

doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2020.05.001

1990—2019 年中国红树林变迁遥感监测与景观格局变化分析

王 浩^{1,2}, 任广波^{2*}, 吴培强², 刘爱超³, 潘良浩⁴, 马云梅^{2,5}, 马 毅^{1,2}, 王锦锦⁶

(1. 山东科技大学, 山东 青岛 266590; 2. 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061;
3. 国家海洋局北海预报中心, 山东 青岛 266061; 4. 广西科学院广西红树林研究中心, 广西 北海 536000;
5. 内蒙古师范大学地理科学学院, 内蒙古 呼和浩特 010010; 6. 上海欧比特航天科技有限公司, 上海 200232)

摘 要: 为监测近期中国红树林的空间分布状况和分析近 30 年我国红树林演变趋势, 本文以 1990 年、2000 年和 2010 年 3 个时期 Landsat TM 以及 2019 年 Landsat OLI 和 GF-1 WFV 卫星遥感影像为数据源, 基于 SVM 结合目视解译的方法完成了红树林信息提取, 利用动态度模型、质心模型和景观格局指数开展了相关分析。本研究利用红树林与盐沼植物的物候差异来解决两者混生对红树林提取精度的影响。研究结果表明: (1) 近 30 年来, 我国红树林分布面积总体呈缓慢增加趋势, 2019 年我国红树林面积为 21 612.9 hm², 相比 1990 年共增加 6 107.7 hm², 2010—2019 年全国红树林增长速率最高, 达到 1.72%。全国红树林分布重心向东北方向偏移, 初步表明红树林分布有向寒冷区域偏移的趋势; (2) 近 30 年来, 我国红树林趋于破碎化, 红树林斑块形状越来越复杂且内部连通性降低; (3) 设立红树林保护区对红树林保护起到了主导作用, 2019 年国家级和省级保护区内红树林面积在全国占比达到 64.63%。从 2000 年开始, 国家级保护区增长变缓, 省级保护区成为红树林的增长活力点。

关键词: 红树林; 遥感; 时空变化; 景观格局指数

中图分类号: X87 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-2029 (2020) 05-0001-12

红树林自然分布于热带和亚热带海岸潮间带, 受周期性潮水浸淹, 是以红树植物为主的常绿灌木或乔木组成的潮滩湿地木本生物群落, 是四大海洋自然生态系统中生产力最高的生态系统^[1-3]。红树林在防风固田、促淤保滩、抵御海啸和台风、保护生物多样性等方面起着重要的作用, 同时又可以当地居民创造巨大的经济效益, 例如食物、工业、药用、水产等方面^[4-6]。然而, 随着人类社会的不断发展, 海岸带区域成为了人口、经济、财富聚集度最高的区域, 有限的自然资源与人类

生存空间的矛盾使得大面积的红树林生长区域被养殖区、城市、道路和港口取代。了解红树林生态系统的存续与否、健康状况及发展趋势, 对海岸带可持续发展、生态保护及恢复工作具有重要意义。因此, 开展红树林的调查和保护工作刻不容缓。

红树林生长在地势平坦的潮间带上部, 传统的调查需要投入大量的人力、物力, 且危险系数较高。遥感技术具有大范围监测、周期短、可持续、信息量大、性价比高等优点, 将遥感技术应

收稿日期: 2020-06-26

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2017YFC1405100); 自然资源卫星遥感业务支持服务体系资助项目 (121168000000190015)

作者简介: 王浩 (1993-), 男, 硕士, 主要从事湿地监测研究。E-mail: 916990327@qq.com

通讯作者: 任广波 (1983-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事海岸带遥感研究。E-mail: renguangbo@126.com

用到红树林的监测中,可以做到全面、快速、动态和精确的红树林监测^[7]。其中,对于较大尺度的红树林监测,常用 Landsat MSS / TM / ETM+、SPOT1-4、GF-1 WFV 等中等空间分辨率影像^[8-9]。目前,已有大量学者做过中国红树林遥感监测的相关研究,经分析,大致分为 3 种情况。第一,对于单独省区的研究,李春干、王胤、张党玉、吴培强等^[10-13]分别对广西、福建、海南、广东 4 个红树林分布较多的省区进行空间分布和驱动力因子研究。第二,对于多个省份的研究,何玉花等^[14]利用重心模型方法针对 1990—2015 年广东、广西、海南、福建四省区红树林的重心迁移特征及共性关系进行了相关分析;李晓俞等^[15]统计了 1990—2015 年广东、广西、海南、福建 4 省份的红树林面积并应用景观格局指数进行了景观分布特征分析。第三,对于全国红树林的研究,吴培强、贾明明等^[16-17]分别对我国红树林面积和分布

进行了监测与分析研究。上述研究在监测数据源、时间、区域和方法上存在差异(表 1),造成红树林面积调查结果有较大差异。相对于其他研究,本文以影像资料完整的 1990 年为起点,对浙江、福建、广东、广西、海南、台湾、香港和澳门的红树林进行了监测,精确提取到了 2019 年,并从全国和省区尺度分别进行了分析。以往研究多通过目视解译或计算机自动解译进行红树林的信息提取。为了提高红树林提取的准确性,本研究在利用盐沼植物的物候特征区分红树林和盐沼植物的基础上,利用对红树林有较好提取精度的 SVM 分类和高精度的目视解译进行红树林信息提取。随着对海岸带利用和保护的重视,更加需要从全国和省区尺度进行实时性的监测,同时基于全国和省区角度的质心和景观生态学分析更有助于对红树林的时空变化和健康状况做出正确评估。

表 1 红树林面积监测汇总表

监测人 / 监测单位	监测方法	数据源	年份	统计区域面积 /hm ²									备注
				浙江	福建	广东	广西	海南	台湾	香港	澳门	全国	
国家林业局 2001 年 ^[18]	卫星遥感结合地面调查	—	2001	20.6	615.1	9 084.0	8 374.9	3 930.3	—	—	—	22 024.9	未统计港澳台面积
吴培强 ^[16]	目视解译	Landsat TM/ETM+、HJ-1 CCD	1990	17.3	218.7	7 733.2	1 754.9	3 795.5	—	—	—	13 519.6	
			2000	20.1	269.3	8 722.0	3 247.2	3 795.0	—	—	—	16 053.6	未统计港澳台面积
			2010	19.9	941.9	12 130.9	6 594.5	4 891.2	—	—	—	24 578.2	
			1973	—	3 810.0	33 234.0	5 305.0	5 991.0	—	—	—	48 750.0	
贾明明 ^[19]	利用面向对象方法建立规则集提取红树林信息	Landsat MSS/TM/ETM+/OLI	1980	—	3 624.0	—	2 306.0	—	—	—	—	22 692.0	港澳面积包含于广东地区;对于 1973、1980 年中国红树林面积统计缺乏数据用 1990 年相同区域数据填补
			1990	53.0	1 216.0	11 286.0	2 638.0	4 809.0	388.0	—	—	20 391.0	
			2000	25.0	697.0	7 630.0	5 937.0	3 978.0	320.0	—	—	18 587.0	
			2010	293.0	1 023.0	9 678.0	5 813.0	3 576.0	382.0	—	—	20 776.0	
			2013	268.0	3 437.0	16 348.0	8 425.0	4 033.0	485.0	—	—	32 834.0	
但新球等 ^[18]	3S 技术结合现地调查	CBERS CCD	2014	20.1	1 184.0	19 751.2	8 780.7	4 736.1	—	—	—	34 472.1	未统计港澳台和海南省三沙市面积
李晓俞等 ^[15]	目视解译	Landsat	1990	—	2 429.4	5 890.8	1 360.1	3 236.0	—	—	—	—	
			2000	—	2 559.3	6 308.5	2 608.5	3 625.0	—	—	—	—	对红树林分布较多的广东、广西、海南、福建 4 个省份进行了解译
			2005	—	1 709.3	7 508.6	2 957.3	3 106.6	—	—	—	—	
			2015	—	3 353.4	8 080.5	6 718.4	3 740.1	—	—	—	—	
王武霞 ^[20]	结合目视解译的计算机自动解译红树林	Landsat TM/ETM+/OLI	1987	—	500.0	10 200.0	3 800.0	5 200.0	400.0	300.0	—	20 400.0	研究区为华南沿海地区,未涉及浙江省和福建省北部
			2000	—	800.0	8 700.0	5 000.0	7 200.0	300.0	300.0	—	22 300.0	
			2016	—	1 900.0	6 200.0	7 800.0	3 900.0	400.0	400.0	—	20 700.0	

监测人 / 监测单位	监测方法	数据源	年份	统计区域面积 /hm ²									备注
				浙江	福建	广东	广西	海南	台湾	香港	澳门	全国	
于凌云等 ^[21]	—	—	1990	—	—	—	—	—	—	—	23.0	—	—
			2000	—	—	—	—	—	—	—	0.0	—	
			2015	—	—	—	—	—	—	—	7.0	—	
雷金睿等 ^[22]	监督分类结合目视解译	Landsat TM/ OLI	1990	—	—	—	—	3 783.0	—	—	—	—	—
			1995	—	—	—	—	3 986.0	—	—	—	—	
			2000	—	—	—	—	3 786.0	—	—	—	—	
			2005	—	—	—	—	3 679.0	—	—	—	—	
			2010	—	—	—	—	3 931.0	—	—	—	—	
			2015	—	—	—	—	3 768.0	—	—	—	—	
			2018	—	—	—	—	3 666.0	—	—	—	—	
谢亮亮等 ^[23]	监督分类获得主要地物分类图, 通过归一化植被指数提取红树林	Landsat TM/ OLI	1997	—	—	—	1 591.0	—	—	—	—	—	—
			2002	—	—	—	1 366.0	—	—	—	—	—	
			2007	—	—	—	1 108.0	—	—	—	—	—	
			2012	—	—	—	4 228.0	—	—	—	—	—	
			2017	—	—	—	4 142.0	—	—	—	—	—	

因此,本研究拟使用 1990 年、2000 年和 2010 年 3 个时期 Landsat TM 以及 2019 年 Landsat OLI 和 GF-1 WFV 卫星遥感影像,利用 SVM 分类和目视解译结合的方法开展中国红树林信息提取,基于动态度模型、质心模型、景观格局指数分析近 30 年红树林的时空分布及景观特征,以期为我国开展红树林保护和管理提供数据支持。

1 数据和方法

1.1 研究区域概况

我国红树林分布的最北端为浙江省乐清湾^[16],因此本文研究区域为 18°12′~28°25′N, 108°03′~122°00′E(图 1),包括浙江省、福建省、广东省、广西壮族自治区、海南省、台湾省、香港特别行政区和澳门特别行政区 8 个省区。研究区为温暖湿润的亚热带海洋性季风气候和热带季风气候,夏季炎热多雨,冬季温暖潮湿,年平均气温 21~25℃,年均降雨量 1 500~2 000 mm^[24],温暖湿润的气候为分布于滩涂、河口、港湾处的红树林创造了良好的生长条件。目前,中国共有红树林保护区 36 个,包括国家级自然保护区 7 个,省级自然保护区 6 个,地方自然保护区 23 个。红树林保护区分布位置引自我国生态环境部

公布的全国自然保护区名录(http://www.gov.cn/guoqing/2019-04/09/content_5380702.htm)和文献中红树林保护区分布位置^[19]。

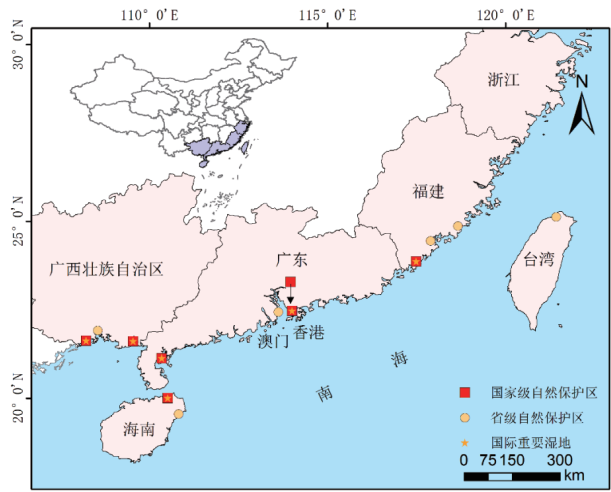


图 1 研究区范围示意图

1.2 数据源

1.2.1 遥感数据 本研究使用 1990 年 Landsat TM、2000 年 Landsat TM、2010 年 Landsat TM、2019 年 Landsat OLI 和 GF-1 WFV 数据作为主要数据源,共 138 景影像,分辨率分别为 30 m、30 m 和 16 m。其中,2019 年 Landsat OLI 作为对 GF-1 WFV 数据的补充。影像具体信息见表 2。

表 2 遥感影像数据

卫星名称	成像时间 / 年	分辨率 / m	数量 / 景						合计
			11 月	12 月	1 月	2 月	3 月	其他月份	
Landsat-5	1988—1991	30	8	16	0	6	0	0	30
Landsat-5	1999—2002	30	2	8	8	2	6	1	27
Landsat-5	2009—2011	30	1	10	2	11	1	2	27
Landsat-8	2017—2019	30	11	1	3	4	1	6	26
GF-1	2018—2019	16	3	1	7	0	7	10	28

红树林分布于潮间带上部,受周期性潮水淹没,为保障红树林信息提取的准确性,应选择低潮位、云覆盖少的卫星遥感影像,避免由于潮水淹没和云层遮挡所造成的漏分现象。由于红树林和互花米草等盐沼植被共生,光谱相近,难以区分,严重影响了红树林提取精度。而以互花米草为代表的盐沼植被受物候影响,冬季时植株枯萎,叶片枯黄,叶绿素含量降低,此时光谱在红光波段的强吸收作用减弱,波谷特征不明显且反射率变大,这与作为常绿植物的红树林在光谱上差别较大,所以可以利用季节差异将两者区分开^[25]。由图 2-a 和图 2-b 可知,红树林和互花米草在 2 月和 9 月影像上色调差异较大。因此,本文所使用遥感影像获取时间多选取冬季(11 月、12 月、1 月、2 月最佳)。红树林的树高或胸径生长速度较慢^[26],因此部分当年未获得满足要求的区域,将影像获取时间放宽到前后不超过两年。

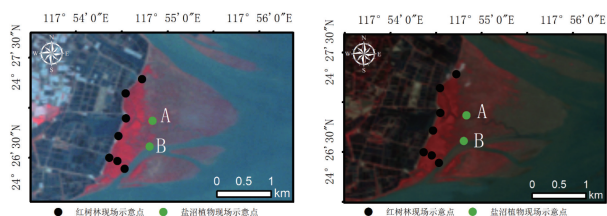
(a) 2011 年 2 月九龙江口
现场调查站点(b) 2011 年 9 月九龙江口
现场调查站点(c) 站点 A 处红树林和
互花米草混生(d) 站点 B 东侧存在
大面积互花米草

图 2 红树、盐沼植物季节性差异对比图

1.2.2 现场数据 2012 年在福建省九龙江口沿岸; 2018 和 2019 年分别在广东省湛江市、珠海市和广西壮族自治区沿岸,开展了多次红树林现场调查,设置现场站点 84 个,获取了红树林地理位置、种类、光谱和生长参数等数据,站点点分布如图 3 所示。其中,2019 年在广西红树林现场调查中利用“御”Mavic2 专业版大疆无人机在北海市、防城港市等区域共拍摄照片 4 022 张,根据无人机照片得到了 234 个红树林点位和 287 个非红树林点位。其中,非红树林样点多为红树林边界处裸滩、盐沼植物和水体。

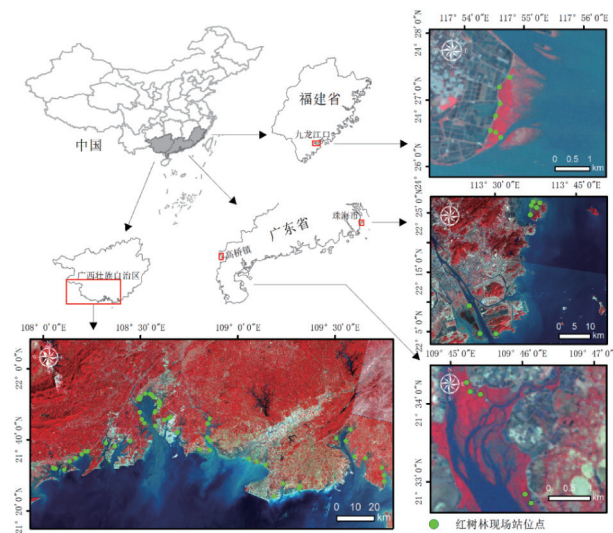


图 3 现场调查红树林站点分布图

1.3 研究方法

1.3.1 数据预处理 本文利用 ENVI 5.3 软件中的辐射定标工具和 FLAASH 大气校正模型对多时相遥感数据进行辐射定标和大气校正,以 2019 年的 Landsat OLI 数据为基准对其他年份遥感影像进行地理配准,配准中误差小于 1 个像元。

1.3.2 红树林信息提取方法 为了减少与红树林光谱和纹理特征相似的沿岸陆生植物对红树林提取信息的影响, 基于现场调查数据, 提取了2019年份红树林与陆地植被的边界并对陆地植物区域进行了掩膜。对掩膜处理后的影像使用支持向量机 (Support Vector Machine, SVM) 分类方法进行监督分类。SVM方法在小样本学习、抗噪声性能、学习效率方面均优于传统分类方法, 同时能通过核方法解决因高特征维度带来的线性不可分问题, 已广泛应用于红树林遥感监测^[27]。本研究所用 SVM 分类选用径向基核函数, 惩罚参数设置为 100。

通过 SVM 分类方法提取 2019 年红树林分布信息。参考现场调查数据和谷歌地球 (Google Earth) 提供的高分辨率遥感图像, 对 2019 年红树林分布结果进行修正。基于 2019 年红树林矢量层, 对比其他年份的卫星影像, 对新增、消失、面积增加和衰减的红树林斑块进行修编, 得到 1990 年、2000 年和 2010 年三期红树林分布信息。

1.3.3 信息提取结果验证 1990 年、2000 年和 2010 年红树林的提取信息是在 2019 年红树林提取信息的基础上经过目视解译得到, 红树林解译的原则和方法相同。本文基于现场数据使用误差矩阵法对 2019 年红树林提取结果进行精度验证, 以评价本文的红树林信息提取精度。

1.3.4 质心模型 质心模型能够反映红树林的空间变化情况, 红树林质心位置的变化可以表征空间上的分布情况, 移动距离可以反映出增加或减少的红树林在空间上与原来分布的接近程度。比较红树林质心在不同时期的位置情况, 可以得到红树林空间变化的规律和趋势, 进而推断出红树林健康状况^[28]。红树林面积的加权质心模型计算公式为:

$$X_t = \sum_{i=1}^n (C_{it} \times X_{it}) / \sum_{i=1}^n C_{it} \quad (1)$$

$$Y_t = \sum_{i=1}^n (C_{it} \times Y_{it}) / \sum_{i=1}^n C_{it} \quad (2)$$

式中: X_t 和 Y_t 分别表示第 t 年红树林斑块质心的经度和纬度坐标; C_{it} 表示第 t 年第 i 个红树林斑块的面积; X_i 和 Y_i 分别表示第 i 个斑块的经度和纬度坐标; n 表示斑块个数。

1.3.5 动态度模型 动态度指标可以定量的表征红树林变化的速度, 可用于比较分析红树林变化的差异及预测未来红树林的变化趋势^[29], 公式如下:

$$K = \frac{U_a - U_b}{U_b} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (3)$$

式中: K 指某一时间段范围内红树林动态度; U_b 和 U_a 分别代表该时间段初期和末期红树林面积; T 为研究时长。

1.3.6 景观格局指数 景观格局指数可高度浓缩景观格局信息, 进而用于定量分析景观结构组成及空间配置特征, 是景观生态学中研究景观格局变化信息、景观格局与景观过程变化规律的常用方法^[24]。本文选取斑块面积 (Class Area, CA)、斑块数 (Number of Patches, NP)、斑块密度 (Patch Density, PD)、最大斑块指数 (Largest Patch Index, LPI)、平均斑块面积 (Mean Patch Area, MPA)、形状指数 (Landscape Shape Index, LSI) 和聚合度指数 (Aggregation Index, AI) 7 个指数, 定量分析了红树林破碎化程度和聚散程度的变化, 以便于了解红树林健康状况以及自然和人为因素对红树林的健康状况的影响。其中, CA 的变化可以最直观地判断红树林的增减情况。综合分析 NP , PD , $AREA_{MN}$ 3 个数值的大小变化, 可以推断出红树林的破碎化程度, 进而对红树林健康状况做出评估。 LPI 可以反映最大片红树林斑块的扩张或碎化现象, 反映核心区红树林的健康状况。 LSI 可以判断斑块的形状变化, 在一定程度上反映红树林抵抗外部干扰的能力。 AI 可以反映红树林斑块内部的连通性及聚散程度。景观格局指数的公式描述和生态含义见表 3。

表 3 景观格局指数及其生态含义

指数	公式描述	生态含义
斑块面积 (CA)	某斑块类型的总面积	CA 值的大小制约着以此类型斑块作为聚集地的物种的丰度、数量、食物链及次生种的繁殖等。
斑块数 (NP)	$NP=N$	某一景观或斑块类型中所有相关斑块的数目。可以反映某一景观类型分离度与破碎化程度, 该指标随各因子的变化趋势相对比较稳定。
斑块密度 (PD)	$PD=\frac{N}{CA}$	斑块密度反映景观被分割的破碎化程度和空间异质性程度。在一定程度上反映人为因素对景观的干扰程度。PD 愈大, 破碎化程度愈高, 空间异质性程度也愈大。
最大斑块指数 (LPI)	$LSI=0.25\frac{E}{\sqrt{CA}}$	某一斑块类型中的最大斑块面积占整个景观面积的比例。可以反应同一类型景观核心区的聚集和分散程度。
形状指数 (LSI)	$AREA_{MN}=\frac{CA}{NP}$	景观中斑块边界总长度除以景观总面积的平方根, 再乘以正方形校正常数。反应景观类型的形状变化, 值越大形状越复杂, 在一定程度上反应红树林抵抗外部干扰的能力。
平均斑块面积 (AREA _{MN})		平均斑块面积可以表征景观的破碎程度, 值越小破碎化程度越高。
聚合度指数 (AI)	$AI=\frac{g_{ii}}{\max g_{ii}}\times 100$	AI 反映景观类型空间格局聚散程度及景观类型中斑块之间的聚散程度, 值越大斑块内部的连接度较高。

注: N 为斑块总数, 为斑块 a_{ij} 的面积, E 为斑块边界总长度, g_{ij} 为相应景观类型的相似邻接斑块数量

2 结果与分析

2.1 分类精度验证

在现场调查数据中选取了 139 个红树林样点和 287 个非红树林样点作为验证点, 对 2019 年中国红树林分类结果建立误差矩阵评价红树林提取精度, 误差矩阵见表 4。分类结果总体精度达 93%, Kappa 系数 0.84, 红树林提取精度较高。

表 4 2019 年中国红树林分类结果评价误差矩阵表

类型	分类结果			制图精度 /%
	红树林	非红树林	合计	
红树林	121	18	139	87
非红树林	12	275	287	96
合计	133	293	426	-
用户精度 /%	91	94	-	-
总体精度 =93%, Kappa 系数 =0.84				

2.2 近 30 年中国红树林面积和时空变化特征

由图 4 可知, 红树林在海南、广东和广西 3 省区的分布集中。由图 5-a 红树林分布面积变化分析可知, 1990 年、2000 年、2010 年和 2019 年的中国红树林分布面积分别为 15 505.2 hm²、

16 439.8 hm²、18 718.9 hm²、21 612.9 hm², 从 1990 年到 2019 年增加 6 107.7 hm², 呈现缓慢增加的趋势。由图 5-b 红树林动态度变化可知, 1990—2019 年间, 中国红树林动态度为 1.36%, 其中, 1990—2000 年中国红树林动态度低于 1990—2019 年, 主要由于澳门、浙江、福建、海南、广东 5 省区红树林面积减少。2000—2010 年和 2010—2019 年两个时期中国红树林动态度均高于 1990—2019 年。可见, 自 2000 年开始, 对我国红树林的保护远远大于破坏, 其中 2010—2019 年中国红树林动态度最高, 为 1.72%, 高于前两个时段的 0.6% 和 1.38%。从图 6 可以看出, 全国红树林景观质心始终位于广东湛江附近, 但 1990—2019 年, 全国红树林质心向东北方向有小幅移动。结合红树林分布位置、面积分析可知, 导致向北偏移原因是海南省红树林增长缓慢, 广东省雷州半岛范围红树林面积减少, 以及广西、福建等地红树林面积增加; 向东偏移的原因是广东东部、福建、香港和台湾等地红树林面积增加。质心北移表明, 随着全球气温的升高, 浙江、福建区域越来越适宜红树林生长, 同时在浙江、福建的人工引种成果显著。总体来看, 近 30 年以来, 由于人们保护意识的增强和政府保

护力度的增大, 中国红树林得到了较好的恢复且红树林质心向东北方向移动。

结合动态度模型、质心模型和面积变化可知, 不同省区红树林面积、空间分布变化有较大差异。广东红树林面积呈现先减少后增加的趋势, 由于人类的开发活动和零星分布红树林大量死亡导致从 1990 年到 2000 年共有 580.2 hm^2 红树林消失, 但从 2000 年到 2010 年红树林显著增加, 共增加 1 059.3 hm^2 , 动态度为 1.45%, 主要增加区域为湛江高桥、水东港、镇海湾、淇澳岛等区域。从质心模型看, 其分布范围在 30 年内有较大变化, 主要原因是雷州半岛红树林碎化现象严重以及湛江往东范围红树林大面积增加。广西红树林面积增加最为显著, 共增加 5 096.7 hm^2 , 其动态度最高, 为 7.71%, 其质心位置变化不大, 整个广西的红树林保护和恢复工作成果显著, 照此下去, 未来几年可能会成为我国红树林面积最多的省份。香港、台湾两地红树林近 30 年由于得到当地较好保护, 面积稳步增加且分布较为稳定, 从香港红树林的质心迁移变化可以明显看出红树林有向海扩散的趋势。1990—2019 年海南红树林动态度为 -0.56%, 海南红树林面积近 30 年呈现先减少后增加的趋势, 从 1990 年到 2010 年共减少红树林面积 1 176.9 hm^2 , 此 20 年中前 10 年减小的面积就达到了 991.2 hm^2 , 主要减小的区域为清澜港和新英湾。从 2010 年到 2019 年, 海南红树林面积开始缓慢增长, 动态度为 1.5%, 但到 2019 年尚未恢复到 1990 年红树林面积, 其质心近 30 年变化剧烈。虽然海南红树林面积自 2010 年开始缓慢增长, 但仍需当地政府加强红树林的管理和保护工作。福建省红树林主要分布于漳州市的漳江口红树林保护区、龙海九龙江口红树林保护区和泉州市的泉州湾河口湿地, 近 30 年呈现先减少后增加的趋势, 1990—2000 年零星分布红树林死亡导致红树林面积减少, 随着红树林保护区的建设, 福建红树林面积由 2000 年的 302 hm^2 增加到 2019 年的 832.8 hm^2 , 共增加 530.8 hm^2 , 增长位置集中在保护区内, 其近 30 年质心移动与 3 个保护区面积的增减程度密切相关。澳门红树林面积较小, 且由

于填海造陆红树林分布变化剧烈, 在本研究中未能在 2000 年卫星影像中监测到红树林。浙江省红树林多为人工引种, 其面积变化和质心迁移受引种影响较大, 不具有明显规律性。

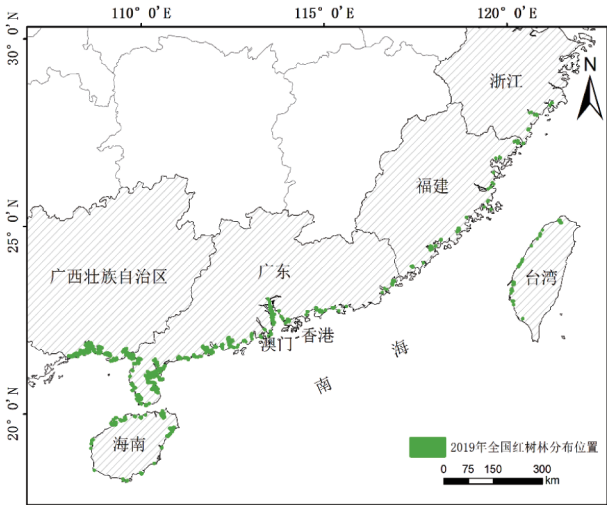
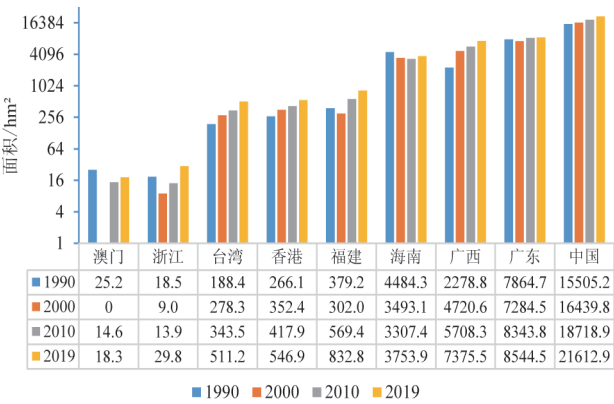
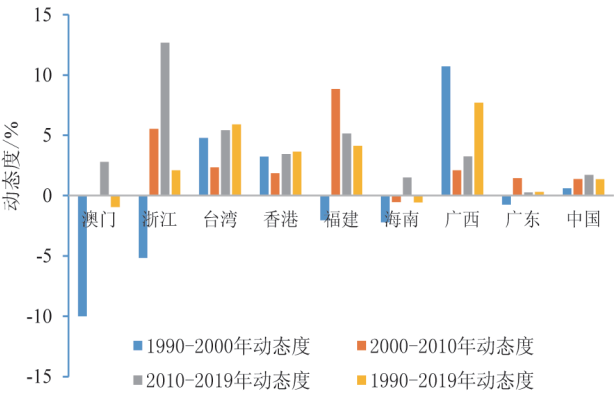


图 4 2019 年全国红树林分布位置示意图



(a) 红树林分布面积变化柱状图



(b) 红树林动态度变化柱状图

图 5 中国红树林面积及动态度变化图

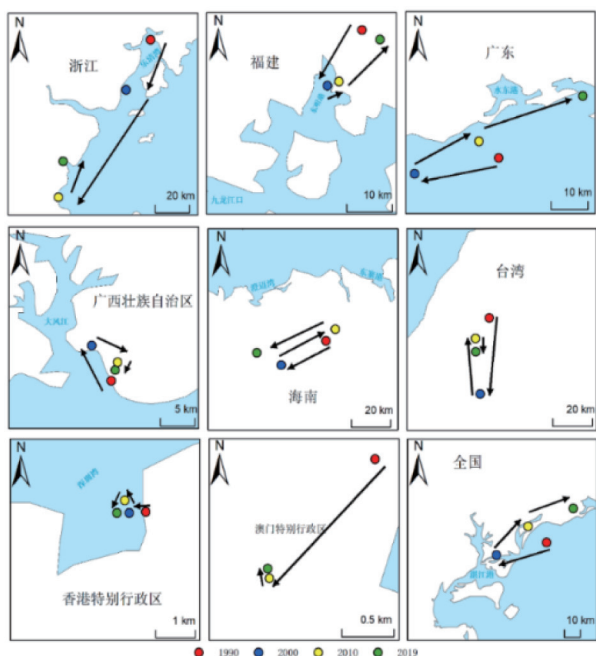


图6 1990—2019年全国及各省区红树林景观质心变化图

2.3 近30年中国红树林景观分布特征

由图7中1990—2019年红树林景观格局指数变化,可以发现我国红树林景观分布特征有以下几个特点:

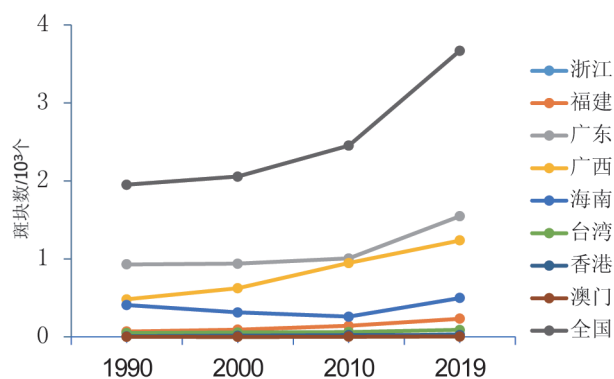
(1) 1990—2019年,红树林斑块密度逐年增加,平均斑块面积逐年变小,红树林斑块数显著增加,整体来看我国红树林景观格局趋于破碎化,导致破碎化的原因有物种入侵、填海造地等多种因素,红树林的健康受到威胁。其中,香港、海南和广东三省区的红树林平均斑块面积高于其他省份、斑块密度略小于其他省份,红树林相对于其他省区整体性较好。

(2) 近30年来,我国红树林最大斑块指数逐年减小,有较大红树林斑块出现萎缩、碎片化现象,根据红树林提取信息发现湛江红树林保护区核心区碎化最为严重。香港和海南保护区内红树林受到当地较好的保护,红树林斑块较为稳定且存在扩张现象并形成较大的红树林斑块。

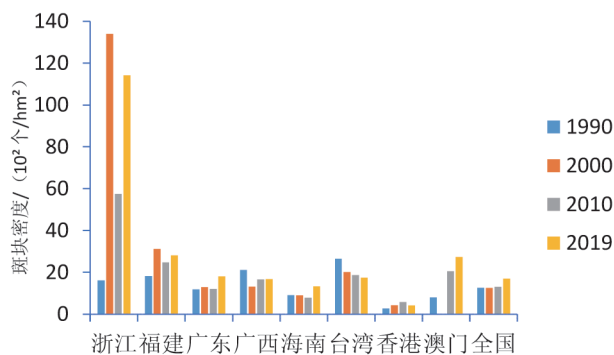
(3) 近30年来,我国红树林斑块形状指数逐年增大,斑块形状呈现极其明显的不规则化趋势。其中,广东红树林斑块形状复杂程度最高且

相对稳定。广西红树林斑块随着时间斑块形状越来越复杂。海南红树林斑块从1990年到2010年形状复杂程度变低,但从2010年到2019年开始趋向于不规则方向发展。广东、广西、海南3个红树林主要分布的省份的红树林形状复杂程度远远高于其他省份,红树林抗外部干扰的能力较强。浙江省、澳门特别行政区的红树林斑块形状过于简单,两省区红树林极易受外部因素影响而造成破坏。

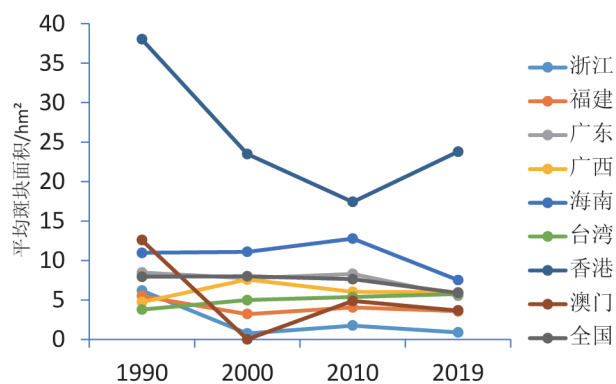
(4) 研究期间,我国红树林整体聚合度虽然稳定在70%以上,但是有减小的趋势。随着保护意识的增强,红树林人工种植和自然扩散的范围逐渐扩大,红树林整体性下降,内部连通性降低。福建省和香港特别行政区红树林斑块随着时间变化,聚合度增加;海南和台湾两省区的红树林斑块从1990年到2019年总体相对稳定;广东省2019年聚合度指数相对于前三期变化较大,从2010年到2019年聚合度明显降低。



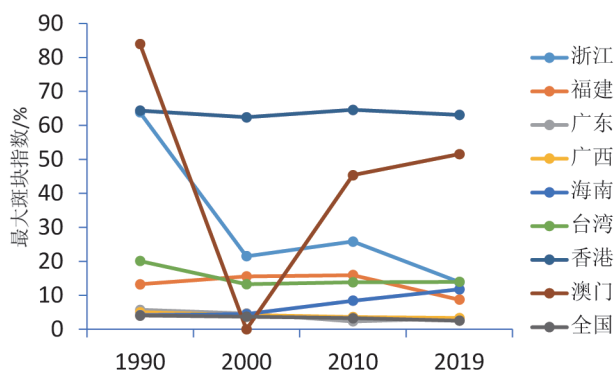
(a) 斑块数变化折线图



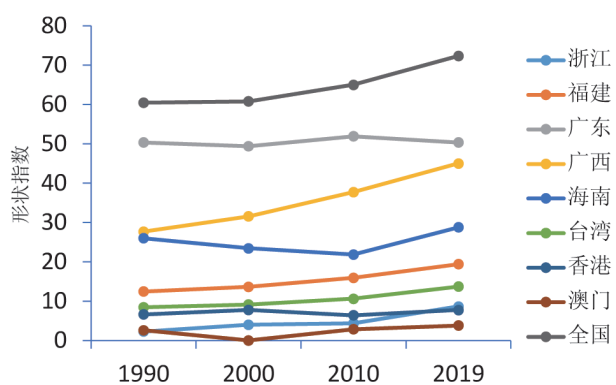
(b) 斑块密度变化柱状图



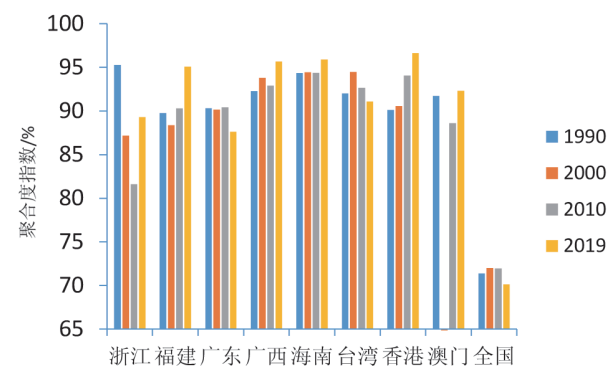
(c) 平均斑块面积变化折线图



(d) 最大斑块指数变化折线图



(e) 形状指数变化折线图



(f) 聚合度指数变化柱状图

图7 1990—2019年中国及各省区红树林景观格局指数变化图

2.4 人类活动对红树林分布变化的影响分析

兴建养殖池塘、填海造陆等不合理的开发行为是造成红树林大量消亡的主要原因。资料显示,海南岛自20世纪90年代大力发展水产养殖以来,水产养殖面积由1990年的21.28 km²增加到2018年的289.82 km²,变化区域主要分布于海南岛东北部的文昌市以及东南沿海一带^[22],对比1990年和2019年卫星遥感影像,可以发现海南清澜港文教河口处大约有99.87 hm²红树林变成养殖池塘,图8-a和图8-b中椭圆形区域变化最为显著。随着海岸带经济的发展,我国沿海地区人均国内生产总值已接近高收入国家水平,沿海地区国土开发强度高于全国平均水平。为了应对社会经济发展带来的土地需求问题,围垦成为了海岸带地区解决此类问题普遍采用的手段和方法,但这不可避免地对沿岸自然生长红树林造成了破坏^[30]。部分经济发达、人口稠密、产业云集的沿海城市,在城市规划过程中把适合红树林生长的滩涂列入填海造陆规划中,造成了当地红树林死亡,例如图8-c和图8-d黑色方框区域显示广东深圳市大铲湾由于填海造地有101.1 hm²红树林消亡。图8-e中澳门函仔区25.2 hm²红树林在图8-f中已全部变为建筑。

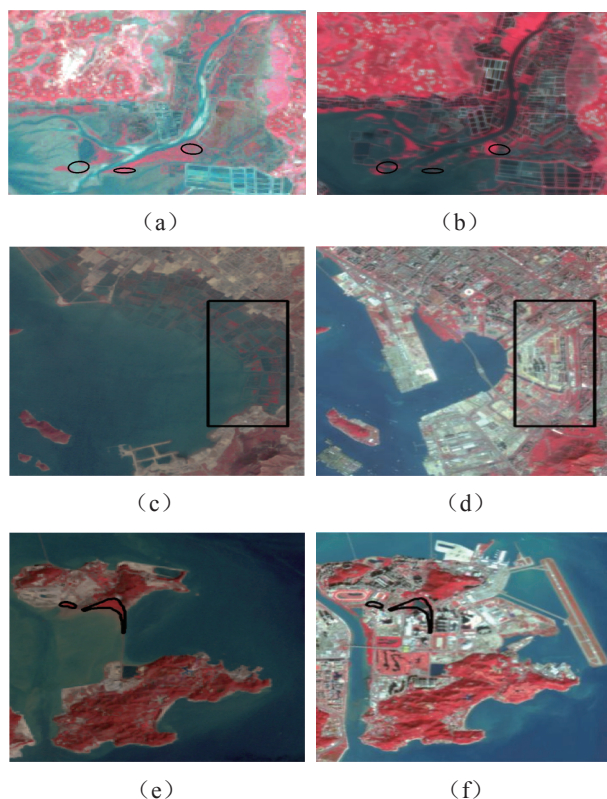


图8 人类活动对红树林的影响

为了更好地保护红树林,目前应多通过宣传提高民众红树林保护意识、颁布红树林保护规定和条例、并建立红树林保护区。习主席在广西调研期间提出“尊重科学,落实责任,把红树林湿地保护好”。2020年6月8日为“世界海洋日”,其主题为“保护红树林,保护海洋生态”,这均起到了宣传保护红树林的作用。目前已有部分省份颁布了保护红树林的相关规定,例如《海南省红树林保护规定》、《广西壮族自治区红树林资源保护条例》以及各红树林保护区制定的保护区管理办法,但仍然需要国家相关部门尽快落实关于红树林保护工作的法律条文,以形成一套完整的保护红树林的法律法规体系。我国自20世纪90年代开始集中大量设立红树林保护区。目前,我国共有红树林保护区36个,其中有11个是90年代以前建立,1990—2000年间共建立保护区13个,除茅尾海保护区外,其他国家级和省级保护区均成立于2000年以前。由图9可知,2019年红树林保护区内红树林面积为13 968.4 hm²,约占全国总面积的64.63%,可见红树林保护区的建立对红树林保护起主导作用。其中,1990—2000年间,我国红树林保护区建立最多,保护区内红树林面积大量增加,占比也随之增加。从2000年开始,省级占比逐年增加,国家级、两者之和占比均有下降趋势,可见国家级保护区保护力度逐渐满载,省级保护区成为红树林面积增加新的活力点。图10中广西茅尾海和广东省淇澳岛两个省级保护区分别在1989年和2005年成立,在设立后红树林面积显著增加。图10中香港米埔红树林自然保护区在1990年已经初具规模,红树林虽逐年增长,但受生长空间范围限制增长速度较慢。

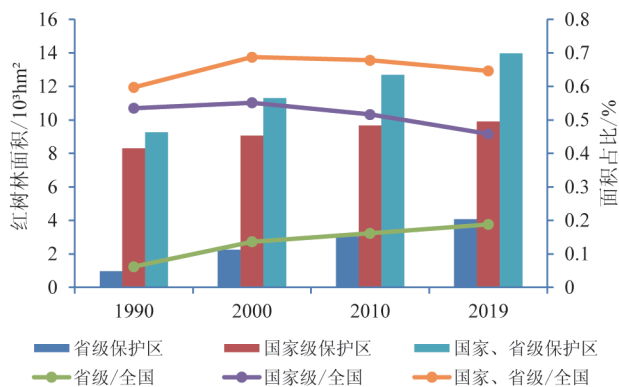


图9 红树林保护区面积占比变化图

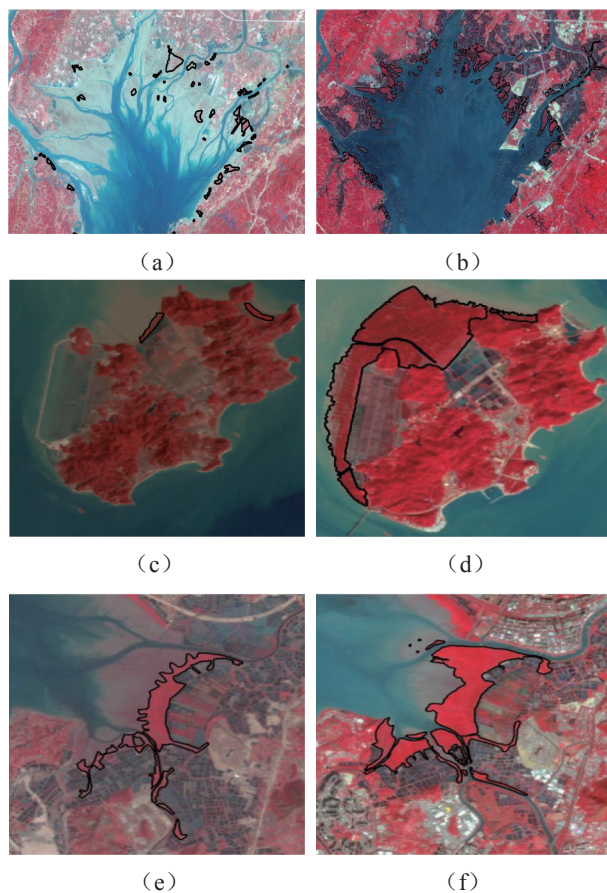


图10 设立保护区对红树林的影响

3 结 论

利用1990年、2000年、2010年和2019年4期冬春季的遥感图像分类提取了至2019年的红树林分布,并开展了基于动态度、质心和景观格局指数的时空分析,得到结论如下:

(1) 1990年中国红树林面积为15 505.18 hm²,到2019年共增加红树林面积6 107.68 hm²,近30年中国红树林分布面积总体呈现缓慢增加的趋势,全国红树林的质心位置向东北方向偏移。其中,2010—2019年中国红树林动态度最高,为1.72%,红树林面积增长速度最快。分析不同省份发现,广西红树林面积增加最为显著,未来几年可能会成为我国红树林面积最多的省份。从香港红树林的质心迁移规律发现红树林有向海扩张的趋势。

(2) 近30年以来,我国红树林受自然和人为因素影响趋于破碎化,红树林斑块形状越来越

复杂且内部连通性降低。分析不同省区发现不同省区红树林景观特征有较大差异。

(3) 填海造地、兴建养殖池塘等不合理的开发活动导致我国红树林遭受破坏, 而兴建保护区则起到了保护红树林的作用。近 30 年来, 保护区内红树林面积逐年增加, 但国家级和省级保护

区对红树林的保护力度随时间出现差异。1990—2000 年我国大量建立红树林保护区, 国家级和省级保护区内红树林面积均增加显著, 但从 2000 年开始保护区内红树林面积虽仍然稳步增加, 但省级保护区对红树林增长的促进作用远远高于国家级保护区。

参考文献:

- [1] 林鹏. 中国红树林生态系 [M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [2] Kuenzer C, Bluemel A, Gebhardt S, et al. Remote sensing of mangrove ecosystems: a review[J]. Remote Sensing, 2011, 3: 878-928.
- [3] Li M S, Mao L J, Shen W J, et al. Change and fragmentation trends of Zhanjiang mangrove forests in southern China using multi-temporal Landsat imagery (1977–2010)[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2013, 130: 111-120.
- [4] 廖宝文. 中国红树林恢复与重建技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [5] Roy A K D. Determinants of participation of mangrove-dependent communities in mangrove conservation practices[J]. Ocean & Coastal Management, 2014, 98: 70-78.
- [6] Conchedda G, Durieux L, Mayaux P. An object-based method for mapping and change analysis in mangrove ecosystems[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2008, 63(5): 578-589.
- [7] 周磊, 马毅, 任广波. 孟加拉国海岸带近 30 a 红树林变化遥感分析 [J]. 海洋环境科学, 2019, 38(1): 60-67.
- [8] Thampanya U, Vermaat J E, Sinsakul S, et al. Coastal erosion and mangrove progradation of Southern Thailand[J]. Estuarine Coastal & Shelf Science, 2006, 68(1-2): 75-85.
- [9] Giri C, Pengra B, Zhu Z, et al. Monitoring mangrove forest dynamics of the Sundarbans in Bangladesh and India using multi-temporal satellite data from 1973 to 2000[J]. Estuarine Coastal & Shelf Science, 2007, 73(1-2): 91-100.
- [10] 李春干, 代华兵. 1960—2010 年广西红树林空间分布演变机制 [J]. 生态学报, 2015, 35(18): 5992-6006.
- [11] 王胤, 左平, 黄仲琪, 等. 海南东寨港红树林湿地面积变化及其驱动力分析 [J]. 四川环境, 2006, 25(3): 44-49.
- [12] 张党玉, 孙志高, 陈冰冰, 等. 近十年来福建兴化湾湿地景观格局及其驱动力分析 [J]. 福建师范大学学报: 自然科学版, 2020, 36(1): 104-116.
- [13] 吴培强, 马毅, 李晓敏, 等. 广东省红树林资源变化遥感监测 [J]. 海洋学研究, 2011, 29(4): 16-24.
- [14] 何玉花, 张东水, 邱炳文, 等. 中国红树林与典型区红树林群落重心迁移特征及共性关系 [J]. 生态学杂志, 2019, 38(8): 2326-2336.
- [15] 李晓俞, 张东水, 马宇, 等. 1990—2015 年间四省红树林变化监测及其驱动力分析 [J]. 地理空间信息, 2020, 18(2): 76-80, 7.
- [16] 吴培强. 近 20 年来我国红树林资源变化遥感监测与分析 [D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2012.
- [17] Mingming J, Zongming W, Yuanzhi Z, et al. Monitoring loss and recovery of mangrove forests during 42 years: The achievements of mangrove conservation in China[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2018, 73: 535-545.
- [18] 但新球, 廖宝文, 吴照柏, 等. 中国红树林湿地资源、保护现状和主要威胁 [J]. 生态环境学报, 2016(7): 1237-1243.
- [19] 贾明明. 1973—2013 年中国红树林动态变化遥感分析 [D]. 长春: 中国科学院研究生院 (东北地理与农业生态研究所), 2014.
- [20] 王武霞. 南海沿岸红树林 30 年时空变化分析 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2017.
- [21] 于凌云, 林绅辉, 焦学尧, 等. 粤港澳大湾区红树林湿地面临的生态问题与保护对策 [J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2019, 55(4): 782-790.
- [22] 雷金睿, 陈宗铸, 陈毅青, 等. 1990—2018 年海南岛湿地景观格局演变及其驱动力分析 [J]. 生态环境学报, 2020, 29(1): 59-70.

- [23] 谢亮亮, 谢小魁. 1997—2017 年间广西北部湾红树林演变分析 [J]. 农村经济与科技, 2020, 31(9): 87-89.
- [24] 刘明月. 中国滨海湿地互花米草入侵遥感监测及变化分析 [D]. 长春: 中国科学院大学, 2018.
- [25] 黄冠闽. 漳江口红树林区互花米草的生长特性及其与秋茄的相对竞争力 [D]. 厦门: 厦门大学, 2009.
- [26] 林鹏, 郑文教. 中国红树植物秋茄、海莲的生长量研究 [J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 1986(2): 224-228.
- [27] 马云梅, 吴培强, 任广波, 等. 基于国产高分遥感的人工种植红树林种间分类方法研究—以广西茅尾海红树林为例 [J]. 海洋技术学报, 2019, 38(4): 1-8.
- [28] 王聪, 刘红玉. 江苏淤泥质潮滩湿地互花米草扩张对湿地景观的影响 [J]. 资源科学, 2014, 36(11): 2413-2422.
- [29] 李丽娟, 杨俊伟, 姜德娟, 等. 20 世纪 90 年代无定河流域土地利用的时空变化 [J]. 地理研究, 2005, 24(4): 527-534, 656.
- [30] 吴文挺, 田波, 周云轩, 等. 中国海岸带围垦遥感分析 [J]. 生态学报, 2016(16): 5007-5016.

Analysis on the Remote Sensing Monitoring and Landscape Pattern Change of Mangrove in China from 1990 to 2019

WANG Hao^{1,2}, REN Guang-bo², WU Pei-qiang², LIU Ai-chao³, PAN Liang-hao⁴,
MA Yun-mei^{2,5}, MA Yi^{1,2}, WANG Jin-jin⁶

1. Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China;

3. North China Sea Marine Forecasting Center, SOA, Qingdao 266061, China;

4. Guangxi Mangrove Research Center, Guangxi Academy of Sciences, Beihai 536000, China;

5. College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010010, China;

6. Shanghai Aubit Aerospace Technology Co., Ltd., Shanghai 200232, China

Abstract: This paper is to monitor the spatial distribution of mangroves and analyze the evolution trend of mangroves in China in the past 30 years. Using Landsat TM in 1990, 2000 and 2010, Landsat OLI and GF-1 WFV remote sensing images in 2019 as data sources, information extraction of mangrove was completed based on SVM and visual interpretation, and correlation analysis was carried out by using dynamic attitude model, Centroid model and landscape pattern index. In this study, phenological differences between mangroves and salt marsh plants are used to study the effects of their mixed growth on the extraction accuracy of mangrove. The results show that: (1) For nearly 30 years, there has been a slow growth of mangrove distribution area in China. The mangrove area of China was 21612.9 hm² in 2019, which totally increased by 6107.7 hm² compared with that in 1990. From 2010 to 2019, the mangroves had the highest growth rate, reaching 1.72%. The distribution center of mangroves has shifted northeastwards, which indicates that the distribution of mangroves has the trend to shift to colder region; (2) In the past 30 years, mangroves in China have the tend to be fragmented, with more and more complex patches and reduced internal connectivity; (3) The establishment of mangrove reserves has played a leading role in mangrove protection. In 2019, mangrove areas in national and provincial protected areas accounted for 64.63% of the national total. Since 2000, the growth of national mangroves protected areas has been slowed down while provincial protected areas have become the vitality growth points.

Key words: mangrove; remote sensing; temporal and spatial variation; landscape pattern index