

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2019011101

近30年红河三角洲岸线演变

杨宏达^{1,2}, 乔璐璐^{1,2}, 刘雪^{1,2}, Le DucCuong^{1,3}, 张蕾^{1,2}, 李珏^{1,2}, 印萍⁴

1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100

2. 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100

3. 越南科学院海洋环境与资源研究所, 海防 180000

4. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266100

摘要: 基于1987—2015年Landsat遥感影像, 运用ENVI与MapInfo软件提取岸线, 分析红河三角洲近30年岸线演变规律, 并结合历史岸线、红河多年径流量与输沙量, 以及过境该海域多年热带气旋数量等数据, 初步探讨红河三角洲岸线演变的影响因素。研究表明红河三角洲岸线在时间上呈前进与后退交替变化特征, 其中巴拉特河口以南的岸段以后退为主, 河口北部岸段总体以前进为主。巴拉特河口地区淤进与蚀退变化频繁, 主要与上游建坝导致入海沙量变化以及台风造成的侵蚀有关。

关键词: 岸线; 长期演变; 台风; 巴拉特河口; 红河三角洲

中图分类号: P737.1

文献标识码: A

Shoreline evolution of the Red River Delta in the recent 30 years

YANG Hongda^{1,2}, QIAO Lulu^{1,2}, LIU Xue^{1,2}, Le DucCuong^{1,3}, ZHANG Lei^{1,2}, LI Jue^{1,2}, YIN Ping⁴

1. Ocean University of China, College of Marine Geosciences, Qingdao 266100, China

2. Key Lab of Submarine Sciences & Prospecting Techniques, MOE, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

3. Institute Of Marine Environment and Resource, Haiphong 180000, Vietnam

4. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266100, China

Abstract: Based on the data acquired by Landsat remote sensing from 1987 to 2015, ENVI and MapInfo softwares are used to extract shoreline of the Red River Delta to follow up its evolution in the recent 30 years. Integrating the historical coastline together with the runoff and sediment budget of the Red River, and the number of tropical cyclones passing through the sea area in the recent years, the controlling factors of the coastline evolution of the Red River Delta are preliminarily discussed. The study shows that the coastline of the Red River Delta changes alternately with time. The southern part of the Balat estuary mainly retreats towards the land, while the northern part of the estuary mainly advances to the sea. The frequent siltation and erosion in the Balat estuary are mainly related to the change in sediment input caused by dam construction in the upper reaches and the severe erosion by typhoon.

Key words: shoreline; long-term evolution; typhoon; Balat estuary; Red River Delta

红河三角洲位于越南北部(图1), 面积约为17 000 km²^[1], 受波浪、潮流、河流共同控制^[2]。红河一共有8条支流, 年均径流量达120 km³^[3], 其中大型的河口主要有白藤(Bach Dang)河口、太平(Thai Binh)河口、巴拉特(Balat)河口、宁科(Ninh Co)河口、天(Day)河口, 其中巴拉特河口的径流量约占总量的65%^[4]。红河年均入海泥沙量约8.2×10⁷ m³^[5], 其中90%在雨季输送^[6], 主要沉积在北部湾西南近海区域^[7]。

红河三角洲所位于的北部湾海域以全日潮为主, 平均潮差2.5~3.5 m; 波浪在旱季为东—东北方向, 在雨季为东—东南方向, 平均和最大波高分别为0.7~1.3 m和3.5~4.5 m^[8]。根据前人研究, 北部湾1990—2010年海岸线的总长度在持续减小, 20年间减小了118.50 km, 其中后10年减小幅度明显大于前10年^[9], 且岸线趋向于平直化^[10]。北部湾岸线的变迁主要和人类活动有关^[11-12], 海岸线被大量开发为港口、码头、养殖区等^[13]。砂质、淤泥和

资助项目: 国家自然科学基金项目“浙闽沿岸泥质带冬季悬浮体的沉积机制”(41476030); 国家重点研发计划项目“大型水库调控下河口沉积动力过程及其生物地球化学效应”(2016YFA060093); 中国东盟海上合作基金项目“长江三角洲与红河三角洲全新世沉积演化对比研究”; 泰山学者建设工程专项项目

作者简介: 杨宏达(1996—), 男, 硕士研究生, 海洋地质专业, E-mail: yanghongda1996@163.com

通讯作者: 乔璐璐(1981—), 女, 博士生导师, 教授, 从事沉积动力学方面的研究, E-mail: qiaolulu126@sina.com

收稿日期: 2019-01-11; **改回日期:** 2019-08-02. 蔡秋蓉编辑

基岩岸线的占比逐渐减小^[14],到1998年人工堤坝已占北部湾岸线总长度的39.46%^[15]。除人类活动影响外,河口岸线变化也较大^[16-17]。

关于红河三角洲岸线,前人主要分析了岸线变化特征以及河口沙坝、上游大坝等对其的影响:红河三角洲岸线在1999年之后的10年总体上向陆迁移^[5],岸线变化频繁剧烈,受多种因素共同影响。关于河口沙坝的影响,Do Minh Duc等发现,河流输送的泥沙主要聚集在河口,使海岸线快速淤积(可达100 m/a),而其他岸段因缺少泥沙供应,导致侵蚀^[4, 18-19]。关于上游大坝的影响,Tran Duc Thanh等发现,和平大坝建立之后,大坝下游河水中泥沙含量减少,宁科(Ninh Co)河口附近岸线的年平均后退速率从1965—1990年的0.41 m/a提高到了1990—1998年的14.5 m/a^[20],但对主要河口巴拉特的岸线变化速率在大坝建立前后的变化缺少研究。另外,入海泥沙量变化导致的河口演变^[18]、波浪斜向入射^[21]、潮流和波浪流^[22]都会对海岸侵蚀产生重要影响。近年来岸线趋于平直,各种人工建筑物也会影响波浪和潮汐的动力作用,从而影响岸线侵蚀^[13, 23]。虽然红树林能很好地应对海岸侵蚀^[24],但由于人类的砍伐,红树林也受到了很大程度的破坏。加剧的岸线侵蚀将导致建筑物不稳定等各种灾害发生,三角洲生态服务功能也会逐渐减弱^[25-27]。

前人对红河三角洲岸线演变进行了定性描述,但缺少定量化分析,而且研究年份仅截止于2001年,对人类活动频繁的近20年的海岸变化相关报道较少。近年来,由于全球变暖,海平面上升,台风发生频率增加^[28],海洋动力发生了重要变化,对岸线变化产生了重要影响。在岸线变化机制上,前人的研究分析了海洋动力和河流入海泥沙对岸线变化的影响,但是对于北部湾海域每年夏季高频次的台风作用分析较少。前人已在山东威海海滩观测发现,台风梅花(1109号)过境后,天鹅湖沙滩后退了3.6 m^[29],热带气旋对岸线变化产生了剧烈影响。因此,本文基于1987—2015年Landsat遥感数据,收集1935—1985年历史数据、红河多年径流量与输沙量,以及该海域多年热带气旋数量等数据,对红河三角洲变化最频繁剧烈的巴拉特河口的岸线演变开展研究,从而为岸线防护以及海岸带经济发展提供科学支撑。

1 数据与方法

本文采用的基础数据来自Landsat系列卫星的

影像数据,从美国地质勘探局官网(网址: <https://earthexplorer.usgs.gov/>)下载,影像分辨率为30 m。为保证影像精度及多年研究中的可对比性,选取云量小于10%、高潮时的遥感影像进行对比分析。基于ENVI软件,进行辐射校正、拼接、大气校正、研究区裁剪、几何精校正等预处理^[30]。预处理之后,根据“我国近海海洋综合调查与评价项目(908专项)”海岸带遥感调查和前人岸线解译经验^[31-32],在MapInfo软件中提取大潮高潮线作为岸线,共提取了1987、1990、1995、2000、2005、2010、2015近30年共7张红河三角洲的岸线,结果如图1所示。

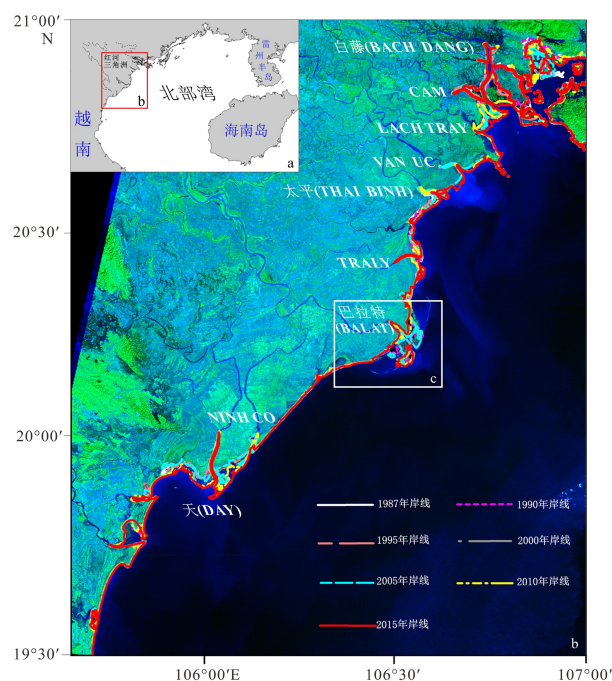


图1 1987—2015年红河三角洲海岸线
背景为2005年遥感影像图; a. 红河三角洲地理位置,
b. 红河三角洲岸线, c. 巴拉特河口岸线。

Fig.1 Red River Delta coastline changes from 1987 to 2015

The background map is from the remote sensing image of 2005;

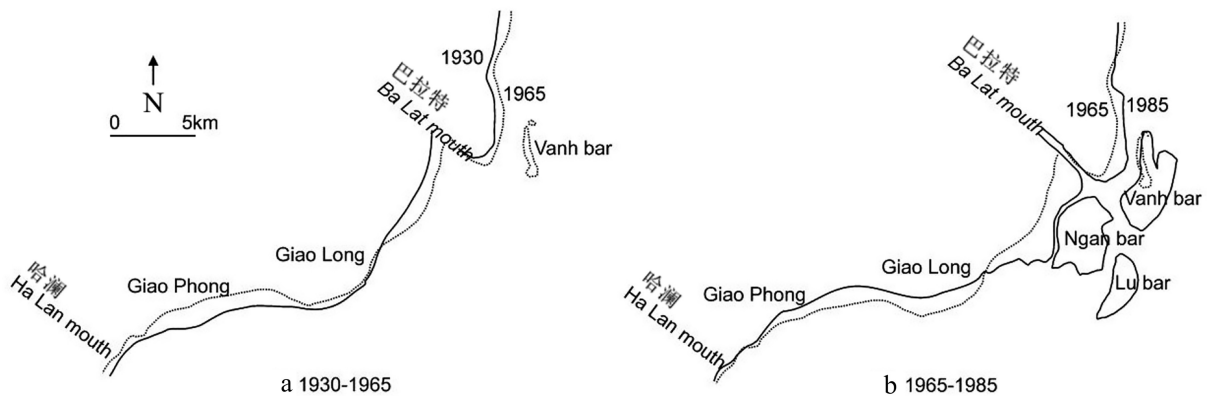
a. Geographical location of the Red River Delta,

b. Red River Delta coastline, c. Balat estuary coastline.

2 多年岸线变化特征

2.1 1930—1985年巴拉特地区岸线变化

根据收集的资料^[8],前人已对1930—1985年巴拉特地区岸线变化进行了研究(图2),可以看出在巴拉特河口地区前进与后退剧烈,在靠近河口部位发生明显前进,而远离河口部位发生明显后退。

图2 1930—1985年巴拉特河口岸线变化^[8]Fig.2 Changes of the Balat estuary shoreline in 1930-1985^[8]

2.2 1987—1990年红河三角洲岸线变化

1987—1990年,红河三角洲南部岸线有多处明显前进,而北部出现多处后退,中部变化不大(图1),主要是巴拉特地区变化明显。通过计算得到如图3所示的巴拉特地区主岸线沿岸平均年变化率,可以看出巴拉特地区沿岸大部分岸线以后退为

主。河口位置发生明显后退,从遥感图像上对比发现,该岸线后退可能与入海泥沙量减少和沙坝侵蚀有关。定量对比发现,1987—1990年巴拉特地区年平均前进速率为39.19 m/a,年平均后退速率为30.68 m/a。

2.3 1990—1995年红河三角洲岸线变化

1990—1995年,红河三角洲除河口岸线以前进为主外,河口的南部和北部岸线均出现了多处明显后退(图1)。巴拉特地区变化明显,通过计算得到如图4所示的巴拉特地区主岸线沿岸平均年变化率,可以看出巴拉特地区沿岸大部分岸线以前进为主,而河口位置发生明显后退,从遥感图像上对比发现,在这一时期,由于波浪等导致沙坝侵蚀或者由于海平面上升,主岸线与沙坝之间的人工养殖池长时间被水淹没,主岸线发生明显后退。1990—1995年巴拉特地区年平均前进速率为28.26 m/a,年平均后退速率为87.25 m/a。

2.4 1995—2000年红河三角洲岸线变化

1995—2000年,红河三角洲岸线变化不大,南部出现了几处明显前进,北部也出现几处明显前进,中部变化不大(图1)。对于巴拉特地区,岸线的后退与前进交替出现,在河口位置发生了一处明显前进(图5),从遥感图像上对比发现,该岸线前进与人工养殖池有关。1995—2000年巴拉特地区年平均前进速率为23.63 m/a,年平均后退速率为11.57 m/a。

2.5 2000—2005年红河三角洲岸线变化

2000—2005年,红河三角洲南部岸线发生一处明显前进,而北部出现几处后退,中部变化不大(图1)。巴拉特地区岸线的后退与前进交替出现,变化不剧

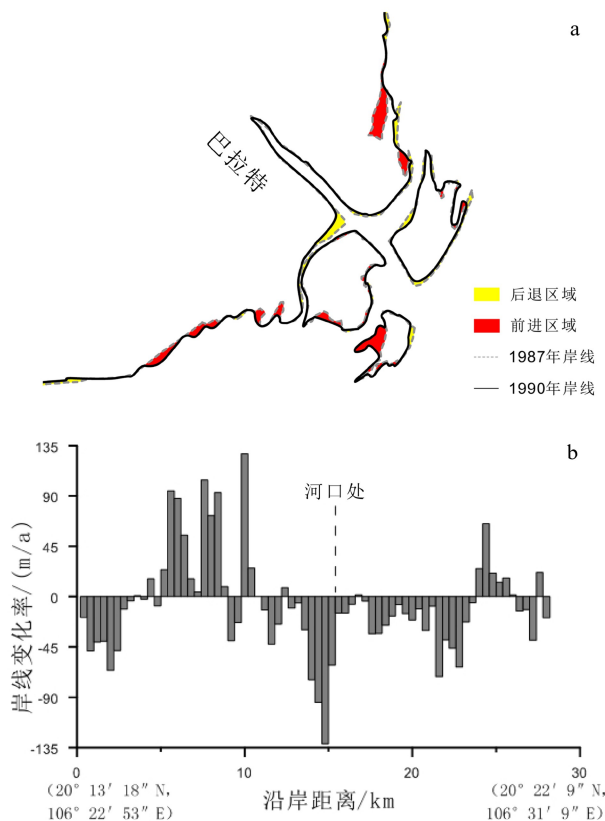


图3 1987—1990巴拉特河口岸线变化

a. 岸线; b. 主岸线年均变化率。

Fig.3 Changes of the Balat estuary from 1987 to 1990

a. Shoreline; b. Average annual change rate of the main shore line.

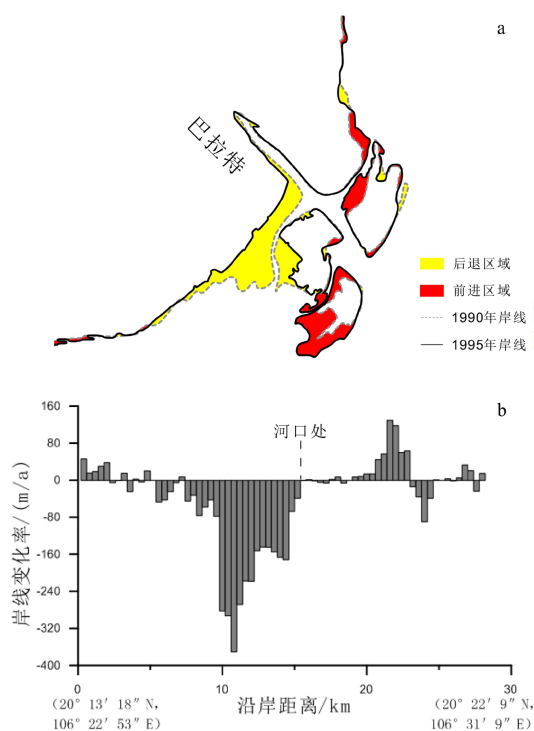


图 4 1990—1995 巴拉特河口岸线变化

a. 岸线, b. 主岸线年均变化率。

Fig.4 Changes of the Balat estuary from 1990 to 1995

a. Shoreline; b. Average annual change rate of the main shore line.

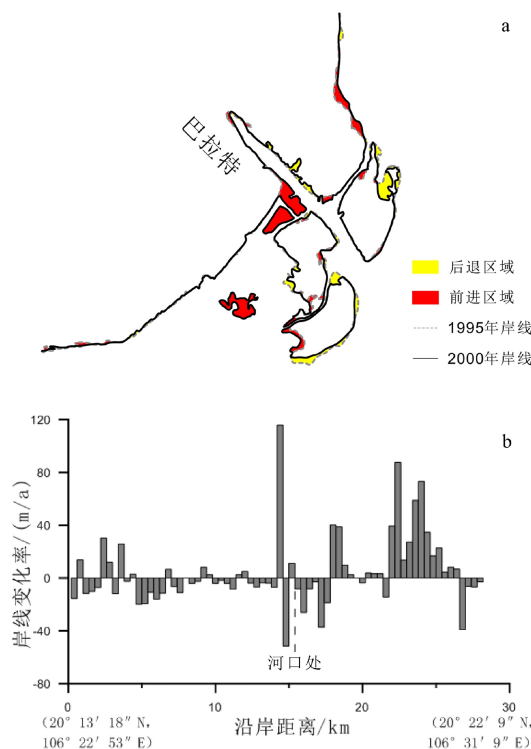


图 5 1995—2000 巴拉特河口岸线变化

a. 岸线, b. 主岸线年均变化率。

Fig.5 Changes of the Balat estuary from 1995 to 2000

a. Shoreline; b. Average annual change rate of the main shore line.

烈(图 6)。2000—2005 年巴拉特地区年平均前进速率为 5.93 m/a, 年平均后退速率为 5.06 m/a。

2.6 2005—2010 年红河三角洲岸线变化

2005—2010 年, 红河三角洲南部岸线有多处明显前进, 而北部出现多处明显后退, 中部出现多处前进(图 1)。巴拉特地区沿岸岸线以后退为主(图 7), 从遥感图像上(图 8)对比发现, 该岸线后退可能与 2009 年宣光(Tuyen Quang)大坝和 2010 年桑拉(Sonla)大坝建成导致入海泥沙量减少有关, 因此沙坝侵蚀, 人工养殖池被水淹没, 主岸线发生明显后退。2005—2010 年巴拉特地区年平均前进速率为 20.87 m/a, 年平均后退速率为 56.19 m/a。

2.7 2010—2015 年红河三角洲岸线变化

2010—2015 年, 红河三角洲南部岸线以明显前进为主, 北部也以明显前进为主, 但出现几处后退, 中部以前进为主(图 1)。巴拉特地区沿岸岸线以前进为主, 后退仅限于河口东北部(图 9), 从遥感图像上对比发现, 该岸线后退可能与入海泥沙量减少,

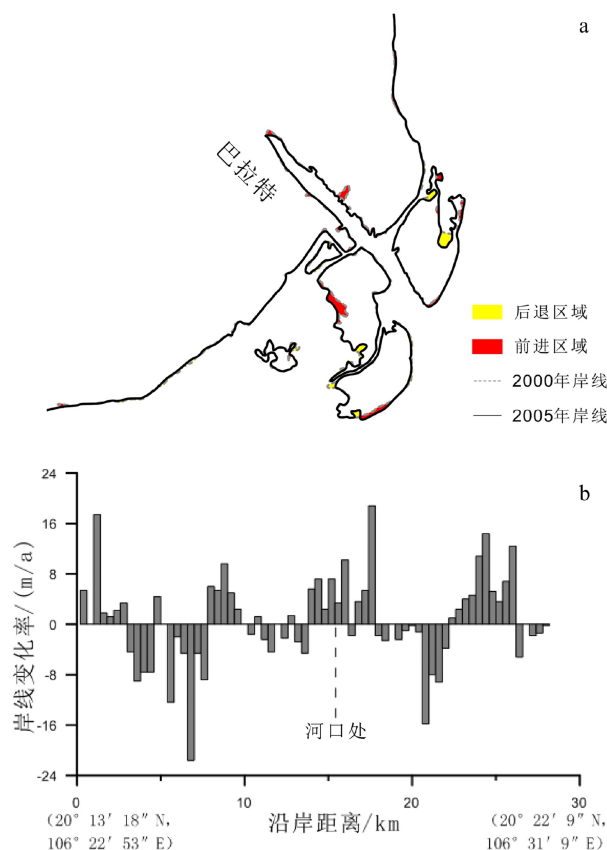


图 6 2000—2005 巴拉特河口岸线变化

a. 岸线, b. 主岸线年均变化率。

Fig.6 Changes of the Balat estuary from 2000 to 2005

a. Shoreline; b. Average annual change rate of the main shore line.

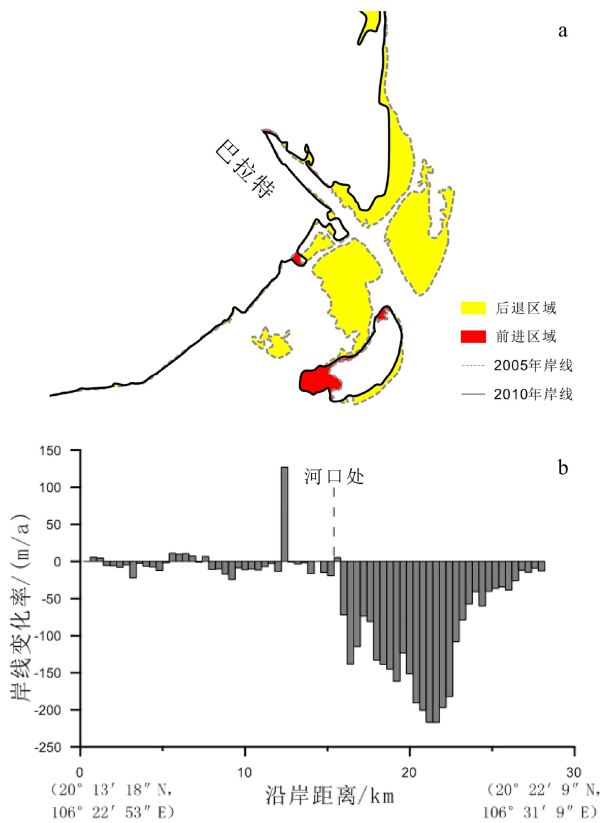
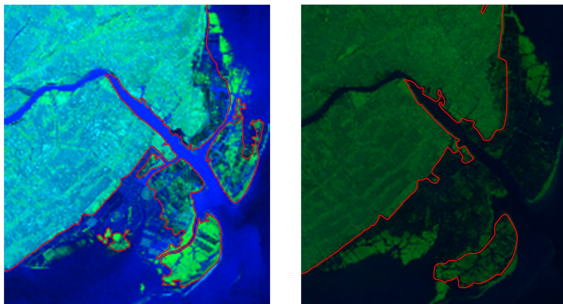


图 7 2005—2010 巴拉特河口岸线变化

a. 岸线, b. 主岸线年均变化率。

Fig.7 Changes of the Balat estuary from 2005 to 2010

a. Shoreline; b. Average annual change rate of the main shore line.



2005年遥感图像

2010年遥感图像

图 8 2005 年和 2010 年巴拉特河口遥感图像

Fig.8 Remote sensing images of the Balat estuary in 2005 and 2010

沙坝侵蚀有关。2010—2015 年巴拉特地区年平均前进速率为 22.13 m/a, 年平均后退速率为 89.72 m/a。

2.8 1987—2015 年红河三角洲岸线总体变化

观察多年岸线变化图(图 1), 可以看出沿岸地区变化不一致, 部分岸段前进与后退交替变化特征明显, 在巴拉特河口地区淤进与蚀退频繁, 变化剧烈, 河口北部岸线后退明显, 主要受沙坝侵蚀影响。计算得到 1987—2015 年巴拉特地区主岸线年

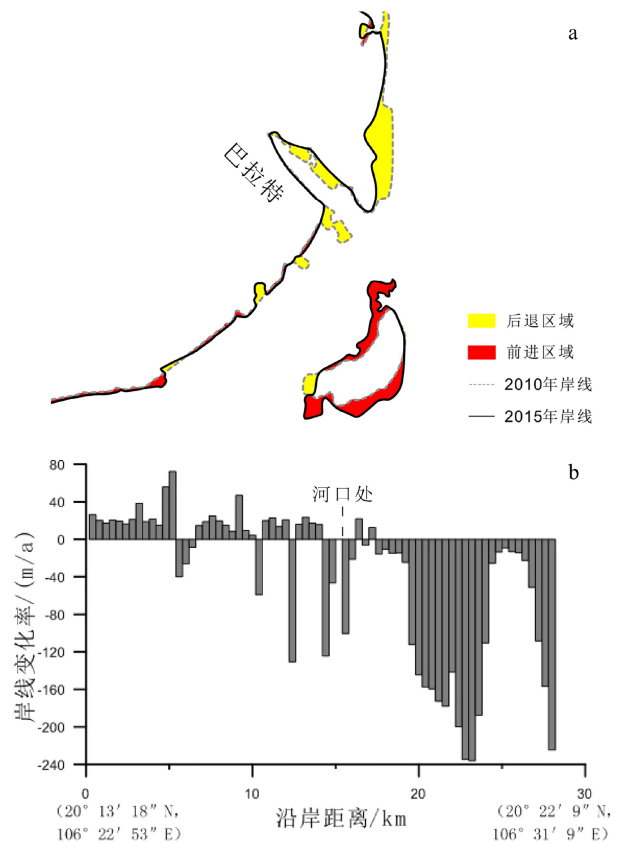


图 9 2010—2015 巴拉特河口岸线变化

a. 岸线, b. 主岸线年均变化率。

Fig.9 Changes of the Balat estuary from 2010 to 2015

a. Shoreline; b. Average annual change rate of the main shore line.

平均前进速率为 3.94 m/a, 年平均后退速率为 29.43 m/a。前人计算得到长江口河口岸线 1974 年到 2015 年的平均变化速率为 34 m/a^[20], 与其对比, 发现巴拉特地区主岸线年平均变化速率大小与其类似(图 10)。

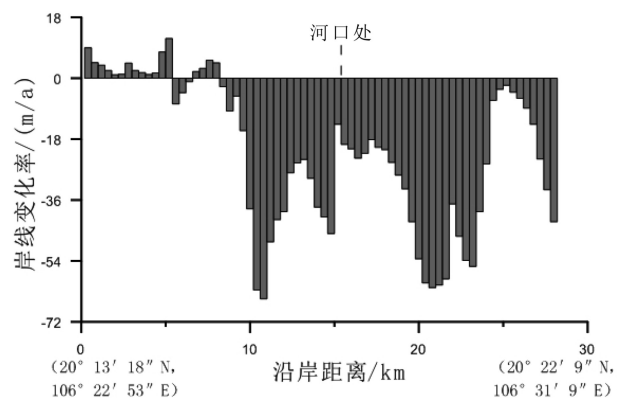
图 10 1987—2015 年巴拉特地区主岸线沿岸
平均年变化率

Fig.10 Average annual change rate of the main shoreline in Balat region from 1987 to 2015

3 岸线多年变化原因分析

通过调查资料,发现红河三角洲海岸线演变受热带气旋以及河流上游水坝等多种因素共同影响。

3.1 河口沙坝的影响

海岸线的向海推进与沙坝的形成和扩大密切相关。大量入海沉积物在河口前形成沙坝,沙坝的快速增长降低了波浪的破坏作用,为海岸线和沙坝之间的河道中沉积物沉降提供了良好的环境^[9]。河

口沙坝在红河三角洲的巴拉特地区作用非常明显。当沙坝被侵蚀时,沙坝与主岸线之间的人工养殖池也被水淹没,因此,主岸线明显后退,如1990—1995年和2005—2010年。

3.2 河流上游建坝的影响

红河入海径流量和输沙量受堤坝建设影响明显(图11),进而会对岸线前进与后退速率产生影响^[20]。前人在1972年第一个大坝塔婆建立之后,在山西站(Son Tay,图11e)观测到的年输沙量下降^[33]。根据前人对1965—1990年宁科(Ninh Co)地区岸线变化

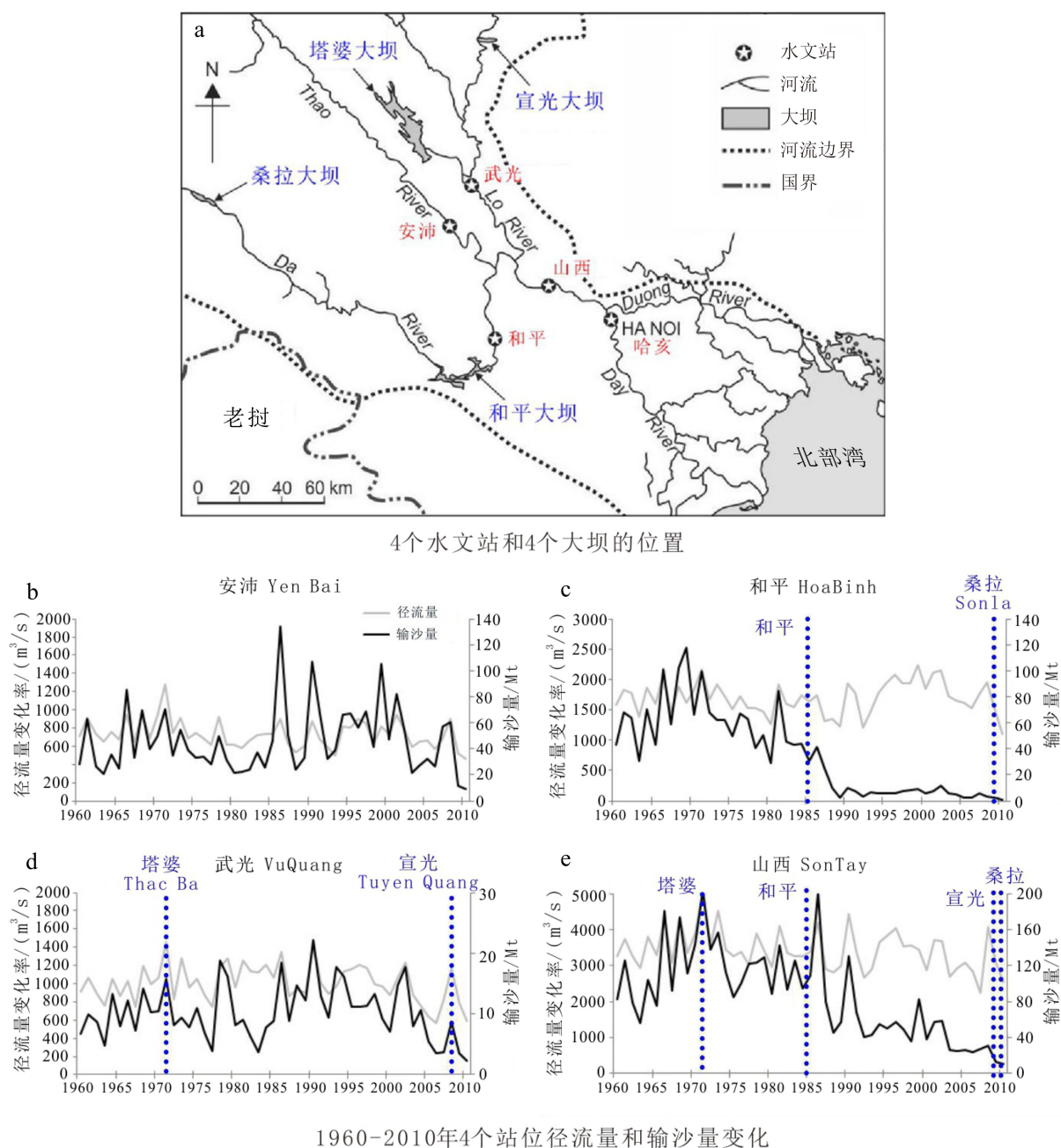


图11 1960—2010年4个站点径流量和输沙量变化^[33]

Fig.11 Variation in runoff and sediment budget at four stations from 1960 to 2010^[33]

的研究结果,可以发现在和平大坝建立之后,宁科河口岸线的年平均后退速率从1965—1990年的0.41 m/a提高到了1990—1998年的14.5 m/a^[21]。而前人对1930—1985年巴拉特地区岸线变化的研究结果表明,在塔婆大坝建立之后巴拉特河口前进速率相应发生了降低^[3]。本文对比发现,在2009年宣光(Tuyen Quang)大坝和2010年桑拉(Sonla)大坝建成之后,沉积物供应减少,2005—2015年巴拉特河口岸线后退速率有所提高。

3.3 气候变化影响

厄尔尼诺现象可造成世界气候的变化,使局部地区降雨量过多,极大地影响岸线的变化速率。调查资料发现,红河上游的大东勇站、中游的元江站、下游的蛮耗站的年径流序列在1993年均由枯水期突变为丰水期^[34],这可能与1991—1994年发生的厄尔尼诺带来的强降雨有关^[4],沙坝与主岸线之间的人工养殖池被水淹没,1990—1995年巴拉特河口岸线的后退速率明显增长。同时,2006—2007年、2009—2010年均发生了厄尔尼诺现象,对应的2005—2010年巴拉特河口岸线的后退速率也有明显增长。

海平面上升对海岸侵蚀速率的影响也很大。根据前人研究结果,1965—1995年期间,海平面上升对红河三角洲海岸侵蚀速率增加的作用约占34%,而1995—2005年为12%。

3.4 热带气旋的影响

热带气旋是越南北部地区典型的天气事件,台

风数量与岸线年平均后退速率有很好相关性(图12),台风数量越多,平均后退速率越大。1990—1995年经过红河三角洲台风数量增多,年平均后退速率有明显提高;1995—2005年经过红河三角洲台风数量减少,年平均后退速率对应有明显降低;2005—2015年经过红河三角洲台风数量增多,年平均后退速率对应有明显提高。海后(Hai Hau)潮汐站曾测得当波高为4.25 m,持续时间2.4 h的情况下,岸线后退了7.1 m^[8]。

3.5 海洋动力的影响

海流和波浪是影响海岸侵蚀的重要因素^[5]。前者在红河三角洲海域呈现出明显的季节性变化:冬季流向南、夏季流向北^[7],并可能通过诱发增水等影响岸线变化。后者在近岸破碎并诱生沿岸流,进而引起沿岸输沙作用,造成海岸侵蚀^[8]。

无论旱季或者雨季,巴拉特河口南部海域平均波高始终高于河口北部(图13a,图13b),河口南部的海洋动力始终强于北部。从沉积物输运方向(图14)也可以看出:在巴拉特、拉赫(Lach)和天河口,5~10 m等深线海域,沉积物主要向东南输运,5 m等深线以浅的区域,沉积物沿岸向西南输运;在特雷(Tra Ly)河口,沉积物向东北输运;在太平河口,沉积物向东输运^[35]。因此,巴拉特河口北部和南部岸线呈现不一样的变化特征;北部岸线后退与前进交替出现,总体以前进为主,可能与复杂的岸线和动力条件及河流入海物质变化有关;南部岸线持续后退,与波浪导致的沿岸南向输沙密切相关。

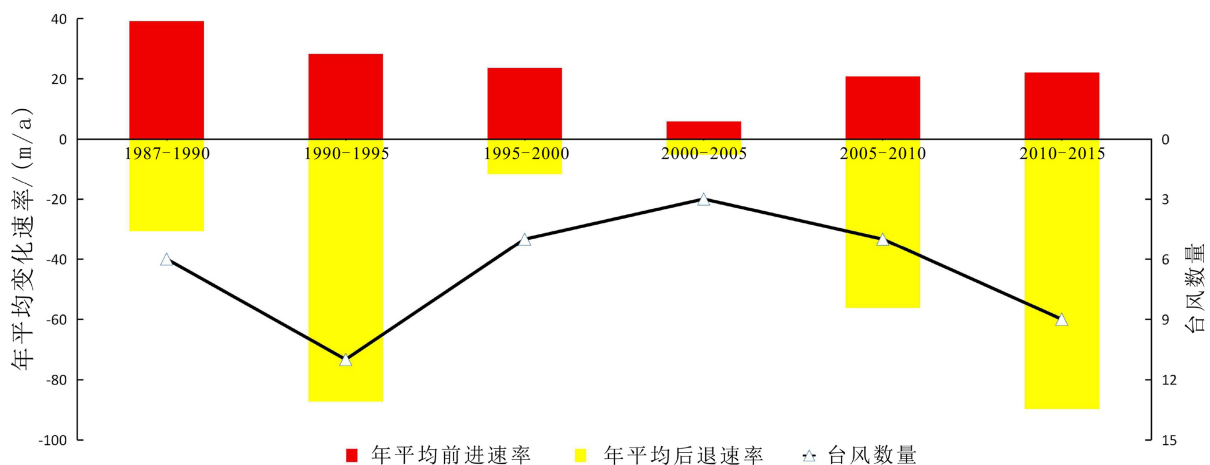
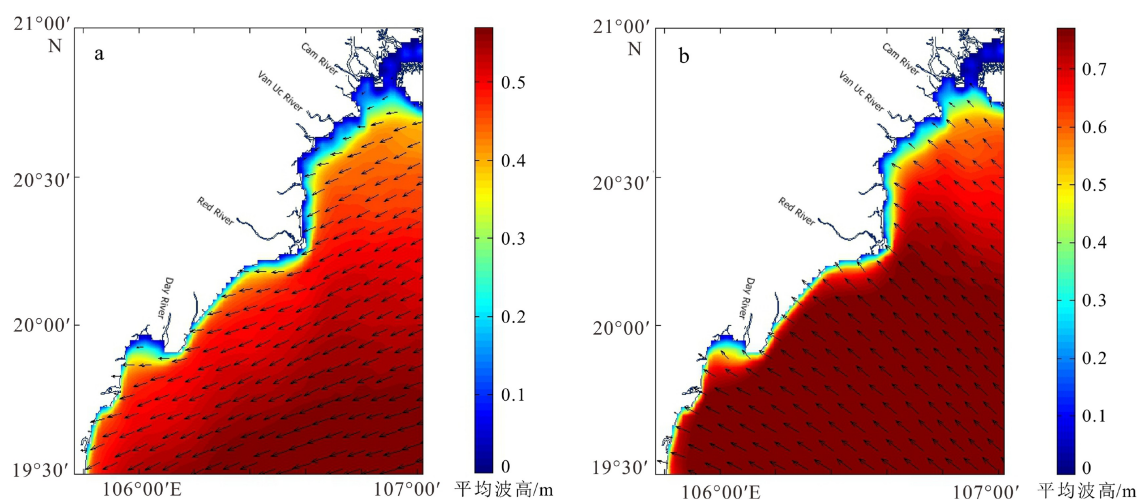


图12 1987—2015年红河三角洲年均后退速率与过境台风数量之间的关系

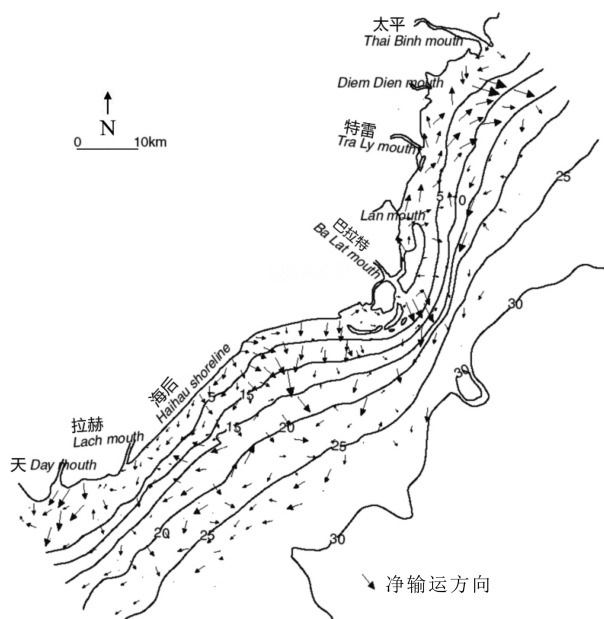
Fig.12 The relationship between the annual averaged retreat rate of the Red River Delta and the numbers of typhoons passed through the delta from 1987 to 2015

图 13 冬(旱)季(a)与夏(雨)季(b)平均波高等值线^[36]

a. 冬(旱)季, b. 夏(雨季)。

Fig.13 Average wave height in winter/summer(dry/rain) seasons^[36]

a. winter (dry) seasons, b. summer (rain) seasons.

图 14 红河三角洲近岸沉积物输运路径^[35]Fig.14 Sediment transport pathways along the coast of the Red River Delta^[35]

4 结论

(1)在时间变化上,红河三角洲岸线表现为前进与后退交替变化特征。南部岸线变化趋势较为稳定,除 1990—1995 年、2010—2015 年以前进为主外,1935—2015 年其他年份均以后退为主,与波浪导致的沿岸南向输沙密切相关。红河三角洲北部岸线由于岸线复杂且为河流入海物质控制区,表现为后退与前进交替出现,总体以前进为主。

(2)红河主要支流之一巴拉特河口地区淤进与蚀退变化剧烈,1987—2015 年巴拉特河口主岸线年平均前进速率为 3.94 m/a,年平均后退速率为 29.43 m/a。该河口岸线的频繁变化主要与上游建坝造成入海沙量变化、台风造成的侵蚀有关。

参考文献 (References)

- [1] Van Thao N, Thanh T D, Saito Y, et al. Monitoring coastline change in the Red River Delta using remotely sensed data [J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2013, 13 (2): 151-160.
- [2] 李珍, 臧家业, Saito Y, 等. 越南红河三角洲近五千年来的几个降温事件[J]. *海洋科学进展*, 2005, 23 (1): 43-53. [LI Zhen, ZANG Jiaye, Saito Y, et al. Several cooling events over the Hong River Delta, Vietnam during the past 5 000 years [J]. *Advances in Marine Science*, 2005, 23 (1): 43-53.]
- [3] Tanabe S, Hori K, Saito Y, et al. Sedimentary facies and radiocarbon dates of the Nam Dinh-1 core from the Song Hong (Red River) delta, Vietnam [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2003, 21 (5): 503-513.
- [4] 时培兵, 褚庆忠, 陈小哲, 等. 红河三角洲沉积相及其形成模式研究[J]. *重庆科技学院学报: 自然科学版*, 2016, 18 (2): 18-21, 26. [SHI Peibing, CHU Qingzhong, CHEN Xiaozhe, et al. Sedimentary facies and formation model of Honghe River Delta [J]. *Journal of Chongqing University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2016, 18 (2): 18-21, 26.]
- [5] Funabiki A, Haruyama S, Van Quy N, et al. Holocene delta plain development in the Song Hong (Red River) delta, Vietnam [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2007, 30 (3-4): 518-529.
- [6] 宋兵, 李珍, 李杰, 等. 越南红河水下三角洲北区表层沉积物类型及分布特征初探[J]. *海洋通报*, 2009, 28 (6): 78-83. [SONG Bing, LI

- Zhen, LI Jie, et al. Study on surface sediment characteristics and distribution in the northern Red River subaqueous delta, Vietnam [J]. *Marine Science Bulletin*, 2009, 28(6): 78-83.]
- [7] 陈丽蓉, 张秀荣. 北部湾沉积物中矿物组合及其分布特征[J]. 海洋学报, 1986, 8(3): 340-346. [CHEN Lirong, ZHANG Xiurong. Mineral assemblages and their distribution characteristics in the sediments of Beibu Gulf [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1986, 8(3): 340-346.]
- [8] Duc D M, Nhuan M T, Van Ngoi C. An analysis of coastal erosion in the tropical rapid accretion delta of the Red River, Vietnam [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 43(1): 98-109.
- [9] 何东艳. 北部湾海岸带生态系统健康遥感监测与评价[D]. 广西师范学院硕士学位论文, 2013. [HE Dongyan. The monitoring and evaluation of ecosystem health of Beibu Gulf coastal zone based on remote sensing[D]. Master Dissertation of Guangxi Teachers Education University, 2013.]
- [10] 葛振鹏, 戴志军, 谢华亮, 等. 北部湾海岸线时空变化特征研究[J]. *上海国土资源*, 2014, 35(2): 49-53. [GE Zhenpeng, DAI Zhijun, XIE Hualiang, et al. Temporal and spatial characteristics of the shoreline along the Beibu Gulf [J]. *Shanghai Land & Resources*, 2014, 35(2): 49-53.]
- [11] 卢宇. 广西北部湾海岸带开发利用与保护研究[D]. 广西师范学院硕士学位论文, 2017. [LU Yu. Study on the development, utilization and protection of the coastal zone of Guangxi Beibu Gulf[D]. Master Dissertation of Guangxi Teachers Education University, 2017.]
- [12] 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.]
- [13] 肖锐. 近三十五年中国海岸线变化及其驱动力因素分析[D]. 华东师范大学硕士学位论文, 2017. [XIAO Rui. Analysis of change and driving force of the coastline of mainland in nearly 35 years[D]. Master Dissertation of East China Normal University, 2017.]
- [14] 周相君. 1973-2013年广西大陆海岸线遥感变迁分析[D]. 国家海洋局第一海洋研究所硕士学位论文, 2014. [ZHOU Xiangjun. Shoreline change analysis of Guangxi mainland based on remote sensing from 1973 to 2013[D]. Master Dissertation of First Oceanographic Research Institute of the National Oceanic Administration, 2014.]
- [15] 黄鸽, 胡自宁, 陈新庚, 等. 基于遥感和GIS相结合的广西海岸线时空变化特征分析[J]. *热带海洋学报*, 2006, 25(1): 66-70. [HUANG Hu, HU Zining, CHEN Xingeng, et al. Analyses on spatial and temporal changes of Guangxi shoreline based on remote sensing and GIS [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2006, 25(1): 66-70.]
- [16] 谭李春. 基于多源数据的广西大陆海岸线变迁研究[J]. *测绘与空间地理信息*, 2013, 36(8): 72-75. [TAN Lichun. The research of Guangxi continental coastline-changing based on multi-source GIS data [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2013, 36(8): 72-75.]
- [17] 王隽. 基于卫星遥感观测的南海内波发生源与传播路径分析[D]. 中国海洋大学博士学位论文, 2012. [WANG Jun. The sources and propagation analysis of internal waves in the South China Sea based on satellite remote sensing[D]. Doctor Dissertation of Ocean University of China, 2012.]
- [18] Duc D M, Yasuhara K, Murakami S, et al. Coastal erosion in the tropical rapid accretion delta - a case study of the Red River Delta, Vietnam[C]//Fourth International Conference on Scour and Erosion. Tokyo, 2008: 372-379.
- [19] Pruszk Z, Szmytkiewicz M, Hung N M, et al. Coastal processes in the Red River Delta Area, Vietnam [J]. *Coastal Engineering Journal*, 2002, 44(2): 97-126.
- [20] Thanh T D, Saito Y, Van Huy D, et al. Regimes of human and climate impacts on coastal changes in Vietnam [J]. *Regional Environmental Change*, 2004, 4(1): 49-62.
- [21] Hung N M, Larson M, Van Ninh P, et al. Regional wave transformation and associated shoreline evolution in the Red River Delta, Vietnam[C]//Fourth International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis. San Francisco, 2001: 1316-1325.
- [22] Hatori C H, Soejarwo P A, Indriasari V Y. Analysis of coastal protection installation to coastline changes in Lombang Beach, Indramayu [J]. *Journal Kelautan Nasional*, 2012, 7: 91-99.
- [23] Saranathan E, Chandrasekaran R, Manickaraj D S, et al. Shoreline changes in Tharangampadi Village, Nagapattinam District, Tamil Nadu, India-A case study [J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2011, 39(1): 107-115.
- [24] Tue N T, Hamaoka H, Sogabe A, et al. Sources of sedimentary organic carbon in mangrove ecosystems from Ba Lat Estuary, Red River, Vietnam[C]//Interdisciplinary Studies on Environmental Chemistry-Marine Environmental Modeling & Analysis. Tokyo, 2011: 151-157.
- [25] 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.]
- [26] Crowell M, Coulton K, Johnson C, et al. An estimate of the U.S. population living in 100-year coastal flood hazard areas [J]. *Journal of Coastal Research*, 2010, 26(2): 201-211.
- [27] 周健, 丛林, 许彰珉. 上海地区沿海岸线工程受相对海平面上升影响浅析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2000, 11(3): 70-73, 78. [ZHOU Jian, CONG Lin, XU Zhangmin. Effect of sea level rising on nearshore structures and seawalls [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2000, 11(3): 70-73, 78.]
- [28] Jin D, Hoagland P, Au D K, et al. Shoreline change, seawalls, and coastal property values [J]. *Ocean & Coastal Management*, 2015, 114: 185-193.
- [29] 杨继超, 李广雪, 宫立新, 等. 山东威海滨海沙滩侵蚀现状和原因分析[J]. *中国海洋大学学报*, 2012, 42(12): 97-106. [YANG Jichao, LI Guangxue, GONG Lixin, et al. Status and causes of beach erosion in Weihai, Shandong Province [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2012, 42(12): 97-106.]
- [30] 李亚方. 基于3S技术的长江口岸线演变规律及成因分析[D]. 中国地质大学硕士学位论文, 2016. [LI Yafang. Evolution and genetic analysis of Yangtze River Estuary shoreline based on 3S technology[D]. Master Dissertation of China University of Geosciences, 2016.]
- [31] 刘雪, 马妍妍, 李广雪, 等. 基于卫星遥感的长江口岸线演化分析[J].

- 海洋地质与第四纪地质, 2013, 33 (2): 17-23. [LIU Xue, MA Yanyan, LI Guangxue, et al. Coastline evolution of the Yangtze estuary upon satellite remote sensing analysis [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2013, 33 (2): 17-23.]
- [32] 孙伟富, 马毅, 张杰, 等. 不同类型海岸线遥感解译标志建立和提取方法研究[J]. 测绘通报, 2011 (3): 41-44. [SUN Weifu, MA Yi, ZHANG Jie, et al. Study of Remote sensing interpretation keys and extraction technique of different types of shoreline [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2011 (3): 41-44.]
- [33] Lu X X, Oeurng C, Le T P Q, et al. Sediment budget as affected by construction of a sequence of dams in the lower Red River, Vietnam [J]. *Geomorphology*, 2015, 248: 125-133.
- [34] 张坤. 基于小波变换的红河年径流时间序列趋势分析[J]. 人民长江, 2012, 43(增刊2): 53-56. [ZHANG Kun. Trend analysis of annual runoff time series of Red River based on wavelet transform[J]. Yangtze River, 2012, 43(Supplement II): 53-56.]
- [35] Duc D M, Nhuan M T, Van Ngoi C, et al. Sediment distribution and transport at the nearshore zone of the Red River delta, Northern Vietnam [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2007, 29 (4): 558-565.
- [36] Le Ducuong. 北部湾海域沉积动力环境对台风“威马逊”响应的数值模拟研究[D]. 中国海洋大学, 2019. [Le Ducuong. Numerical Simulation of the Sedimentary Dynamic Changes Response to the Super Typhoon Rammasun in the Gulf of Tonkin [D]. Ocean University of China, 2019.]