其中 Landsat 因分辨率适中,价格合理,性价比较高,是红树林面积调查和遥感动态监测中应用最多的遥感数据源^[21];进入20世纪90年代,随着陆地资源卫星及海洋卫星时空分辨率的不断提高,红树林遥感监测也由动态监测向类别监测方向发展^[21-27],中低分辨率遥感影像可以区分出红树林林区与非红树林区,但难以完成红树林种类的区分。法国1986年发射的 SPOT 卫星系列,其高空间分辨率及多光谱特性为红树林种间分类技术的研究提供了有利条件,随着航空数据、NOAA-AVHRR、ERS-1 radar 数据等商业化应用的提高,多源数据融合技术为红树林分类技术的提高提供了数据基础,使红树林类别监测取得了长足发展^[21-27]。进入21世纪以来,IKONOS 卫星、ALOS(空间分辨率:2.5 m)、

QuickBird、SPIN-2、Orbview-3 等它们的全色波段空间分辨率多达到米级, SAR 雷达数据的应用极大提高了遥感图像的信息含量^[28]。红树林遥感监测也逐渐向纵深发展, 逐渐由宏观动态、分类监测向生态系统参数及综合信息监测方向转化, 遥感估算红树林生物量^[29]、分层结构^[30-31]、群落特征参数^[32]、树高^[33-34]、平均冠幅^[29]、健康^[35-36]、病虫害^[37]等生态学参数特征。近些年来, 遥感技术在红树林监测中的应用逐渐向综合方向发展深入, 逐渐转向红树林对气候变化、海平面变化^[38-39]及人类活动的响应过程及管理^[28]的研究(图 2)。

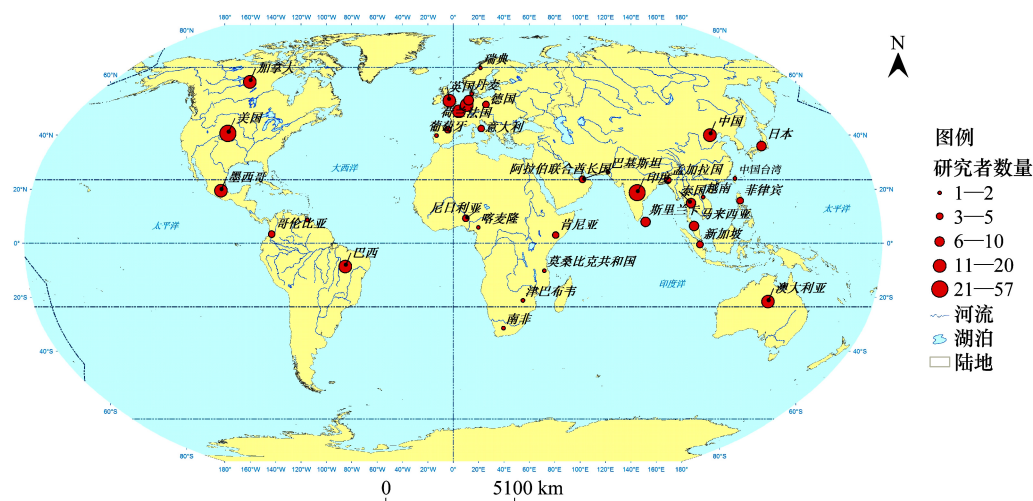


图 3 红树林遥感研究者所属国家或地区分布

Fig.3 Country and area distribution of researcher of mangrove remote sensing

选取 Web of Science 数据库 (SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, CPCI-S, CPCI-SSH), 利用复合主题“mangrove”和“remote sensing OR RS”所有年份搜索, 共得到相关文献 233 篇

1.2 我国红树林遥感监测发展历程

国内遥感技术在红树林监测中的应用始于 20 世纪 90 年代, 在最近几年呈现明显上升趋势, 特别是在 2008—2011 年, 呈明显递增趋势(图 4)。1994 年遥感技术在海南岛红树林湿地资源调查中得到了应用^[28,40]。90 年代至 21 世纪初, 我国的红树林遥感监测主要是以遥感测绘^[40]、成图^[40-44]为主。1997 年国家海洋局第三海洋研究所首次开展了红树林智能分类研究^[42]。进入 21 世纪, 随着 Landsat TM 和 ETM、SPOT、NOAA - AVHRR、中巴资源卫星、IKONOS、SAR 雷达和 QuickBird 等影像的逐渐普及, 国内学者逐步在红树林制图^[41]、动态监测^[42-45]、光谱特征及分类等方面开展了一些卓有成效的研究^[42-54]。2006 年, 我国首次借助雷达数据对珠江三角洲珠海的淇澳岛红树林进行了红树林生物量监测, 这是我国首次实现红树林生物量雷达监测^[53], 之后, 国内学者利用光学遥感方法评估了北部湾红树林碳储量^[55], 将我国的红树林遥感监测由动态、分类、制图和资源调查等推向生态系统特征参数变化监测, 特别是最近几年, 中巴资源卫星、IKONOS、SAR 雷达、QuickBird、HJ 星等数据相继被应用于红树林生态系统遥感监测^[55-67], 大大提高了信息量及分类精度; 同时, 在红树林动态、分类方法等方面也取得了一定成果。但相比国际红树林遥感监测进程, 国内在红树林遥感监测群落结构、灾害灾情、综合信息等方面的研究鲜见。

2 遥感技术主要应用领域

2.1 红树林湿地动态监测

宏观、区域尺度动态监测是红树林遥感监测的重要领域之一, 其原理是基于同一区域存在着光谱特征差异, 利用遥感影像增强及红树林边界检测技术^[28,60]识别红树林与非红树林的差异, 从而实现红树林分布、面积监测及制图。

1979 年 Lorenzo 等借助 Landsat MSS data 对菲律宾三宝颜半岛 (Zamboanga Peninsula) 的红树林退化状况进行了动态监测^[13], 随后, Laba 等在大洲国家尺度上, 分析了多米尼加共和国尤纳河流域下游土地覆盖的变

化趋势,获得 1973—1985 年间红树林面积的变化^[68]; Wang 等以 TM 和 ETM 图像为基础,分析了坦桑尼亚从南至北 800 km 长海岸带红树林在 1990—2000 年的变化^[69];Godstime 等利用 TM 和 ETM 数据分析了尼日尔三角洲 1980—2003 年间红树林边界变化情况^[70],从红树林动态监测研究上看^[15-20],主要以 TM、ETM、Landsat MSS 等数据为主,采用的技术方法主要是边界检测技术。随着遥感技术的不断发展,红树林动态监测逐渐向纵深发展, Vaisiades 等采用 NDVI(归一化植被指数)技术研究了泰国 Pak Phanang 地区的红树林动态变化情况^[71],Giri 等采用监督分类法,识别了 20 世纪 70 年代至 21 世纪在孟加拉和印度之间的孙德尔本斯地区红树林湿地的动态变化过程^[72],Rakotonirainy 等研究了马达加斯加的曼戈基河三角洲土地覆盖的变化趋势,并探测到 1951—2000 年间红树林面积的变化^[73]。

国内在红树林动态变化遥感监测起步较晚,但也取得了一定的研究成果,李天宏于 2002 年首次借助 Landsat TM/ETM 不同时段影像数据分析了深圳河口红树林 6 个时段的动态变化过程,并借助 NDVI 指数研究了该区域红树林生长状况特征^[45],刘凯等应用多种规则相结合的专家系统方法,对珠江口地区 3 个时相的遥感图像进行分类,得到 3 个时相的红树林面积变化和空间分布变化情况^[49],赵玉灵^[62]对珠江口地区 4 个时期的遥感影像和地理地形资料进行综合分析。毛丽君基于遥感的方法分析了广东省红树林资源动态变化情况^[28]。张雪红采用知识与规则方法提取红树林遥感动态信息,与其他学者常采用的分类特征及分类方法相比,识别精度有明显提高^[67]。从红树林遥感动态监测研究进展来看,此类研究采用的数据主要以中分辨率影像数据(Landsat/MSS、Landsat/TM(ETM)、SPOT 和 ASTER)为主^[67],空间尺度以大洲、国家、区域为主、时间尺度以 10 年为监测尺度,侧重于红树林与非红树林的划分及变化监测,主要以监督分类与非监督分类相结合方法,借助 NDVI 等参数对红树林动态进行监测。

2.2 红树林种间分类监测

红树林种间类别复杂,各自具有不同的几何外观、光谱特征以及纹理特征等^[10],遥感监测的基本原理是应用红树林种间光谱特征差异(图 5)、纹理特征差异及综合信息的差异进行种间分类,而光谱特征尤以光谱反射率在 650—750nm 处的差异最为显著,在红外波段各物种光谱反射率出现显著分化,这为红树林光学遥感种间分类奠定了理论基础^[74](图 5)。

中低分辨率遥感影像数据(空间分辨率>10m;Landsat TM, Landsat MSS 和 SPOTXS 等)并不能满足红树林种间分类的要求^[75-76],随着高空间分辨率(空间分辨率<10 m;IKONOS、QuickBird、CASI、SPOT-5 等)影像数据的出现及商业化应用程度的提高,为红树林种间分类研究提供了数据基础,不同学者分别应用 IKONOS^[77]、QuickBird 影像^[37]和 CASI 数据^[78]对红树林种间类型进行了识别,分类种数均在 4 种以上。红树林种间分类的难点在于分类方法与精度评估,HELD 等以 CASI 和 AIRSAR 作为数据源,采用最大似然分类法和分层神经网络分类法对融合数据进行分类,结果表明融合后分类精度更高,达到 79.8%;说明基于结构信息的分类比基于光谱特征差异的分类更为精确^[78];Neukermans 等以 Quick Bird 影像为数据源,采用模糊分类方法对肯尼亚 Gazi 海湾的红树林区的 4 种主要红树林区分出来,总体分类精度达到 72%,其中 2 种主要树种分类精度达到 85%^[76];Wang 等对比了不同分类方法、不同影像(QuickBird、IKONOS)对分类结果的影响,结果发现:采用基于对象的分类方法时,QuickBird 影像数据分类结果就优于 IKONOS,且整体精度提升 2%;反之,IKONOS 整体精度下降 2%^[77]。Wang 等对基于像素的最大似然分类法(MLC)与基于对象的最邻近距离分类

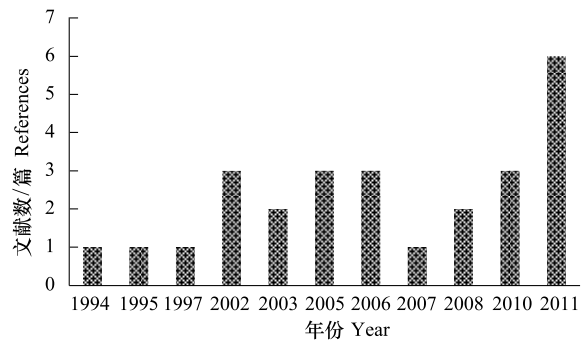


图4 国内红树林遥感文献量年度统计

Fig. 4 Statistics of research papers on mangrove remote sensing in China

以“红树林+遥感”作为搜索关键词,在“中国期刊论文数据库”中进行搜索,截至 2012 年 05 月,共检索到论文 31 篇

法(NN)进行了融合,融合后能将分类结果提升至 91.4%^[79]。也有学者以 SPOT-5(空间分辨率:2.5 m)作为数据源,证明了面向对象分类法的精度均高于基于像素的分类方法,分别比最大似然分类法 MLC 和支持向量机(SVM)方法的精度高^[80],国外研究表明,红树林分类不仅仅依靠光谱特征,同时也要考虑结构信息,有助于提高分类精度。

在国内,腾俊华等应用 TM、DEM 模型获取红树林分布子区的地理范围,通过人工神经网络分类方法,获得红树林群落分类信息^[42],张伟等和苏岫等探讨了高分影像数据用于红树林种间分类的预处理方法及分类方法^[10,54]。刘凯等^[49]以珠海淇澳岛红树林区为例,在国内首次将 TM 数据与 SAR 雷达数据进行融合,探讨了监督分类、非监督分类以及神经网络分类方法对红树林种间分类的精度,结果表明:应用主成分融合后,采用神经网络分类方法能够提高红树林分类精度,总精度达到 84.4%。综合而言,现阶段红树林种间分类研究主要集中于分类方法及分类精度提高研究上,红树林分类标准,分类精度、确定合适方法仍是红树林遥感种间分类的重要研究课题。

2.3 红树群落结构监测

结构监测是对红树林叶面积指数(LAI)、平均冠幅、林木高度、群落结构梯度进行遥感监测。学者们在此方面开展了广泛的研究^[24,81-83],Ramsey 和 Jensen 发现借助植被指数可有效地对红树林叶面积指数(LAI)和平均冠幅进行监测^[84],LAI 监测主要将遥感图像数据如归一化植被指数(NDVI)、比植被指数(RVI)和垂直植被指数(PVI)与实测 LAI 建立模型。这种方法输入参数单一,不需要复杂的计算,因此成为遥感估算 LAI 的常用方法^[78],但其对红树林群落立体结构特征则无法识别。而激光雷达被学者们公认为监测红树林结构信息最为有效的方法^[78,84],雷达遥感具有侧视特点所使用的波长比光学遥感的要长,具有一定的穿透性,能获得更准确的植被立体信息^[85-87],且其不同波段(例如:X-band、C-band、L-band 等)对植被冠幅、土壤、水面等具有不同的后向散射特征(图 6),雷达遥感依据其后向散射系数的差异特征可对红树林林木高度、平均冠幅、健康状况、退化状况等进行有效监测。

国外应用不同雷达数据(墨西哥:RADARSAT-1 SAR^[88], ENVISAT ASAR^[35]; 泰国: JERS-1 ERS-1 SAR, JERS-1SAR^[89]; 孟加拉共和国, SIR-B^[90]; 印度和孟加拉共和国: ERS-1 SAR^[91]; 印度: ERS-1 SAR ERS-1^[92]; 澳大利亚和南美: ALOS PALSAR^[93]; 澳大利亚: AIRSAR^[94]; 巴西: RADARSAT-1^[95]; 加蓬共和国: JERS-1, ERS-1 SAR^[27]; 马达加斯加: SIR-C^[96]) 在红树林结构特征方面开展了大量实证研究。例如: Simard 等^[27]采用决策树的方法对加蓬沿海植被覆盖类型进行分类,研究 JERS-1 和 ERS-1 雷达数据在测绘大尺度沿海地区的互补性,同时证明在区分高、矮红树林、草树沼泽方面,将雷达数据的 L-频和 C-频波段的组合应用分类比单波段分类精度提高 18%。Proisy^[33]运用基于傅里叶纹理结构的分类方法 FOTO 对法属圭亚那的高生物量红树林区的 IKONOS 影像进行处理,得到林区冠层结构特点;同时,为了提升 FOTO 方法在捕捉 3D 森林结构特性方面的能力,用带有植被冠层高度信息的激光雷达 LIDAR 数据为数据源,改进 FOTO 方法,以便获取更精确的冠层结构信息。Lucas 等在澳大利亚研究发现雷达 C-VV 和 C-HH 数据与红树林结构参数具有较高的相关性,同样的结论在法属圭亚那地区得到证实^[97]。大量研究证明红树林结构与后向散射系数之间的存在

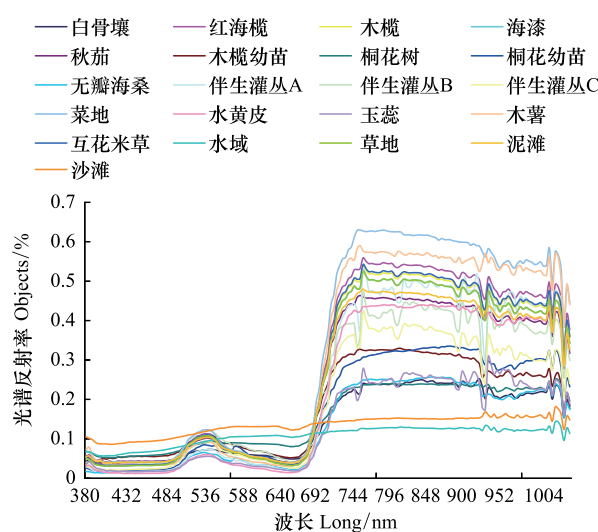


图 5 不同红树林物种、非红树物种及地物光谱特征

Fig. 5 Spectral curves of different mangrove species non-mangrove species and other objects

数据源于 2011 年广西山口、丹兜海红树林及地物 55 个样地,1060 组光谱调查数据,仪器采用 ISI921VF 野外地物光谱辐射计

响应关系^[34,86,97],发现红树林由先锋状态过渡到成熟林状态,利用 L-频和 C-频波段穿透力的差异性(图 6)对其进行监测,而对于同性质、高度、密度相似的红树林则不能在物种水平上进行区分^[89]。为了深入理解雷达电磁波谱入射角与红树林冠层结构之间内在联系机理,研究人员^[34,86-87]对比了澳大利亚 3 个红树林物种不同生长阶段(同质的灰红树林先锋阶段、白红树林占优势群落的成熟红树林和红白退化红树林)雷达监测能力,发现由先锋红树林和成熟红树林组成的红树林能够利用遥感进行有效的监测^[34,86]。综合而言,目前红树林群落结构遥感监测核心是:识别雷达后向散射系数与红树林冠幅、垂直结构之间的关系,建立二者之间的数量模型关系,从而应用 NASA/JPL 航空 SAR (AIRSAR) 的 C-频波段、L-频波段、P-频波段和 C-VV 和 C-HH 数据,对红树林生长状况进行监测。

国内在红树林群落结构特征遥感监测尚未涉足。

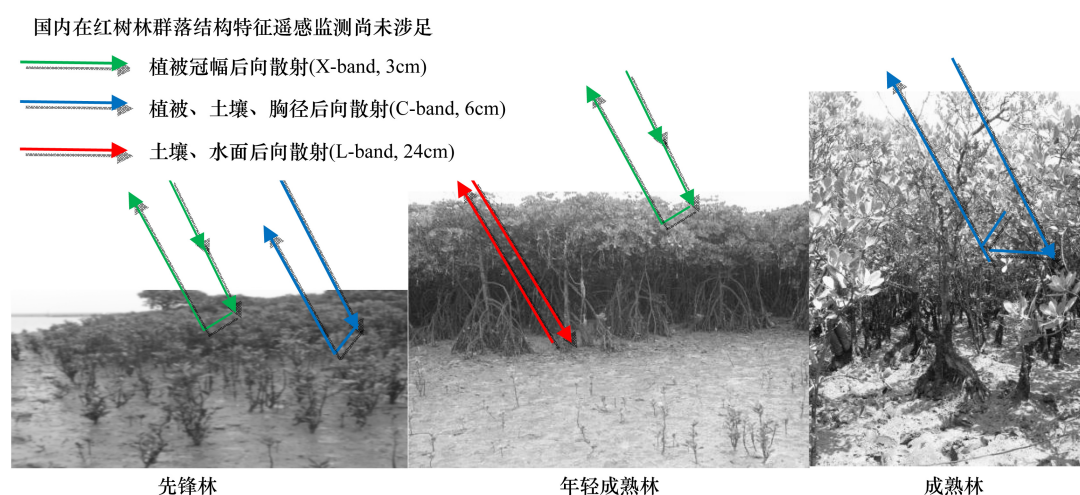


图 6 不同生长状态红树林的雷达后向散射特征^[98]

Fig. 6 Dominating backscatter mechanisms at different stages of mangrove growth depending on bandwidth of the radar beam^[98]

2.4 红树林生物量监测

生物量遥感主要采用光学遥感和雷达遥感两种方法^[10]。在光学遥感中利用 NDVI 指数提取生物量比较常用,基本原理是根据植被对红光波段有着明显的吸收性,不同类型的植被类型由于树叶形状、植珠间隔、含水率以及土壤背景不同而产生差异性变化,进而建立 NDVI 指数与生物量之间的回归模型,目前常用有一阶线性模型、二阶多项式模型^[10,33]。雷达监测生物量的基本原理依据红树林群落在结构、冠幅和植珠直径之间的差异,建立雷达波段后向散射系数与生物量之间的回归模型^[98]。

国外,Proisy 等^[33]利用 IKONOS 影像数据,借助傅里叶纹理结构的分类方法 FOTO 对法属圭亚那的红树林生物量进行了监测,并建立了多元回归模型,取得了较好的效果。但由于光学遥感穿透力不强,其在红树林生物量遥感中应用并不是最佳方法,雷达数据由于其波长比光学遥感的长,具有较强的穿透能力,能够获得红树林植被立体信息,因此,雷达遥感比光学遥感在植被生物量估算方面更具优势^[10]。目前,常用的有四种方法(简单雷达截面方法、RANSON 方法、DOBSON 方法、KASISCHKE 方法)用来建立雷达数据与生物量之间的估算模型^[10]。Mougin 等以法属圭亚那海岸的红树林林区作为研究对象,分析对比了 P-HV (0.44 GHz)、L-HV (1.25 GHz)、C-HV (5.3 GHz) 3 种波段算出的雷达后向散射系数与生物量之间的关系,结果表明:P-HV 与 L-HV 这两个频率的散射系数与红树林总生物量最为相关,理论证明雷达低频系统在红树林生物量估算中的有效性^[87]。Wang 等^[90]采用 $T_t = T_s + T_c + T_d + T_a + T_m$ 模型来表示雷达后向散射系数与红树林生物量之间的关系,其中 T_s 是指表面散射; T_c 是指植被体积散射; T_d 是指树干与地面的双向反射; T_a 是树底部与地面相互合成的反射; T_m 植被和地面的多向反射合成; T_t 是总体的后向反射系数。综合而言,大多研究者普遍认为 SAR 雷达低频段数据是红树林生物量监测最为合适的方法,特别是 P 波段和 L 波段^[98]。国外也有学者尝试将光谱

数据与雷达数据进行多源融合应用于生物量遥感监测, Proisy 等^[33]利用 IKONOS 影像数据、雷达数据进行多源融合后, 其生物量估算不仅包含了光谱特征, 也包含了丰富的结构信息, 使生物量估算精度明显提高。

国内在红树林生物量遥感监测方面研究不多。曹庆先等以 TM 数据作为数据源, 提取了光谱特征及纹理特征, 结合地面调查数据, 建立了北部湾红树林生物量遥感估算模型, 并进一步估算了碳含量^[55]。黎夏等^[53]根据雷达后向散射系数建立了红树林湿地植被生物量的估算模型, 并运用遗传算法确定其中非线性模型的最优参数, 通过对比分析表明, 雷达后向散射系数模型比 NDVI 模型在植被生物量估算中有更高的精度。

2.5 红树林灾害灾情监测

红树林灾害灾情监测包括: 病虫害监测、冰冻灾害监测、风暴潮监测及生物入侵监测。病虫害监测则是红树林健康状况重要的指标, 也是众多灾情中较难进行遥感监测的内容。因此, 病虫害监测成为了众多学者关注的焦点。病虫害遥感监测的基本原理: 红树林受到病虫害侵蚀时光谱特征发生显著改变, 叶子残缺变黄、叶绿素不断减少, 造成绿光波段的反射能力降低, 而对红光的反射能力上升, 近红外的反射能力也显著下降^[10, 99], 遥感监测病虫害就是依据其与健康红树林之间的光谱特征差异进行监测。

Kovacs 等^[37]应用实测 LAI 与 IKONOS 图像计算的 LAI 建立线性回归模型, 对墨西哥 Agua Brava 潟湖红树林健康状况进行监测与评价, 结果表明: 红红树叶面积指数为 2.49, 健康的白红树叶面积指数为 1.74, 不健康的白红树为 0.85, LAI 能够较好地红树林健康状况进行差异化反映。相似结论也被其他学者所证实^[99], LAI 是定量分析红树林生态系统健康及病虫害状况的重要指示指标, 能够借助 LAI 对红树林健康状况及病虫害状况进行评价; Doyle 等应用航空摄影技术评估了飓风对西南佛罗里达地区红树林湿地植被的破坏模式, 并对其破坏程度及状况进行了遥感监测与评价^[38]; Everitt 等应用机载红外视频图像, 对黑红树冰冻灾害的灾情进行了动态监测, 通过全球定位系统和视频图像集成, 最终获得德克萨斯沿岸红树林群落受冰冻灾害影响情况^[36]。Blasco 等^[100]应用 SPOT XS 数据对孟加拉国海岸带红树林受到风暴潮影响的损失进行了评估, 研究指出红树林损害评估的关键点是影像数据时间节点的选择, 研究认为一般在灾害发生后 5—10 周是遥感监测风暴潮损害评估的最佳时机。Sirikulchayanon 等^[101]则应用 TM 数据评估了 2004 年印度洋海啸对攀牙红树林植被的影响及损失评估与监测。也有学者应用遥感数据对红树林恢复状态进行监测, Selvam 等^[102]应用 Landsat TM (IRS 1D LISS III) 对印度 Pichavaram 湿地红树林恢复状态进行了动态监测。综合而言, 灾害灾情监测依据监测目的不同则采用的方法也不尽相同。病虫害监测则多以叶面积指数作为结构性指标, 而冰冻灾害、风暴潮及生物入侵则其基本原理与红树林动态监测相似, 利用红树林种间、种内光谱特征差异进行差异化监测。

郎惠卿^[99]虽然给出了受病虫害影响的红树林光谱与健康红树林之间光谱差异化特征, 但国内系统地将遥感技术应用于红树林灾害灾情监测的研究鲜见, 有待开展此方面的研究。

2.6 红树林湿地动态驱动力遥感监测

红树林湿地动态驱动力是一个复杂的系统, 即包括自然因素(海平面变化、风暴潮、潮汐、沉积环境、水动力...)也包括人为因素(旅游开发、围填海、海塘养殖、滩涂养殖、农业耕种、污染物排放及工业企业开发...) ^[28], 其变化是两者共同作用的结果。遥感技术并不能够全面理解红树林驱动机制, 而是对地面调查起到补充作用。基本原理是利用遥感技术提取空间信息, 结合地面生态、社会调查数据对驱动力进行识别与研究。

Doyle 等^[38]应用航空摄影技术不仅评估了飓风对西南佛罗里达地区红树林湿地植被的影响模式, 也深入分析了其对红树林湿地的驱动机制, 识别了飓风强度对红树林湿地驱动机制。Sirikulchayanon 等^[101]应用 TM 数据评估了海啸对红树林造成的影响。红树林湿地变化不仅是受到自然因素的影响, 而且也受到人为因素的影响。目前, 多数学者更多关注红树林湿地人为驱动机制的研究。Tong 等^[103]应用 SPOT 数据评估了 1995 年至 2001 年间虾塘养殖对湄公河三角洲红树林湿地的影响, 识别了虾塘养殖活动对红树林湿地变化的驱动机制; Vaiphasa 等^[71]借助遥感及地面调查进一步深入分析了虾塘养殖对泰国红树林的影响机制, 结果表明: 虾池底泥废料中含有的化学物质超过了红树林自身的自净能力, 对红树林具有较强的破坏作用。Rakotomav

等^[73]研究了马达加斯加曼戈基河三角洲从 1951 年至 2000 年红树林湿地的变化原因,发现:水文条件变化、沉积作用、潮汐及基底是决定植物演替作用的自然因素,而人类活动(毁林、农业扩张和水产养殖等)则是影响红树林湿地变化的重要因素^[73]。从实证研究内容来看,遥感技术在红树林驱动机制研究方面起到重要的辅助作用,虽然遥感技术可解释资源变化及空间属性的变化,但更深入的驱动机制研究则尚需借助地面生态调查及模型^[28]予以完成。

国内,陈凌云等^[50]以广西红树林为实证研究基地,运用遥感技术识别出红树林湿地变化的主要原因是人类活动(围垦、滨海养殖)的干扰,造成红树林大面积的砍伐,而无人干扰的情况下,红树林在养殖塘排放的富营养化水质中能够迅速恢复。刘凯等在珠江口的研究^[49]也获得相似的结论,该区域红树林变化的主要影响因素是人类活动,人类活动改变了红树林湿地景观结构和功能。毛丽君^[28]则以广东湛江红树林为研究对象,借助遥感技术识别了 1977—1991 年、1991—2000 年、2000—2005 年红树林变化驱动力,发现人类活动对红树林影响在不同阶段均占主导地位,主要受到采海、污染物排放、工业企业开发等人类活动的影响。沿海城市化迅速,城镇用地急剧扩张,城市交通及基础设施的建设使红树林湿地受到不同程度破坏,红树林进一步丧失生境。

遥感技术虽然在红树林驱动力研究中得到了广泛的应用。但目前仍处于辅助研究阶段,而深入的对驱动力机制的理解尚需加强,基于遥感的驱动机制模型尚未建立。

2.7 红树林景观动态遥感识别

景观动态特征能够反映红树林湿地内部各种矛盾和外部作用力相互作用的结果,通过景观动态指数模型,可以揭示红树林湿地内部规律和机制^[28]。其遥感监测的基本原理:在遥感监测红树林动态及种间分类基础上,通过景观模型计算红树林湿地动态特征及群落水平动态特征,获得红树林全局水平及物种水平景观动态变化特征,其对遥感数据源的选择依研究的目的不同而不同;全局水平主要以 TM、SPOT(多光谱)等,空间分辨率大于或等于 10m 遥感影像为主,而物种水平则以高空间分辨率、高光谱光学遥感影像或雷达影像(空间分辨率小于或等于 2.5m)为主。

Seto 等^[104]在识别了越南红树林动态基础上,进一步分析了斑块大小,斑块数,最大斑块指数,平均斑块邻近度指数,景观形状指数,分形维等指数动态变化特征,揭示了红树林景观异质性与健康程度的变化规律。国内学者在红树林景观特征遥感监测方面也有一些相关研究。辛琨等从全局尺度分析了海南东寨岗红树林景观动态变化特征,研究表明:表征面积变化特征的景观相似性指数和平均斑块面积有明显的下降趋势;而表征破碎化程度的单位周长斑块数和边界密度呈上升趋势;形状指标也有下降趋势,表明该区域红树林衰减及破碎化程度升高^[105]。也有学者利用红树林空间质心变化情况识别了红树林空间变化趋势上的差异,并借助动态度模型获得各种景观类型相对变化速率^[28]。

虽然景观动态特征能够在一定程度上反映生态系统变化情况,如:破碎化指数能够作为反映生态系统健康的指标^[105],但其在表征中科学性尚显不足,其多数研究仍停留在反映景观要素的增减、空间转移、扩张及缩减程度等方面^[28],无法真正成为生态系统质量、健康表征的量化指标,无法表征红树林环境要素演变的空间化过程。

2.8 红树林保护与管理

遥感技术在红树林保护与管理方面的应用优势在于:可在短时间内准确地掌握区域红树林湿地的生态特征,把握红树林湿地资源动态变化的情况和趋势,为区域的湿地保护、管理和利用提供一定的科学依据^[22],从而推动红树林湿地的有效保护与管理。在遥感监测红树林动态、种间分类、群落结构、生物量、灾害灾情监测、驱动力、景观动态等多方面的基础上,因地制宜提出保护与管理对策。

Zharikov 等^[106]将澳大利亚昆士兰州亚热带河口系统划分为红树林、潮间带和陆地等 24 个土地覆被类型,应用航片与地理信息系统对野生动物保护和管理潜能进行了研究。Kovacs 等^[37]在墨西哥太平洋沿岸用实测叶面积指数(LAI);应用经过几何校正后的高分辨率 QuickBird 卫星图像进行归一化植被指数 NDVI 以及

比植被指数(RVI)分析,通过回归分析对比实测值与估算出的植被指数,从而对红树林健康状况进行监测以及评价,在此基础上,提出墨西哥太平洋沿岸红树林恢复及保护措施。Ren等^[107]分析了深圳湾在1986—2007年红树林湿地动态基础上,从全局尺度提出红树林、潮汐滩涂及基围3种生态系统的最佳比例为1:2:3,提出了6种可持续发展战略,对维护海岸红树林湿地生态系统的生产力尤其鸟类多样性保护具有重要意义。黎夏等^[53]通过建立红树林湿地植被生物量的估算模型进行遥感估算,进而提出红树林管理对策。国内在海南、福建、广西和广东分别开展了红树林湿地保护与管理方面的研究工作^[28]。

红树林湿地保护与管理是遥感监测红树林生态系统变化的深入研究,主要是对生态系统生物量监测^[107]、健康监测评价^[37]基础上,对红树林湿地进行恢复与保护管理。更加综合全面反映生态系统质量的研究有待开展。

3 我国红树林生态系统变化遥感监测存在的问题

3.1 遥感数据利用程度问题

国内学者目前主要将TM、中巴资源卫星、IKONOS、Quickbird、环境卫星等数据应用于红树林遥感监测^[52-65],虽然雷达数据被应用于红树林生物量估算中来^[53],但在研究的深度与精度尚存在一定不足。主要体现在:国内多数学者仍停留在光学遥感监测红树林动态、分类和制图等阶段。光学遥感由于自身穿透能力弱、空间分辨率限制、光谱特征限制,不能获得红树林全面的生态系统结构信息,在一定程度上已不能满足红树林树高、胸径等结构参数遥感监测的要求。虽然有学者尝试应用雷达数据获得红树林生物量信息,但更深入的生态系统变化信息SAR雷达监测工作尚未开展。国内应在多源数据的利用、融合及监测的广度与深度加强研究工作。

3.2 红树林生态系统变化遥感监测深度问题

国外学者已经应用中高分辨率光学遥感数据、航空数据、SAR雷达数据,在红树林动态监测、种间分类、生产力(生物量)、群落结构信息(LAI、平均冠幅、林木高度、群落结构等)、灾害灾情(病虫害、风暴潮等)、驱动力(海平面变化、人类活动等)、景观动态及红树林湿地保护与管理方面开展了大量的研究工作。虽然国内学者在红树林动态、种间分类、生物量、景观动态、驱动力及湿地保护与管理方面开展了一些卓有成效的研究工作,但相比国外仍存在一定差距,特别是在红树林群落结构信息监测和灾害灾情(病虫害)监测方面,国内相关研究尚未开展。

4 红树林生态系统变化遥感监测应用展望

生态系统变化监测已成为生态研究的热点与重点问题^[8]。在空间上,宏观和微观两个方向不断向多学科交叉拓宽,时间尺度向地质历史时期的长期回溯发展^[9]。地面调查虽然能够全面了解生态系统状况,但其所能达到的时空尺度有限。为提高生态系统变化监测效率,就需要将对地观测技术、空间分析技术和定位调查相结合,发展生态系统定位观测与对地观测数据融合和区域生态系统综合监测方法与模型^[108],为发展红树林生态系统变化遥感监测综合模型,尚需在以下几方面需进一步提升研究力度。

4.1 红树林遥感提取分类体系标准化

分类体系标准化是实现区域综合监测模型的基础。大多数研究依据各自研究目的的不同,分类体系的确立也各不相同,造成数据可对比性不强,因此,在同一地区的红树林遥感监测研究应至少保证一致^[98],这就需要结合多学科的科学家(物理学家,天文学家,环境学家,生物学家,当地社区的专家)建立标准的红树林分类体系,可根据物种分化、林分密度、底栖环境和相关条件(例如,生物量和活力)等^[98]确定规范化、统一化分类体系,保证在同一区域在时空尺度具有可比性。

4.2 分类精度提升

遥感信息提取的精度问题是国内外遥感学者共同面临的挑战,由于红树林的分布和生长状况受到:温度、洋流、盐水、潮汐和底质等影响,加之人为干扰(围垦、旅游开发、滨海养殖、污染物排放等)影响,红树林在面积、结构及形态上会出现较大变化,而遥感的“同物异谱”、“异物同谱”现象更加加剧了红树林分类精度的提

升难度,容易造成漏分、错分等问题^[60]。虽然,国内外学者在分类精度提高方面开展了大量研究工作,从分类方法、辅助信息决策方面取得了一定的研究成果。然而,将现有的调查资料、室内实验与遥感手段进行紧密结合,建立红树林分类、结构信息等方面的遥感估算模型研究尚显薄弱,虽然已有大量生物量遥感估算模型,但在结构信息、健康状况等方面综合估算模型尚未建立,进一步提升分类精度尚需借助精准定位技术及估算模型。

4.3 遥感监测领域拓宽

随着现代遥感技术、模型技术、仿真技术与景观格局分析方法的不断成熟^[8],为红树林生态系统变化时空尺度数据获得提供了重要的技术手段和方法。已往遥感技术在红树林动态监测、种间分类、生产力、群落结构信息、灾害灾情、驱动力、景观动态及红树林湿地保护与管理方面开展了大量的研究工作。但就生态系统变化而言,包括:红树林群落特征参数、环境变化参数以及人类活动信息等,虽然通过光学遥感、雷达及航空数据可直接获得红树林群落特征参数(LAI、NDVI、结构、种类、生物量等)及人类活动信息等,但对红树林湿地环境演变空间化过程尚无法进行遥感识别,部分植被生态学指标(生物多样性、优势度指数等)尚未进行遥感监测,部分生态学指标(生物多样性、优势度指数等)已被证明可应用遥感进行监测^[109],红树林在此方面的研究工作尚需进一步开展。生态系统变化的环境信息空间演化过程遥感监测有待深入探讨。

4.4 红树林遥感监测尺度效应

红树林遥感监测不仅存在数据源的空间分辨率问题,同时部分生态系统变化参数遥感监测也存在尺度效应问题。已往学者多关注遥感数据空间分辨率的选择,满足红树林动态、种间分类、红树林结构信息等方面的监测,而很少研究关注红树林生态系统变化遥感监测的尺度效应问题。例如:红树林景观动态监测、驱动力研究、湿地保护与管理等方面均存在空间尺度效应。另外,植被特征参数(生物多样性、优势度等)^[109]和环境空间演化过程也存在尺度效应问题。而关于此方面的研究尚未涉足,识别遥感监测的尺度效应问题,选择适合的尺度是建立遥感监测综合模型的必由之路。

5 结语

遥感监测是实现红树林保护与管理的重要方法与手段,Claudia 等^[98]系统总结了不同空间分辨率遥感数据在红树林监测中应用现状、理论与方法。总结了中、低、高分辨率光学遥感、航空遥感、SAR 雷达在红树林遥感监测中的应用^[98]。而本文从遥感技术在红树林生态系统变化监测中的应用领域角度,系统总结了国内外红树林生态系统变化遥感监测现状、理论和方法,并指出我国在红树林遥感监测中与国外之间的差距,为红树林遥感监测研究者提供借鉴。

References:

- [1] Lin P. Mangrove. Beijing: Ocean Press, 1984.
- [2] Fan H Q. Mangrove-Environmental Protection Guard at the Coastal Zone. Nanning: Guangxi Science and Technology Press, 2000: 32-37.
- [3] Liao B W, Li M, Chen Y J, Guan W. Techniques on Restoration and Reconstruction of Mangrove Ecosystem in China. Beijing: Science Press, 2010.
- [4] Bayen S, Wurl O, Karupiah S, Sivasothi N, Lee H K, Obbard J P. Persistent organic pollutants in mangrove food webs in Singapore. Chemosphere, 2005, 61(3): 303-313.
- [5] Wang Y T. Research on the Health Assessing System of Chinese Mangrove Ecosystems. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2010: 7-70.
- [6] Duke N C, Meynecke J O, Dittmann S, Ellison A M, Anger K, Berger U, Cannicci S, Diele K, Ewel K C, Field C D, Koedam N, Lee S Y, Marchand C, Nordhaus I, Dahdouh-Guebas F. A world without mangroves? Science, 2007, 317(5834): 41-42.
- [7] Liu L, Fan H Q, Li C G. Tide elevations for four mangrove species along western coast of Guangxi, China. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(3): 690-698.
- [8] Li W H. China's ecology research and its contribution for social development. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(19): 5421-5428.
- [9] Li W H, Zhang B, Xie G D. Research on ecosystem services in China: progress and perspectives. Journal of Natural Resources, 2009, 24(1): 1-10.

- [10] Su X, Zhao D Z, Huang F R, Wu T, Wang X. Development of mangrove monitoring technology using high spatial-resolution satellite images. *Journal of Tropical Oceanography*, 2011, 30(3): 38-45.
- [11] Mitsch W J, Wu X Y, Naim P W. Grating and restoring wetlands. *Soil Science*, 1998, 48(12): 1019-1030.
- [12] Lyon B G. Remote sensing of sediment and wetlands in Lake Erie // Lyon J G, McCarthy J, eds. *Wetland and Environment Applications of GIS*. Boca Raton: CRC Press, 1995: 107-204.
- [13] Lorenzo E N, de Jesus B R, Jara R S. Assessment of mangrove forest deterioration in Zamboanga Peninsula, Philippines using Landsat MSS data // *Proceedings of the 13th International Symposium on Remote Sensing of the Environment*, 1979: 1737-1745.
- [14] FAO. Land use in Nigeria. By Allen P. E. T. Field document NIR/77/009. Ibadan, Nigeria, 1980.
- [15] Patterson S G, Rehder J B. An assessment of conversion and loss of mangroves using remote sensing imagery on Marco Island, Florida // *ASPRS. Proceedings American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, 1985: 728-735.
- [16] Blasco F, Lavenu F, Baraza J. Remote sensing data applied to mangroves of Kenya coast // *Proceedings 20th International Symposium on Remote Sensing of the Environment*, 1986, 3: 1465-1480.
- [17] Chaudhury M U. Digital analysis of remote sensing data for monitoring the ecological status of the mangrove forests of Sunderbans in Bangladesh // *Proceedings 23rd International Symposium on Remote Sensing of the Environment*, 1990: 493-497.
- [18] Everitt JH, Judd FW. Using remote sensing techniques to distinguish and monitor Black Mangrove (*Avicennia germinans*). *Journal of Coastal Research*, 1989, 5(4): 737-745.
- [19] Long B G, Skewes T D. GIS and remote sensing improves mangrove mapping // *Proceedings of the 7th Australasian Remote Sensing Conference*. Melbourne, 1994: 545-550.
- [20] Mas J F. Monitoring land-cover changes: a comparison of change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, 20(1): 139-152.
- [21] Li C G. Review on Mangrove Mapping Base on Remote Sensing. *Central South Forest Inventory and Planning*, 2002, 2(4): 52-58.
- [22] Green E P, Clark C D, Mumby P J, Edwards A J, Ellis A C. Remote sensing techniques for mangrove mapping. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(5): 935-956.
- [23] Dutrieux E, Denis J, Populus J. Application of SPOT data to a base-line ecological study of the Mahakam Delta mangroves (East Kalimantan, Indonesia). *Oceanologica Acta*, 1990, 13(3): 317-326.
- [24] Jensen J R, Hongyue L, Yang X H, Ramsey E, Davis B A, Thoenke C W. The measurement of mangrove characteristics in southwest Florida using SPOT multispectral data. *Geocarto International*, 1991, 6(2): 13-21.
- [25] Ramirez-Garcia P, Lopez-Blanco J, Ocana D. Mangrove vegetation assessment in the Santiago River mouth, Mexico, by means of supervised classification using Landsat TM imagery. *Forest Ecology and Management*, 1998, 105(1/3): 217-229.
- [26] Rogers D J, Hay S I, Packer M J, Wint G R W. Mapping land-cover over large areas using multispectral data derived from the NOAA-AVHRR: a case study of Nigeria. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(15): 3297-3303.
- [27] Simard M, de Grandi G E, Saatchi S, Mayaux P. Mapping tropical coastal vegetation using JERS-1 and ERS-1 radar data with a decision tree classifier. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(7): 1461-1474.
- [28] Mao L J. Assessment of Changes in Mangrove Forest Patterns from Multitemporal Remotely Sensed Imagery over Zhanjiang City, Guangdong Province. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2011.
- [29] Behara S, Khairul A M, Indra F I, Monhd-lokman H, Farid D G. Assessment of mangrove vegetation based on remote sensing and ground-truth measurements at Tumpat, Kelantan Delta, East Coast of Peninsular Malaysia. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(6): 1635-1650.
- [30] 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.
- [31] Kovacs J M, DeSantjago F F, Bastien J, France P. An assessment of mangroves in Guinea, West Africa, using a field and remote sensing based approach. *Wetlands*, 2010, 30(4): 773-752.
- [32] Shah D G, Anjali B, Deshmukh B, Nayak S R, Singh H S, Patel B H. Zoning and monitoring dominant mangrove communities of a part of the marine national park, Gulf of kachchh. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2005, 33(1): 155-163.
- [33] Proisy C, Couteron P, Fromard F. Predicting and mapping mangrove biomass from canopy grain analysis using Fourier-based textural ordination of IKONOS images. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 109(3): 379-392.
- [34] Proisy C, Mougin E, Fromard F, Trichon V, Karam M A. On the influence of canopy structure on the radar backscattering of mangrove forests. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(20): 4197-4210.
- [35] Kovacs J M, Vandenberg C V, Wang J F, Flores-Verdugo F. The use of Multipolarized space borne SAR backscatter for monitoring the health of a degraded mangrove Forest. *Journal of Coastal Research*, 2008, 24(1): 248-254.

- [36] Everitt J H, Judd F W, Escobar D E, Davis M R. Integration of remote sensing and spatial information technologies for mapping black mangrove on the Texas Gulf Coast. *Journal of Coastal Research*, 1996, 12(1): 64-69.
- [37] Kovacs J M, Wang J F, Flores-verdugo F. Mapping mangrove leaf area index at the species level using IKONOS and LAI-2000 sensors for the Agua Brava Lagoon, Mexican Pacific. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2005, 62(1/2): 377-384.
- [38] Doyle T W, Krauss K W, Wells C J. Landscape analysis and pattern of hurricane impact and circulation on mangrove Forests of the Everglades. *Wetlands*, 2009, 29(1): 44-53.
- [39] Cohen M L C, Behling H, Lara R J, Smith C B, Matos H R S, Vedel V. Impact of sea-level and climatic changes on the Amazon coastal wetlands during the late Holocene. *Vegetation History and Archaeobotany*, 2009, 18(6): 425-439.
- [40] Lin R S, Lin M J, Teng J H, Zhang W Y. Remote sensing Survey and mapping of mangroves in Western Xiamen Harbour. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 1994, 13(3): 297-302.
- [41] Wei X F, Lin M J, Teng J H, Chen S G, Yang X Q. Designing and mapping dynamic charts by means of remote sensing for mangrove region-Test area in Qinglan Bay, Hainan island. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 1995, 14(3): 226-234.
- [42] Teng J H, Liu Y, Gu D Y. Intelligent remote sensing classification of mangroves. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 1997, 16(3): 331-338.
- [43] Li C G, Tan B Z. Studies on the methods of mangrove inventory based on RS, GPS and GIS. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(2): 215-221.
- [44] Li C G, Tan B Z. A Study on Remote Sensing Image Processing Approaches for Mangrove Inventory. *Central South Forest Inventory and Planning*, 2003, 22(2): 2-7.
- [45] Li T H, Zhao Z J, Han P. Detection and analysis of mangrove changes with multi-temporal remotely sensed imagery in the Shenzhen river estuary. *Journal of Remote Sensing*, 2002, 6(5): 364-369.
- [46] Deng G F. Application of remote sensing technique to the mangrove resource investigation. *Central South Forest Inventory and Planning*, 2002, 21(1): 27-28.
- [47] Li S H, Wang H, Jiang X W. Application of CBERS-1 CCD in the mangrove remote sensing survey. *Marine Science Bulletin*, 2003, 22(6): 30-35.
- [48] Yu X, Zhao D Z, Zhang F S. The application development of remote sensing in mangrove environment search. *Marine Environmental Science*, 2005, 24(1): 76-80.
- [49] Liu K, Li X, Wang S G, Zhong K W, Qian J P. Monitoring of the changes of mangrove wetland around the Zhujiang estuary in the past two decades by remote sensing. *Tropical Geography*, 2005, 25(2): 111-116.
- [50] Chen L Y, Hu Z N, Zhong S Q, Liang W, Shi J L. Applying the remote sensing information to analyze Guangxi mangrove development variety characteristic. *Guangxi Sciences*, 2005, 12(4): 308-311.
- [51] Fang S H, Dian Y Y, Zhou Y. Classification of Mangroves based on IKONOS data. *Journal of Geomatics*, 2005, 30(4): 5-6.
- [52] Yu X, Zhao D Z, Zhang F S. Research on mangrove hyperspectrum analysis technology. *Journal of Binzhou University*, 2006, 22(6): 53-56.
- [53] Li X, Ye J A, Wang S G. Estimating mangrove wetland biomass using radar remote sensing. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(3): 387-396.
- [54] Zhang W, Lan Z Y, Li Z, Zhang D S. Preprocessing of QuickBird remote sensing image for mangrove study. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2006, 33(4): 77-81.
- [55] Cao Q X. The Estimation of Mangrove Biomass and Carbon Storage Using Remote Sensing Data in Beibu Gulf Coast. Beijing: Chinese Academy of Forest, 2010.
- [56] Li M S, Tan Y, Pan J, Peng S K. Modeling Forest Aboveground Biomass by Combining the Spectrum, Textures with Topographic Features. *Remote Sensing Information*, 2006, (6): 6-9.
- [57] Weng Q, Lu C Y. The development of application of satellite remote-sensing in mangrove environment search. *Journal of Sanming University*, 2006, 23(2): 141-147.
- [58] Yu X, Zhao D Z, Zhang F S, Xiao Z F. Study on remote sensing image NN classification techniques of mangrove landscape character. *Marine Environmental Science*, 2007, 26(6): 576-579.
- [59] Zhang H Q, Zhao F, Cui L J. A study on dynamic monitoring of mangrove wetland restoration using remote sensing techniques. *Forest Research*, 2008, 21(S1): 32-36.
- [60] Li W, Cui L J, Zhang M Y, Wang Y F. Comment on application of remote sensing technology to the study of mangrove wetland. *Forest Inventory and Planning*, 2008, 33(5): 1-7.
- [61] Li J J. Research on the Spatial Structure Optimization of Mangrove Ecosystem in Zhejiang, Guangdong. Changsha: Central South University of Forest and Technology, 2010.

- [62] Zhao Y L. The remote sensing dynamic monitoring of the evolution of shoreline and mangrove wetlands in the Zhujiang river estuary in the past 30 years. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2010, 86(S1): 178-184.
- [63] Li S S, Tian Q J. Mangrove extraction mode based on HJ multispectral remote sensing in Beibu Gulf. *Scientia Sinica Mathematica*, 2011, 41(S1): 153-165.
- [64] Cao Q X, Xu D P, Ju H B. Biomass estimation of five kinds of mangrove community in Beibu Gulf based on remote sensing. *Guangxi Sciences*, 2011, 18(3): 289-293.
- [65] Wu P Q, Ma Y, Li X M, Yu G H. Remote sensing monitoring of the mangrove forests resources of Guangdong Province. *Journal of Marine Sciences*, 2011, 29(4): 16-24.
- [66] Chen Y M, Yang Y. Application of remote sensing to mangrove resource monitoring: a case study of Huizhou city. *Tropical Geography*, 2011, 31(4): 373-376.
- [67] Zhang X H. Remote sensing information extraction of mangrove based on knowledge and rules. *Journal of Nanjing University of Information Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2011, 3(4): 341-345.
- [68] Laba M, Smith S D, Degloria S D. Landsat-based land cover mapping in the lower Yuna River watershed in the Dominican Republic. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(14): 3011-3025.
- [69] Wang Y Q, Bonyne G, Nugranad J, Traber M, Ngusuru A, Tobey J, Hale L, Bowen R, Makota V. Remote sensing of mangrove change along the Tanzania coast. *Marine Geodesy*, 2003, 26(1/2): 35-48.
- [70] James G K, Adegokea J O, Sabab E, Nwilo P, Akinyede J. Satellite-based assessment of the extent and changes in the mangrove ecosystem of the Niger Delta. *Marine Geodesy*, 2007, 30(3): 249-267.
- [71] VaiPhasa C, Boer W F, Skidmore A K, Panitehart S, VaihPasa T, Banirongrugsa N, Santitanmont P. Impact of solid shrimp pond waste materials on mangrove growth and mortality: a case study from Pak Phanang, Thailand. *Hydrobiologia*, 2007, 591(1): 47-57.
- [72] Giri C, Pengra B, Zhu Z L, Singh A, Tieszen L L. Monitoring mangrove forest dynamics of the Sundarbans in Bangladesh and India using multi-temporal satellite data from 1973—2000. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 73(1/2): 91-100.
- [73] Rakotomavo A, Fromard F. Dynamics of mangrove forests in the Mangoky river delta, Madagascar, under the influence of natural and human factors. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(6): 1161-1169.
- [74] Kairo J G, Kiviyatu B, Koedam N. Application of remote sensing and GIS in the management of mangrove forests within and adjacent to Kiunga marine protected area, Lamu, Kenya. *Environment, Development and Sustainability*, 2002, 4(2): 153-166.
- [75] Kay R J, Hick P T, Houghton H J. Remote sensing of kimberley rainforests // McKenzie N K, Johnston R B, Kendrick P G, eds. *Kimberley Rainforests*. Surr: Surrey Beatty, 1991: 41-51.
- [76] Neukermans G, Dahdouh-Guebas F, Kairo J G, Koedam N. Mangrove species and stand mapping in Gazi bay (Kenya) using Quickbird satellite imagery. *Journal of Spatial Science*, 2008, 53(1): 75-86.
- [77] Wang L, Sousa W P, Gong P. Integration of object-based and pixel-based classification for mapping mangroves with IKONOS imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(24): 5655-5668.
- [78] Held A, Ticehurst C, Lymburner L, Williams N. High resolution mapping of tropical mangrove ecosystems using hyperspectral and radar remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(13): 2739-2759.
- [79] Wang L, Sousa W P, Gong P, Biging G S. Comparison of IKONOS and QuickBird images for mapping mangrove species on the Caribbean coast of Panama. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91(3/4): 432-440.
- [80] Liu Z G, Li J, Lim B L, Seng C Y, Inbaraj S. Object-based classification for mangrove with VHR remotely sensed image. *Proceedings-Spie the International Society for Optical Engineering*, 2007, 6752(3): 83-87.
- [81] Gao J. A hybrid method toward accurate mapping of mangroves in a marginal habitat from SPOT multispectral data. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(10): 1887-1899.
- [82] Green E P, Mumby P J, Edwards A J, Clark C D, Ellis A C. The assessment of mangrove areas using high resolution multispectral airborne imagery. *Journal of Coastal Research*, 1998, 14(2): 433-443.
- [83] Rasolofoharinoro M, Blasco F, Bellan M F, Aizpuru M, Gauquelin T, Denis J. A remote sensing based methodology for mangrove studies in Madagascar. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(10): 1873-1886.
- [84] Ramsey E W, Jensen J R. Remote sensing of mangrove wetlands: relating canopy spectra to site-specific data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1996, 62(8): 939-948.
- [85] Mumby P J, Green E P, Edwards A J, Clark C D. The cost-effectiveness of remote sensing for tropical coastal resources assessment and management. *Journal of Environmental Management*, 1999, 55(3): 157-166.
- [86] Proisy C, Mougin E, Fromard F, Karam M A. Interpretation of polarimetric radar signatures of mangrove forests. *Remote Sensing of Environment*,

2000, 71(1): 56-66.

- [87] Mougin E, Proisy C, Marty G, Fromard F, Puig H, Betoulle J L, Rudant J P. Multifrequency and multipolarization radar backscattering from mangrove forests. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(1): 94-102.
- [88] Kovacs J M, Vandenberg C V, Flores-Verdugo F. Assessing fine beam RADARSAT-1 backscatter from a white mangrove (*Laguncularia racemosa* (Gaertner)) canopy. *Wetlands Ecology and Management*, 2006, 14(5): 401-408.
- [89] Giri C P, Delsol, J P. Mangrove forest cover mapping in Phangnga Bay, Thailand, Using SPOT HRV and JERS-1 data in conjunction with GIS. In *Proceedings of International Seminar on Remote Sensing for Coastal Zone and Coral Reef Applications*, Bangkok, Thailand, 25 October-1 November 1993.
- [90] Wang Y, Imhoff M L. Simulated and observed L-HH radar backscatter from tropical mangrove forests. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14(15): 2819-2828.
- [91] Dwivedi R S, Rao B R M, Bhattacharya S. Mapping wetlands of the Sundaban Delta and its environs using ERS-1 SAR data. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, 20(11): 2235-2247.
- [92] Rao B R M, Dwivedi R S, Kushwaha S P S, Bhattacharya S N, Anand J B, Dasgupta S. Monitoring the spatial extent of coastal wetlands using ERS-1 SAR data. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, 20(13): 2509-2517.
- [93] Lucas R M, Carreiras J, Proisy C, Bunting P. ALOS PALSAR applications in the Tropics and Subtropics; characterisation, mapping and detecting change in forests and coastal wetlands // *Proceedings of Second ALOS PI Symposium*, Rhodes, Greece, 3-7 November 2008. Available online: http://amapmed.free.fr/AMAPMED_fichiers/Publications_fichiers/Lucas08.pdf (accessed on 30 October 2009).
- [94] Hernández Cornejo R, Koedam N, Ruiz Luna A, Troell M, Dahdouh-Guebas F. Remote sensing and ethnobotanical assessment of the mangrove forest changes in the Navachiste-San Ignacio-Macapule Lagoon Complex, Sinaloa, Mexico. *Ecology and Society*, 2005, 10(1): 1-19.
- [95] Souza Filho P W M, Paradella W R. Recognition of the main geobotanical features along the Bragança mangrove coast (Brazilian Amazon Region) from Landsat TM and RADARSAT-1 data. *Wetlands Ecology and Management*, 2002, 10(2): 121-130.
- [96] Pasqualini V, Iltis J, Dessay N, Lointier M, Guelorget O, Polidori L. Mangrove mapping in North-Western Madagascar using SPOT-XS and SIR-C radar data. *Hydrobiologia*, 1999, 413: 127-133.
- [97] Lucas R M, Ellison J C, Mitchell A, Donnelly B, Finlayson M, Milne A K. Use of stereo aerial photography for quantifying changes in the extent and height of mangroves in tropical Australia. *Wetlands Ecology and Management*, 2002, 10(2): 159-173.
- [98] Claudia K, Andrea B, Steffen G, Tuan Vo Q, Stefan D. Remote sensing of mangrove ecosystems: a review. *Remote Sensing*, 2011, 3(5): 878-928.
- [99] Lang H Q. *Protection and Research of Wetlands in China*. Shanghai: East China Normal University Press, 1998: 415-419.
- [100] Blasco F, Bellan M F, Chaudhury M U. Estimating the extent of floods in Bangladesh using SPOT Data. *Remote Sensing of Environment*, 1992, 39(3): 167-178.
- [101] Sirikulchayanon P, Sun W X, Oyana T J. Assessing the impact of the 2004 tsunami on mangroves using remote sensing and GIS techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(12): 3553-3576.
- [102] 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.
- [103] Tong P H S, Auda Y, Populus J, Aizpura M, Habshi A A, Blasco F. Assessment from space of mangroves evolution in the Mekong Delta, in relation to extensive shrimp farming. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(21): 4795-4812.
- [104] Seto K C, Fragkias M. Mangrove conversion and aquaculture development in Vietnam: a remote sensing-based approach for evaluating the Ramsar Convention on Wetlands. *Global Environmental Change*, 2007, 17(3/4): 486-500.
- [105] Xin K, Huang X. Landscape change of the mangrove forest in Dongzhai Harbor of Hainan and its driving forces. *Wetland Science and Management*, 2009, 5(2): 46-47.
- [106] Zharikov Y, Skilleter G A, Loneragan N R, Taranto T, Cameron B E. Mapping and characterising subtropical estuarine landscapes using aerial photography and GIS for potential application in wildlife conservation and management. *Biological Conservation*, 2005, 125(1): 87-100.
- [107] Ren H, Wu X M, Ning T Z, Huang G, Wang J, Jian S G, Lu H F. Wetland changes and mangrove restoration planning in Shenzhen Bay, Southern China. *Landscape and Ecological Engineering*, 2011, 7(2): 241-250.
- [108] Fu B J. Trends and priority areas in ecosystem research of China. *Geographical Research*, 2010, 29(3): 383-396.
- [109] Xu W T, Wu B F. Progress on measuring forest biodiversity with remote sensing technique. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(5): 1199-1204.

参考文献:

- [1] 林鹏. 红树林. 北京: 海洋出版社, 1984.

- [2] 范航清. 红树林海岸环保卫士. 南宁: 广西科学技术出版社, 2000: 32-37.
- [3] 廖宝文, 李玫, 陈玉军, 管伟. 中国红树林恢复与重建技术. 北京: 科学出版社, 2010.
- [5] 王玉图. 中国红树林生态系统健康评价指标体系研究. 北京: 中国科学院, 2010: 7-10.
- [7] 刘亮, 范航清, 李春干. 广西西端海岸四种红树植物天然种群生境高程. 生态学报, 2012, 32(3): 690-698.
- [8] 李文华. 我国生态学研究及其对社会发展的贡献. 生态学报, 2011, 31(19): 5421-5428.
- [9] 李文华, 张彪, 谢高地. 中国生态系统服务研究的回顾与展望. 自然资源学报, 2009, 24(1): 1-10.
- [10] 苏岫, 赵冬至, 黄凤荣, 吴涛, 王祥. 基于高空间分辨率的红树林卫星遥感监测技术进展. 热带海洋学报, 2011, 30(3): 38-45.
- [21] 李春干. 红树林遥感成图研究综述. 中南林业调查规划, 2002, 2(4): 52-58.
- [28] 毛丽君. 基于遥感的广东湛江红树林湿地动态变化研究. 南京: 南京林业大学, 2011.
- [40] 林荣盛, 林敏基, 滕骏华, 章文毅. 厦门西港红树林的卫星遥感测绘. 台湾海峡, 1994, 13(3): 297-302.
- [41] 魏筱芳, 林敏基, 滕骏华, 陈世敢, 杨肖琪. 红树林区遥感测绘动态图的编绘与设计——以海南岛清澜港为实验区. 台湾海峡, 1995, 14(3): 226-234.
- [42] 滕骏华, 刘宇, 顾德宇. 红树林遥感智能分类方法研究. 台湾海峡, 1997, 16(3): 331-338.
- [43] 李春干, 谭必增. 基于“3S”的红树林资源调查方法研究. 自然资源学报, 2003, 18(2): 215-221.
- [44] 李春干, 谭必增. 红树林资源调查的遥感图像处理研究方法. 中南林业调查规划, 2003, 22(2): 24-27.
- [45] 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.
- [46] 邓国芳. 遥感技术在红树林资源调查中的应用. 中南林业调查规划, 2002, 21(1): 27-28.
- [47] 李四海, 王华, 蒋兴伟. 中巴资源卫星在红树林遥感调查中的应用研究. 海洋通报, 2003, 22(6): 30-35.
- [48] 于祥, 赵冬至, 张丰收. 遥感技术在红树林生态监测与研究中的应用进展. 海洋环境科学, 2005, 24(1): 76-80.
- [49] 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.
- [50] 陈凌云, 胡自宁, 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.
- [51] 方圣辉, 佃袁勇, 周源. 基于 IKONOS 数据的红树林分类方法研究. 测绘信息与科学, 2005, 30(4): 5-6.
- [52] 于祥, 赵冬至, 张丰收, 肖忠峰. 红树林高光谱分析技术研究. 滨州大学学报, 2006, 22(6): 53-56.
- [53] 黎夏, 叶嘉安, 王树功. 红树林湿地植被生物量的雷达遥感估算. 遥感学报, 2006, 10(3): 387-396.
- [54] 张伟, 兰樟仁, 李峥, 张东水. 红树林卫星遥感影像快鸟数据预处理方法. 福建林业科技, 2006, 33(4): 77-81.
- [55] 曹庆先. 北部湾沿海红树林生物量和碳贮量的遥感估算. 北京: 中国林业科学研究院, 2010.
- [56] 李明诗, 谭莹, 潘洁, 彭世揆. 结合光谱、纹理及地形特征的森林生物量建模研究. 遥感信息, 2006, (6): 6-9.
- [57] 翁强, 卢昌义. 卫星遥感技术在红树林生态监测与研究中的应用进展. 三明学院学报, 2006, 23(2): 141-147.
- [58] 于祥, 赵冬至, 张丰收, 肖忠峰. 基于神经网络的红树林景观特性遥感提取技术研究. 海洋环境科学, 2007, 26(6): 576-579.
- [59] 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.
- [60] 李伟, 崔丽娟, 张曼胤, 王义飞. 遥感技术在红树林湿地研究中的应用述评. 林业调查规划, 2008, 33(5): 1-7.
- [61] 李建军. 广东湛江红树林生态系统空间结构优化研究. 长沙: 中国林业科技大学, 2010.
- [62] 赵玉灵. 珠江口地区近 30 年海岸线与红树林湿地遥感动态监测. 国土资源遥感, 2010, 86(增刊): 178-184.
- [63] 李姗姗, 田庆久. 北部湾红树林的 HJ 星多光谱遥感提取模式. 中国科学: 信息科学, 2011, 41(增刊): 153-165.
- [64] 曹庆先, 徐大平, 鞠洪波. 北部湾沿海 5 种红树林群落生物量的遥感估算. 广西科学, 2011, 18(3): 289-293.
- [65] 吴培强, 马毅, 李晓敏, 余国华. 广东省红树林资源变化遥感监测. 海洋学研究, 2011, 29(4): 16-24.
- [66] 陈一萌, 杨阳. 惠州红树林资源的遥感监测应用研究. 热带地理, 2011, 31(4): 373-376.
- [67] 张雪红. 基于知识与规则的红树林遥感信息提取. 南京信息工程大学学报: 自然科学版, 2011, 3(4): 341-345.
- [99] 郎惠卿. 中国湿地研究和保护. 上海: 华东师范出版社, 1998: 415-419.
- [105] 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): 46-47.
- [108] 傅伯杰. 我国生态系统研究的发展趋势与优先领域. 地理研究, 2010, 29(3): 383-396.
- [109] 徐文婷, 吴炳方. 遥感用于森林生物多样性监测的进展. 生态学报, 2005, 25(5): 1199-1204.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 15 Aug. ,2013(Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- A review on the application of remote sensing in mangrove ecosystem monitoring SUN Yongguang, ZHAO Dongzhi, GUO Wenyong, et al (4523)
- Urban metabolism process based on emergy synthesis: Theory and method LIU Gengyuan, YANG Zhifeng, CHEN Bin (4539)
- Theoretical considerations on ecological civilization development and assessment ZHAO Jingzhu (4552)

Autecology & Fundamentals

- Assemblage composition and distribution of meiobenthos in the Yangtze Estuary and its adjacent waters in autumn-winter season Yu Tingting, XU Kuidong (4556)
- Ecological distribution and nutrient limitation of phytoplankton in adjacent sea of Guanhe Estuary in spring FANG Tao, HE Xinran, FENG Zhihua, et al (4567)
- The distribution of urea concentrations and urease activities in the coastal waters of Hainan Island during the spring HUANG Kaixuan, ZHANG Yun, OU Linjian, et al (4575)
- Effects of simulated acid rain on growth and bleeding sap amount of root in *Quercus mongolica* LIANG Xiaoqin, LIU Jian, DING Wenjuan, et al (4583)
- Allelopathic effects of organic acid allelochemicals on melon ZHANG Zhizhong, SUN Zhihao, CHEN Wenhui, et al (4591)
- Fraction changes of oxidation organic carbon in paddy soil and its correlation with CH₄ emission fluxes WU Jiamei, JI Xionghui, HUO Lianjie, et al (4599)
- Changes of soil nitrogen types and nitrate accumulation in vegetables with single or multiple application of dicyandiamide WANG Huangping, ZHANG Qing, WENG Boqi, et al (4608)
- Comparison of isolation rate of mycobacteriophage in the different type soils XU Fengyu, SU Shengbing, MA Hongxia, et al (4616)
- Effects of different acidity acid rain on yield, protein and starch content and components in two wheat cultivars BIAN Yajiao, HUANG Jie, SUN Qisong, et al (4623)
- The causes of *Gentiana straminea* Maxim. seeds dormancy and the methods for its breaking LI Bingbing, WEI Xiaohong, XU Yan (4631)
- Physiological responses of four golden-leaf trees to SO₂ stress CHONG Peifang, SU Shiping (4639)
- Influence of endosulfan and its metabolites on enzyme activities in purple soil XIONG Bailian, ZHANG Jinzhong, DAI Juan, et al (4649)

Population, Community and Ecosystem

- Seasonal dynamics of food web energy pathways at the community-level XU Jun, ZHOU Qiong, WEN Zhourui, et al (4658)
- Population dynamics of *Niviventer confucianus* in Thousand Island Lake ZHANG Xu, BAO Yixin, LIU Jun, et al (4665)
- Soil ecological stoichiometry under different vegetation area on loess hilly-gully region ZHU Qiulian, XING Xiaoyi, ZHANG Hong, et al (4674)
- Adaptation strategies of reproduction of plant community in response to grassland degradation and artificial restoration LI Yuanyuan, DONG Shikui, ZHU Lei, et al (4683)
- Effect of different *Cunninghamia lanceolata* plantation soil qualities on soil microbial community structure LIU Li, XU Mingkai, WANG Silong, et al (4692)
- Effects of different maize hybrids (inbreds) on the growth, development and population dynamics of *Rhopalosiphum maidis* Fitch ZHAO Man, GUO Xianru, LI Weizheng, et al (4707)
- Effects of forest canopy structure on understory vegetation characteristics of Funiu Mountain Nature Reserve LU Xunling, DING Shengyan, YOU Li, et al (4715)

- Influence of restoring cropland to grassland on dung beetle assemblages in Wuchuan County, Inner Mongolia, China LIU Wei, MEN Lina, LIU Xinmin (4724)
- Cu and nutrient deficiency on different effects of growth, tolerance and mineral elements accumulation between two *Elsholtzia haichouensis* populations KE Wenshan, CHEN Shijian, XIONG Zhiting, et al (4737)
- Measurement and retrieval of leaf area index using remote sensing data in Kanas National Nature Reserve, Xinjiang ZAN Mei, LI Dengqiu, JU Weimin, et al (4744)
- Landscape, Regional and Global Ecology**
- An spatial ecosystem services approach based on LUCC: a case study of Ganzhou district of Zhangye City LIANG Youjia, XU Zhongmin, ZHONG Fanglei, et al (4758)
- Spatiotemporal characteristics of *Spartina alterniflora* marsh change in the coastal wetlands of Yancheng caused by natural processes and human activities ZHANG Huabing, LIU Hongyu, Hou Minghang (4767)
- Process analysis and evaluation of wetlands degradation based on PCA in the lakeside of Napahai, Northwest Yunnan Plateau SHANG Wen, YANG Yongxing, HAN Dayong (4776)
- On eco-security evaluation in the Tumen River region based on RS&GIS NAN Ying, JI Zhe, FENG Hengdong, et al (4790)
- Evaluation and simulation of historical range of variability of forest landscape pattern in Huzhong area WU Zhifeng, LI Yuehui, BU Rencang, et al (4799)
- Effects of precipitation timing on aboveground net primary productivity in inner mongolia temperate steppe GUO Qun, HU Zhongmin, LI Xuanran, et al (4808)
- Research Notes**
- Litter production and decomposition of different forest ecosystems and their relations to environmental factors in different climatic zones of mid and eastern China WANG Jianjian, WANG Yongji, LAI Liming, et al (4818)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的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;新书评价和学术、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,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 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

本期责任副主编 赵景柱

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 33 卷 第 15 期 (2013 年 8 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 15 (August, 2013)

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	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
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:100717	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@csppg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@csppg.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 90.00 元