

基于遥感技术的近 30 a 海南岛海岸线时空变化

姚晓静^{1 2}, 高 义^{3 4}, 杜云艳^{1*}, 季 民²

- (1. 中国科学院 地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;
2. 山东科技大学 测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266510; 3. 国家海洋环境预报中心 海洋
灾害预报技术研究重点实验室, 北京 100081; 4. 北京大学 物理学院, 北京 100871)

摘要: 了解海岸线变化对海岸资源的开发与保护有着重要的意义。论文基于遥感技术与 GIS 技术 提取了海南岛 1980、1990、2000、2010 年 4 个时期的海岸线, 并对其 30 a 来的时空变化特征进行了系统分析。结果表明: 海南岛海岸线变化主要受人为因素的影响, 近 30 a 来其长度增加了 55.4 km; 海岸线时空变化显著, 变化比较剧烈的岸段多分布在地势较为平缓的南部地区, 以养殖开发、工业用地、城镇与港口建设用地区为主。研究认为, 海南岛海岸线的变化, 将有可能导致诸如岸线侵蚀等环境问题, 应注意合理开发, 利用海岸线资源。

关键词: 摄影测量与遥感; 海岸线变化; 基线法; 海南岛

中图分类号: TP79; P229 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3037(2013)01-0114-12

海岸线是指海面与陆地接触的分界线, 海岸线从形态上看, 有曲有直。而且, 这些海岸线由于地壳的运动、冰川和入海河流沙以及人类活动(围垦、填海造地等)的影响, 还在不断地发生着变化。1988 年, 全国人大审议批准成立海南省, 并划定海南岛为我国最大的经济特区, 随后国家和地方开始大力开发海南岛, 从而导致了海南岛海岸线的显著变化。

近年来, 国内学者纷纷开始研究海南岛岸线的变化情况。黄少敏和罗章仁等在野外调查和测量的基础上对海南岛砂质海岸侵蚀状况和原因作了初步分析^[1]; 季荣耀等在调查和统计资料的基础上对海南岛海岸侵蚀特征及主因进行了分析^[2]。但是, 传统的常规调查费时费力, 已不能满足当前岸线监测的要求, 遥感技术作为一种新的动态监测分析手段, 得到了广泛应用。国内外将遥感技术运用在岸线变化监测上已有很多成功的例子, Donoghue 等曾使用遥感技术对英国东海岸带进行制图和监测^[3]; Semih Ekercin 在对 Landsat MSS、Landsat TM 及 Landsat ETM+ 卫星遥感影像处理的基础上, 对土耳其爱琴海西岸的海岸线变化进行了分析^[4]。国内学者基于多源遥感影像和 GIS 技术, 对我国自北向南多个区域岸线变化进行了详细研究, 包括海南岛的部分区段, 如赵洪波、杨树森利用卫星遥感资料与现场实测资料相结合的分析方法, 对海南澄迈湾海域悬沙分布、弧形岸线演变进行了研究^[5], 但是对于海南岛整体岸线类型分布及时空变化分析未见有详细论述。本研究以遥感影像为基础, 综合利用遥感与 GIS 技术, 对海南岛岸线时空变化进行详细分析。

研究中提取了 1980、1990、2000、2010 四个年代的海南岛海岸线, 对近 30 a 来海南岛海岸线变化进行系统分析。为便于表达, 本文中 1980 年到 1990 年称为前期, 1990 年到

收稿日期: 2011-08-11; 修订日期: 2012-04-21。

基金项目: 基于小卫星智能观测技术的荒漠化和海岸带监测应用示范(2011BAH23B04)。

第一作者简介: 姚晓静(1987-), 女, 硕士研究生, 研究方向为地理信息理论与应用。E-mail: yaoxj@lreis.ac.cn

* 通信作者简介: 杜云艳(1973-), 女, 研究员, 硕士生导师。E-mail: duyuy@lreis.ac.cn

2000 年称为中期 2000 年到 2010 年称为后期。

1 研究区概况及数据基础

1.1 研究区概况

海南岛位于中国的最南部,地处中国南海西北部,北隔琼州海峡,与雷州半岛相望,西临北部湾与越南相望,东临香港、深圳,遥对台湾省。地跨 $18^{\circ}10' \sim 20^{\circ}10' N$, $108^{\circ}37' \sim 111^{\circ}03' E$, 处于热带北缘,岛形近似椭圆,是我国仅次于台湾岛的第二大岛。地势较为复杂,山地、丘陵、台地、盆地交错分布,中间高四周低,呈穹隆状。海南岛潮汐类型复杂,海口以东至铜鼓嘴为不规则半日潮,铜鼓嘴至感恩角为不规则日潮,感恩角以北的整个西岸为正规日潮。高低潮出现时间南早、北晚。

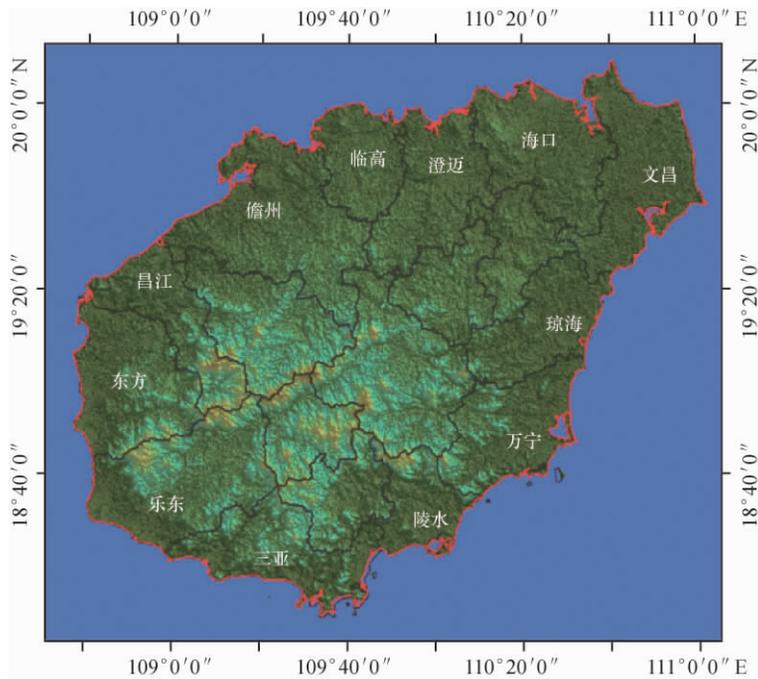


图 1 研究区示意图

Fig. 1 The study area

1.2 数据基础

为研究海南岛海岸线近 30 a 的时空变化,本研究收集了海南岛海岸线 Landsat MSS/TM/ETM+ 影像每个时期 6 景,4 个时期共计 24 景,成像时间分别在 1980 年左右、1990 年左右、2000 年左右、2010 年左右,详细的数据列表见表 1。

2 研究方法

2.1 海岸线类型划分及提取原则

在海岸发育过程中,除波浪作用外,还受其他诸如潮汐、海流、海平面变化、地壳运动、地质构造、岩石性质、地形、入海河流及生物等诸多因素影响。目前为止,还没有统一公认的海岸类型划分系统,众多海岸类型划分通常是依据个别因素进行。由于海岸环境因素复杂,制定统一的海岸分类,还有待于深入研究^[6]。

表 1 遥感影像信息

Table 1 List of remote sensing images

序号	卫星	传感器	轨道号	日期	序号	卫星	传感器	轨道号	日期
1	Landsat 3	MSS	132-46	1978-12-18	13	Landsat 7	ETM+	123-46	2000-06-17
2	Landsat 3	MSS	132-47	1980-03-12	14	Landsat 7	ETM+	123-47	2000-11-08
3	Landsat 3	MSS	133-46	1978-08-15	15	Landsat 7	ETM+	124-46	2000-07-26
4	Landsat 3	MSS	133-47	1980-01-01	16	Landsat 7	ETM+	124-47	2001-04-08
5	Landsat 3	MSS	134-46	1979-01-25	17	Landsat 7	ETM+	125-46	2000-03-27
6	Landsat 3	MSS	134-47	1980-03-14	18	Landsat 7	ETM+	125-47	2000-05-30
7	Landsat 5	TM	123-46	1988-06-08	19	Landsat 7	ETM+	123-46	2010-04-10
8	Landsat 4	TM	123-47	1992-08-30	20	Landsat 7	ETM+	123-47	2010-09-01
9	Landsat 5	TM	124-46	1991-10-30	21	Landsat 7	ETM+	124-46	2010-02-28
10	Landsat 5	TM	124-47	1991-10-30	22	Landsat 7	ETM+	124-47	2010-04-01
11	Landsat 5	TM	125-46	1990-12-05	23	Landsat 7	ETM+	125-46	2010-08-14
12	Landsat 5	TM	125-47	1989-02-17	24	Landsat 7	ETM+	125-47	2010-09-15

由于海岸分类依据不一,形成了众多的分类方案^[7]。本研究参照《全国海岸带和滩涂资源综合调查简明规程》中的部分划分,结合海南岛海岸物质组成情况,将海南岛海岸线划分为人工岸线和自然岸线两个一级类,自然岸线又划分为河口、基岩岸线、砂砾质岸线、生物岸线4个二级类;关于人工岸线的划分,以国家海洋局制定的海岸基本功能规划的类型^[8]为参考,综合海南岛海岸开发现状,将人工岸线类型分为建设围堤、码头岸线、农田围堤、养殖围堤4个二级类(表2)。

表 2 海岸线分类系统

Table 2 Classification of coastlines

海岸线类型	一级类	二级类
	自然岸线	河口、基岩岸线、砂砾质岸线、生物岸线
人工岸线	建设围堤、码头岸线、农田围堤、养殖围堤	

2.2 海岸线变化分析方法

本研究中,根据海岸线的定义,取平均大潮高潮线,并结合实地调查资料和海岸线在卫星遥感影像上的成像特征,建立海岸线目视解译标志,对海南岛海岸线进行了提取。

研究中,基于 ArcGIS 软件平台,以几何校正后的 Landsat 影像作为工作底图,采用 TM4、3、2 假彩色波段组合,在 WGS 84 坐标系下,目视解译提取海岸线。首先自北向南基于 1980 年卫星影像逐景提取海岸线,然后参照 1980 年提取的矢量岸线结果,基于 1990 年卫星遥感影像对岸线属性和空间位置变化的区域进行编辑,依次提取了 2000 年和 2010 年海南岛海岸线。

目前量化分析海岸线变迁的方法主要有基线法、面积法、动态分割法及非线性缓冲区迭代法^[9-13]。本文采用基线法分析近 30 a 海南岛海岸线变化。

基线法最早由 Dolan 等研究美国新泽西州南部海岸时空变化时提出^[9],后经 Thieler 等开发,形成了基于 ArcGIS 平台的“Digital Shoreline Analysis System, DSAS”功能模块,用于分析海岸线时空变化^[14]。本文的分析工具即采用 ArcGIS 平台下的 DSAS 模块。DSAS 的分析原理如图 2 所示,首先由海岸线向陆或向海纵深得到基线(Baseline),需使海岸线在基线的同

一侧; 然后从基线向海岸线一侧做长度为 D 的垂线“Transect (i)”, Transect (i)、Transect ($i+1$) 与基线交点间的距离为基线采样间隔 (Transect space), 每个垂线与各个时期海岸线相交, 通过每个交点至基线的距离可以求解海岸线变化距离 d 。基线可以是一条, 也可以是多条。

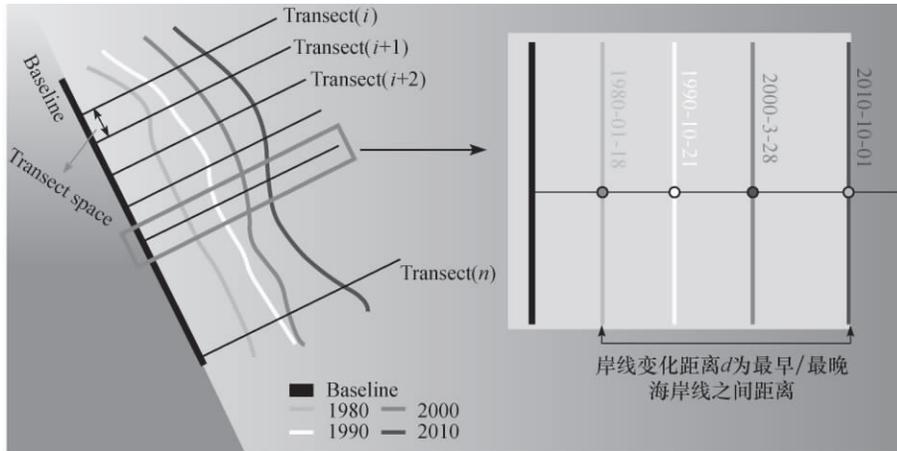


图 2 基线法海岸线变化分析原理示意图

Fig. 2 Diagram of digital shoreline analysis system

本文中选取的基线是由 4 期海岸线内边界向陆地纵深 100 m 得到, 长 1 563.8 km, 使用的基线采样间隔为 100 m, 由 DSAS 分析得到的最终时空变化表格结构如表 3 所示。

表 3 基线法分析岸线时空变化结构

Table 3 Structure of baseline method for analysis of spatial and temporal changes of coastlines

TransectId	BaselineId	ShorelineId	Distance	IntersectX	IntersectY
3	1	01/01/1980	249.791 220	89 952.369 560	2 408 366.479 255
3	1	01/01/1990	119.707 689	89 912.201 058	2 408 242.752 877
3	1	01/01/2000	158.441 356	89 924.161 630	2 408 279.593 638
3	1	01/01/2010	100.130 301	89 906.155 755	2 408 224.132 232
.....

注: ShorelineId 为海岸线的时间标识 (只作为年份标识, 不是准确的时间); Distance 为垂线与海岸线交点到基线的距离; IntersectX、IntersectY 记录了各交点的坐标。

3 结果分析

3.1 各类型岸线空间分布特征

1980、1990、2000、2010 年海南岛海岸线类型分布如图 3 所示。

海南岛地势中部高、四周低, 南北以南渡江中游为界, 北部具有广宽的平原、台地, 以南地区, 丘陵、台地和平原围绕着山地, 环环相套。由于地质构造与岩性复杂、地貌类型各异, 故海岸类型较多。整体而言, 人工岸线以养殖围堤与建设围堤为主, 多分布在易于开发的平原海岸及经济发达且人口密集的河口区域; 自然岸线大多数属于砂砾质类型, 部分属基岩岸线与生物岸线, 基岩海岸主要分布在北部与东南部, 生物岸线分布在海口、文昌这类以旅游业为主的城市境内。

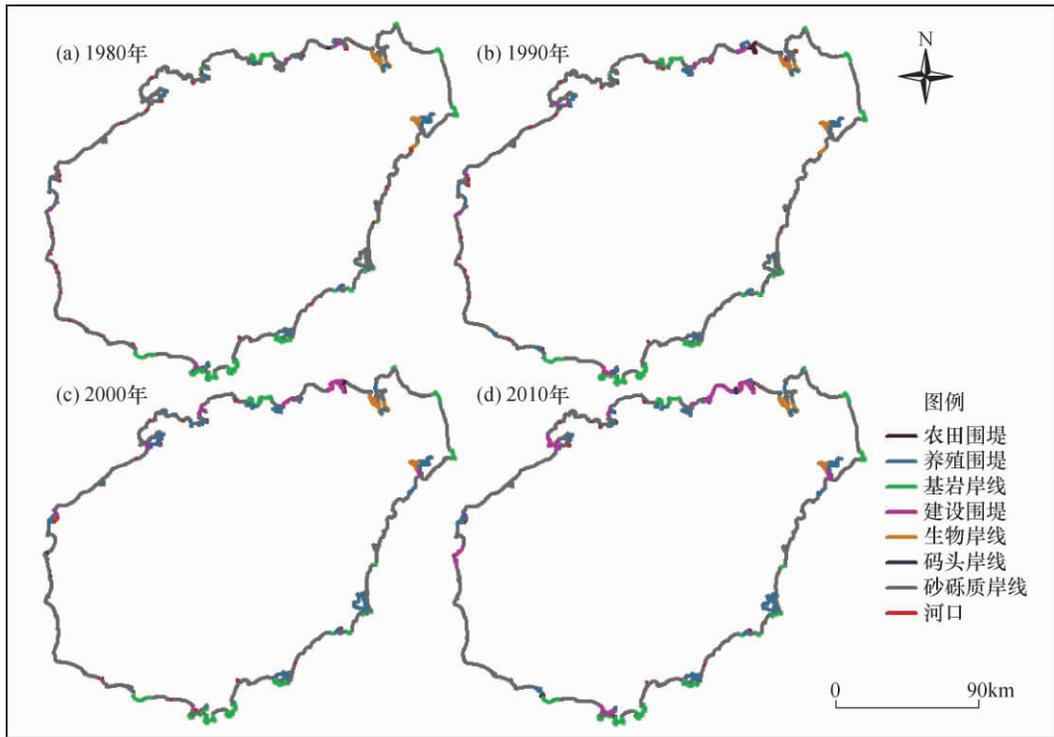


图3 海南岛海岸线类型分布

Fig. 3 Coastline distribution in Hainan Island

3.2 各类型岸线长度变化分析

1980、1990、2000、2010 年海南岛海岸线各类型长度及所占比例如表 4 所列。

表 4 海南岛各时期各类型海岸线长度统计

Table 4 Length and proportion statistics of coastline of Hainan Island in each period

岸线类型	各年代岸线长度/km				所占比例/%				
	1980 年	1990 年	2000 年	2010 年	1980 年	1990 年	2000 年	2010 年	
人工岸线	建设围堤	40.6	61.9	85.8	174.4	2.5	3.8	5.2	10.4
	码头岸线	2.9	3.5	7.8	11.5	0.2	0.2	0.5	0.7
	农田围堤	0.0	15.6	8.9	5.9	0.0	0.9	0.5	0.4
	养殖围堤	126.5	159.3	242.4	282.7	7.8	9.7	14.7	16.9
	小计	170.0	240.3	344.9	474.5	10.5	14.6	20.8	28.3
	河口	11.5	10.9	9.6	9.5	0.7	0.7	0.6	0.6
自然岸线	基岩岸线	167.2	164.9	159.8	156.0	10.3	10.0	9.7	9.3
	砂砾质岸线	1 202.3	1 154.6	1 072.3	968.5	74.3	70.3	64.8	57.9
	生物岸线	67.6	71.9	67.7	65.5	4.2	4.4	4.1	3.9
	小计	1 448.6	1 402.3	1 309.4	1 199.5	89.5	85.4	79.2	71.7
总计	1 618.6	1 642.6	1 654.3	1 674.0	100.0	100.0	100.0	100.0	

注: 受海岸线尺度效应及海岸线范围界定原则等诸多因素影响, 文中海岸线类型长度会和有关部门公布数据不一致, 并不影响海南岛海岸线变化研究^[15]。

数据表明, 近 30 a 来, 受人为开发与海陆作用的综合影响, 海南岛海岸线总长度增加了 55.4 km, 其中前期、中期、后期分别增加了 24.0、11.7、19.7 km, 海岸线长度呈增加趋势, 主

要由人工开发造成,如养殖围堤的围建,使得原有的曲折岸线变短,或者一些呈“凸”型的围堤与陆连岛的开发也使岸线变长,另外还有港口码头的建设对岸线增长也有影响;其次,自然因素也对岸线的增长有一定影响,如河口泥沙沉积、沙坝增长等。

1980、1990、2000、2010 年 4 个时期人工岸线长度显著增加,1980 年人工岸线长度 170 km,占海南岛总岸线的 10.5%。经过 30 a 的海岸线开发,到 2010 年人工岸线长度达到 474.5 km,比例上升为 28.3%,增加速度达 10.15 km/a,其中前期、中期、后期速度分别为 7.03、10.46、12.96 km/a,增加速度不断加快;与之相应,自然岸线则有一定程度的减少,三个阶段减少速度分别为 4.63、9.29、10.99 km/a,减少速度亦逐年加快。由此可见,随着海南岛开发速度的加快,海南岛海岸线类型的变化也在加快,人类作用对海岸线类型及长度变化影响较大。

在人工岸线中,养殖围堤增加最多,达 156.2 km,占总人工岸线增长长度的一半以上。农田围堤在前期增加相对较多,因为海南岛在开发初始阶段,经济主要以农业为主,工业发展尚处在初级阶段;20 世纪 90 年代到 2000 年及以后,随着工业、养殖业与旅游、商贸的发展,农田围堤都处于减少状态,一部分农田围堤被用来进行建设、修建码头,所以建设围堤、码头都有相对的大幅增长。各类自然岸线中,除了生物岸线在前期有些许增加外,其他的也一直处于减少状态,以砂砾质海岸减少最为显著,30 a 间减少了 233.8 km,所占比例从 1980 年的 74.3% 减少到 2010 年的 57.9%。

3.3 海岸线变化区域分异特征

海南岛是海南省的主岛,境内有海岸线的行政区有 12 个。改革开放以来,随着政策改革,海南社会与经济迅速发展,与之相应,海南岛海岸线也发生了巨大的变化。

图 4 为海南岛近 30 a 来海岸线变化分布图,可以看到,30 a 间海岸线变化比较大的区

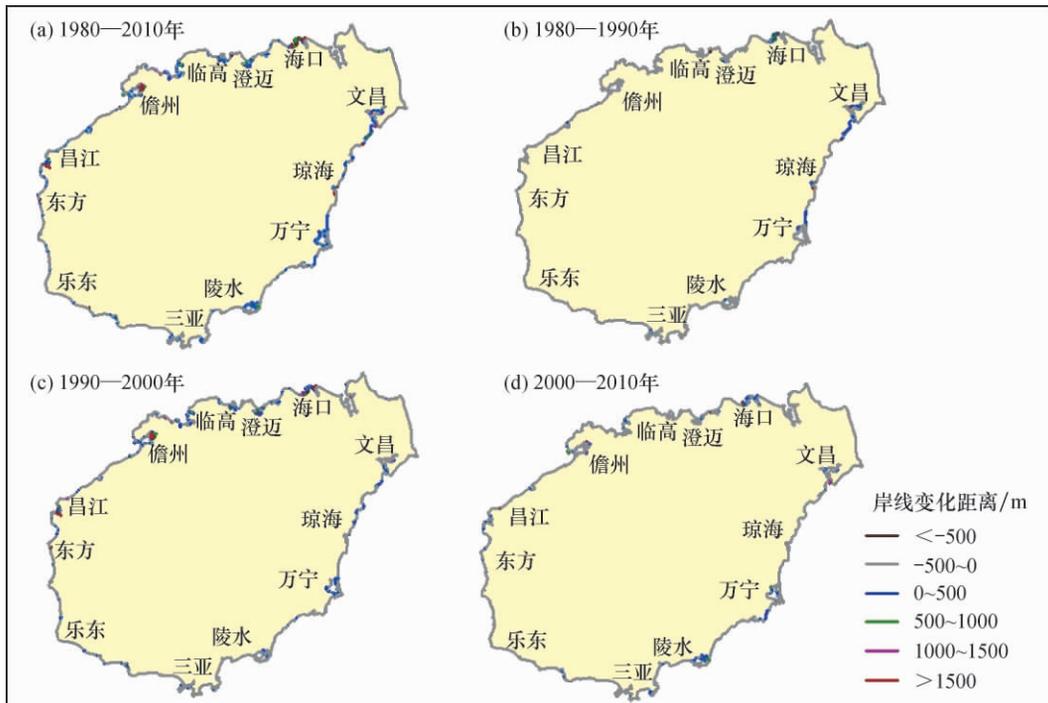


图 4 海南岛海岸线变化分布

Fig. 4 Coastline erosion distribution in Hainan Island

域主要分布海口、文昌、儋州,另外,三亚作为中国最南端的对外贸易口岸,近年来其人工岸线变化也比较显著,所以,本文将以此4个区域为典型岸段区进行分析。

3.4 典型岸段分析

3.4.1 海口段

海口位于海南岛的北部,是海南省的省会,地势平缓。海南岛最长的河流——南渡江从海口市中部穿过,在其北部入海,海口境内有海南省最大的港口——海口港。海口市海岸线变化较大区域即位于南渡江入海口与海口港处,近30 a时空变化如图5(a)所示。图中110°21'E、20°4'N附近为南渡江入海口,由于地势平缓,南渡江入海口来沙量较大,海岸线明显向海推进;110°15'E、20°2'N附近为海口港所在位置,可以看出,在1990年以后,岸线向海推进比较明显,因为20世纪90年代后海口港开始建设,并迅速发展。

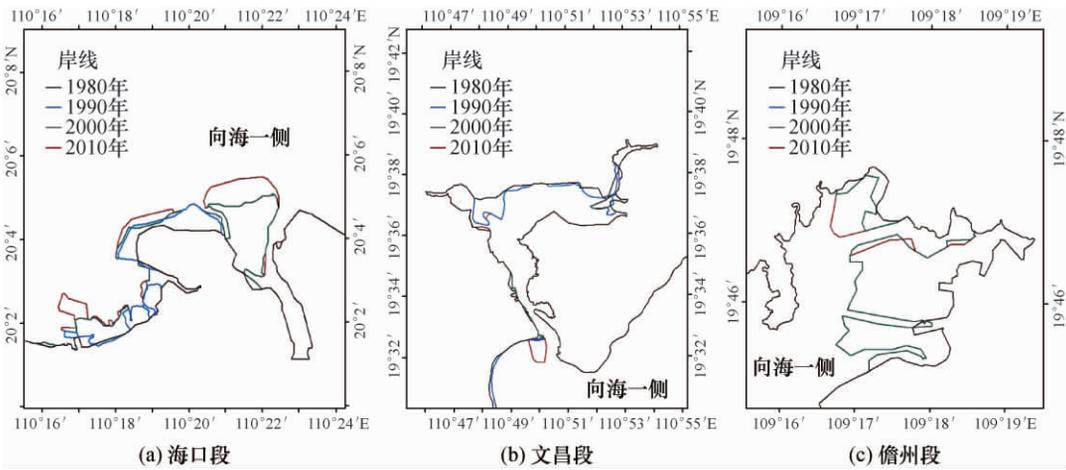


图5 部分典型岸段岸线变化分布

Fig. 5 Erosion distribution of partial typical coastline

表5列出了海口市海岸线各时期各类型的长度及长度变化。该段岸线以砂砾质岸线为主,1980、1990、2000、2010年长度分别为141.1、149.0、151.2、156.2 km;前期、中期、后期变化分别为7.9、2.2、5.0 km,可见从20世纪90年代后,岸线增长趋势减弱,因为在90年代以后,人类活动对海岸线的影响逐渐加强,像海口湾这样的自然海湾被人类围垦利用,自然岸线减少而导致整个岸线增长减弱。相应地,伴随着人类活动,人工岸线整体呈增加趋势,码头岸线与建设围堤的增加比较明显。而在人工岸线中,也有逐年减少的类型,如农田围堤,这是因为在80年代,海南省大力发展农业,而到了90年代后期,海南的经济结构发生了转变,尤其是海口这样的城市变化比较明显,经济结构逐渐由农业转变为工业、商业。

3.4.2 文昌段

文昌位于海南岛的东部,属于低丘台地平原地带。文昌市海岸线变化比较大的区域位于文昌市东部偏北清澜湾与高隆湾一带海岸线,变化分布如图5(b)所示。在该区域中海岸线变化比较明显的主要有两处:19°36'N以北海岸线1980年到1990年期间,这是因为20世纪80年代文昌市养殖业处于初步发展阶段,大量岸线被围垦用于养殖,导致其向海推进;另一处是110°50'E、19°32'N处岸线在2000年到2010年期间,因为从2009年开始,文昌市大力开发高隆湾白金海岸以发展文昌市的旅游业而造成的部分自然岸线“凸”向海,并转化为建设围堤。在文昌建设发展过程中导致了各类岸线长度的变化,文昌海岸线各时期各类型

海岸线长度及其变化统计见表 6。

表 5 海口各时期各类型海岸线长度统计

Table 5 Length and proportion statistics of coastline of Haikou in each period

岸线类型	各年代岸线长度/km				各时期长度变化/km			
	1980 年	1990 年	2000 年	2010 年	1980—1990 年	1990—2000 年	2000—2010 年	
人工岸线	建设围堤	2.2	14.5	21.1	46.7	12.3	6.6	25.6
	码头岸线	2.4	3.0	4.2	7.4	0.6	1.2	3.2
	农田围堤	0.0	15.6	8.4	5.9	15.6	-7.2	-2.5
	养殖围堤	14.6	18.8	9.4	15.6	4.2	-9.4	6.2
	小计	19.2	51.9	43.1	75.6	32.7	-8.8	32.5
自然岸线	河口	1.3	1.3	2.4	2.3	0.0	1.1	-0.1
	基岩岸线	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	砂砾质岸线	76.3	51.5	61.4	34.0	-24.8	9.9	-27.4
	生物岸线	44.3	44.3	44.3	44.3	0.0	0.0	0.0
	小计	121.9	97.1	108.1	80.6	-24.8	11.0	-27.5
总计	141.1	149.0	151.2	156.2	7.9	2.2	5.0	

表 6 文昌各时期各类型海岸线长度统计

Table 6 Length and proportion statistics of coastline of Wenchang in each period

岸线类型	各年代岸线长度/km				各时期长度变化/km			
	1980 年	1990 年	2000 年	2010 年	1980—1990 年	1990—2000 年	2000—2010 年	
人工岸线	建设围堤	2.2	2.2	3.5	8.5	0.0	1.3	5.0
	码头岸线	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	农田围堤	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	养殖围堤	25.0	30.0	44.5	42.6	5.0	14.5	-1.9
	小计	27.2	32.2	48.0	51.1	5.0	15.8	3.1
自然岸线	河口	1.4	0.9	0.8	0.8	-0.5	-0.1	0.0
	基岩岸线	27.1	27.6	27.6	27.6	0.5	0.0	0.0
	砂砾质岸线	185.1	183.6	175.3	173.1	-1.5	-8.3	-2.2
	生物岸线	23.3	26.3	23.4	21.2	3.0	-2.9	-2.2
	小计	236.9	238.4	227.1	222.7	1.5	-11.3	-4.4
总计	264.1	270.6	275.1	273.8	6.5	4.5	-1.3	

文昌市海岸线 1980、1990、2000、2010 年长度分别为 264.1、270.6、275.1、273.8 km,前期与中期都处于增长阶段,分别增加 6.5、4.5 km,后期长度则减少了 1.3 km,增长主要表现在人工岸线中的建设围堤与养殖围堤。文昌属于海南旅游黄金三角洲(海口、文昌、三亚),所以近年来为了旅游业的发展,很多岸段被用来建设度假村等旅游胜地,建设围堤逐年增加,尤其是后期 10 a 中建设围堤增加了 5.0 km,相当于 1980 年全部建设围堤的两倍多。与旅游业并重的还有养殖业,前期和中期养殖围堤也不断增加,但到了后期,文昌的发展偏重于旅游业,养殖围堤有所减少。与之同时,自然岸线,尤其是砂砾质岸线长度不断减少。

3.4.3 儋州段

儋州市位于海南省的西北部,濒临北部湾,地势由东南向西北倾斜,由平原、丘陵、山地三部分构成。海岸线变化比较大的区域位于新英湾[图 5(c)],地处儋州市西南部平原

地带。

从图 5(c) 中可见,1990 年以后岸线向海推进比较明显。这是因为,新英湾口窄里阔,水域面积大,比较适合发展养殖业,所以,该地区 20 世纪 80 年代养殖业就已经起步,但还处于初级阶段,到了 90 年代以后,养殖业迅速发展,“凸”形围堤渐增,岸线明显向海推进。除了图 5(c) 中向海推进比较明显的新英湾岸线,儋州市其他岸段也有相应的开发,各类型的岸线长度及变化如表 7 所列。

表 7 儋州各时期各类型海岸线长度统计

Table 7 Length and proportion statistics of coastline of Danzhou in each period

岸线类型	各年代岸线长度/km				各时期长度变化/km			
	1980 年	1990 年	2000 年	2010 年	1980—1990 年	1990—2000 年	2000—2010 年	
人工岸线	建设围堤	4.9	8.6	19.9	42.7	3.7	11.3	22.8
	码头岸线	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	农田围堤	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	养殖围堤	13.7	17.3	38.3	32.7	3.6	21.0	-5.6
	小计	18.6	25.9	58.2	75.4	7.3	32.3	17.2
自然岸线	河口	1.9	2.2	1.4	1.5	0.3	-0.8	0.1
	基岩岸线	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	砂砾质岸线	224.7	220.4	181.2	164.9	-4.3	-39.2	-16.3
	生物岸线	0.0	1.3	0.0	0.0	1.3	-1.3	0.0
	小计	226.6	223.9	182.6	166.4	-2.7	-41.3	-16.2
总计	245.2	249.8	240.8	241.8	4.6	-9.0	1.0	

儋州市海岸线 1980、1990、2000、2010 年长度分别为 245.2、249.8、240.8、241.8 km,前期、中期、后期长度变化分别为 4.6、-9.0、1.0 km,中期岸线长度有所减少,主要是由砂砾质岸线减少引起的。30 a 间,人工岸线长度一直处于增长状态,而儋州市人工岸线只有建设围堤与养殖围堤,建设围堤在 20 世纪 90 年代以后增长比较快,主要是因为对洋浦湾的开发造成的,养殖围堤在 80 年代与 90 年代增长也很快,尤其是 90 年代,2000 年以后长度虽有所减少,但是总长度仍占到人工岸线总长度的 43.4%。由此可见,儋州市的沿海经济主要以养殖为主,到了后期,海岸开发逐渐偏向于建设,使得 2010 年时建设围堤长度超出了养殖围堤。

3.4.4 三亚段

三亚市位于海南省的最南端,是海南省仅有的两个地级市之一,北靠高山,南邻大海,是海南著名的热带海滨旅游城市和海港,其境内拥有重要的贸易港口三亚港。三亚境内岸线变化比较大的区域包括三亚港处[图 6(a)]、三亚崖城镇港门村宁远河的入海处[图 6(b)]。可以看出在三亚港岸段,主要变化集中在 1990 年到 2000 年之间,这也是三亚港迅速建设的时期,主要岸段变化类型表现为建设围堤。在宁远河的入海处岸线变化比较复杂,具体类型分布如图 7 所示。

从图 7 中可以看出,在宁远河入海口处岸段变化主要表现在砂砾质岸线到养殖围堤、建设围堤的转变。前期岸线变化主要是由河口泥沙堆积导致的砂砾质岸线变形,人工岸线基本未发生变化。20 世纪 90 年代以后,随着养殖业的发展,大部分砂砾质岸段转化为养殖围堤,部分用于建设围堤。三亚岸线各时期的长度变化如表 8 所示。

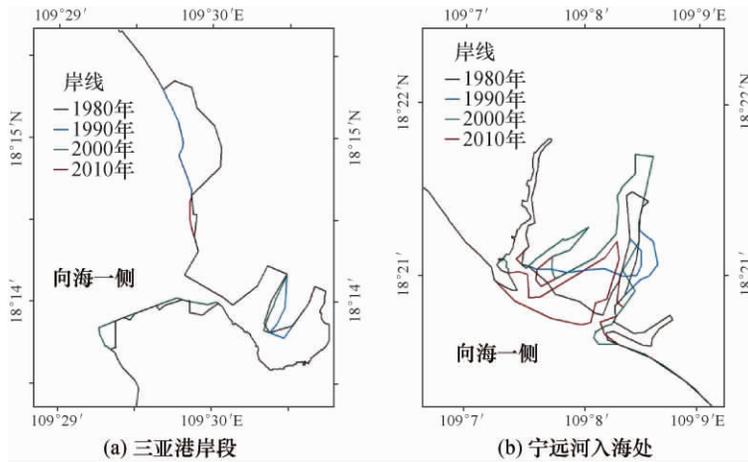


图 6 三亚典型岸段岸线变化分布

Fig. 6 Erosion distribution of typical coastline in Sanya

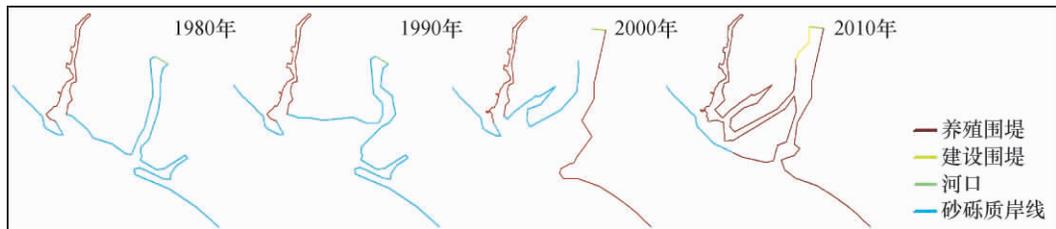


图 7 宁远河入海处各时期岸线类型

Fig. 7 Coastline distribution in mouth of Ningyuan River

表 8 三亚各时期各类型海岸线长度统计

Table 8 Length and proportion statistics of coastline of Sanya in each period

岸线类型	各年代岸线长度/km				各时期长度变化/km			
	1980 年	1990 年	2000 年	2010 年	1980—1990 年	1990—2000 年	2000—2010 年	
人工岸线	建设围堤	16.9	17.9	20.0	21.4	16.0	2.1	1.4
	码头岸线	0.5	0.5	0.5	4.1	0.0	0.0	3.6
	农田围堤	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.5	-0.5
	养殖围堤	11.6	13.4	13.7	21.6	1.8	0.3	7.9
	小计	29.0	31.8	34.7	47.1	2.8	2.9	12.4
自然岸线	河口	1.1	1.1	1.1	1.0	0.0	0.0	-0.1
	基岩岸线	73.1	74.2	74.1	71.5	1.1	-0.1	-2.6
	砂砾质岸线	108.5	106.3	103.2	99.6	-2.2	-3.1	-3.6
	生物岸线	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	小计	182.7	181.6	178.4	172.1	-1.1	-3.2	-6.3
总计	211.7	213.4	213.1	219.2	1.7	-0.3	6.1	

三亚市 1980、1990、2000、2010 年海岸线长度分别为 211.7、213.4、213.1、219.2 km, 总体长度变化集中在后期, 增加了 6.1 km。三亚市经济以旅游业为主, 自然岸线占相当的比重。从 20 世纪 90 年代开始, 三亚港口建设加速、养殖业开始发展, 人工岸线逐年增加, 自然

岸线虽仍占主导,但比重有所下降,从1980年的86.3%下降到78.5%,旅游资源有待保护。人工岸线变化主要表现在中期建设围堤的增加与后期养殖围堤的增加上,主要由上述两个岸段的变化引起。

4 结语

近30 a来,受人为开发与海陆作用的综合影响,海南岛的海岸线总长度呈增加趋势,1980、1990、2000、2010年4个时期人工岸线长度增加显著,且前期、中期、后期增加速度不断加快。近30 a来海南岛海岸开发早期以围垦农田和养殖为主要内容;中期围垦农田所占比例相对降低,海岸开发中经济附加值较高的港口码头开始增长;而后期港口码头建设和城镇建设型海岸开发所占比例逐渐上升。

随着人工岸线的增加,自然岸线必然相应减少,这将有可能导致诸如岸线侵蚀、水生动物栖息地减退等一系列环境问题。研究海岸线时空变化,对海岸治理、解决海岸环境问题有着重要的指导意义。

参考文献(References):

- [1] 黄少敏,罗章仁. 海南岛沙质海岸侵蚀的初步研究[J]. 广州大学学报:自然科学版,2003,2(5):449-454. [HUANG Shao-min,LUO Zhang-ren. Research on sandcoast erosion in Hainan Island. *Journal of Guangzhou University: Natural Science Edition*,2003,2(5):449-454.]
- [2] 季荣耀,罗宪林,陆永军,等. 海南岛海岸侵蚀特征及主因分析[C]//第十三届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 2007. [JI Rong-yao,LUO Xian-lin,LU Yong-jun, et al. Analysis on coastline erosion characteristics and main reasons in Hainan Island//The 13th China Ocean (Coast) Engineering Symposium Proceedings. 2007.]
- [3] Donoghue D, Reid-Thomas D C, Zong Y. Mapping and monitoring the intertidal zone of the east coast of England using remote sensing techniques and a coastal monitoring GIS [J]. *Marine Technology Society Journal*, 1994, 28(2): 19-29.
- [4] Ekercin S. Coastline change assessment at the aegean sea coasts in turkey using multitemporal landsat imagery [J]. *Journal of Coastal Research*, 2009, 23(3): 691-698.
- [5] 赵洪波,杨树森. 海南澄迈湾海域泥沙运动及岸线演变遥感分析[C]//第十二届中国海岸工程学术讨论会论文集. 2005. [ZHAO Hong-bo, YANG Shu-sen. Analysis on sediment movement and shoreline evolution in the Chengmai Bay of Hainan based on remote sensing//The 13th China Ocean Engineering Symposium Proceedings. 2005.]
- [6] 高义. 我国大陆海岸线30年时空变化研究[D]. 青岛:中国科学院烟台海岸带研究所,2011:18. [GAO Yi. Research on Coastline Changes in Recent 30 Years of China mainland. Qingdao: Yantai Institute of Coastal Zone Research, CAS, 2011: 18.]
- [7] 周成虎. 地貌学辞典[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006. [ZHOU Cheng-hu. *Geomorphology Dictionary*. Beijing: China Water Power Press, 2006.]
- [8] 国家海洋局. 国家海洋局关于开展海岸保护与利用规划编制工作的通知[R]. 2009. [Station Ocean Administration People's Republic of China. Notice about working on coastal protection and utilization. 2009.]
- [9] Dolan R, Hayden B, Heywood J. A new photogrammetric method for determining shoreline erosion [J]. *Coastal Engineering*, 1978, 2: 21-39.
- [10] Li R, Liu J K, Felus Y. Spatial modeling and analysis for shoreline change detection and coastal erosion monitoring [J]. *Marine Geodesy*, 2001, 24(1): 1-12.
- [11] Liu J. Developing Geographic Information System Applications in Analysis of Responses to Lake Erie Shoreline Changes [D]. The Ohio State University, 1998.
- [12] Gao Y, Su F, Sun X, et al. A study on spatial and temporal variations of coastal wetland in Pearl River Estuary [C]//IEEE, 2010.
- [13] Heo J, Kim J H, Kim J W. A new methodology for measuring coastline recession using buffering and non-linear least squares estimation [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2009, 23(9): 1165-1177.

- [14] Thieler E R , Himmelstoss E A , Zichichi J L , *et al.* Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0—An ArcGIS extension for calculating shoreline change [R]. U. S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278. 2009.
- [15] 高义, 苏奋振, 周成虎, 等. 基于分形的中国大陆海岸线尺度效应研究[J]. 地理学报, 2011, 66(3): 331-339. [GAO Yi, SU Fen-zhen, ZHOU Cheng-hu, *et al.* Scale effects of China mainland coastline based on fractal theory. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(3): 331-339.]

Spatial and Temporal Changes of Hainan Coastline in the Past 30 Years Based on RS

YAO Xiao-jing^{1 2}, GAO Yi^{3 4}, DU Yun-yan¹, JI Min²

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. Shandong University of Science and Technology, Geomatics College, Qingdao 266510, China; 3. National Marine Environmental Forecasting Center, Key Laboratory of Research on Marine Hazards Forecasting, Beijing 100081, China; 4. School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Understanding of changes of coastline has significance in developing and protecting coastal resources. In this paper, based on the technology of GIS and RS, coastlines in the year of 1980, 1990, 2000 and 2010 of Hainan Island were interpreted from remote sensing images using baseline method. The analysis of spatial and temporal changes of coastlines and the driving forces shows that: Hainan Island coastline changes are mainly affected by human factors; the total length of the coastline had increased by 55.4 km in the past 30 years, which is evidently in the changes of artificial coastline; and the temporal and spatial variation that is mainly reflected in aquaculture reclamation, industrial land use, town and port construction, was significant, especially in southern region where is relatively flat. These results imply that the changes of Hainan Island might lead to a set of environment problems such as coastline erosion, and it is really particularly important to develop coastlines and use the coastal resources reasonably.

Key words: photogrammetry and remote sensing; coastline changes; baseline method; Hainan Island