

21 世纪初期海上丝绸之路大陆岸线位置变化特征

宋 洋^{1,3,4}, 张玉新^{1,2,3,4}, 侯西勇^{1,3,4}

(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; 4. 山东省海岸带环境过程重点实验室, 中国科学院海岸带研究所, 山东 烟台 264003)

摘要: 基于遥感和 GIS 技术, 利用 Landsat 影像目视解译提取 2000 和 2015 年海上丝绸之路大陆岸线数据, 从整体、洲际尺度、国家尺度、热点区域和港口城市 5 个空间尺度分析大陆岸线位置变化特征。结果表明: (1) 整体方面, 2000 年和 2015 年海上丝绸之路沿线地区岸线扩张和后退的比例(速度)分别为 8.21%(27 m·a⁻¹)和 6.42%(-22 m·a⁻¹), 陆地净增长 954 km², 相当于整体向海扩张 12 m; (2) 洲际尺度, 除南亚岸线后退比例高于扩张比例外, 其他大洲岸线的扩张比例和强度均明显强于其后退的, 其中, 东南亚、西亚和南亚地区岸线扩张强度尤其剧烈, 陆地增长显著; (3) 国家层面, 大陆岸线以扩张为主要特征; 缅甸、越南、孟加拉国和阿联酋岸线扩张最为剧烈, 陆地增长普遍超过 100 km²; 马来西亚、伊朗、沙特阿拉伯、印度和卡塔尔岸线扩张也比较显著, 陆地增长面积在 30~60 km² 之间; 波黑和斯洛文尼亚岸线保持稳定, 巴基斯坦岸线后退尤为严重; (4) 岸线扩张的热点区域主要分布在莫塔马湾、恒河三角洲、红河三角洲、肯帕德湾和阿联酋东中岸段等区域, 岸线后退的热点区域主要分布在卡其沼泽地区; (5) 迪拜、多哈、海防和阿巴斯等港口城市及周边地区岸线扩张趋势和强度都比较明显, 陆地增长显著。本研究对于一带一路倡议的推进以及海上丝绸之路沿线的海岸带保护具有一定的指导意义。

关键词: 海上丝绸之路; 大陆岸线; 洲际尺度; 国家尺度; 热点区域; 港口城市; 岸线摆动

中图分类号: P748 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2021)07-0018-11

DOI: 10.11759/hyxx20200812001

海岸带作为沟通陆地和海洋的桥梁, 蕴藏着丰富的自然资源, 承载着多样性的生物资源^[1-2], 但海岸带生态系统又极其脆弱和敏感, 极易受到外部因素的影响, 时常遭遇无法逆转的不利影响^[3]。长时间尺度海岸带生态环境变化主要受自然因素的影响^[4-5], 人类活动则对短时间尺度海岸带生态环境变化影响剧烈^[6-7], 而海岸线作为海陆的分界, 受全球变化和人类活动的影响最为直接, 已成为海岸带生态环境变化研究以及经济社会发展重点关注的问题之一^[3, 8]。

“21 世纪海上丝绸之路”沿岸地区受全球变化影响显著, 而海上丝绸之路国家海岸带经济亦处于快速发展时期^[9], 未来势必迎来更大规模、更高强度的岸线开发与利用^[10]。本研究利用遥感技术获取 2000 年和 2015 年海上丝绸之路沿线地区大陆岸线数据, 从整体、洲际尺度、国家尺度、热点区域和港口城市 5 个空间尺度, 对海上丝绸之路沿线大陆岸线时空变化特征进行分析, 揭示岸线时空变化的热点区域, 以期对海上丝绸之路海岸带地区的生态环境变化、

经济社会发展与管理决策制定提供有力的支撑。

1 研究区与数据源介绍

1.1 研究区概况

海上丝绸之路沿线地区空间范围广阔, 东西连接亚欧非 3 个大陆, 依次经过 43 个国家和地区(图 1), 自然地理环境总体复杂多样, 区域差异比较显著。东南亚和南亚地区既有高原、山地, 又有富饶的滨海平原和大型河口三角洲, 也分布着大量的热带雨林地区; 西亚和东北非许多地区分布着极度干旱的荒漠和沙漠地带, 生态环境总体比较脆弱; 地中海作为最大的陆间海, 沿岸地区冬暖多雨, 夏热干燥; 北大

收稿日期: 2020-08-12; 修回日期: 2020-10-16

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项项目(XDA19060205)

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

作者简介: 宋洋(1988—), 男, 山东威海人, 博士, 研究方向为海岸线变化遥感监测, E-mail: ysong@yic.ac.cn; 侯西勇(1975—), 通信作者, 研究员, E-mail: xyhou@yic.ac.cn

西洋地区气候温和且季节变化小,降水丰富,沿海有滨海平原分布^[11]。除自然地理环境区域差异显著外,海上丝绸之路沿线地区的经济发展、人口增长和

产业布局等也明显不同,其中,港口城市由于区位优势、发展基础好,因而成为当前海上丝绸之路沿线国家和地区经济社会发展的热点和重点区域。

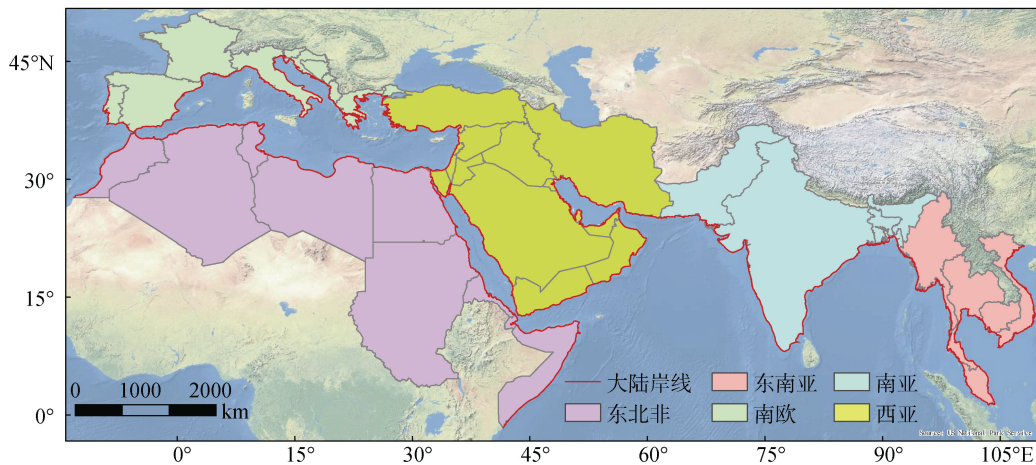


图1 海上丝绸之路洲际尺度大陆岸线空间分布图(审图号: GS(2016)1663号)
Fig. 1 Mainland shoreline at continent scales over the Mainland Maritime Silk Road

1.2 数据源与处理

1.2.1 岸线提取的数据源

选取 Landsat 影像作为大陆岸线提取的数据源,由美国地质调查局(USGS)提供免费下载(<http://landsat.usgs.gov/>),提取两个时相岸线所需的遥感影像数量如表 1 所示,2000 年的 Landsat TM 和 2015 年的 Landsat OLI 影像分别达 319 景和 305 景。Landsat 影像空间分辨率为 30 m,已完成辐射矫正、系统几何校正和地形纠正,可满足岸线位置提取等工作需求。在预处理过程中,利用多种波段组合方式对影像进行合成和展示,以突出地物丰富的光谱信息,如果地物信息差别仍不明显,则对影像进行直方图均衡化、标准差等影像增强处理,确保在影像上能够清晰辨认大陆岸线所在位置,保证人机交互解译的数据质量。

表1 提取大陆岸线所需的 Landsat 遥感影像数量(单位:景)
Tab. 1 Amounts of Landsat imageries used for shoreline extraction (Unit: Scenes)

洲际区域	2000 年	2015 年
东南亚	56	54
南亚	48	44
西亚	74	70
东北非	86	87
南欧	55	50
合计	319	305

1.2.2 辅助数据源

高分辨率遥感影像和专题地理空间数据是岸线提取及其精度验证的重要辅助数据。一方面,Google Earth 影像被用于辅助识别难以分辨的地物,以保证海岸线位置的提取精度,并在岸线数据制作完成后,以其为基础采集验证数据对岸线位置进行精度验证。另一方面,海上丝绸之路沿线地区红树林等生物岸线分布广泛,USGS 基于 Global Land Survey(GLS)数据和 Landsat 影像对全球 1997—2000 年的红树林进行了长期观测,目前已进行了第三次数据更新^[12],本研究在提取大陆岸线过程中参考了该红树林专题分布数据。

1.3 研究方法

1.3.1 岸线的定义

海岸线,即海陆分界线,具有瞬时性和动态性特征,因而在实际研究中多以植被线、杂物堆积线、平均高潮线、平均大潮高潮线等目视可识别线或潮汐指示岸线代表海岸线的位置^[13-14]。在缺乏潮汐数据的情况下,计算机方法提取的瞬时水边线等岸线指示要素很难被校正至真实岸线位置^[15],而崖壁线、滩脊线和植被线等长期稳定的平均大潮高潮线在遥感影像上则容易识别^[16],并且在国际上绘制地形图等过程中多采用平均大潮高潮线代表海陆边界^[17],因此本研究也采用平均大潮高潮线,基于遥感影像提取海上丝绸之路地区的大陆岸线。

1.3.2 岸线位置提取

计算机等自动解译方法提取的瞬时水边线不能

够代表真实岸线位置,而人工目视解译方法虽然费时费力,但提取的平均大潮高潮线却能够代表真实岸线位置,因此本研究在 GIS 环境中选用人工目视解译方法进行岸线提取。岸线分类体系如表 2 所示,分为基岩岸线、淤泥质岸线、砂砾质岸线、生物岸线和人工岸线共 5 种类型。岸线解译标准如下: 1) 基岩岸线: 提取水边线作为基岩海岸的岸线位置; 2) 淤泥质岸线: 提取植被茂盛与稀疏度差异分明的地方作为淤泥质岸线位置; 3) 砂砾质岸线:

提取滩脊线、杂物堆积线等亮度发生明显转折的地方作为平直砂砾质岸线位置,提取滩与崖的交接处作为陡崖砂砾质岸线位置; 4) 生物岸线: 提取红树林等区域的陆地一侧边界作为生物海岸岸线位置; 5) 河口岸线: 提取河道突然展宽或者地形明显转折变化地区的节点连线作为河口处的岸线位置; 6) 人工岸线: 通常不会被海水淹没,因此多提取向海一侧边线作为人工岸线位置,在河口等特殊区域,以最接近河口的防潮闸或道路桥梁作为人工岸线位置。

表 2 海上丝绸之路岸线分类体系

Tab. 2 Classification system for shoreline along the Maritime Silk Road

岸线类型	岸线说明
基岩岸线	位于基岩海岸的岸线
淤泥质岸线	位于淤泥或粉砂泥滩海岸的岸线
砂砾质岸线	位于沙滩海岸的岸线,包括平直砂砾质岸线和陡崖砂砾质岸线
生物岸线	由红树林等组成的岸线
人工岸线	人工加固的岸线,包括丁坝突堤、港口码头、围垦岸线、养殖岸线、盐田岸线、交通岸线、防潮堤岸线和城镇岸线

1.3.3 岸线提取精度评估方法

岸线位置准确是进行岸线时空变化分析的重要前提^[19]。本研究选取 Landsat 遥感影像上基岩岸线、道路岸线以及河口闸门等岸线位置长期稳定不变的地方为待验证点,导入更高分辨率的 Google Earth 影像中,利用点对法^[20-21]计算待验证点与 Google Earth 中实际点之间的距离,得到一个距离序列,检验这一序列的平均值、均方根误差等指标是否小于遥感影像提取岸线的理论最大允许误差^[22-23]。均方根误差和理论最大允许误差计算公式如下:

$$S = \sqrt{\frac{D_1^2 + D_2^2 + D_3^2 + \dots + D_n^2}{n}}, \quad (1)$$

$$P = \frac{2\sqrt{2}}{3} \times a, \quad (2)$$

式中, S 为均方根误差, D 为海岸线位置长期不变的特征点与 Google Earth 中岸线间的垂直距离, n 为位置长期不变的待验特征点的个数, P 为理论最大允许误差, a 为遥感影像分辨率。

1.3.4 岸线变化速率分析

岸线变化速率是岸线摆动强度的指标。端点速率法利用首末两时相岸线位置计算变化速率,简单快速,适合表征 2000 和 2015 共 2 个年份的岸线位移特征^[24]。构建岸线端点速率计算工具由 DSAS(digital shoreline analysis system)系统提供,是目前计算岸线变化速率

最有效的软件工具^[25]。与两期岸线数据基本走向近似平行的陆地一侧基线,垂直于基线以 10 个数据源像素的间隔(300 m)分别向东南亚、南亚、西亚、东北非和南欧地区投射 58 985、34 327、70 196、54 030 和 53 022 个与两个时相岸线均相交的剖面线,对自相交以及与同一时相岸线相交 1 次以上的剖面线进行局部修改,且适当增加岸线曲折处的剖面线密度,以保证复杂地形区域的岸线速率计算精度,最终,两期岸线的间距即为两期岸线与剖面线的交点距离。端点速率法计算如公式(3)所示:

$$EPR_{m(i,j)} = \frac{D_{mi} - D_{mj}}{T_{m(i,j)}}, \quad (3)$$

式中, $EPR_{m(i,j)}$ 为 m 剖面的第 i 与第 j 个时相岸线变化的端点速率, D_{mi} 与 D_{mj} 分别代表两个时相与剖面的交点到基线的距离,而 $T_{m(i,j)}$ 为 i 与 j 时相之间的时间间隔。

1.3.5 陆地扩张分析

基于 GIS 空间分析功能,对 2000 和 2015 年两个时相的岸线数据进行叠置分析,计算两期岸线所包围的空间区域的面积,识别海陆进退的热点区域。此外,以 2000 年的大陆海岸线长度(不含丁坝和突堤)为参考,结合海陆进退面积,定义“陆地扩张指数”,表征陆地向海的平均扩张量,表达式如公式(4)和(5)所示:

$$\Delta A = A_b - A_a, \quad (4)$$

$$LAGI = \Delta A / L_a, \quad (5)$$

式中, A_b 为末期 b 年份的陆地面积, A_a 为初期 a 年份的陆地面积, ΔA 为此研究时段内陆地面积的净变化量, $LAGI$ 为单位长度海岸线的陆地扩张距离, L_a 为初期 a 年份的岸线长度。

2 结果

2.1 岸线位置精度评估结果

表 3 所示为各洲际地区岸线位置精度分析的验证

表 3 洲际尺度岸线位置精度特征

Tab. 3 Positional accuracy of shoreline at continent scales

地区	验证点数	均值/m	标准差/m	均方根误差/m	理论最大允许误差/m
东南亚	1 811	9.43	14.38	17.19	28.28
南亚	1 022	12.87	18.36	21.74	28.28
西亚	2 369	14.42	22.77	26.95	28.28
东北非	1 789	14.93	17.68	23.13	28.28
南欧	2 137	15.56	17.44	23.36	28.28

2.2 岸线位置时空变化特征

2.2.1 整体尺度岸线摆动特征

海上丝绸之路沿线地区的岸线整体空间摆动格局如图 2(a)所示, 岸线摆动速度如图 2(b)所示, 结果表明, 2000—2015 年间, 14.63% 的大陆岸线处于摆动状态, 其中, 扩张岸线其长度占比及扩张速率分别为 8.21% 和 $27 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$, 后退岸线其长度占比和退缩速率分别为 6.42% 和 $22 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ 。陆地扩张和后退的面积分别约为 $2\,137 \text{ km}^2$ 和 $1\,183 \text{ km}^2$, 陆地净增长 954 km^2 , 陆地增长指数等效表明海上丝绸之路岸线整体向海扩张 12 m。

2.2.2 洲际尺度岸线摆动特征

各洲际地区岸线摆动比例、强度与陆地进退特征如表 4 所示。南亚和东南亚摆动岸线占比相对较高, 分别高达 30.12% 和 26.61%, 显著高于西亚、东北非、南欧地区的 8.36%、4.67% 和 3.28%。南亚岸线后退比例虽然高达 17.32%, 但岸线扩张强度最高, 高达 $39.05 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$, 陆地总体表现为扩张状态, 但扩张量不显著, 为 101.47 km^2 , 陆地扩张指数约为 10 m; 东南亚岸线的扩张比后退在比例和强度方面都明显占优, 分别高达 $24.38 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 16.96%, 陆地净增长最显著, 为 534.23 km^2 , 陆地增长指数约为 29 m; 西亚虽然岸线扩张比例优势不明显, 但岸线扩张强度显著占优, 岸线扩张速度高达 $37.04 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$, 陆地净增长量仅次于东南亚地区, 为 268.32 km^2 , 陆地增长指数约为 13 m。东北非和南欧虽然岸线扩张比例和强

点数以及距离序列的平均值、标准偏差和均方根误差等统计量。结果表明: 一方面, 各洲际地区表征误差大小的均值、标准差和均方根误差 3 个统计量均小于理论最大允许误差, 均能满足各洲际地区岸线位置时空变化研究需求。另一方面, 不同洲际地区岸线位置精度有所不同: 东南亚海岸带地区地物特征比较明显, 岸线位置判读精度较高, 西亚海岸带地区沙漠分布广泛, 岸线判读难度较大, 岸线位置精度相对低于其他洲际地区。

度皆占优势, 但岸线摆动趋势和强度总体较小, 陆地增长不显著, 分别只为 27.56 km^2 和 22.21 km^2 。

2.2.3 国家尺度岸线位置时空变化特征

海上丝绸之路沿线国家尺度的摆动岸线占比和强度差异显著(图 3), 陆海进退格局略显复杂(图 4)。波黑和斯洛文尼亚的岸线较稳定, 孟加拉国、越南、巴基斯坦、柬埔寨、伊拉克、阿联酋、缅甸等国家岸线的摆动比较强烈, 摆动岸线占比普遍超过 25%, 孟加拉国、越南、巴基斯坦摆动岸线占比更是高达 55.44%、47.27%、42.37%, 其中, 越南、伊拉克、柬埔寨、阿联酋、缅甸等国家的岸线以扩张趋势为主, 岸线扩张比例分别高达 32.81%、30.44%、25.95%、17.85% 和 14.89%, 孟加拉国和巴基斯坦则以后退趋势为主, 岸线后退比例分别高达 34.75% 和 27.57%, 相比之下, 其他国家岸线虽有摆动发生, 但总体摆动趋势不明显。

多数国家表现为陆地净增长特征。越南岸线扩张比例较高, 而孟加拉国、阿联酋和缅甸的岸线扩张强度分别高达 $88.88 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $65.58 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $55.52 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$, 分别居海上丝绸之路沿线国家岸线扩张速度的第一、三、四位, 因此缅甸、越南、孟加拉国、阿联酋 4 个国家岸线扩张相对最为剧烈, 陆地增长量超过 100 km^2 , 分别高达 244.74 km^2 、 219.94 km^2 、 165.13 km^2 、 110.25 km^2 , 其中, 阿联酋、越南、缅甸陆地扩张指数高居海上丝绸之路沿线国家的前三位, 分别高达 90 m、47 m、42 m; 马来西亚、伊朗、沙特阿拉伯、

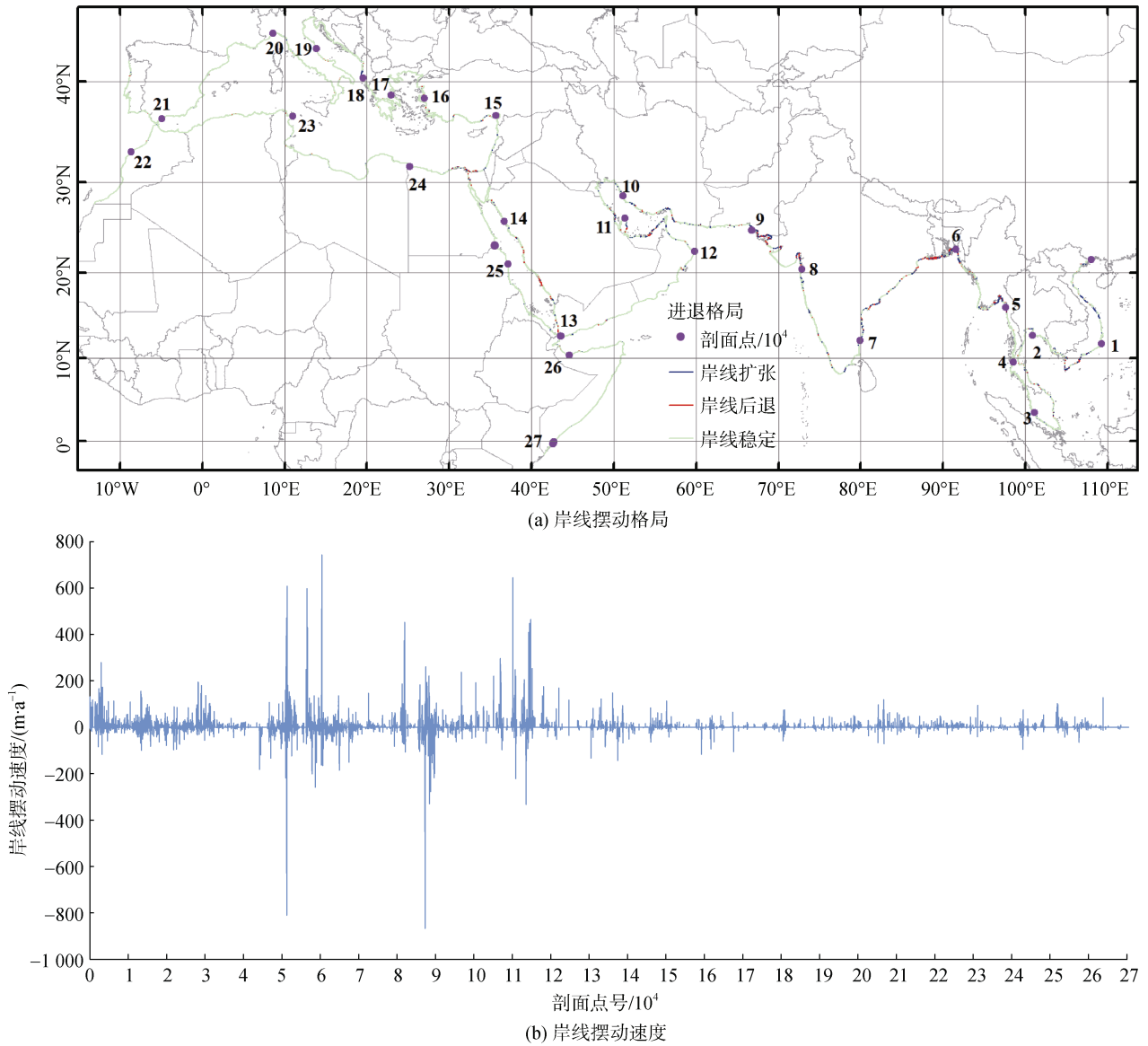


图 2 海上丝绸之路沿线地区大陆岸线摆动格局与速度
Fig. 2 Spatial pattern and speed of shoreline swings along the MSR

表 4 洲际尺度岸线摆动与陆海进退特征

Tab. 4 Characteristics of shoreline swings and land-sea interchanges at continent scales

洲际地区	摆动岸线占比/%		岸线摆动强度/m·a ⁻¹		陆海进退面积/km ²		陆地增长指数/m
	扩张	后退	扩张	后退	扩张	后退	
东南亚	16.96	9.65	24.38	19.79	1 038.42	504.19	28.94
南亚	12.80	17.32	39.05	25.19	625.75	524.28	9.97
西亚	4.98	3.38	37.04	15.93	380.25	111.93	13.20
东北非	2.81	1.86	10.32	7.34	51.63	24.07	1.72
南欧	2.00	1.28	11.51	8.75	40.65	18.44	1.40

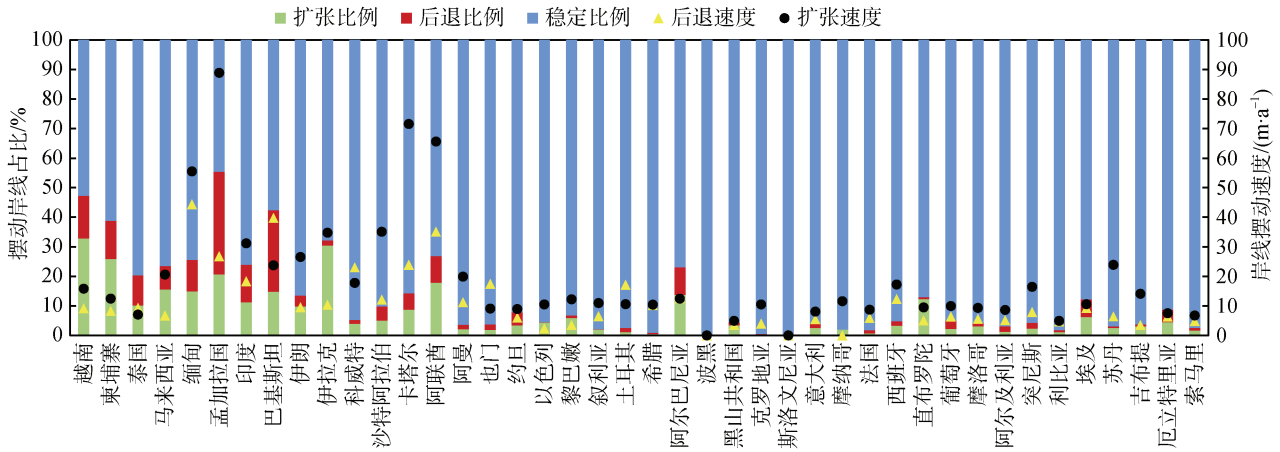


图3 国家尺度摆动岸线占比与速度

Fig. 3 Proportions and speeds of shoreline swings at nation scales

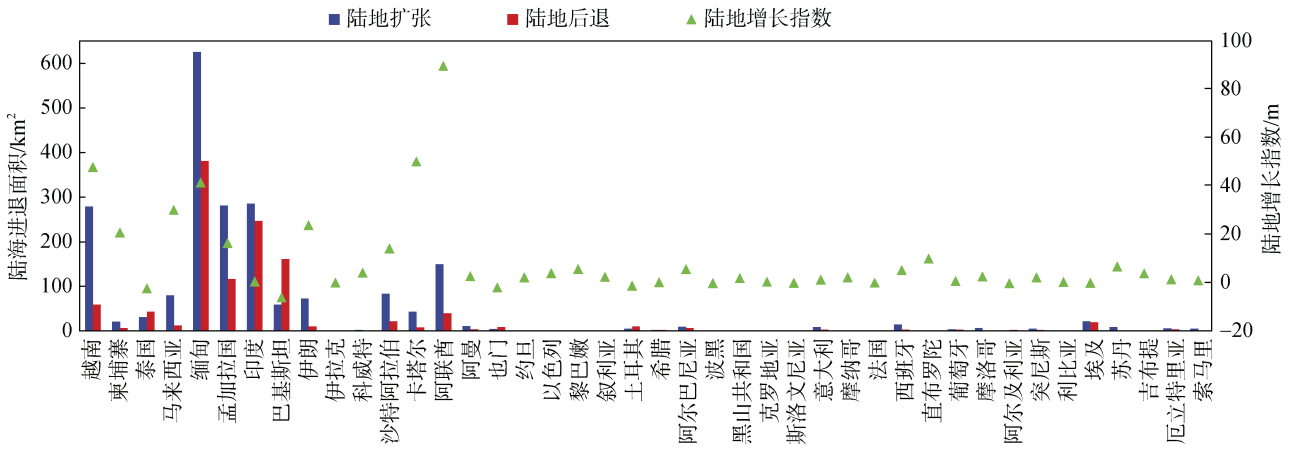


图4 国家尺度陆海进退格局

Fig. 4 Patterns of land-sea interchanges at nation scales

印度和卡塔尔的岸线扩张比岸线后退在比例或强度上占据明显优势, 马来西亚、伊朗岸线扩张比例分别为 15.59% 和 8.82%, 卡塔尔、沙特阿拉伯、印度岸线扩张速度分别为 $71.58 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $35.04 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $31.17 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$, 其中, 卡塔尔岸线扩张速度更是高居海上丝绸之路沿线国家的第二位, 5 个国家陆地净增长量普遍介于 $30\sim 60 \text{ km}^2$ 之间, 陆地扩张指数分别为 30 m、24 m、14 m、1 m、50 m; 剩余以岸线扩张为主的国家, 岸线扩张比例和速度不显著, 除西班牙和柬埔寨外, 多数国家陆地净增长量不足 10 km^2 , 陆地扩张指数不足 5 m。少数国家陆地表现为萎缩状态, 其中, 巴基斯坦岸线后退强度最为显著, 岸线后退速度高达 $39.81 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$, 陆地净后退高达 102.53 km^2 , 陆地后退指数为 6 m, 此外, 泰国、也门和土耳其虽以陆地后退为主, 但后退比例和强度相对较低, 陆地后退不明显。

2.2.4 热点区域岸线位置时空变化特征

基于地理空间分析技术以 10 km 网格对海上丝绸之路沿线地区两期岸线进行覆盖, 计算各网格内岸线进退总面积, 并以面积值对各网格进行赋值, 对所有网格进行地理空间热点和冷点分析, 对所有岸线摆动热点网格以 2 个条件为标准进行热点区域筛选: 1) 存在岸线大范围空间连续摆动; 2) 摆动岸线占比超过 30%, 最终 9 个地区被选为岸线变化的热点区域(表 5)。热点区域的摆动岸线占比、强度以及陆地进退面积表明, 东南亚和南亚地区岸线整体摆动比较剧烈, 岸线摆动热点区域居多, 所有热点区域摆动岸线占比普遍高于 30%, 其中, 莫塔马湾、恒河三角洲和卡其沼泽地区摆动岸线占比分别高达 65.27%、60.97%、66.37%, 岸线摆动强度普遍超过 $40 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$, 陆地进退总面积超过 360 km^2 , 其中, 莫塔马湾的岸线摆动强度超过 $68 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$, 陆地进退总面积

更是高达 646.86 km²。曼谷湾北岸-佛丕府中岸和卡其沼泽地区的摆动岸线占比和强度均以后退为主, 陆地整体发生后退, 其中, 卡其沼泽地区岸线后退比重优势明显, 岸线后退比例高达 41.09%, 陆地净后退高达 163.47 km²; 莫塔马湾、红河三角洲、湄公河口、柔佛海峡和阿联酋东中岸段的岸线扩张比例和强度均占优势, 陆地表现为增长状态, 其中, 红河三角洲和阿联酋东中岸段岸线扩张比例和强度占据

明显优势, 岸线扩张速度分别高达 25.62 m·a⁻¹ 和 78.51 m·a⁻¹, 扩张比例分别高达 39.87%和 23.11%, 陆地分别显著增加 140.38 km²和 86.64 km², 而恒河三角洲和肯帕德湾虽然岸线后退比重占优势, 岸线后退比例分别为 46.39%和 16.11%, 但 2 个地区岸线扩张强度优势却更加明显, 岸线扩张速度分别高达 101.33 m·a⁻¹和 86.46 m·a⁻¹, 陆地净增长也分别显著高达 158.83 km²和 105.75 km²。

表 5 热点区域岸线摆动与陆海进退格局

Tab. 5 Patterns of shoreline swings and land-sea interchanges at hot spots

洲际尺度	摆动岸线占比/%		岸线摆动强度/(m·a ⁻¹)		陆海进退面积/km ²	
	扩张	后退	扩张	后退	扩张	后退
红河三角洲	39.87	7.47	25.62	6.77	148.57	8.19
湄公河口	26.57	24.74	14.32	10.71	44.51	25.35
曼谷湾北岸-佛丕府中岸	16.89	29.89	7.11	11	4.45	12.71
柔佛海峡	24.66	8.22	34.63	6.33	23.21	1.54
莫塔马湾	37.80	27.48	76.04	68.47	356.93	289.93
恒河三角洲	14.58	46.39	101.33	20.01	260.71	101.88
肯帕德湾	14.39	16.11	86.46	18.18	121.90	16.15
卡其沼泽地区	25.28	41.09	41.81	44.82	99.81	263.28
阿联酋东中岸段	23.11	13.25	78.51	38.77	120.32	33.68

2.2.5 港口城市岸线位置时空变化特征

综合考虑港口的区位重要性、未来发展潜力、辐射能力及其与中国之间交流与合作的密切程度等因素, 选择 20 个港口城市及其周边 50 km 缓冲区范围分析岸线位置时空变化特征。结果表明, 只有是拉差及周边地区的岸线后退比扩张在比例和强度方面稍占优势, 陆地有 2.01 km²的轻微后退, 其他港口城市及周边地区岸线扩张比例和强度都明显占优, 各港口城市及其周边地区的岸线扩张比例和强度如图 5 所示, 陆地扩张统计结果如表 6 所示。海防、阿巴斯、迪拜、多哈、关丹等五个港口城市及周边地区的岸线扩张趋势显著高于其他港口城市及周边地区, 分别高达 44.28%、34.50%、23.99%、20.49%、20.25%, 其中, 迪拜、多哈、海防、阿巴斯等四个港口城市及周边地区岸线扩张速度显著占优, 分别高达 28.75 m·a⁻¹、172.58 m·a⁻¹、65.89 m·a⁻¹、27.76 m·a⁻¹, 陆地扩张量分别显著高达 67.92 km²、64.90 km²、32.47 km²、15.42 km²。其他港口城市及周边地区岸线扩张比例普遍不足 10%, 且岸线扩张强度也不显著, 其中, 瓜达尔、吉达、苏丹港和巴塞罗那及周边地区岸线扩

张速度相对比较高, 但扩张比例较小, 而关丹及周边地区岸线扩张比例相对比较高, 但岸线扩张速度较小, 此五个港口城市及周边地区陆地虽有所扩张, 但扩张量普遍不显著, 普遍不足 4 km², 其余港口城市及周边地区岸线扩张比例、强度以及陆地扩张量更是较低。

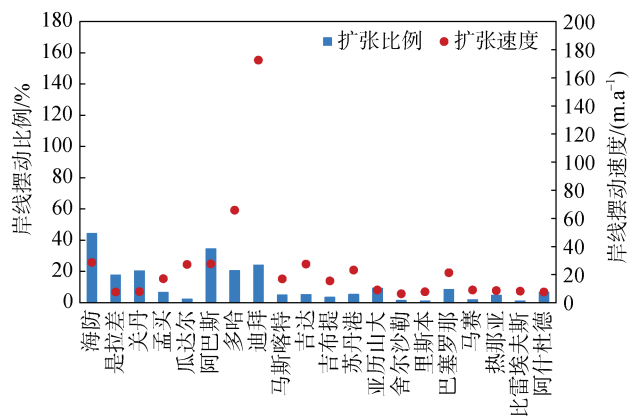


图 5 港口城市及其周边地区岸线扩张特征与陆地扩张量
Fig. 5 Characteristics of shoreline expansion and areas of land expansion in port cities and their surrounding areas

表 6 港口城市及周边地区陆地扩张面积
Tab. 6 Areas of land expansion in port cities and surrounding areas

港口城市	陆地扩张面积/ km ²	港口城市	陆地扩张面积/ km ²
海防	64.90	吉布提	1.35
是拉差	2.96	苏丹港	2.52
关丹	2.17	亚历山大	1.48
孟买	4.62	舍尔沙勒	0.15
瓜达尔	1.40	里斯本	0.59
阿巴斯	15.42	巴塞罗那	3.09
多哈	32.47	马赛	0.61
迪拜	67.92	热那亚	0.57
马斯喀特	1.41	比雷埃夫斯	0.34
吉达	3.59	阿什杜德	0.49

3 讨论

自然因素仍是长时间、宏观尺度下岸线分布及变化的基本控制因素^[26-27]。东南亚和南亚等国家地区降水丰富，河网密布，红河三角洲、湄公河三角洲、莫塔马湾、恒河口等大型河口三角洲地区泥沙大量淤积，岸线扩张明显^[28-29]，除此之外，受地形低洼等影响，大型河口三角洲以及曼谷湾和卡其沼泽等地区饱受海平面上升和风暴潮的侵袭，岸线后退同样比较严重^[30-32]。相比之下，西亚、南欧和东北非地区大型河流相对较少，下游河流泥沙携带量也不足，地势条件相对较好，受全球变化等海洋灾害的影响相对较小，岸线自然扩张和后退都相对比较微弱^[33]。

人文因素是短期内、局部尺度下岸线变化的主要影响因素^[34]。海岸带人口增长及经济快速发展，使东南亚和西亚的不少港口城市地区城镇建设需求不断增加，港口、交通以及防潮堤等岸线不断向海扩张^[35-37]；养殖业和种植业作为东南亚和南亚的重要外汇产业，在许多海岸带地区，尤其是平坦的下游河口地区，养殖和农业围堤等岸线向海扩张比较迅速^[38-39]；海上贸易的发展使得许多港口城市港口码头用地扩张明显，在石油贸易发达的波斯湾地区尤其明显^[40]，而且不少新兴和欠发达港口城市的港口用地有一定程度的小幅扩张，其中瓜达尔、关丹和多哈新港等港口更是由中国企业投资而建^[41-42]，此外，由于城镇建设、农业围垦和港口码头等人类建设活动对海岸带的开发，许多地区出现红树林衰退和地面下沉等现象，使得岸线严重后退^[43]。

本研究虽从 5 个空间尺度揭示了 21 世纪初期海上丝绸之路沿线地区大陆岸线的时空位置变化特征，但研究区范围广阔，仍有大量的局部信息尚未得到充分地挖掘和讨论，而且仅建立了 2000—2015 年 15 a 时间尺度的信息，难以反映更细时间尺度(如 5 a、10 a)以及更长时间范围的岸线变化特征及规律。未来旨在延长研究时间序列，加密研究时相，增加更小尺度区域岸线时空变化的数据结果，更详细地展示岸线位置时空变化的阶段性与区域性特征。

4 结论

本研究基于遥感和 GIS 技术，利用 Landsat 遥感影像通过目视解译方法获取海上丝绸之路沿线地区 2000 年和 2015 年的大陆岸线数据，并从整体、洲际尺度、国家尺度、热点区域和港口城市共 5 个空间尺度分析海上丝绸之路沿线大陆岸线时空变化特征。主要结论如下：

(1) 整体上，海上丝绸之路沿线地区 14.63% 的岸线处于摆动状态，东南亚和南亚为岸线摆动的重心区域，西亚处于中等水平，东北非和南欧岸线摆动则比较微弱；岸线除在南亚以后退趋势为主外，其他大洲均以岸线扩张趋势为主，有一定后退强度外，其他所有大洲岸线扩张强度明显占优；东南亚陆地增长最为显著，西亚和南亚紧随其后，东北非和南欧陆地净增长量较低。

(2) 多数国家岸线以向海扩张为主要特征，东南亚、南亚和西亚地区的国家岸线扩张明显，热点扩张区域较多。缅甸、越南、孟加拉国和阿联酋岸线剧烈扩张，在恒河三角洲、莫塔马湾、红河三角洲和阿联酋东中岸段岸线扩张尤其明显，陆地增长显著；马来西亚、伊朗、沙特阿拉伯、印度和卡塔尔岸线扩张处于中等强度水平，陆地净增长量紧随缅甸、越南、孟加拉国和阿联酋之后，在柔佛海峡和肯帕德湾岸线扩张趋势强烈，其中，柔佛海峡岸线扩张强度较小，陆地增长不显著，肯帕德湾岸线扩张强度较大，陆地显著增长。

(3) 少数国家岸线以稳定和后退为主。波黑和斯洛文尼亚岸线保持稳定；巴基斯坦在卡其沼泽地区岸线严重后退，陆地显著减少；泰国、也门和土耳其虽以岸线后退为主，且在曼谷湾-佛丕府中岸岸线后退趋势明显，但岸线后退强度普遍较低，陆地减少不显著。

(4) 传统大型港口城市中，迪拜和多哈及周边地区岸线扩张和陆地增加比较显著，巴塞罗那、里斯

本、马赛、热那亚、亚历山大、比雷埃夫斯、吉达和孟买等港口城市及周边地区岸线扩张不显著,陆地增加较小;中等快速发展城市中,阿巴斯和海防及周边地区岸线扩张和陆地增加比较显著,马斯喀特、舍尔沙勒、阿什杜德和是拉差岸线扩张和陆地增长不显著;瓜达尔、关丹、吉布提和苏丹港等新兴港口城市都有一定的港口新建和扩张存在,但总体扩张强度较小,陆地增加仍不显著。

参考文献:

- [1] ANILKUMAR P P, VARGHESE K, GANESH L S. Formulating a coastal zone health metric for landuse impact management in urban coastal zones[J]. *Environment Manage*, 2010, 91: 2172-2185.
- [2] SESLI F A, KARSLI F, COLKESEN I, et al. Monitoring the changing position of coastlines using aerial and satellite image data: An example from the eastern coast of Trabzon, Turkey[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, 153: 391-403.
- [3] 王宝, 高峰, 王金平. 海岸带综合管理研究新趋势及其对我国的启示[J]. *世界科技研究与发展*, 2015, 37(1): 105-109.
WANG Bao, GAO Feng, WANG Jinping. Trends on study of integrated coastal zone management and its enlightenment to China[J]. *World Sci-Tech R&D*, 2015, 37(1): 105-109.
- [4] 徐冠华, 葛全胜, 宫鹏, 等. 全球变化和人类可持续发展: 挑战与对策[J]. *科学通报*, 2013, 58(21): 2100-2106.
XU Guanhua, GE Quansheng, GONG Peng, et al. Societal response to challenges of global change and human sustainable development[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(21): 2100-2106.
- [5] 葛全胜, 王芳, 王绍武, 等. 对全球变暖认识的七个问题的确定与不确定性[J]. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(1): 1-6.
GE Quansheng, WANG Fang, WANG Shaowu, et al. Certainty and uncertainty in global warming studies[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(1): 1-6.
- [6] 吴国雄, 林海, 邹晓蕾, 等. 全球气候变化研究与科学数据[J]. *地球科学进展*, 2014, 29(1): 15-22.
WU Guofeng, LIN Hai, ZOU Xiaolei, et al. Research on global climate change and scientific data[J]. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(1): 15-22.
- [7] CIARDINI V, CONTESSA G M, FALSAPERLA R, et al. A global and mediterranean climate change: a short summary[J]. *Annali Dell Istituto Superiore Di Sanita*, 2016, 52: 325-337.
- [8] ZUZEK P J, NAIRN R B, THIEME S J. Spatial and temporal considerations for calculating shoreline change rates in the Great Lakes Basin[J]. *Journal of Coastal Research*, 2003, 38: 125-146.
- [9] 侯西勇, 宋洋, 徐新良. “一带一路”港口城市生态环境遥感监测[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
HOU Xiyong, SONG Yang, XU Xinliang. Monitoring of ecological environment in port cities along “One Belt and One Road”[M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [10] 樊兢. “21 世纪海上丝绸之路”海洋产业合作研究——基于中国与 26 个沿线国家的实证分析[J]. *改革与战略*, 2018, 34(11): 93-101.
FAN Jing. Cooperation of “The 21st Century Maritime Silk Road” marine industry-empirical analysis based on China and 26 countries[J]. *Reformation & Strategy*, 2018, 34(11): 93-101.
- [11] 李加洪, 施建成. 全球生态环境遥感监测 2015 年度报告[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
LI Jiahong, SHI Jiancheng. Annual report of remote sensing monitoring of the global ecological environment in 2015[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [12] GIRI C, OCHIENG E, TIESZEN L L, et al. Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data(version 1.3, updated by UNEP-WCMC)[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2011, 20: 154-159.
- [13] BOAK E H, TURNER I L. Shoreline definition and detection: a review[J]. *Journal of Coastal Research*, 2005, 21(4): 688-703.
- [14] 毋亭, 侯西勇. 海岸线变化研究综述[J]. *生态学报*, 2016, 36(4): 1170-1182.
WU Ting, HOU Xiyong. Review of research on coastline changes[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(4): 1170-1182.
- [15] 刘艳霞, 黄海军, 丘仲锋, 等. 基于影像间潮滩地形修正的海岸线监测研究-以黄河三角洲为例[J]. *地理学报*, 2012, 67(3): 377-387.
LIU Yanxia, HUANG Haijun, QIU Zhongfeng, et al. Monitoring change and position of coastlines from satellite images using slope correction in a tidal flat: A case study in the Yellow River Delta[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(3): 377-387.
- [16] 侯西勇, 毋亭, 侯婉, 等. 20 世纪 40 年代初以来中国大陆海岸线变化特征[J]. *中国科学: 地球科学*, 2016, 46(8): 1065-1075.
HOU Xiyong, WU Ting, HOU Wan, et al. Characteristics of coastline changes in mainland China since the early 1940s[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2016, 46(8): 1065-1075.
- [17] LI R, MA R, DI K. Digital tide-coordinated shoreline[J]. *Marine Geodesy*, 2002, 25(1/2): 27-36.

- [18] 毋亭. 近 70 年中国大陆岸线变化的时空特征分析[D]. 烟台: 中国科学院烟台海岸带研究所, 2016.
WU Ting. Analysis of spatio-temporal characteristics of mainland coastline changes in China in nearly 70 years[D]. Yantai: Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [19] 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.
- [20] ROONEY J, FLETCHER C, BARBEE M, et al. Mapping shoreline change using digital orthophotogrammetry on Maui, Hawaii[J]. Journal of Coastal Research, 2003, 38: 106-124.
- [21] TANAKA H, TAKAHASHI G, MATSUTOMI H, et al. Application of old maps for studying long-term shoreline change[C]//SMITH J M. Coastal Engineering 2006 (Vol.5) —Proceedings of the 30th International Conference. Singapore: World Scientific Publishing Co Pte Ltd, 2007: 4022-4034.
- [22] 高山. 铁路工程地质遥感调查中的图像解译质量分析[J]. 铁道勘察, 2010(3): 24-27.
GAO Shan. Analysis on interpretation quality of images in geological remote sensing investigation of railway engineering[J]. Railway Investigation and Surveying, 2010(3): 24-27.
- [23] 高山. 铁路工程地质遥感图像解译质量分析[J]. 铁道工程学报, 2010(8): 25-28, 37.
GAO Shan. Analysis of interpretation quality of remote sensing image for railway engineering geology[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2010(8): 25-28, 37.
- [24] CROWELL M, COULTON K, JOHNSON C, et al. An estimate of the US population living in 100-year coastal flood Hazard Areas[J]. Journal of Coastal Research, 2010, 26(2): 201-211.
- [25] 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 (ver. 4.4, July 2017)[R]. U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278, 2017.
- [26] ALBERS T, SCHMITT K. Dyke design, floodplain restoration and mangrove co-management as parts of an area coastal protection strategy for the mud coasts of the Mekong Delta, Vietnam[J]. Wetlands Ecology and Management, 2015, 23: 991-1004.
- [27] ZHOU L, MA Y, HU Y B, et al. Remote sensing analysis of shoreline change in the Gulf of Thailand from 1988 to 2016[J]. Ocean Development and Management, 2016, 5: 44-51.
- [28] BESSET M, ANTHONY E J, BOUCHETTE F. Multi-decadal variations in delta shorelines and their relationship to river sediment supply: An assessment and review[J]. Earth-Science Reviews, 2019, 193: 199-219.
- [29] DUC D M, NHUAN M T, NGOI C V, et al. Sediment distribution and transport at the near shore zone of the Red River delta, Northern Vietnam[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2007, 29: 558-565.
- [30] BARBIER E B. Climate change impacts on rural poverty in low-elevation coastal zones[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2015, 165: A1-A13.
- [31] DUC D M, NHUAN M T, NGOI C V. An analysis of coastal erosion in the tropical rapid accretion delta of the Red River, Vietnam[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 43: 98-109.
- [32] MCGRANAHAN G, BALK D, ANDERSON B. The rising tide: assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones[J]. Environment and Urbanization, 2007, 19: 17-37.
- [33] GAYATHRI R, BHASKARAN P K, SEN D. Numerical study on storm surge and associated coastal inundation for 2009 Aila Cyclone in the head Bay of Bengal[J]. Aquatic Procedia, 2015, 4: 404-411.
- [34] GHAZALI N H M, AWANG N A, MAHMUD M, et al. Impact of sea level rise and tsunami on coastal areas of north-west Peninsular Malaysia[J]. Irrigation and Drainage, 2018, 67: 119-129.
- [35] NGUYEN T P, PARNELL K E, COTTRELL A. Human activities and coastal erosion on the Kien Giang coast, Vietnam[J]. Journal of Coastal Conservation, 2017, 21: 967-979.
- [36] SU Y C, ABDUL G O, YEE K S, et al. Land reclamation and artificial islands: Walking the tightrope between development and conservation[J]. Global Ecology and Conservation, 2017, 12: 80-95.
- [37] ZAMANI-FARAHANI H, HENDERSON J C. Islamic tourism and managing tourism development in islamic societies: The cases of Iran and Saudi Arabia[J]. International Journal of Tourism Research. 2010, 12: 79-89.
- [38] PRIMAVERA J H. Overcoming the impacts of aquaculture on the coastal zone[J]. Ocean & Coastal Management, 2006, 49: 531-545.
- [39] LI L, BOYD C E, RACINE P. Assessment of elemental profiling for distinguishing geographic origin of aquacultured shrimp from India, Thailand and Vietnam[J]. Food Control. 2017, 80: 162-169.
- [40] DIBAJNIA M, SOLTANPOUR M, VAFAI F, et al. A shoreline management plan for Iranian coastlines[J]. Ocean & Coastal Management. 2012, 63: 1-15.
- [41] CAO F. Regional economy and port synergies under the

- background of “One Belt And One Road”-Empirical analysis based on haken model[J]. *Journal of Commercial Economics*. 2019, 14: 157-160.
- [42] LI H M, WU M Q, NIU Z, et al. Dataset development of overseas port project of China (1979—2019)[J]. *Journal of Global Change Data & Discovery*, 2019, 3(3): 234-243.
- [43] TERRY J P, DUNNE K, JANKAEW K. Prehistorical frequency of high-energy marine inundation events driven by typhoons in the Bay of Bangkok (Thailand), interpreted from coastal carbonate boulders[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2016, 41: 553-562.

Characteristics of mainland shoreline position changes of Maritime Silk Road in the early 21st century

SONG Yang^{1, 3, 4}, ZHANG Yu-xin^{1, 2, 3, 4}, HOU Xi-yong^{1, 3, 4}

(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. CAS Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai 264003, China; 4. Shandong Key Laboratory of Coastal Environmental Processes, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China)

Received: Aug. 12, 2020

Key words: Maritime Silk Road; mainland shoreline; continent scale; nation scale; hot spot; port city; shoreline swing

Abstract: Based on remote sensing and GIS techniques, the visual interpretation of Landsat images was used to extract the coastline data of the Maritime Silk Road (MSR) in 2000 and 2015, and the variation characteristics of the coastline position were analyzed from the overall, intercontinental, national, hot spots and port cities spatial scales. The results showed that: (1) as a whole, the proportion and speed of shoreline expansions and retreats were 8.21% ($27 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$) and 6.24% ($22 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$) respectively, the net growth of land was 954 km^2 , which was equivalent to the overall expansion of 12 m to the sea in the MSR. (2) On the continent scale, except for the advantage retreat proportion in South Asia, the shoreline expansions showed mainly swung trends in all continents no matter proportion and intensity, among which the shoreline expanded more violently and the land area increased violently in Southeast Asia, South Asia, and West Asia. (3) At the national level, expansion was the main characteristic of mainland shoreline swings; Myanmar, Vietnam, Bangladesh, and United Arabia Emirates (UAE) experienced the most violent shoreline expansion with land increase above 100 km^2 , followed by Malaysia, Iran, Saudi Arabia, and Qatar in that order with land increase within $30\text{--}60 \text{ km}^2$; the shoreline kept stable and unchanged in Bosnia and Herzegovina and Republic of Slovenia, and the shoreline retreated most violently in Pakistan. (4) The hot spots of shoreline expansions were mainly concentrated in Gulf of Martban, Ganges Delta, Red River Delta, Gulf of Khambhat, and northeast and central coasts of UAE, and a violent shoreline retreat occurred in Khaki Swamp. (5) The land areas increased violently due to the more significance of both proportions and intensities for shoreline expansions in Dubai, Doha, Haiphong, and Abbas, and their surrounding areas. This research can give some purposes to the promotion of the Belt and Road Initiative and the protection of shoreline along the MSR.

(本文编辑: 赵卫红)