

1988—2015 年马六甲海峡岸线时空变化特征分析

张玉新^{1,2,3}, 宋 洋^{1,2,3}, 侯西勇^{1,3}

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 山东 烟台 264003)

摘要: 基于 Landsat 遥感影像, 建立 1988 年、2000 年和 2015 年 3 个时期马六甲海峡两侧的岸线数据, 并从岸线结构、岸线变化速率、海陆格局和岸线开发利用强度等方面分析 1988—2000 年、2000—2015 年和 1988—2015 年不同时段区域陆体以及槟城港等 12 个主要港口区域的岸线时空变化特征。结果如下: 岸线结构变化显著, 人工岸线长度和比例急剧增加, 港口区域逐渐从单一类型主导向多元结构转变; 除个别港口外, 两侧岸线均呈向海扩张状态, 南北两岸的岸线平均变化速率分别为 0.91 m/a 和 1.20 m/a; 因海峡南岸沼泽广布、地势低平及海平面上升等原因, 其岸线稳定性差于海峡北岸; 岸线开发利用强度持续增强, 并表现出明显的海峡北岸强于南岸的空间差异, 以及北岸第一阶段增长快于第二阶段, 南岸第一阶段增长慢于第二阶段的时间差异。马六甲海峡的交通运输功能是两岸岸线变化的主要驱动因素。本研究对认识马六甲海峡两岸及港口区域岸线的时空变化和发展特征有重要意义, 对海峡及港口岸线的综合管理具有一定借鉴作用。

关键词: 海岸线变化; 自然岸线; 人工岸线; 开发利用强度; 马六甲海峡; 港口

中图分类号: P748 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2019)08-0017-12

DOI: 10.11759/hyxx20181014001

海岸线被国际地理数据委员会 (International Geographic Data Committee) 认定为 27 个地表要素之一^[1], 是海岸带最古老和最直观的表现形式。海岸线的时空动态变化是全球环境过程、海岸带环境过程、人类活动综合作用的结果与反映, 是海岸带生态系统演变态势的体现, 也是海岸带经济发展活动的重要标识^[2-5]。研究海岸线的时空变化特征, 对海岸带的开发与保护、生态系统演变、区域社会经济发展、近海生物多样性、气候环境变化研究等都具有重要的意义^[6-9]。

在影响海岸线变化的众多因素中, 人类活动的影响通常是最快、最直接和最显著的, 且通常为不可逆过程, 常见的改变海岸线空间位置及类型形态的人类活动主要有围填海之后所进行的水产养殖、盐田建设、港口码头建设、防护堤建设、旅游开发和沿海城镇化建设等^[10-13]。2013 年 10 月我国提出 21 世纪海上丝绸之路的战略构想, 并于 2015 年 3 月发布了《推动共建丝绸之路经济带和 21 世纪海上丝绸之路的愿景与行动》^[14], 标志着该战略构想进入全面实施阶段。享有“海上十字路口”和“海上生命线”之誉的马六甲海峡在该战略中占据着极为重要的角色。海峡每年有各类商船 5 万余艘通过, 年均海上货

运量约占世界海运货物总量的 1/3~1/4, 其年均油、气的海运量相当于世界海运总量的 1/2 和 2/3^[15], 这极大促成了马六甲海峡两岸港口的规模化发展, 也必然导致海峡两岸岸线的形态结构不断发生着变化。

针对不同区域海岸线变化监测的研究已有很多, 例如: Gong 等^[16]基于 Landsat 影像分析了佛罗里达州西部 1984—2013 年间的海岸线时空变化特征; Hou 等^[17]分析了 20 世纪 40 年代初以来中国大陆海岸线的时空变化特征; Purkis 等^[18]分析了 1963—2013 年间迪戈加西亚岛的岸线时空变化特征。针对围填海对海岸线变化特征影响的研究也已有很多, 例如: 朱高儒等^[19]分析了渤海湾西北岸 1974—2010 年逐年填海造陆进程; 魏帆等^[20]运用 3S 技术, 采用水体指数法 (MNDWI)、分形维数法、土地利用转移矩阵和回归分析等方法, 以环渤海海岸带 1980—2017 年

收稿日期: 2018-10-14; 修回日期: 2018-12-11

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项项目 (XDA19060205)

[Foundation: Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No. XDA19060205]

作者简介: 张玉新 (1993-), 男, 山东济南人, 硕士生, 研究方向为海岸线变化遥感监测, E-mail: yxzhang@yic.ac.cn; 侯西勇, 通信作者, E-mail: xyhou@yic.ac.cn

9 个时期 TM 遥感影像为主数据源, 研究了近 40 年围填海活动影响下的环渤海海岸线动态演变特征。目前, 国内外对马六甲海峡的研究大多集中于海峡航道安全及其战略地位研究^[21-23], 而以航道所带有的交通运输功能为主要驱动因素, 分析海岸线时空变化特征的研究还较少。

为了了解马六甲海峡发达的航运能力对两岸岸线的影响, 以及港口区域在不同发展阶段的岸线变化特征, 本研究利用遥感和 GIS 技术, 提取 1988、2000 和 2015 年 3 个时期的岸线信息, 对 1988—2000 年、2000—2015 年和 1988—2015 年 3 个阶段海峡两岸以及檳城港等 12 个主要港口区域的岸线时空变化特征进行分析。

1 研究区与数据源介绍

1.1 研究区概况

马六甲海峡东连南海, 西接安达曼海, 是连接印度洋与太平洋以及东亚、非洲和欧洲的重要水道之一, 加之新加坡海峡, 海峡总长约 1 100 km, 西北口宽约 233 km, 东南新加坡海峡最小宽度不足 20 km。海峡处于赤道无风带, 底质平坦, 水流平缓, 水深 17~70 m 不等, 两岸以滩涂为主, 通航条件良好, 是继英吉利海峡之后的全球第二大繁忙海峡^[24-26]。宫晓

婵评价海上丝绸之路关键节点的动态安全效率, 指出马六甲海峡是安全效率最高的^[27]。可见, 马六甲海峡无论在经济或军事上, 都是极为重要的国际水道。

研究区包括马来半岛西海岸(自西北端泰国的普吉岛 8°12'14.18"N, 98°17'00"E 至东南端马来西亚新山市东南部 1°22'15.74"N, 104°16'57.41"E), 苏门答腊岛东海岸(自西北端 Lampageu 西北部, 5°34'32.50"N, 95°13'30.21"E, 至东南端 Serapung 东南部 0°27'18.00"N, 103°06'25.75"E)以及新加坡全境和印度尼西亚的巴淡岛全境, 如图 1。

1.2 数据源与处理

数据源主要是 1988、2000、2015 年前后的 Landsat TM/OLI 遥感影像(表 1), 所选影像云量较少, 成像清晰, 满足岸线信息的提取要求。影像均为“L1T”产品(Level1 Terrain Corrected Product), 均已经过正射校正和几何校正, 基于这些遥感影像提取的岸线误差不超出 2 个像元。利用 ENVI 5.3、ArcGIS 10.2 软件对影像进行了影像融合、图像增强等数据预处理。辅助数据主要有 GoogleEarth 影像、GlobeLand30 土地利用数据^[28](<http://www.globallandcover.com/GLC30Download/>)、世界港口交通地图集^[29]、世界标准地名地图集^[30]等。

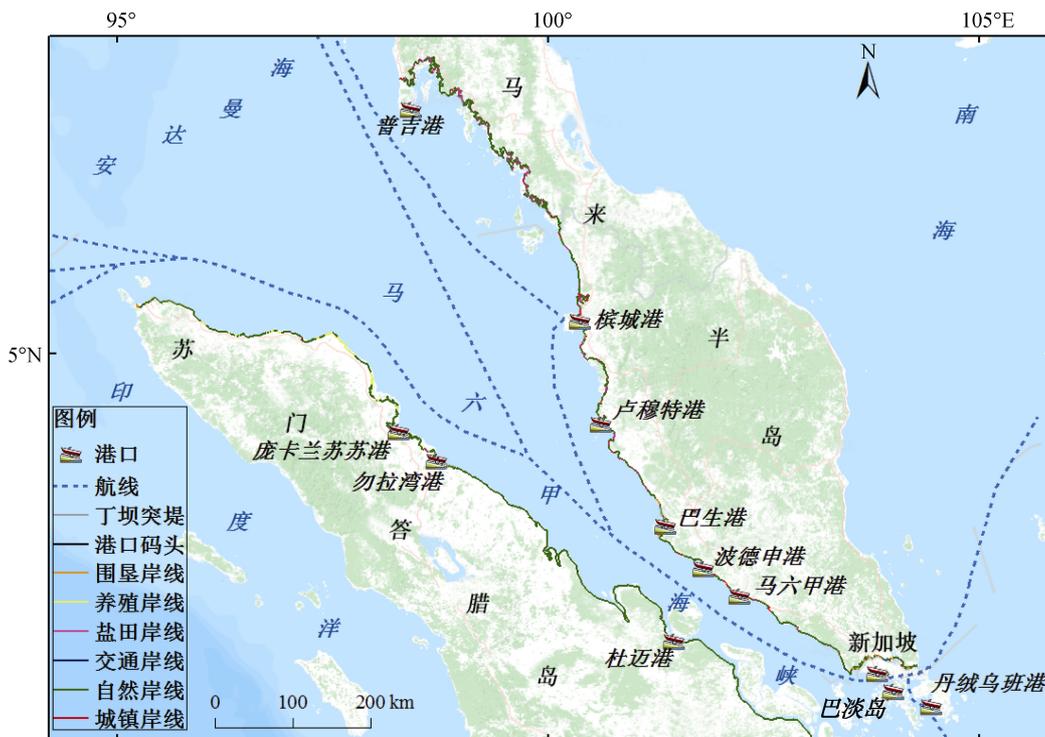


图 1 2015 年马六甲海峡岸线分布

Fig. 1 The coastline distribution of Malacca in 2015

表 1 数据源列表

Tab. 1 List of base data

年份	遥感数据类型	空间分辨率/m	景数/景
1988	Landsat TM	30	21
1989	Landsat TM	30	2
1999	Landsat TM	30	2
2000	Landsat TM	30	15
2001	Landsat TM	30	4
2014	Landsat OLI	30	1
2015	Landsat OLI	30	9
2016	Landsat OLI	30	8

2 研究方法

2.1 岸线分类与提取

海岸线具有明显的瞬时性与动态性特征, 研究中多采用指示海岸线指示海陆边界, 如瞬时水边线、

平均高潮线、高(低)潮线、植被线、干湿分界线和杂物线等^[31], 其中平均高潮线被广泛应用于国内外研究与应用中。因此, 本研究也采用平均高潮线。受地形、地貌、地质构造、近海洋动力、气候环境、海岸生物及人类活动等诸多因素的综合影响, 海岸带在发育过程中会呈现出不同的形态特征, 即表现为不同类型的海岸线^[32-34]。

根据不同岸线类型在影像上的色调、纹理、空间形态和分布等特征差异, 以及马六甲海峡两岸岸线的实际状态, 将海岸线分为人工岸线与自然岸线两个一级类, 又将人工岸线分为丁坝突堤、港口码头、围垦(中)岸线、养殖岸线、盐田岸线、交通岸线、城镇岸线 7 个二级类(表 2)。

基于 ArcGIS 10.2, 按照岸线提取技术规范^[35], 提取马六甲海峡两岸 1988 年前后、2000 年前后、2015 年前后 3 个时期的海岸线。

表 2 马六甲海峡岸线分类

Tab. 2 Categories of coastline in the Straits of Malacca

一级岸线	二级岸线	特征说明
自然岸线		未受人类活动影响, 仍处于自然状态下的岸线。
人工岸线	丁坝突堤	丁坝: 与海岸成一定角度向外伸出, 具有保滩和挑流作用的护岸建筑物; 突堤: 一段与岸连接, 一段伸入海里的实体建筑物。
	港口码头	港池与航运码头形成的岸线。
	城镇岸线	指用于城市、城镇、滨海新区公共和基础设施建设功能用途的海岸段。
	围垦岸线	正在建设中的围海堤坝或经人工围垦还未进行明显功能的开发利用的岸段。
	养殖岸线	用于养殖的人工修筑堤坝。
	盐田岸线	用于盐碱晒制而围垦的堤坝。
	交通岸线	用于交通运输的人工海边道路与围堤。

挑选了海峡两岸 10 个主要港口, 以港口核心区为中心, 15 km 为半径做缓冲区, 分别制作出 10 个港口区域 3 个时期的岸线数据, 由于新加坡和巴淡岛为岛屿, 面积较小, 港口密度较大, 因此, 将新加坡和巴淡岛也作为两个独立的研究单元, 制作出 3 个时期的岸线数据, 如表 3。

2.2 岸线变化分析方法

引入以下量化指标分别从岸线结构、岸线变迁、海陆格局、岸线开发利用 4 个方面进行综合分析。

2.2.1 岸线变迁强度

采用某一时段内海岸线长度的年均变化百分比来表示海岸线的变迁强度(intensity of shoreline change)^[36], 这一指标避免了各研究单元长度不一, 监测时期间隔不同而造成的分析误差, 能够更加客

观地表征岸线长度变迁的时空差异, 公式如下:

$$I_{i,j} = \frac{L_j - L_i}{L_j(j-i)} \times 100\%, \quad (1)$$

式中: $I_{i,j}$ 表示某一研究单元内第 i 年至第 j 年间的岸线长度变迁强度; L_j 、 L_i 分别表示第 i 年和第 j 年的岸线长度; $I_{i,j}$ 为正值表示岸线增长, $I_{i,j}$ 为负值表示岸线缩短, $|I_{i,j}|$ 数值越大, 表示岸线变迁强度越大。

2.2.2 岸线端点速率

选择基线法分别计算 3 个时期两两之间的端点速率, 以 3 个时期叠加之后的最内侧(靠近陆地侧)岸线作为基线, 然后从基线向岸线一侧作长度为 D 的垂线, 相邻两垂线与基线交点间的距离 d 即为基线采样间隔, 每条垂线与两个时期岸线相交, 如图 2, 利用 DSAS 系统, 以两条岸线的距离间隔与时间间

表 3 1988—2015 年各研究单元岸线信息

Tab. 3 Shoreline information of each unit from 1988 to 2015

研究单元	年份	岸线长度/km			研究单元	年份	岸线长度/km		
		人工	自然	总计			人工	自然	总计
普吉港	1988	7.69	106.95	114.64	庞卡兰苏苏港	1988	1.44	118.11	119.55
	2000	13.24	99.75	112.99		2000	22.32	101.65	123.97
	2015	15.99	98.74	114.73		2015	18.4	121.72	140.12
檳城港	1988	24.52	36.09	60.61	勿拉湾港	1988	10.11	79.69	89.81
	2000	59.70	21.57	81.27		2000	20.15	88.81	108.96
	2015	66.96	15.34	82.30		2015	42.46	59.56	102.02
卢穆特港	1988	6.25	68.27	74.51	杜迈港	1988	2.05	31.69	33.75
	2000	20.98	62.77	83.76		2000	4.79	28.80	33.59
	2015	25.70	61.58	87.27		2015	11.51	26.88	38.39
巴生港	1988	20.01	48.75	63.12	巴淡岛	1988	20.11	219.44	239.56
	2000	36.33	23.13	63.93		2000	51.61	183.90	235.52
	2015	32.51	21.89	64.91		2015	85.70	131.69	217.39
波德申港	1988	4.08	49.53	53.61	新加坡	1988	135.89	207.85	343.73
	2000	9.11	48.08	57.18		2000	207.44	167.41	374.85
	2015	13.17	44.24	57.37		2015	291.64	141.58	433.18
马六甲港	1988	7.53	28.16	35.69	南岸合计	1988	52.45	1 694.88	1 747.33
	2000	25.85	15.30	42.19		2000	157.36	1 686.35	1 843.71
	2015	45.44	9.88	55.04		2015	227.46	1 653.52	1 880.99
丹绒乌班港	1988	13.52	110.25	123.77	北岸合计	1988	187.60	2 924.24	3 111.86
	2000	26.10	97.19	123.29		2000	837.09	2 412.64	3 249.74
	2015	24.83	87.91	113.02		2015	1 010.77	2 266.13	3 276.90

隔的比值作为岸线端点速率(end point rate)^[37]。公式如下:

$$R_{m,i,j} = \frac{D_{m,j} - D_{m,i}}{T_{i,j}}, \quad (2)$$

式中, $R_{m,i,j}$ 为 m 剖面的第 i 与第 j 时相间岸线变化的端点速率; $D_{m,i}$ 与 $D_{m,j}$ 分别代表 m 剖面上两个时相岸线与剖面的交点到基线的距离; $T_{i,j}$ 为 i 与 j 时相间的时间间隔。

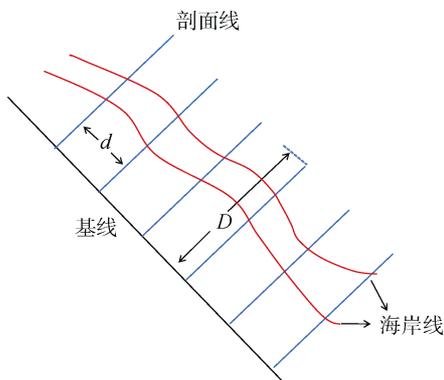


图 2 端点速率计算示意图

Fig. 2 Schematic diagram of calculation of end point rate

2.2.3 岸线开发利用强度

参照土地利用程度综合指数的概念与计算方法, 以及已有文献中的研究基础^[36], 引入岸线开发利用强度(intensity of coastline development and utilization), 定量描述各类岸线对海岸带资源的综合影响程度, 公式如下:

$$U = \frac{\sum_{i=1}^n L_i P_i}{L}, \quad (3)$$

式中: U 为岸线开发利用强度; n 为岸线类型数量; L_i 为研究单元内第 i 类岸线的长度; P_i 为第 i 类岸线类型对海岸带资源的影响因子, 影响因子 P 表示不同海岸类型针对自然海岸的资源环境影响程度大小 ($0 < P_i \leq 1$), 见表 4; L 为研究单元内岸线总长。

2.2.4 陆地面积增长指数

定义单位长度岸线的陆地面积增长量为陆地面积增长指数(index of land area growth), 意在定量表征岸线开发状态与强度信息, 公式如下:

$$G = \frac{A}{L}, \quad (4)$$

式中: G 为陆地面积增长指数, G 为正值表示岸线总体为陆进海退状态, G 为负值表示岸线总体为陆退海

进状态, $|G|$ 越大表示岸线开发强度越大; A 为岸线变迁所造成的陆地面积净变化量; L 为对应岸线长度。

表 4 各类岸线的资源环境影响因子

Tab. 4 Impact factors of resources and environment for all kinds of shorelines

一级岸线	二级岸线	岸线资源环境影响状况	P_i
自然岸线		自然发育状态, 对海岸资源与生态环境影响较小。	0.1
人工岸线	丁坝突堤	占用海岸带资源, 破坏海岸生态环境, 且大多为不可逆。	0.8
	港口码头	占用海岸带资源, 破坏海岸生态环境, 且大多为不可逆。	0.8
	围垦岸线	未完全占用海岸带资源, 对海岸生态环境影响较大。	0.5
	养殖岸线	占用海岸带资源, 对海岸生态环境影响较大, 且部分为不可逆。	0.6
	盐田岸线	占用海岸带资源, 对海岸生态环境影响较大, 且部分为不可逆。	0.6
	交通岸线	占用海岸带资源, 对海岸生态环境影响较小。	0.2
	城镇岸线	占用海岸带资源, 破坏海岸生态环境, 且大多为不可逆。	0.8

3 数据结果

3.1 岸线结构时空变化特征

岸线结构指某一区域内各种类型岸线的长度占总长度的比例情况, 能够反映岸线在长期自然海陆交互作用以及人类活动共同影响下岸线的类型、状态、和属性特征。统计海峡两岸以及 12 个港口区域 3 个时期 7 类人工岸线以及自然岸线的占比情况, 图 3 分别展示 1988 年、2000 年和 2015 年的岸线结构。

1988—2000 年, 海峡南岸自然岸线比例由 97.00% 降到 91.47%, 人工岸线比例由 3.00% 增长到 8.53%; 而北岸的自然岸线比例由 93.97% 急剧减少到 74.24%, 人工岸线比例也相应由 6.03% 猛增到 25.76%, 是原来的 4.27 倍, 其中贡献最大的为养殖岸线, 增加了约 14 倍。12 个港口区域中自然岸线比例下降最快的是檳城港, 由 59.54% 骤减到 26.54%, 其次为马六甲港和巴生港, 这三大港口均为马来西亚最主要的港口, 自然岸线的骤减正是大力发展港口运输和迅速城镇化的结果; 人工岸线增加最快的是庞卡兰苏苏港, 增加了 13.95 倍, 其中围垦岸线贡献最多, 由 0 急剧增加到 10.52%, 这是由于大量的红树林被人类所围垦。

2000—2015 年, 海峡南岸自然岸线比例由 91.47% 降到 87.91%, 人工岸线比例由 8.53% 增长到 12.09%; 而北岸的自然岸线比例由 74.24% 减少到 69.15%, 人工岸线比例由 25.76% 增加到 30.85%。12 个港口区域中, 自然岸线减少最快的是马六甲港, 由 37.18% 减少到 17.86%; 人工岸线比例增长最快的是勿拉湾港, 由 18.49% 增加到 29.98%, 其中盐田岸线和城镇岸线

的大幅增加起主导原因。2000—2015 年这一阶段无论是自然岸线的减少幅度还是人工岸线的增长幅度较 1988—2000 年期间均明显放缓, 北岸尤为显著。

近 30 年, 南北两岸均表现出自然岸线骤减、人工岸线剧增的特征。12 港口区域中, 自然岸线减幅超过 40% 的为马六甲港(77.36%)、檳城港(68.70%)、新加坡(45.95%)、巴生港(43.24%); 人工岸线增幅超过 3 倍的为庞卡兰苏苏港(9.90 倍)、杜迈港(3.93 倍)、巴淡岛(3.7 倍), 可见, 自然岸线减幅明显的港口均位于海峡的北侧, 而人工岸线增加明显的港口多位于海峡的南侧。

就整体结构而言, 1988 年前后, 在多数分析单元内, 自然岸线比例都超过了 90%, 有绝对的主导地位, 然而, 受马六甲海峡发达的交通运输、两岸社会经济发展等人类活动影响, 以及海平面上升、近海极端气候等自然因素的影响, 岸线人工化的速度与规模大幅增加, 自然岸线比例持续降低, 岸线结构开始从以自然岸线为绝对主导的单一类型主导向多种人工岸线并存的多元结构转变。

3.2 岸线变迁强度特征

统计海峡两岸整体和 12 个港口区域 3 个时期的岸线长度, 以及 3 个不同阶段的岸线变迁强度。总的来说, 除个别港口外, 岸线长度总体上是持续增加的, 变迁强度则有所差异, 具体特征见图 4。

1988—2000 年, 南岸岸线年均增长速率为 8.03 km/a, 变迁强度为 0.44%, 北岸岸线年均增长速率达 11.49 km/a, 变迁强度为 0.35%。12 个港口区域中, 普吉港和巴淡岛岸线缩短较多, 主要是因为对沿岸海湾进行围填, “凹”型部分被大量围填造成岸

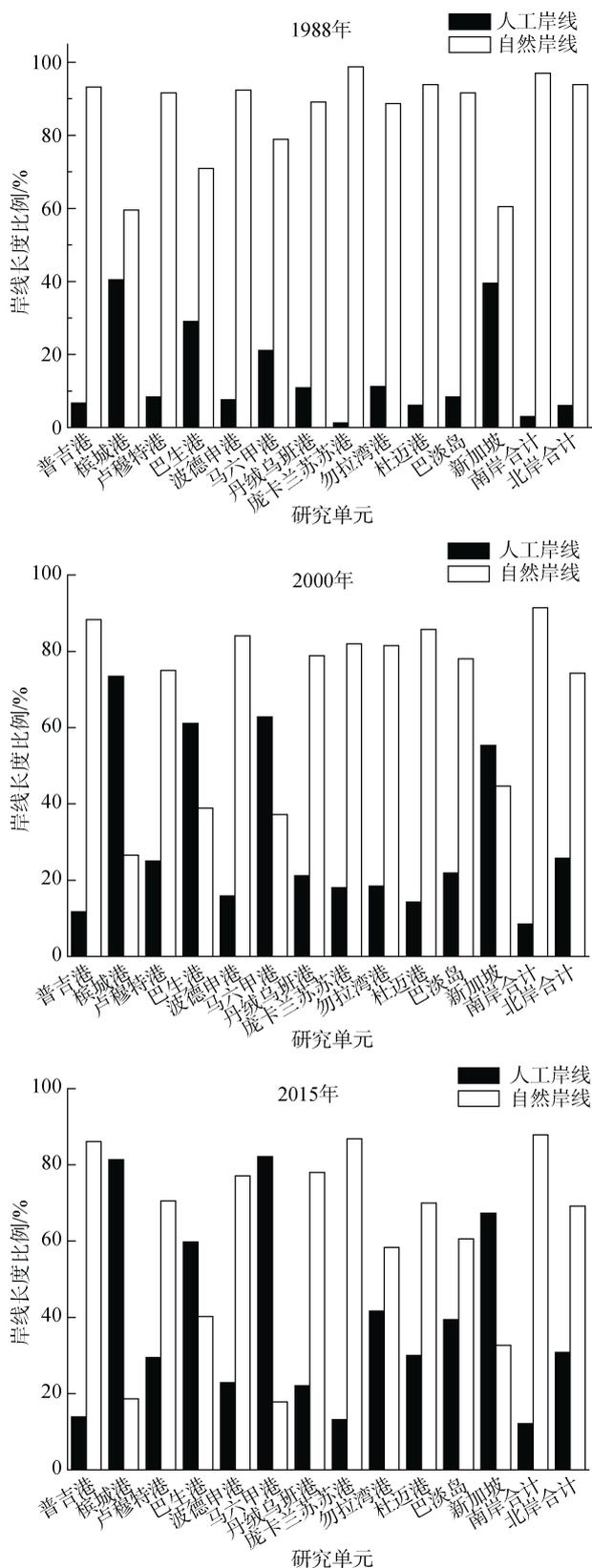


图3 1988—2015年各研究单元岸线结构信息

Fig. 3 Shoreline structure information of each unit from 1988 to 2015

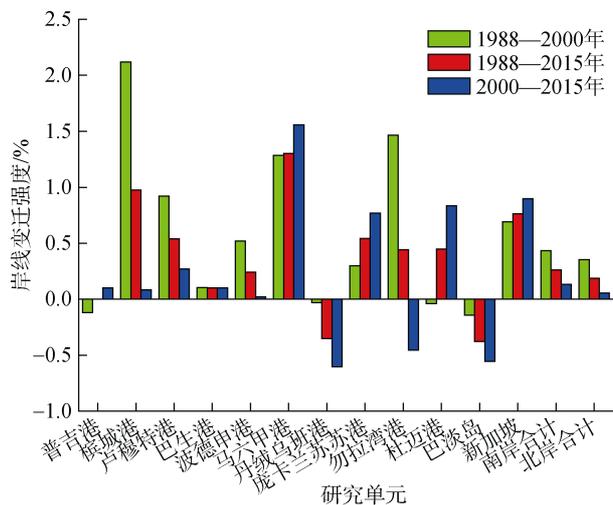


图4 1988—2015年各研究单元岸线变迁强度

Fig. 4 Intensity of shoreline change in each unit from 1988 to 2015

线的缩短；檳城港、勿拉灣港和馬六甲港的变迁强度超过 1%，主要原因都是因为在原来较为平直的岸线基础上围填，进行港口建设以及围垦养殖等人工活动所造成。

2000—2015 年，海峡两岸的岸线长度也均有所增加，但这一阶段的增加幅度和速率较上一阶段均明显萎缩。12 个港口区域中，变迁强度绝对值超过 1% 的仅有馬六甲港，这一阶段岸线长度变化相对不大。

近 30 年，海峡南北两岸的岸线长度均表现为增长，年均增长速率分别为 4.94 km/a 和 6.11 km/a。12 个港口区域中岸线缩短的仅有丹絨烏班港和巴淡島，其余港口区域均是岸线增长。除巴生港外，各港口区域岸线变迁强度绝对值均大于所在沿岸的平均变迁强度。

3.3 岸线变化速率特征

岸线变化速率是描述岸线时空变化特征的最基本要素之一，分别计算海峡两岸和 12 个港口区域的平均变化速率、平均扩张速率以及平均侵蚀速率，总的来说，岸线以向海扩张为主，个别港口区域也有较为明显的侵蚀现象，具体特征见表 5。

1988—2000 年，海峡南岸的扩张岸线与侵蚀岸线的比例相当，分别为 24.09% 和 23.95%，对应岸段的平均变化速率分别为 34.09 m/a 和 -6.08 m/a；北岸的扩张岸线比例两倍于侵蚀岸线，分别为 11.91% 和 6.52%，对应岸段平均变化速率分别为 17.96 m/a 和 -20.12 m/a。12 港口区域中，扩张岸线比例最大的是勿拉灣港，高达 49.75%，对应的扩张速率也最大；

侵蚀岸线比例最大的是杜迈港，为 33.80%，侵蚀速率为-10.05 m/a。

2000—2015 年，海峡南岸的扩张岸线比例约为侵蚀岸线的 1/3，分别为 13.75%和 38.91%，对应岸段的平均变化速率分别为 17.66 m/a 和-25.33 m/a；北岸的扩张岸线与侵蚀岸线比例均较小，分别为 4.25%和 3.62%，对应岸段的平均变化速率为 24.95 m/a 和 -7.34 m/a。12 个港口区域中，扩张岸线比例最大的是巴淡岛，高达 49.91%，平均扩张速率最大的是新加坡；侵蚀岸线比例最高的是勿拉湾港，高达 55.11%，相应的侵蚀速率也最大。

近 30 年，海峡两岸岸线均表现为向海扩张，平均变化速率南岸略小于北岸，但是，无论是扩张侵蚀岸线的比例还是对应的岸线变化速率，南岸均明显大于北岸，这表明，马六甲海峡南侧岸段变化波动较大，不稳定性特征显著。

3.4 海陆格局变化特征

统计近 30 年以及中间两阶段陆进海退、陆退海进的面积规模特征，见表 6。

1988—2000 年，海峡南岸整体净增面积

254.07 km²，*G* 为 0.15，其中向海扩张面积 306.75 km²，向陆后退 52.68 km²；北岸整体净增面积仅 18.89 km²，*G* 仅为 0.01，向海扩张与向陆后退面积相差不大，分别为 62.62 km² 和 43.74 km²。12 个港口区域中，卢穆特港的 *G* 最小为-0.03，向陆后退面积为 2.85 km²；勿拉湾港 *G* 最大为 0.33，净增面积高达 31.50 km²。

2000—2015 年，海峡南岸面积表现为减少状态，萎缩量共 161.62 km²，*G* 为-0.09，其中向海扩张 65.06 km²，向陆后退 226.68 km²；北岸整体面积净增 62.37 km²，*G* 为 0.02，向海扩张 71.28 km²，向陆后退 8.91 km²。12 个港口区域中，勿拉湾港的 *G* 最小为-0.34，向陆后退面积高达 38.71 km²；马六甲港 *G* 最大为 0.27，净增面积为 10.46 km²。

近 30 年，海峡南岸净增面积为 92.45 km²，*G* 为 0.05，其中向海扩张共 304.55 km²，向陆后退 212.10 km²；北岸净增面积为 81.26 km²，*G* 为 0.03，其中向海扩张 119.84 km²，向陆后退 38.58 km²。12 个港口区域中，*G* 最大的是马六甲港，为 0.23，最小的是均位于南岸的勿拉湾港和杜迈港，为-0.08，另外，*G* 绝对值整体上一直表现为南岸大于北岸。

表 5 各研究单元岸线变化速率

Tab. 5 Shoreline change rate in each unit

研究单元	平均变化速率/(m/a)			平均扩张速率/(m/a)			平均侵蚀速率/(m/a)		
	1988—2000 年	1988—2015 年	2000—2015 年	1988—2000 年	1988—2015 年	2000—2015 年	1988—2000 年	1988—2015 年	2000—2015 年
普吉港	2.38	0.60	-0.82	21.88	5.97	8.72	-2.21	-3.05	-17.33
檳城港	4.99	3.73	2.73	22.82	9.80	12.09	-8.74	-2.00	-1.47
卢穆特港	-2.23	-0.81	0.33	5.41	2.37	5.80	-18.67	-8.34	-0.72
巴生港	-4.35	0.66	4.68	35.11	18.21	28.81	-62.71	-19.14	-10.21
波德申港	3.06	1.22	-0.24	8.83	3.65	4.33	-2.16	-0.91	-8.75
马六甲港	1.72	8.48	13.89	11.99	23.60	59.71	-7.48	-2.63	-9.05
丹绒乌班港	-0.65	0.86	2.06	9.25	7.77	14.54	-8.08	-3.15	-3.59
庞卡兰苏苏港	7.83	8.03	8.18	34.31	24.03	46.63	-3.45	-2.11	-6.01
勿拉湾港	28.65	-4.01	-30.13	69.14	13.50	20.68	-37.28	-17.14	-63.95
杜迈港	-1.05	-3.02	-4.60	6.68	7.47	4.32	-10.05	-6.39	-9.85
巴淡岛	3.83	6.64	8.88	30.95	18.83	27.87	-8.45	-4.28	-5.96
新加坡	11.89	10.82	9.95	69.84	36.97	54.00	-15.08	-6.68	-3.03
南岸合计	10.30	0.91	-6.60	34.09	18.22	17.66	-6.08	-8.87	-25.33
北岸合计	0.59	1.20	1.69	17.96	10.51	24.95	-20.12	-6.58	-7.34

3.5 岸线开发利用强度特征

3 个时期岸线开发利用强度如图 5，总的来说，3 个时期的开发利用强度呈逐年增长态势，具体特征如下。

1988 年，南北两岸的岸线开发利用强度相仿，

分别为 0.12 和 0.13。12 个港口区域中，最大的是檳城港和新加坡，均为 0.32，巴生港和马六甲港次之，分别为 0.23 和 0.20，均位于海峡北岸，其余港口区域均大于 0.10 小于 0.20。

表 6 各研究单元面积净变化与陆地面积增长指数

Tab. 6 Net change in area and index of land area growth in each unit

研究单元	面积净变化量/km ²			陆地面积增长指数		
	1988—2000年	2000—2015年	1988—2015年	1988—2000年	2000—2015年	1988—2015年
普吉港	2.67	1.75	-0.92	0.02	0.02	-0.01
檳城港	4.12	7.79	3.68	0.07	0.13	0.05
卢穆特港	-2.30	-1.97	0.33	-0.03	-0.03	0.00
巴生港	-1.34	1.75	3.09	-0.02	0.03	0.05
波德申港	1.61	1.47	-0.14	0.03	0.03	0.00
马六甲港	0.95	11.41	10.46	0.03	0.32	0.27
丹絨乌班港	-0.98	1.87	2.85	-0.01	0.02	0.02
庞卡兰苏苏港	13.88	27.89	14.01	0.12	0.23	0.11
勿拉湾港	29.51	-7.00	-36.51	0.33	-0.08	-0.34
杜迈港	-0.62	-2.63	-2.01	-0.02	-0.08	-0.06
巴淡岛	11.09	40.17	29.08	0.05	0.17	0.12
新加坡	42.93	91.79	48.85	0.13	0.27	0.13
南岸合计	254.07	92.45	-161.62	0.15	0.05	-0.09
北岸合计	18.89	81.26	62.37	0.01	0.03	0.02

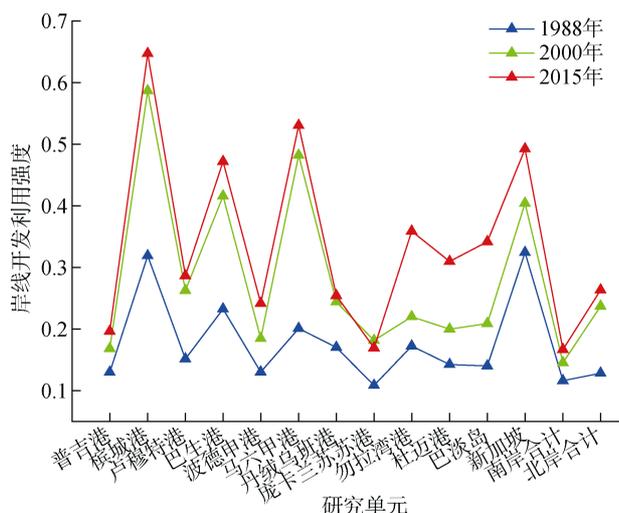


图 5 1988—2015 年各研究单元岸线开发利用强度

Fig. 5 The intensity of coastline development and utilization in each unit from 1988 to 2015

2000 年, 南北两岸的岸线开发利用强度均有所增加, 分别增加到了 0.15 和 0.24, 前者增幅要小于后者。12 个港口区域仍大致分为 3 个层次, 最高的为檳城港, 高达 0.59。介于 0.30~0.50 的有巴生港、马六甲港和新加坡, 分别为 0.42、0.48 和 0.40。其余区域均介于 0.10~0.30, 最小是普吉港, 仅为 0.17。另外, 较 1988 年来说, 马六甲港和檳城港增幅较大, 分别增加了 0.28 和 0.27。

2015 年, 南北两岸的岸线开发利用强度均增加了 0.02。12 个港口区域同样大致分为 3 个层次, 强

度大于 0.50 的有檳城港和马六甲港, 分别为 0.65 和 0.53。介于 0.30~0.50 的有巴生港、乌拉湾港、杜迈港、巴淡岛和新加坡。其余区域均介于 0.10~0.30, 庞卡兰苏苏港最小, 仅为 0.17。

近 30 年, 马六甲海峡北岸港口在 1988—2000 年这一阶段的岸线开发利用强度增长较快, 为港口的快速开发阶段, 2000—2015 年则为开发饱和阶段, 增长明显放缓。然而, 对于海峡南岸港口(除庞卡兰苏苏港)和巴淡岛而言, 第一阶段开发较慢, 第二阶段才是其快速开发阶段。新加坡在这 30 年则一直表现为均速开发态势。

4 结论与讨论

基于 1988 年、2000 年和 2015 年前后的 3 期遥感影像提取 3 个时期马六甲海峡两岸的岸线数据, 基于整体以及 12 个主要的港口区域, 从 5 个方面分析岸线的时空动态特征, 主要结论如下。

1) 近 30 年, 马六甲海峡两岸及 12 个主要港口区域的岸线在长度、结构组成、空间位置和开发利用强度等方面都发生了较大的变化, 主要体现为人工岸线长度和比例不断增加、岸线的开发利用强度持续增强、岸线长度和空间位置除个别港口区域外, 分别表现为长度不断增长、岸线位置不断背陆向海运动, 海陆格局整体表现为陆进海退的扩张态势。

2) 岸线结构与岸线开发利用强度存在较为明显的时空差异性, 整体表现为: 1988—2000 年, 马六甲

海峡南侧港口区域处于早期发展阶段,人工岸线比例与开发利用强度增长缓慢,而北侧港口区域则处于快速发展阶段,人工岸线比例与开发利用强度均大幅增加;2000—2015年,海峡南侧港口区域进入到快速发展阶段,水产养殖业、港口码头和城镇化建设加快,人工岸线比例和岸线开发利用强度迅速增加,北侧港口区域发展则接近饱和状态,人工岸线比例和岸线开发强度增长明显放缓,但整体上北侧沿岸及港口区域的发展程度仍强于南侧。导致这些差异的主要原因是,马六甲海峡的主航道是沿马来半岛一侧,大型船舶多经停北侧沿岸的港口,因此,海峡北岸的港口建设及社会经济发展受航运影响时间早,影响程度大。另一方面,就岸线位置的空间稳定性而言,整体表现为南岸稳定性要差于北岸,主要原因是因为苏门答腊岛沿岸分布大量沼泽湿地,岸线较为曲折,一方面受人为开发影响,占用大量湿地进行养殖、港口和城镇化建设,另一方面,沿岸地势低平,受海平面上升和近海极端天气影响,尤其近十几年间,侵蚀岸线比例加剧,以红树林为主的大量湿地侵蚀严重。

3) 近30年,马六甲海峡两岸岸线的各方面变化是自然因素和人类活动因素共同影响的综合反馈,但马六甲海峡作为国际上重要的水道之一,航运是两岸社会经济发展的主要驱动要素,因此,以围填海为主的人类活动无疑是主导的影响因素,且其影响随离主航道距离的增加而有所递减,与 Yan 等^[38]得出的结论一致。

随着“一带一路”倡议的不断推进发展,马六甲海峡在“海上丝绸之路”的发展中仍将担任连接亚、欧、非的重要纽带,其交通运输功能将持续影响两岸岸线的开发与利用,因此,港口岸线的开发、港口城市的城镇化建设以及沿岸自然岸线的保护是未来马六甲海峡两岸岸线综合管理的重要任务。建议以港口基础设施、装卸效率、服务功能以及信息化程度等因素为标准,对港口级别以及发展阶段进行等级的划分并实施分类管理,从岸线开发、保护和管理三个方面,分别建立针对不同级别及处于不同发展阶段港口的岸线综合管理办法,一方面要避免或杜绝无序开发、低效开发和破坏性开发的现象,优化和提高岸线资源的利用效率,另一方面要大力保护现有自然岸线资源,并尝试修复已被破坏的自然岸线。

参考文献:

[1] Mujabar P S, Chandrasekar N. Shoreline change analysis

along the coast between Kanyakumari and Tuticorin of India using remote sensing and GIS[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2013, 6(3): 647-664.

- [2] Cooper M J P, Beevers M D, Oppenheimer M. The potential impacts of sea level rise on the coastal region of New Jersey, USA[J]. *Climatic Change*, 2008, 90(4): 475.
- [3] 高义, 王辉, 苏奋振, 等. 中国大陆海岸线近 30 a 的时空变化分析[J]. *海洋学报*, 2013, 35(6): 31-42.
Gao Yi, Wang Hui, Su Fenzhen, et al. The analysis of spatial and temporal changes of the continental coastlines of China in recent three decades[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 35(6): 31-42.
- [4] Sthilaregravel D, Forbes D L, Bell T. Multitemporal analysis of a Gravel-Dominated coastline in the Central Canadian Arctic Archipelago[J]. *Journal of Coastal Research*, 2012, 28(2): 421-441.
- [5] 朱高儒, 许学工. 填海造陆的环境效应研究进展[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(4): 761-766.
Zhu Gaoru, Xu Xuegong. Research review on environmental effects of land reclamation from sea[J]. *Journal of Ecology and Environment*, 2011, 20(4): 761-766.
- [6] 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 Fenzhen, Zhou Chenghu, et al. Scale effects of China mainland coastline based on fractal theory[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(3): 331-339.
- [7] 王璵, 吴志峰, 李少英, 等. 珠江口湾区海岸线及沿岸土地利用变化遥感监测与分析[J]. *地理科学*, 2016, 36(12): 1903-1911.
Wang Jin, Wu Zhifeng, Li Shaoying, et al. Coastline and land use change detection and analysis with remote sensing in the Pearl River Estuary Gulf[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(12): 1903-1911.
- [8] 姚晓静, 高义, 杜云艳, 等. 基于遥感技术的近 30a 海南岛海岸线时空变化[J]. *自然资源学报*, 2013, 28(1): 114-125.
Yao Xiaojing, Gao Yi, Du Yunyan, et al. Spatial and temporal changes of Hainan coastline in the past 30 years based on RS[J]. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(1): 114-125.
- [9] Ekercin S. Coastline change assessment at the aegean sea coasts in turkey using multitemporal Landsat imagery[J]. *Journal of Coastal Research*, 2007, 23(3): 691-698.
- [10] 刘百桥, 孟伟庆, 赵建华, 等. 中国大陆 1990—2013 年海岸线资源开发利用特征变化[J]. *自然资源学报*, 2015(12): 2033-2044.
Liu Baiqiao, Meng Weiqing, Zhao Jianhua, et al. Variation of coastline resources utilization in China from

- 1990 to 2013[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015(12): 2033-2044.
- [11] 张晓祥, 王伟玮, 严长清, 等. 南宋以来江苏海岸带历史海岸线时空演变研究[J]. *地理科学*, 2014, 34(3): 344-351.
Zhang Xiaoxiang, Wang Weiwei, Yan Changqing, et al. Historical coastline spatio-temporal evolution analysis in Jiangsu coastal area during the past 1000 years[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(3): 344-351.
- [12] Sadio M, Anthony E, Diaw A, et al. Shoreline changes on the wave-influenced Senegal River Delta, West Africa: The roles of natural processes and human interventions[J]. *Water*, 2017, 9(6): 357.
- [13] 张君珏, 苏奋振, 左秀玲, 等. 南海周边海岸带开发利用空间分异[J]. *地理学报*, 2015, 70(2): 319-332.
Zhang Junjue, Su Fenzhen, Zuo Xiuling, et al. Research on the spatial differentiation of coastal land development surrounding South China Sea[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(2): 319-332.
- [14] 国家发展改革委, 外交部, 商务部. 推动共建丝绸之路经济带和 21 世纪海上丝绸之路的愿景与行动[J]. *交通财会*, 2015(4): 82-87.
National Development and Reform Commission, Ministry of Foreign Affairs of the People's Republic of China, Ministry of Commerce of the People's Republic of China. Vision and actions on jointly building silk road economic belt and 21st-century maritime silk road[J]. *Finance & Accounting for Communications*, 2015(4): 82-87.
- [15] 史春林, 史凯册. 马六甲海峡安全问题与中国战略对策[J]. *新东方*, 2014(2): 6-11.
Shi Chunlin, Shi Kaice. The security problem of the straits of Malacca and China's strategic countermeasures[J]. *The New Oriental*, 2014(2): 6-11
- [16] Li Wenyu, Gong Peng. Continuous monitoring of coastline dynamics in western Florida with a 30-year time series of Landsat imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 179: 196-209.
- [17] Hou Xiyong, Wu Ting, Hou Wan, et al. Characteristics of coastline changes in mainland China since the early 1940s[J]. *Science China Earth Sciences*, 2016, 59: 1791-1802.
- [18] Purkis S J, Gardiner R, Johnston M W, et al. A half-century of coastline change in Diego Garcia: the largest atoll island in the Chagos[J]. *Geomorphology*, 2016, 261: 282-298.
- [19] 朱高儒, 许学工. 渤海湾西北岸 1974—2010 年逐年填海造陆进程分析[J]. *地理科学*, 2012, 32(8): 1006-1012.
Zhu Gaoru, Xu Xuegong. Annual processes of land reclamation from the sea along the northwest coast of Bohai Bay during 1974 to 2010[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(8): 1006-1012.
- [20] 魏帆, 韩广轩, 韩美, 等. 1980—2017 年环渤海海岸线和围填海时空演变及其影响机制[J]. *地理科学*, 2019, 39(6): 997-1007.
Wei Fan, Han Guangxuan, Han Mei, et al. Temporal-spatial dynamic evolution and mechanism of shoreline and the sea reclamation in the Bohai rim during 1980-2017[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2019, 39(6): 997-1007.
- [21] Ba A D. Governing the safety and security of the Malacca Strait: The nippon foundation between states and industry[J]. *Journal of Contemporary Asia*, 2017, 48(2): 1-26.
- [22] 潘一宁. 马六甲海峡安全与国际合作[J]. *东南亚南亚研究*, 2005(2): 35-40.
Pan Yining. Safety of Malacca Strait and international cooperation[J]. *Southeast Asian and South Asian Studies*, 2005(2): 35-40.
- [23] 杨仁飞. 马六甲海峡问题的最新发展及对南海问题的启示[J]. *东南亚纵横*, 2004(9): 38-42.
Yang Renfei. The latest development on the issue of the Malacca Strait and the inspiration on South China Sea issue[J]. *Around Southeast Asian*, 2004(9): 38-42.
- [24] Thia-Eng C, Gorre I R L, Ross S A, et al. The Malacca Straits[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2000, 41(1): 160-178.
- [25] 郭伟, 王颖. 马六甲海峡-南海航线与当代中国经济发展[J]. *第四纪研究*, 2006, 26(3): 485-490.
Guo Wei, Wang Ying. Navigation route of straits of Malacca-South China Sea and modern economic development of China[J]. *Quaternary Research*, 2006, 26(3): 485-490.
- [26] 俞慕耕. 略论马六甲海峡的水文特点[J]. *海洋湖沼通报*, 1987(2): 8-18.
Yu Mugeng. Hydrographic in the strait of Malacca[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 1987(2): 8-18.
- [27] 宫晓婷, 吕靖. 海上丝绸之路关键节点动态安全效率评价[J]. *系统工程学报*, 2017, 32(3): 414-422.
Gong Xiaoxing, Lü jing. Dynamic safety efficiency evaluation of key nodes in Maritime Silk Road[J]. *Journal of Systems Engineering*, 2017, 32(3): 414-422.
- [28] Chen Jun, Chen Jin, Liao Anping, et al. Global land cover mapping at 30m resolution: A POK-based operational approach[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 103: 7-27.
- [29] 周敏. 世界港口交通地图集[M]. 北京: 中国地图出版社, 2013: 1.
Zhou Min. Atlas of World Port Traffic[M]. Beijing: China Cartographic Publishing House, 2013: 1.

- [30] 中国地图出版社. 世界标准地名地图集[M]. 北京: 中国地图出版社, 2014: 7.
China Cartographic Publishing House. Atlas of Standard Place Names of Word[M]. Beijing: China Cartographic Publishing House, 2014: 7.
- [31] Boak E H, Turner I L. Shoreline definition and detection: A review[J]. Journal of Coastal Research, 2005, 21(4): 688-703.
- [32] 朱国强, 苏奋振, 张君珏. 南海周边国家近 20 年海岸线时空变化分析[J]. 海洋通报, 2015, 34(5): 481-490.
Zhu Guoqiang, Su Fenzhen, Zhang Junjue. Analysis on spatial-temporal changes of the coastline in the countries around the South China Sea in recent two decades[J]. Marine Science Bulletin, 2015, 34(5): 481-490.
- [33] 索安宁, 曹可, 马红伟, 等. 海岸线分类体系探讨[J]. 地理科学, 2015, 35(7): 933-937.
Suo Anning, Cao Ke, Ma Hongwei, et al. Discussion on classification system of coastline[J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(7): 933-937.
- [34] Xu Jinyong, Zhang Zengxiang, Zhao Xiaoli, et al. Spatial and temporal variations of coastlines in northern China (2000–2012)[J]. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24(1): 18-32.
- [35] 侯西勇, 毋亭, 王远东, 等. 20 世纪 40 年代以来多时相中国大陆岸线提取方法及精度评估[J]. 海洋科学, 2014, 38(11): 66-73.
Hou Xiyong, Wu Ting, Wang Yuandong, et al. Extraction and accuracy evaluation of multi-temporal coastlines of mainland China since 1940s[J]. Marine Sciences, 2014, 38(11): 66-73.
- [36] 叶梦姚, 李加林, 史小丽, 等. 1990-2015 年浙江省大陆岸线变迁与开发利用空间格局变化[J]. 地理研究, 2017, 36(6): 1159-1170.
Ye Mengyao, Li Jialin, Shi Xiaoli, et al. Spatial pattern change of the coastline development and utilization in Zhejiang from 1990 to 2015[J]. Geographical Research, 2017, 36(6): 1159-1170.
- [37] 毋亭, 侯西勇. 1944—2012 年胶州湾岸线时空动态特征[J]. 科技导报, 2015, 33(2): 28-34.
Wu Ting, Hou Xiyong. Spatial-temporal characteristics of coastline in Jiaozhou Bay during the period of 1944-2012[J]. Science & Technology Review, 2015, 33(2): 28-34.
- [38] Yan Jinfeng, Su Fenzhen, Wang Menghan. The development processes and regional differentiation of both banks of the Strait of Malacca during 1980–2010[J]. Ocean & Coastal Management, 2017, 139: 141-152.

Spatial–temporal characters of coastline changes in the Strait of Malacca during 1988–2015

ZHANG Yu-xin^{1, 2, 3}, SONG Yang^{1, 2, 3}, HOU Xi-yong^{1, 3}

(1. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China)

Received: Oct. 14, 2018

Key words: coastline change; natural coastline; hardened coastline; development and utilization intensity; the Strait of Malacca; port

Abstract: Based on Landsat remote sensing images, the coastlines on both sides of the Straits of Malacca were extracted in 1988, 2000, and 2015. From the aspects of coastline structure, coastline change rate, land-sea patterns, and strength of shoreline development and utilization, the spatial–temporal characteristics of the coastline changes during different time periods, 1988–2000, 2000–2015, and 1988–2015, on both sides of the Straits of Malacca and 12 major ports, such as the Penang Port, were analyzed. The conclusions are as follows: The coastline structure in the study area changed significantly, particularly in the port area, where it gradually changed from single-type to multi-structure, and the length and proportion of the artificial shoreline increased sharply. Except for a few ports, the coastlines on both sides expanded seaward, and the average rates of the coastlines change on the north and south sides were 0.91 m/a and 1.20 m/a, respectively. The stability of the south shoreline of the strait was worse than that of the north bank because of the wide swamp of the south shoreline, low terrain, and rising sea level. The degree of the shoreline development and utilization continued to increase. The spatial difference between the north bank of the strait and south bank was significant. The growth of the first phase of the north bank was faster than that of the second phase, while the growth of the first phase of the south bank was slower than that of the second phase. The main driving factor of the changes in the coastline of the two sides was the transportation function of the Straits of Malacca.

(本文编辑: 刘珊珊)

勘 误

发表于《海洋科学》2019年第43卷第5期P19—P26刘洪艳,王珊的文章“海洋沉积物中异化铁还原细菌还原重金属Cr(VI)研究”,其DOI号出现错误,此错误与作者无关。应改为:

DOI: 10.11759/hyxx20190211001

有关网站的电子版本也将及时进行替换。