



南京大學

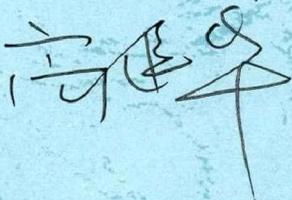
研究生畢業論文
(申請碩士學位)

論文題目	<u>基于 Argus 監測數據的海灘對連續風暴 的響應研究——以舟山東沙海灘為例</u>
作者姓名	<u>郭俊麗</u>
學科、專業名稱	<u>自然地理學</u>
研究方向	<u>河口海岸環境演變</u>
指導教師	<u>時連強 教授級高工 高建華 副教授</u>

2018年5月28日

学 号： MG1527009

论文答辩日期： 2018 年 05 月 28 日

指导教师：  (签字)

Research of Beach Response to Continuous Storms Using Argus Monitoring Data: A Case Study of Dongsha Beach in Zhoushan

By Guo Junli

*A Dissertation Submitted to
School of Geography and Ocean Science,
Nanjing University*

Mentor : Professorate Senior Engineer Shi Lianqiang

Associate Prof. Gao Jianhua

May, 2018

南京大学研究生毕业论文中文摘要首页用纸

毕业论文题目：基于 Argus 监测数据的海滩对连续风暴的响应研究

—以舟山东沙海滩为例

自然地理学 专业 2015 级 硕士生姓名：郭俊丽

指导教师（姓名、职称）：时连强 教授级高工 高建华 副教授

摘要

全球有 70% 的海岸遭受侵蚀，我国则有 49.5% 的砂质海岸处于侵蚀状态。因此，如何有效地防御海岸侵蚀，特别是砂质海岸的侵蚀，一直以来都是国内外研究的热点。海滩是宝贵的旅游资源，也是滨海旅游业的重要依托。然而，浙江省沿海海滩资源非常稀缺，同时，浙江省又是一个受台风影响较多的地方，平均每年超过 6 个。在台风引起的风暴浪和大浪冲击情况下，海滩的侵蚀退化将更加严重，通过自然重塑甚至都难以恢复原状。海滩资源减少与人们需求日益增长之间的矛盾越来越突出。为科学合理地开发利用与保护浙江海滩，我们首先需要深入了解舟山海滩的动力地貌演变过程，特别是在风暴影响下的情况。由此可见，这方面的研究具有十分重要的意义。

本文利用 2016 年的 Argus 视频图像数据、东沙海滩近岸波浪、潮位、风等动力数据以及滩面表层沉积物粒度数据，借助数值模拟与 Argus 应用模块反演获得了东沙海滩滩面地形数据，进而从海滩地貌、剖面、海滩滨线、海滩宽度、表层沉积物粒度特征等方面分析了海滩对连续风暴“马勒卡”和“暹芭”的响应特征，并从海滩自身因素、外部动力因素以及人类活动等方面，探讨了影响海滩对风暴响应的因素，最终获得以下主要结论：

(1) 风暴“马勒卡”发生后海滩单宽体积变化量平均值为 $-73.75 \text{ m}^3/\text{m}$ ，风暴“暹芭”发生后海滩单宽体积变化量的平均值为 $-54.56 \text{ m}^3/\text{m}$ 。连续风暴发生前后海滩的侵蚀程度整体呈现出：直线段 > 上岬角遮蔽段 > 下岬角遮蔽段，剖面形态的变化均表现出以浙江沿海的多年平均海平面为分界、上冲下淤的基本特征，而另外一小部分剖面呈现出几乎整个剖面的侵蚀。海滩各剖面的坡度在风暴发生皆呈

变缓趋势。

(2) 风暴“马勒卡”使整个海滩滨线平均后退 14.75 m, 风暴“暹芭”使得海滩滨线相对于两次风暴前后退 10.91 m; 风暴发生前, 海滩平均滩面宽度为 113.06 m, 第一次风暴发生后海滩宽度变为 98.31 m, 第二次风暴发生后宽度则又为 102.15 m。

(3) 海滩表层沉积物粒度特征的变化: 从横向上分异的变化上看, 因水动力对沉积物的分选, 粒径较细的沉积物随水流向海运动, 使得高滩和中滩粒径变粗, 低滩粒径变细; 从纵向上看, 因岬角的保护作用与沿岸输沙的影响, 海滩下岬角遮蔽段沉积物最稳定, 直线段和上岬角遮蔽段受水动力扰动显著。

(4) 砾石、砂和粉砂等沉积物在不同部位的不同组分含量的分布使海滩不同部位地貌特征各异, 风暴期间的强水动力使细粒泥沙向海运输、粗颗粒的砾石在滩面出露, 沉积物的一系列变化引起滩面地貌(如砾石带的变迁)的相应变化。

(5) 东沙海滩湾口朝向东南, 南北有岬角或海岛遮蔽, 这使得东南向浪对其地貌变化影响最大, 其沉积物主要源于风、水动力对近岸基岩的冲刷以及岛陆岩石的风化、搬运, 风暴的发生造成泥沙损失之后很难得到补给。两次风暴期间偏东向的浪直接冲击海滩, 风向均为能使研究区附近海域产生增水的风向, 水位的异常增高使得海滩剖面的冲淤表现更加明显, 海平面上升的累积效应也会加剧台风风暴潮和海岸侵蚀。海堤的建立阻隔了泥沙来源使得海滩遭受侵蚀后得不到后方的补给, 排水口流出的水流加剧了滩面的侵蚀, 两次风暴中间的海滩补沙起到了一定的作用。

关键词: Argus 视频监测系统; 东沙海滩; 连续风暴; 海滩对风暴的响应

南京大学研究生毕业论文英文摘要首页用纸

THESIS: Research of Beach Response to Continuous Storms Using

Argus Monitoring Data: A Case Study of Dongsha Beach in Zhoushan

SPECIALIZATION: Physical Geography

POSTGRADUATE: Guo Junli

MENTOR: Professorate Senior Engineer Shi Lianqiang

Associate Professor Gao Jianhua

Abstract

70% of coasts are under erosion worldwide, and 49.5% of sandy coasts in China are under erosion. Therefore, how to protect coast from erosion effectively, especially on the sandy coast, has been a hot topic globally. Sandy beaches are usually precious tourism resources and crucial to the whole coastal tourism industry. However, coastal sandy beaches are very scarce in Zhejiang Province, where the sandy coasts are prone to be attacked by typhoons, with an average of more than 6 times a year. Under the attack by large waves caused by typhoons, the erosion and degradation of the beaches are serious, thus the natural recovering processes cannot manage to restore. The conflict between decreasing of beach resources and people's increasing demands has become increasingly remarkable in the recent years. This requires us to make more scientific, rational and sustainable development and utilization of beach resources. To do this, we need to understand the morphodynamic evolution of Zhoushan's beaches system, especially under storm conditions.

In this paper, we used the Argus video image data of 2016, the near-shore wave, tide level, wind and other dynamic data of Dongsha beach and the surface sediments of the beach, and then obtained the beach topographic data of Dongsha beach with numerical simulation and Argus monitoring data. Furthermore, the response characteristics of the beach to the continuous storms "Malakas" and "Chaba" were analyzed from the aspects

of beach topography, section, intertidal shoreline, beach width (out of water), and surface sediment characteristics. We discussed the factors affecting the storm's changes to the beach from the beach's own factors, external dynamic factors, as well as human activities and other aspects, and finally obtained the following findings:

(1) The average volumetric change after the storm "Malakas" was $-73.75 \text{ m}^3/\text{m}$, while the average volumetric change after the storm "Chaba" was $-54.56 \text{ m}^3/\text{m}$. The erosion degree of the beach before and after the continuous storms appeared as follows: straight zone > the upper shadow zone > the lower shadow zone, and the changes of sections all showed the basic features of scouring and silting along the boundary line of the multi-year average sea level in Zhejiang coast. The slope of each section of the beach generally decreased after the storm occurred.

(2) Intertidal shoreline of the beach retreated by an average of 14.75 m after storm "Malakas", and the storm "Chaba" caused the intertidal shoreline retreating landwards 10.91 m (compared with the intertidal shoreline before the two storms). The average beach width before the two storms was 113.06 m, and it changed to 98.31 m after the first storm, and then changed to 102.15 m after the second storm.

(3) As to lateral variation, sediments with finer grain sizes moved with the water to the sea due to the sediments sorting by hydrodynamic forces, making the sediments' grain size at the higher elevation location of beach and the middle elevation situation of beach become coarser and the grain size of the low bank become finer. From the longitudinal point of view, due to the protection of the horns and the effects of sediment transportation along the coast, the sediments at the lower shadow zone were most stable, and the hydrodynamic disturbances were prominently present at the straight zone and the upper shadow zone.

(4) The distribution of different sediment size (gravel, sand, silt, etc) in different parts makes the geomorphological characteristics different at along the beach profile. During the storm, the strong hydrodynamic force transported the fine sediment to the sea, and the coarse-grain gravel occurred in the beach surface. A series of changes in the composition and distribution of beach sediments resulted in corresponding changes in

the beach geomorphology (like changes of gravel belt).

(5) Dongsha beach faces southeast and is covered by horns or islands in the north and south, which makes the southeast direction waves have the greatest impact on the geomorphological change. The sediments were mainly caused by wind and hydrodynamic forces escaping the near-shore bedrock and weathering and transport of the island land rocks. Sediments lost a lot after the storm, but it was difficult to get supplies. The eastward waves during the two storms directly hit the beach, and the wind direction increased water level in the sea area near the research area. The abnormally high water level made the scouring and deposition of the beach section more obvious, and the cumulative effect of sea level rise would also increase the typhoon storm surge and coastal erosion. The establishment of the seawall obstructed the source of sediment and caused the beach to be eroded without supplies from the hinterland. The water discharged from the drainage outlet increased erosion of the beach, and the beach nourishment can help the beach recovering to some extent.

Keywords: Argus video monitoring system; Dongsha beach; continuous storms; the beach response to storm

目录

摘要.....	I
Abstract.....	III
目录.....	VII
第 1 章 绪论.....	1
1.1 选题背景及研究意义.....	1
1.2 Argus 视频监测系统在沙滩对风暴的响应研究中的应用.....	2
1.2.1 Argus 视频监测系统简介.....	2
1.2.2 Argus 在沙滩对风暴响应方面的应用.....	4
1.3 国内沙滩对风暴的响应研究现状.....	8
1.3.1 存在的问题.....	9
1.4 本文主要工作.....	10
第 2 章 研究区域概况.....	13
2.1 地理概况.....	13
2.2 地质地貌及沉积物特征.....	14
2.3 波浪和潮汐.....	14
2.4 风况、气温和降水.....	15
2.5 台风发生情况.....	16
第 3 章 数据获取与处理.....	17
3.1 风暴“马勒卡”和“暹芭”概况.....	17
3.2 Argus 视频图像获取.....	18
3.3 坐标转换及图像校正.....	19
3.4 边线识别及高程获取.....	21
3.4.1 IBM 工作原理.....	21
3.4.2 波浪潮位观测.....	24
3.4.3 风暴期间东沙沙滩附近海域的风况、波浪与潮位.....	25
3.4.4 沙滩前沿波浪模拟.....	28

3.5	地形插值与误差分析.....	31
3.6	潮间带冲淤量与滨线位置变化量计算.....	34
3.7	表层沉积物采集与粒度分析原理.....	36
第 4 章	海滩对连续风暴的响应特征.....	39
4.1	海滩剖面对连续风暴的响应.....	39
4.1.1	风暴期间海滩剖面的冲淤及形态变化.....	43
4.1.2	海滩滨线及出露水面的海滩宽度的响应.....	51
4.2	海滩沉积地貌对连续风暴的响应.....	54
4.2.1	海滩地貌对连续风暴的响应.....	54
4.2.2	海滩表层沉积物粒度特征对风暴的响应.....	61
第 5 章	连续风暴作用下海滩变化的影响因素分析.....	67
5.1	连续风暴作用下海滩剖面变化的影响因素分析.....	67
5.1.1	海滩自身因素.....	68
5.1.2	外部因素.....	69
5.1.3	人类活动.....	71
5.2	连续风暴作用下海滩沉积地貌变化的影响因素分析.....	73
第 6 章	结论.....	75
第 7 章	展望.....	77
7.1	存在的问题.....	77
7.2	未来的研究展望.....	78
	参考文献.....	79
	在校期间发表论文情况.....	91
	致谢.....	93

第1章 绪论

1.1 选题背景及研究意义

当前,海洋经济进入了快速发展的时期,为适应这种发展需求,人类对海岸带已达近乎饱和的开发利用,加上全球变化的影响,如海平面上升、风暴潮频发等,导致了海岸侵蚀、环境恶化、生态破坏等诸多负面影响,给海岸带带来了前所未有的压力。其中,全球有 70% 的海岸遭受侵蚀(陈吉余等, 2010),我国则有 49.5% 的砂质海岸处于侵蚀状态(罗时龙, 2013)。因此,如何有效地防御海岸侵蚀,特别是砂质海岸的侵蚀,一直以来都是国内外研究的热点。砂质海岸最典型的特征是砂质海滩,《2020 年的海洋科学、发展趋势和可持续发展面临的挑战》(2004)已将海滩研究列为优先的科学问题,可见深入开展海滩研究具有重要的科学意义。

海滩是宝贵的旅游资源,是海浴、沙浴、日光浴的最佳旅游场所,也是滨海旅游业的重要依托。然而,浙江省沿海海滩非常稀缺,据浙江省 908 专项海岛海岸带调查资料,浙江省海滩面积约为 64 km²,仅占潮间带面积的 3%,而且主要分布在舟山群岛、象山县东部及苍南沿海一带。其中,舟山群岛地区有三十多处海滩,是浙江省海滩资源最丰富的地区。但是,在海平面上升和人类活动的双重影响下,舟山群岛海滩已经开始侵蚀退化,部分海滩出现粗化现象;同时,浙江省又是一个受台风影响较多的地方,平均每年超过 6 个(陆建新, 2010),在台风引起的风暴浪和大浪冲击情况下,海滩的侵蚀退化将更加严重,通过自然重塑甚至都难以恢复原状(Brooks et al., 2017)。长此以往,势必会导致海滩资源减少与人们对于海滩休闲度假的需求日益增长之间的矛盾越来越突出。这就需要我们更加科学、合理、可持续开发利用海滩资源,必要时要进行适当地修复或养护。为此,我们首先需要深入了解舟山海滩的动力地貌演变过程,特别是在风暴影响下的情况。由此可见,这方面的研究具有十分重要的现实意义。

由于 Argus 视频图像监测系统不仅能够提供长期、实时、连续、高分辨率的海滩地形地貌数据,而且在极端天气情况下也能照常监测,因而,近几十年来,Argus 视频监测系统在海外海滩研究中得到了广泛地应用。鉴于此,本文以浙江舟山朱家尖岛东沙海滩为例,利用 2016 年所获取的 Argus 视频监测数据、东沙

海滩近岸水动力数据以及滩面表层沉积物数据,深入开展海滩对连续风暴的响应,为东沙海滩的可持续开发利用与后期养护提供参考。

1.2 Argus 视频监测系统在沙滩对风暴的响应研究中的应用

1.2.1 Argus 视频监测系统简介

二十世纪八十年代,美国俄勒冈州立大学的 Rob Holman 教授所在的海岸影像实验室研发了一套基于海岸线的 Argus 海岸遥测系统。它利用设立在岸边一定高度建筑物或支架上高分辨率的数码摄像探头以及气象探头来获取对平常和台风等灾害天气下海滩及近海海域的图像,通过对图像进行处理获取海滩与近海海域的定量数据,从而实现对海滩与近海海域的实时在线以及高精度的监测。该系统主要由现场视频测站、公共或者专用通讯网、中心服务器系统等部分组成(图 1-1)。

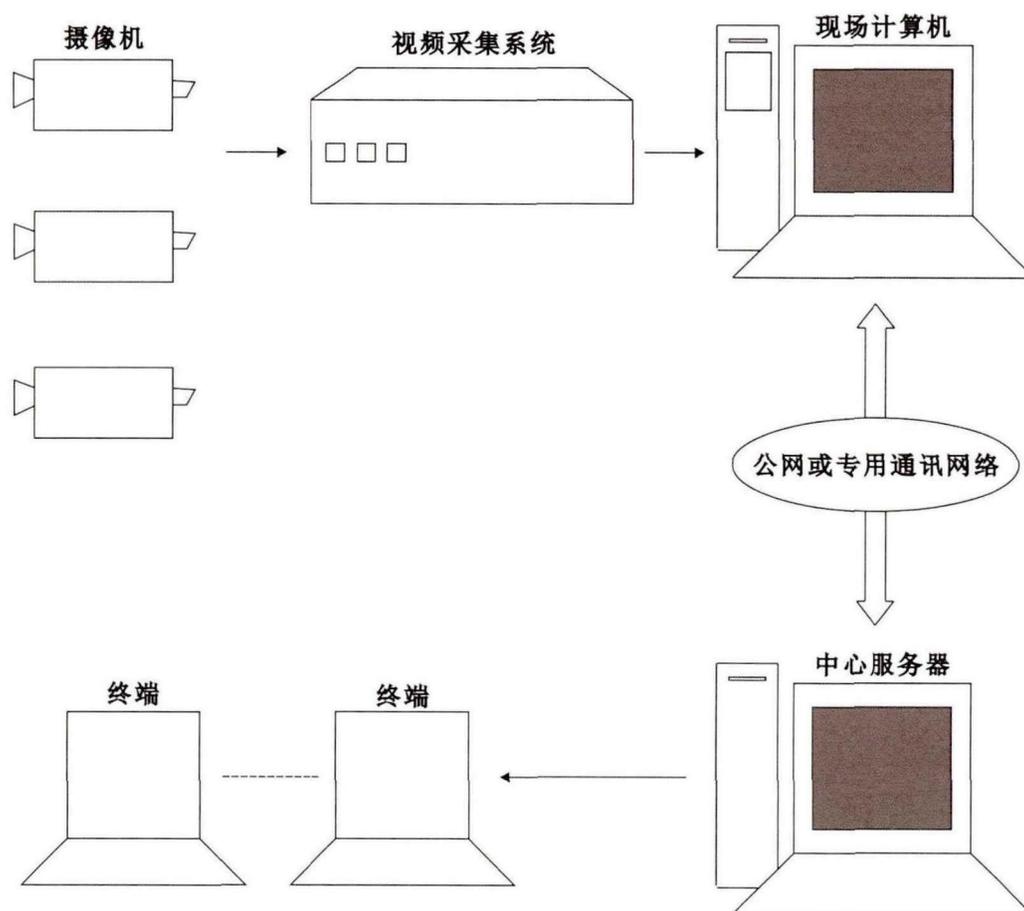


图 1-1 Argus 系统组成

Figure 1-1 The composition of Argus system

Argus 现场视频测站通常由 4~6 个摄像机组成, 覆盖 180° 视野范围, 根据摄像机安置高度和相机镜头焦距, 观测区域的空间范围可以达到 3-6 km, 同时给出一个平面上的各物理量信息(区别于传统的单点测量手法); 在时间尺度上, Argus 系统可以实施从不到一秒到连续数年的观测, 甚至更长(区别于只能在指定时间段内进行测量的传统方法)。数据采集的过程是自动化的。

Argus 观测系统自诞生以来, 目前已经发展到第三代, 全球第一套 Argus 观测站建于 1992 年, 由两台采集黑白图像的摄影机组成, 记录图像的解像度为 640×480 像素, 实地计算机基于 DOS 操作系统; 第二代 Argus 观测系统采用 Unix 操作系统, 记录图像为 640×480 像素的彩色胶卷照片; 第三代 Argus 观测系统采用 Linux 操作系统, 记录 1024×768 像素的彩色数字图片, 对图片可做同步数字化处理, 并且对海岸带内移动目标可做立体图像分析(张锁平和张春田, 2006; 刘海江和时连强, 2016)。

到目前为止, 已经在美国、加拿大、荷兰、日本、澳大利亚、新西兰、英国等国家建成了数十个 Argus 观测站, 实时在线监测海岸带的动力地貌及动力环境。2015 年 5 月, 国家海洋局第二海洋研究所率先在浙江舟山朱家尖岛的东沙海滩建成了大陆首套 Argus 观测站, 接着河北省地矿局秦皇岛矿产水文工程地质大队在秦皇岛西海滩、中国地质调查局青岛海洋地质研究所在威海市文登南海新区金沙滩也陆续建成, 另外, 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室正在上海崇明东滩建设 Argus 观测站, 可见, Argus 视频监测系统在国内已呈星火燎原之势, 将来势必会有更多的监测站建成。Argus 视频系统在海岸管理和工程建设方面获得了较成功的应用, 主要包括:

- (1) 定量岸线和海滩宽度的演变, 评估潜在的娱乐价值或者风暴作用对地形地貌的影响;
- (2) 定量滩面沉积物的侵淤量, 如评价海岸工程建筑物对地形的影响; 调查海滩动力和海滩养护的季节性变化; 研究海滩地貌特征的演化;
- (3) 定量内滨水深, 评估其安全性; 评估海滩养护后的演化效果, 甚至应用于军事活动;
- (4) 定量波浪上爬高度, 以评估海岸建筑物如海堤、护岸、海港防波堤等的稳定性;

(5) 耦合不同计算模型, 利用 Argus 调查和高时间分辨率信息, 定量表达海岸的状态。

在科学研究中, 海岸带监测系统已经被用来定量沿岸流流速, 波浪特征, 海藻繁殖旺盛期的出现及其分布, 裂流持续性, 还可能应用于海滩游人密度的监测和裂流的预测等方面。另外, 连续、长期的高分辨率监测数据还有利于随后数据的选择, 如风暴造成的损失和海岸侵蚀趋势预警预报等。

1.2.2 Argus 在海滩对风暴响应方面的应用

目前基于 Argus 视频图像的海滩风暴响应报道已有不少, 主要包括针对单个风暴响应的研究与针对连续风暴响应的研究 (表 1-1、表 1-2)。

表 1-1 基于 Argus 视频图像的海滩对单个风暴的响应研究

Table 1-1 Research on beach response to single storm based on Argus video image

文献来源	风暴数量	按沉积物类型分类	按海滩形态分类
Aarninkof et al. (2003)	1	沙滩	岬湾型
Harley et al. (2009)	1 (一系列)	沙滩	岬湾型
Bramato et al. (2010)	1	砂砾混合海滩	岬湾型
Alegria et al. (2011)	1	砾石滩	平直型
Sancho et al. (2012, 2013)	1	沙滩	岬湾型
Poate et al. (2014, 2015)	1	砾石滩	平直型
Scott et al. (2015)	1	砾石滩	平直型
Archetti et al. (2015)	1 (一系列)	沙滩	平直型
Masselink et al. (2015, 2016)	1	砾石滩	平直型

表 1-2 基于 Argus 视频图像的海滩对连续风暴的响应研究

Table 1-2 Research on beach response to continuous storms based on Argus video image

文献来源	风暴数量	按沉积物类型分类	按海滩形态分类
Yoon et al. (2007)	5	沙滩	螺旋线弧形
Alegria et al. (2008)	9	砾石滩	平直型
Ojeda et al. (2008)	25	沙滩	岬湾型
Splinter et al. (2011)	数个	沙滩	沙坝型
Ranasinghe et al. (2012)	24,17	沙滩	沙坝型
Gervais et al. (2013, 2015)	8	沙滩	沙坝型
Balouin et al. (2013)	数个	沙滩	沙坝型
Karunarathna et al. (2014)	数个	沙滩	岬湾型
Coco et al. (2014)	4	沙滩	平直型
Angnuureng et al. (2015)	83	沙滩	沙坝型

(1) 海滩对单个风暴的响应

为针对性地了解海滩对某个风暴的响应特征,学者们对不同类型的海滩进行了研究,包括砂质海滩、砂砾混合质海滩和砾石滩等(表 1-1)。

其中对于砂质海滩的研究,从海滩的平面形态上看,主要集中在岬湾型和平直型海滩。在岬湾型海滩对风暴的响应研究中,Aarninkof et al. (2003) 在西班牙的 Barcelona 和 Bogatell, 应用岸线监测模型来估计海滩由于风暴导致的岸线变化,显示出在一次风暴中,岸线后退了几十米; Sancho et al. (2012,2013) 对西班牙巴塞罗那沿岸三个岬湾型海滩在防波堤建设后对风暴的响应特征进行了研究,通过对不同特征的地貌类型进行分析,对比了不同海滩或同一海滩不同部位经历海滩风暴的差异; Harley et al. (2009) 利用 2004~2008 年间的 Argus 图像数据,研究了澳大利亚东南部岬湾型海滩 Collaroy-Narrabeen 对一系列单个风暴事件的响应,分析了海滩宽度的变化,并将该变化与累积风暴能量进行了比较。对平直型海滩的风暴效应研究,如 Archetti 等 (2011, 2015, 2016) 以意大利亚得里亚海北部的 Jesolo 海滩为例,通过分析海岸线位移和波浪特征之间的关系,研究了一

年内的 31 个独立风暴期间的净海岸线位移, 发现人工沙丘的存在, 可以减少风暴期间海岸线的蚀退。

在更高能、平直型的砾石海滩对风暴响应方面, 主要是英国西南岸的砾石滩研究。比如: Alegria et al. (2011) 借助视频图像数据及模型, 分析了英格兰西南部 Slapton Sands 砾石滩剖面对风暴的响应特征; Poate et al. (2014, 2015) 研究了英国西南 Loe Bar, Slapton Sands 和 Chesil 三个代表性砾石滩对极端冬季风暴的地貌响应, 结果发现: 在更高能量条件下地貌响应更一致, 并且波浪在一个潮周期内会造成底床超过 1.5 m 的侵蚀变化。风暴后的恢复在前两个月最明显, 海岸地貌的长期变化是坝顶位置向岸迁移了超过 17m; Masselink et al. (2015, 2016) 也对英国西南岸海滩进行了风暴效应研究, 通过分析风暴强度和海滩形态发现控制英格兰西南岸海滩对风暴响应的关键因素是风暴轨迹, 海岸线的延伸性质和海岸方向的相关变化使得英格兰西南海岸的地貌风暴响应表现出相当大的空间变异性。

关于砂砾混合质海滩对风暴的响应研究较少, Bramato et al. (2010) 研究了西班牙岬湾型海滩 Carchuna 在经历一次风暴事件后、在中低能量海况条件下的恢复过程, 通过分析海滩沉积物组成、海岸线位置与沿岸沙坝在风暴前后的变化, 发现双峰态海滩对普遍接受的海滩经验关系式有不同反应。

(2) 海滩对连续风暴的响应

近年来, 海滩对连续风暴的响应引起了更多的关注, 在此方面, 国外学者们主要针对岸线和海滩宽度的变化分析海滩对连续风暴的响应。海滩对连续风暴响应的研究中以砂质海滩居多, 从海滩的平面形态上看, 沙坝型的最多, 其次是岬湾型和平直型的 (表 1-2)。

学者们对连续风暴发生情况下海滩沙坝迁移情况关注较多, Ranasinghe et al. (2012) 对比分析了悉尼 Palm 海滩和北卡莱罗纳 Duck 海滩对连续风暴的响应, 量化了近岸形态恢复时间尺度 (T_{mr}), 结果显示在这两个海滩的 T_{mr} 约为 5 至 10 日; Balouin et al. (2013) 利用 Argus 图像数据研究了法国 Sète 海滩岸线韵律性特征与近岸沙坝动力在风暴期间的耦合, 结果表明, 这种耦合是随时间变化的, 并且在风暴减弱时, 需要给定的周期以恢复这两种地貌不同阶段的位置, 恢复的

周期一般是 10-20 天; Angnuureng et al. (2015) 对法国西南部的 Bisscarrosse 海滩进行了长达 6 年的视频观测, 研究了单个和序列风暴对海滩的影响。结果表明: 风暴后 9 天海滩就能恢复到风暴前的状态, 最显著的侵蚀发生在序列风暴的第一次和第二次期间, 而随后的风暴影响较小, 而海岸线的变化受到波浪的影响, 侵蚀主要发生在大潮潮差时, 此时内沙坝远离岸边。此外, Splinter et al. (2011) 研究了澳大利亚黄金海岸数个海滩在风暴期间的地貌变化和风暴后海滩的恢复过程。Gervais et al. (2013, 2015) 也研究了风暴事件对法国南部沙坝型海滩的影响及海滩的恢复期。

关于岬湾型砂质海滩, Ojeda et al. (2008) 利用视频监控技术研究了 2001~2006 年间西班牙巴塞罗那那两个人工岬角海滩对 25 个风暴事件的动力地貌响应, 分析了海岸线蚀进、水下沙坝迁移与形状变化以及巨大滩角的形成; Karunaratna et al. (2014) 分析讨论了澳大利亚新南威尔士州 Narrabeen 海滩风暴波候与海滩剖面对风暴集群的响应, 揭示了海滩变化的原因不仅仅是风暴集群中单个风暴的强度, 连续风暴和风暴后恢复速度之间的时间间隔也起着重要的作用。

在平直型砂质海滩对连续风暴的响应方面, Coco et al. (2014) 利用现场地形测量数据以及离岸水深测量数据、视频图像数据, 研究了法国波尔多南部 Truc Vert 海滩在横向和纵向上对风暴集群的响应特征, 多元线性回归分析表明: 滩面上部的体积变化可由离岸波浪特征、潮差或内破碎波区域的长重力波能来解释, 但不能将单个风暴的侵蚀研究放大到风暴集群侵蚀的预测; Puig et al. (2016) 研究了 1956-2010 年间风暴对西班牙西南部 Cadiz 湾 4 个不同地貌单元中潮差耗散性海滩 (两个平直型, 两个岬湾型) 的海岸线变化的影响, 风暴因子与岸线变化的相关性分析表明: 在相关性较好的海岸, 风暴对开敞型海滩海岸线影响更显著。

在螺旋线弧形海滩连续风暴效应的研究中, Yoon et al. (2007) 按时间序列对韩国的海云台海滩风暴期间的岸线变化进行了量化分析, 发现整体岸线的变化与台风发生的频率没有关系。

关于砂砾混合质海滩、砾石滩对连续风暴响应的研究很少, 仅发现 Alegria et al. (2008) 利用 Argus 图像数据和 RTK GPS 现场测量数据, 通过确定风暴前后潮间带地形, 研究了 9 个风暴造成的英格兰西南部的砾石滩 Slapton Sands 沿岸

和离岸地貌的变化,并对比了通过图像提取程序提取到的岸线与利用 RTK GPS 现场测量所得岸线之间的差别, 结果发现垂向误差小于 0.21 m。

1.3 国内海滩对风暴的响应研究现状

同一海滩对不同风暴的响应特征是不同的, 不同海滩对同一风暴的响应亦不同。国内学者一般通过分析风暴前后海滩剖面 and 沉积物的变化研究海滩的风暴效应, 并且主要关注岬湾型砂质海滩对风暴的响应(表 1-3)。

在岬湾型海滩对风暴响应的研究报道中, 戴志军等(2001)对粤东寮咀口的岬间海滩的剖面进行了重复测量, 发现海滩剖面短期变化的主要动力因素是波浪, 且台风大浪是剖面快速变化的比较直接的驱动力; 蔡锋等(2004)以粤中飞沙湾和粤东水东湾的下大海海滩为例, 探讨了热带气旋前进方向两侧海滩对台风“伊布都”的不同响应特征; 雷刚和蔡锋(2005)对福建江田下沙海滩进行调查, 分析了该海滩对台风的响应模式, 发现沉积物的偏度和峰度没有明显变化, 且剖面的底层沉积物与表层沉积物响应特征相似; 陈子燊等(2009)利用台风“派比安”和“宝霞”期间粤东后江湾的剖面数据, 分析了极端波况影响下前滨剖面不同高度固定点的时间变化特征, 在这之后, 于吉涛等(2015)又基于现场实测数据, 利用典型相关分析方法揭示了 0709 号台风“圣帕”影响下后江湾海滩前滨地形不同的变化过程。

除岬湾型海滩对风暴响应的研究外, 还有部分弧形、沙坝型、平直型海滩的研究。陈子燊(1995)分析了粤西水东湾的弧形海岸对 8616 号台风的响应特征, 发现弧形海岸的凹入段下大海海滩侵蚀最严重; 彭俊等(2008)对比分析了福建的岬湾型、沙坝-潟湖型、夷直型海滩在 0418 号台风“艾利”发生后沉积物的粒度特征变化, 结果表明沉积物呈现出粗化为主、分选性差的特征, 且岬湾型海滩沉积物的粒度变化最为强烈; Yu et al. (2013)研究了香港的两个海滩(一个为弧形、一个为岬湾型)对台风黑格比的响应; 黎树式等(2017)通过对北海银滩在威马逊作用下的动力沉积过程的研究, 发现台风作用后海滩沉积物变粗并且细沙含量有所增加。

表 1-3 国内海滩对风暴的响应研究对比

Table 1-3 Comparison of various domestic beach responses to storms

文献来源	台风	按沉积物类型分类	按海滩形态分类
陈子燊, 1995	8616 号	砂质海滩	弧形
戴志军等, 2001	9904、9905、9908 号	砂质海滩	岬湾型
蔡锋等, 2002	9914 号台风	砂质海滩	岬湾型
蔡锋等, 2004	伊布都	砂质海滩	岬湾型
蔡锋等, 2006	艾利	砂质海滩	岬湾型
蔡锋等, 2006	艾利	砂质海滩	沙坝型
蔡锋等, 2006	艾利	砂质海滩	平直型
蔡锋等, 2008	碧利斯	砂质海滩	岬湾型
陈子燊, 2009	派比安、宝霞	砂质海滩	岬湾型
陈燕萍, 2012	洛坦	砂质海滩	岬湾型
Yu et al., 2013	黑格比	砂质海滩	弧形、岬湾型
童宵岭等, 2014	海葵	砂质海滩	岬湾型
李明杰等, 2015	0312 号	砂质海滩	弧形
于吉涛等, 2015	0709 号	砂质海滩	岬湾型
邵超等, 2016	威马逊	砂质海滩	岬湾型
冯哲等, 2016	长时期一系列台风	砂质海滩	岬湾型
龚昊等, 2017	威马逊、海鸥	砂质海滩	岬湾型
黎树式等, 2017	威马逊	砂质海滩	沙坝型
本文	马勒卡、暹芭	砂质海滩	岬湾型

1.3.1 存在的问题

近年来,随着极端天气的不断增多,量化风暴对海滩的影响是一个具有挑战性的目标 (Dinu et al., 2017),尤其是连续风暴。目前国内对于连续风暴的研究报道较少,冯哲等 (2016) 利用全站仪对青岛石老人海滩进行近 8 年 (不连续) 的观测,结合交叉小波和小波相干分析方法探讨海滩剖面中长期淤蚀变化特征及其

控制因素, 结果表明海滩长周期变化主要受控于风暴潮作用及其漫长的恢复期。龚昊等 (2017) 对比分析了 1409 号台风“威马逊”和 1415 号台风“海鸥”登陆前后的海滩剖面及表层沉积物的演变, 发现连续台风对滩面表层沉积物的破坏性较强, 海滩剖面的变化则表现出前滨响应强烈。

在海滩风暴响应方面关注浙江海滩的报道很少, 张国栋等 (1987) 以舟山普陀岛和朱家尖岛为例, 研究了砾质滨岸在台风时期的地貌变化和沉积特征, 对研究古代风暴沉积具有重要意义。另外, 童宵岭 (2014) 研究了台风“海葵”对皇城海滩的影响。

1.4 本文主要工作

研究目标: 利用 2016 年 Argus 系统监测数据、东沙海滩近岸波浪、潮位等水动力数据以及滩面表层沉积物粒度数据, 借助数值模拟与 Argus 应用模块反演滩面地形, 进而从海滩地貌、剖面、海滩滨线、海滩宽度、表层沉积物粒度特征等方面分析东沙海滩对连续风暴的响应。

研究内容:

(1) 海滩剖面、滨线对连续风暴的响应

对海滩的 15 条剖面在两次风暴期间及前后的数据进行处理, 并计算各剖面的单宽淤积量、坡度, 分析不同岸段剖面形态及冲淤特征; 对不同剖面两次风暴前后海滩滨线进退变化进行分析, 并计算风暴发生期间海滩出露水面的宽度;

(2) 海滩沉积地貌对连续风暴的响应

利用 Argus 六个摄像头的瞬时图像, 分析两次风暴前后海滩不同部位的地貌变化; 分析连续风暴前后沉积物在横向和纵向上的的粒度分异特征, 总结沉积物对连续风暴的响应规律;

(3) 海滩对风暴响应的影响因素

从海滩地质地貌、形态等自身因素以及波浪、潮汐、风、海平面上升等外部因素分析海滩的变化规律。

研究思路：论文技术路线如图 1-2 所示，首先获取风暴数据以及在风暴发生时的波浪潮汐数据、Argus 图像数据，然后用 Delft3D 模型将海滩前沿浪进行模拟、验证。以朱家尖岛外的波浪浮标数据为边界条件，通过地形水深、岸线、和已有波浪数据，利用 Delft3D 正交网格模拟东沙海滩近岸浪的数值。而后将所获得的波浪数据和另外一个波浪浮标数据进行对比验证。将潮位、波浪数据通过 FDM 应用模块导入 Argus 数据库以供 Argus 水边线高程模型计算使用。之后进行图像融合、水边线提取、滩面地形插值及验证、冲淤量计算，分析总结风暴影响下海滩的地形地貌变化及其影响因素，最终得出结论。

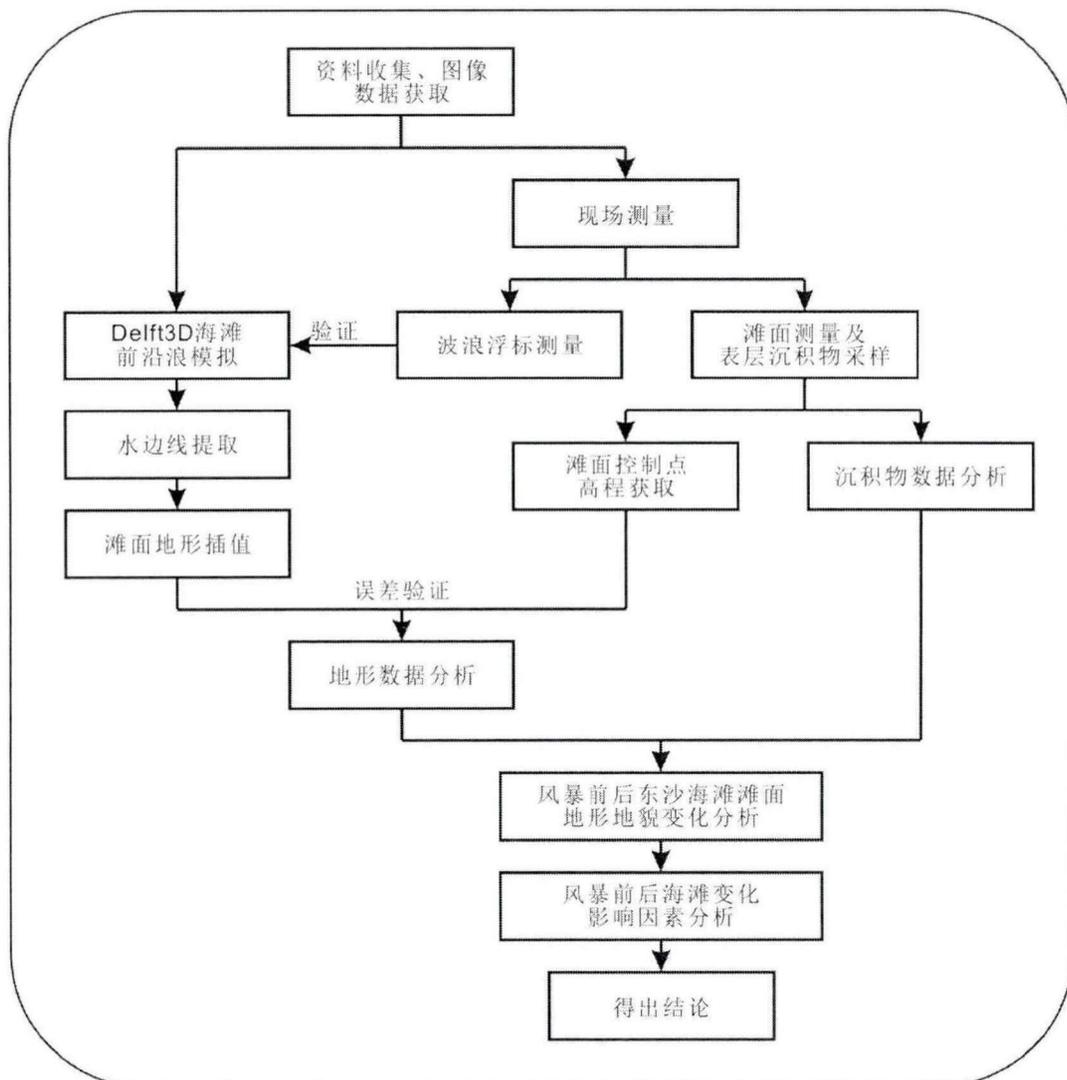


图 1-2 研究技术路线

Figure 1-2 Technology route

第2章 研究区域概况

2.1 地理概况

朱家尖岛是舟山市的第五大岛，位于舟山群岛的东南部海域，俯瞰岛呈现北端宽、南端窄的蝌蚪状，长 14.4 km，最宽处 9.1 km，陆域面积 62.2 km²，海岸线长 79.2 km，以基岩、砾石、砂质海岸为主。当地气候受到海陆的共同影响呈现亚热带季风气候的特征，主要特征是：季风显著，四季分明，冬暖夏凉，无霜期长，光照充足，降雨季节变化显著，气温适中。

东沙海滩位于浙江省舟山市朱家尖岛的东部（图 2-1），全长约 1440 m，宽约 250 m，面朝东海，南邻后门山岛，北接牛泥塘山。东沙是砂质海滩，整个海滩呈 NNE-SSW 走向，两端的岬角伸入海中，是典型的岬湾型海滩。海滩附近以丘陵地貌为主，山势平缓，没有入海河流的物质输入（夏小明，2014）。

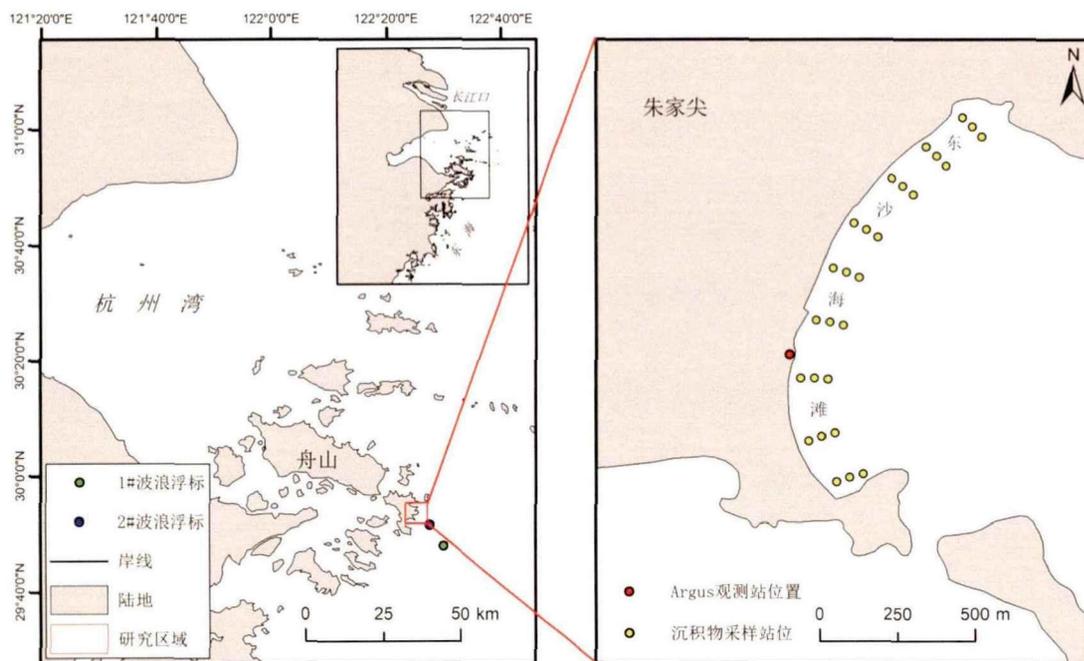


图 2-1 研究区域及 Argus 观测站位置示意

Figure 2-1 Location of the study area and Argus observation station

2.2 地质地貌及沉积物特征

东沙海滩所在的朱家尖岛在地质上属于大陆基岩岛,原系浙东北丘陵山地的一部分,地质构造形成于燕山晚期,在全新世海侵过程中陷入海中。堆积地貌随处可见,约占该岛面积 45%,以海积平原为主,丘陵坡麓、沟谷(或谷口)发育的坡积洪积群和洪积扇分布零散。东沙海滩附近则以丘陵地貌为主,海拔在 100~200 m,丘陵之间有小型的冲击、海积平原,沿岸建有防护海塘。海滩外侧有较为平缓的水下岸坡,逐渐过渡到东海内陆架堆积平原地貌(图 2-2)。

朱家尖岛东岸和东南岸的大沙里、东沙、南沙、千沙、里沙、乌石塘、小乌石塘等是典型的海积沙滩、砾滩。朱家尖岛东部的海滩沉积物的平均粒径为 2.06~2.51 ϕ ,粒径变化不大;分选系数 0.49~0.63,分选性好;沉积物的偏度值中滩呈现负偏,高滩和低滩正偏;峰态值分布范围为 1.46~2.58,呈窄尖至很尖的状态。朱家尖岛外海域沉积物主要来自长江口,表层沉积物的主要组份为黏土、粉砂和砂。朱家尖岛沿岸附近的沉积物粒径比外部海域的大,沉积物的中值粒径平均值为 6.6 ϕ (细粉砂),由沿岸至外海沉积物平均粒径呈现出逐渐变细的趋势(罗光富等, 2014; 张朝阳等, 2012)。研究区域附近海域悬沙含量冬季高、夏季低,冬季为 0.6~1.4 kg/m^3 ,夏季为 0.024~0.098 kg/m^3 。悬沙的中值粒径变化于 2.5~5.2 μm 之间,悬沙自表层向底层变粗(吴晗等, 2014)。

2.3 波浪和潮汐

朱家尖岛所处海域波浪年平均波高 0.5 m,最大波高 4.2 m,年平均周期 3.6 s,各月平均波高和变化周期分别为 0.3~0.6 m 和 2.6~4.5 s 之间,冬季大于夏季,常波向为北、东北、东南,大浪多集中与 8~10 月,以风浪为主,涌浪也占一定的比例。历史上,在朱家尖西南角的乌沙门水道附近,实测到台风和大风期最大波高高达 2.26 m,周期 2.6 s。

朱家尖诸岛海域,潮汐性质为正规半日潮。调和分析结果表明,诸岛海域浅海分潮的振幅较大,其中 H_{M4}/H_{M2} 为 0.03,海区的潮汐应属于非正规浅海半日潮类型,潮位在一个太阴日内出现两次高潮和两次低潮,并且有明显的日不等现象。潮流为 SE-NW,平均潮差 2.5~2.8 m,最大潮差 4.79 m(陈洪德等, 1982)。

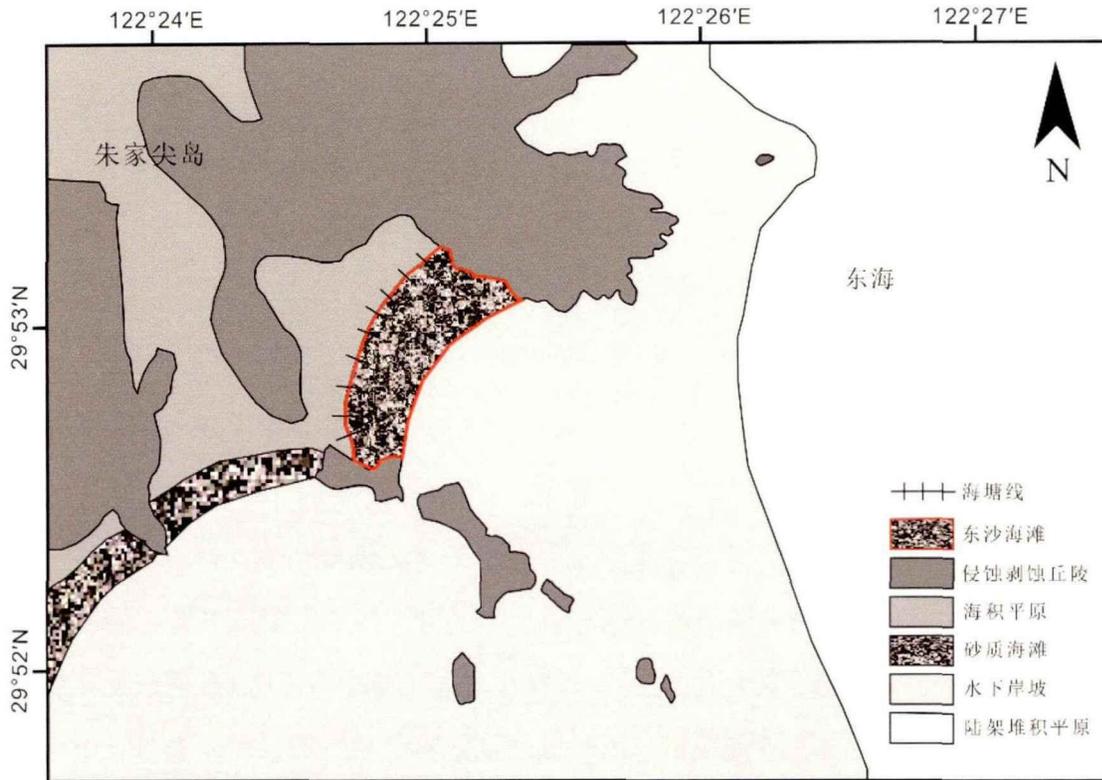


图 2-2 东沙海滩及其附近区域地质地貌分布图（改绘自程林，2014）

Figure 2-2 Geological and geomorphological map of Dongsha beach and its vicinity (modified from Cheng Lin et al., 2014)

2.4 风况、气温和降水

本研究区域平均风速的主方向以北、北西北和东南为主，出现频率分别占 11.2%、10.7%和 8.8%。平均风速以北西北方向最大，为 6.4 m/s，其次为南向的 6.1 m/s 和北向、南东南向的 6 m/s。本区域属亚热带季风气候区，风速、风向有明显的季节变化。风向的季节变化特点为南向风与北向风的季节性交替，北向风主导时间长，南向风主导时间短。冬春季盛行风向为 NW、NNW，夏季盛行风向为 SSE、SE。

朱家尖岛年平均气温 16.4 °C，一月份多年平均气温仅 6 °C 为最冷，八月气温最热达 26.8 °C。朱家尖岛的降雨随季节的变化而变化显著，全年大致可分为两个雨季和两个干季。第一个雨季包括 3-6 月的春雨和梅雨，降水明显增多，特别是梅汛期，常有暴雨或大暴雨出现。春季降水量为 200~500 mm，占年雨量的 25%~34%；梅汛期降水量为 150~400 mm，占年雨量的 20%~28%，第一个雨季的

降雨量占全年的比率接近 40%~50%。第二个雨季就是 8 月的台风雨与 9 月的秋雨，月雨量在 220~500 mm，占年雨量的 20%~28.5%。雨季降水占全年的比率为 65%~70%，说明降水时段比较集中，季节变化较显著。年降水日（日降水量 ≥ 0.1 mm）为 150 天左右，降水日均以 3~6 月和 8~9 月为最多，以 7 月和 10 月至第二年 2 月为最少（国家海洋局第二海洋研究所，2012）。

2.5 台风发生情况

自 1949 年至 2016 年，浙江省共有 43 个台风登陆（图 2-3）。登陆浙江的大部分台风在西北太平洋上生成后向西北方向运动进入浙江沿海，台湾为浙江“挡风”数次。登陆浙江的台风个数有明显的上升趋势，其中，在 21 世纪的前十年登陆浙江的台风数量最多，达 12 个，每年平均登陆 1.2 个。这 68 年来登陆浙江的台风级别主要为强热带风暴和台风，约占总登陆台风数的 74%，另外，还有两次为超强台风。7-9 月是台风登陆浙江最多的季节，约占总登陆个数的 93%，其中 7 月有 13 个，8 月有 18 个，10 月也是可能有台风登陆的（许浩恩等，2009）。

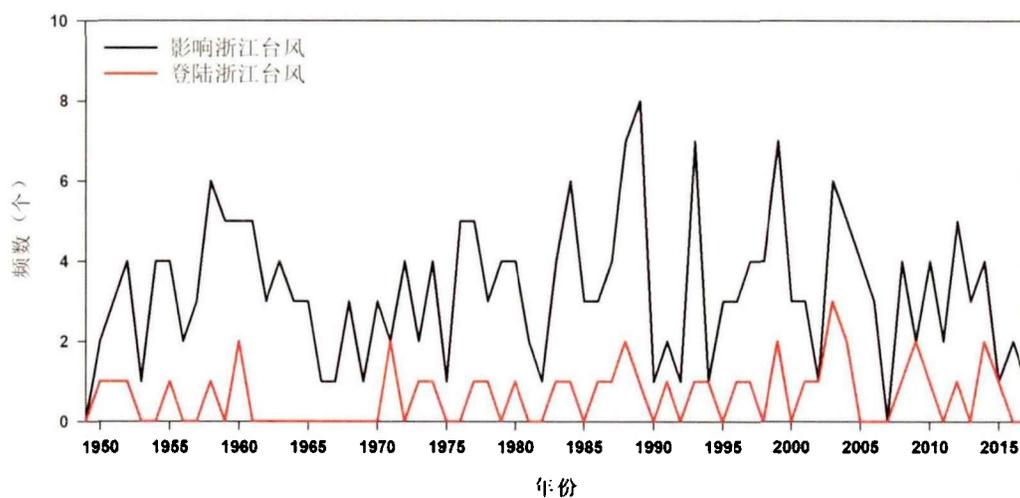


图 2-3 影响及登陆浙江的台风年际分布（许浩恩等，2009；台风路径实时发布系统）

Figure 2-3 Inter-year distribution of typhoons affecting and launching Zhejiang (Xu et al., 2009; Typhoon Path Real-time Publishing System)

第3章 数据获取与处理

3.1 风暴“马勒卡”和“暹芭”概况

2016 年虽没有台风登陆浙江,但显著影响研究区的风暴有两个且时间接近,即风暴“马勒卡”和风暴“暹芭”(台风路径实时发布系统:<http://typhoon.zjwater.gov.cn>),因此,本文仅这两个风暴开展海滩对风暴响应的研究。

2016 年第 16 号风暴“马勒卡”9 月 13 日 2 时在西北太平洋海域生成(路径见图 3-1),中心位于北纬 13.6°,东经 139.5°,中心最大风力为 18 m/s,移动方向为西北西。以每小时 15~20 公里的速度向北偏西方向移动,强度维持或略有增强。9 月 14 日 8 时,强度升格为强热带风暴越过冲绳,9 月 15 日 20 时升级为强台风,中心最大风速达 42 m/s,9 月 17 日 22 时开始影响浙江东部海域,且风向由北北西转为北偏东向。9 月 18 日 12 时,朱家尖进入“马勒卡”七级风圈区,当日 21 时,脱离七级风圈区。“马勒卡”继续向东北方向移动,于 9 月 19 日 23 时前后在日本鹿儿岛登陆,由强台风转为台风,而后逐渐减弱至 20 日后消亡。

2016 年第 18 号风暴“暹芭”9 月 28 日 2 时在西北太平洋海域生成(路径见图 3-1),中心位于北纬 14.6°,东经 150°,中心最大风力为 18 m/s,移动方向为向西。而后以每小时 15~25 公里的速度向北偏西方向移动,强度不断增强,到 10 月 1 日 5 时升级为强热带风暴,在移动过程中强度不断增强,至 10 月 2 日 8 时升级为超强台风,中心最大风速达 52 m/s。10 月 4 日 0 时,17 级超强台风“暹芭”越过冲绳,并继续向北移动,至 9 时左右开始以 60 m/s 的风速影响浙江东部海域。10 月 4 日 17 时左右“暹芭”与舟山群岛附近擦肩而过,10 月 4 日 20 时由超强台风降格为强台风并远离浙江东部海域向东北方向移动。10 月 5 日 5 时中央气象台将其降格为台风,至 11 时降格为强热带风暴,而后逐渐消亡(台风路径实时发布系:<http://typhoon.zjwater.gov.cn>)。

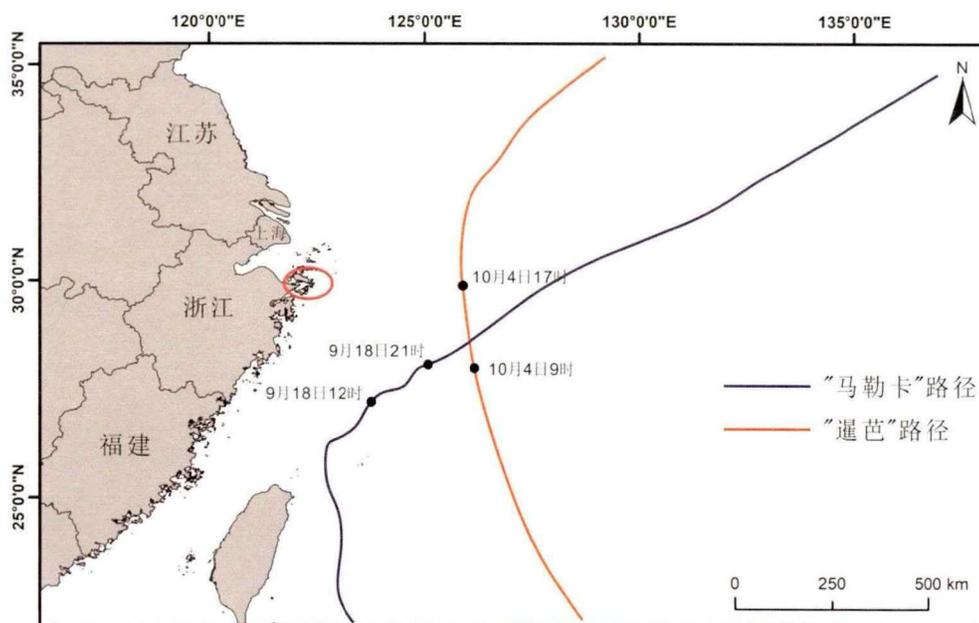


图 3-1 风暴“马勒卡”、“暹芭”路径图

Figure 3-1 The route of storm “Malakas” and “Chaba”

3.2 Argus 视频图像获取

自 2015 年 5 月大陆首套 Argus 视频监测系统（图 3-2）在舟山市朱家尖岛东沙海滩安装成功后，已经获得了长期、实时且连续的监测图像数据，包括瞬时图像（snap-shot image）、时均图像（time-exposure image）、方差图像（variance image），图像分辨率为 2448×2048。本研究主要利用瞬时图像和时均图像分析海滩的变化。我们从图像数据集中选取 2016 年 9 月 16 日-9 月 21 日（风暴“马勒卡”前后）以及 2016 年 10 月 4 日-10 月 5 日（风暴“暹芭”前后）的图像以进行后续的分析处理。



图 3-2 Argus 观测站示意图

Figure 3-2 Argus station

3.3 坐标转换及图像校正

Argus 所采集的图像是二维的平面图像，而实际的海滩是三维的、立体的，因此需要对二维平面图像进行一系列的转换以便分析。然而，为了二维的平面图像与实际的海滩相互对应，需要建立起两者之间的位置对应关系，即进行坐标转换(张锁平和张春田，2006)。对间接视频数据精确的地理参考以及相机交叉覆盖部分像素分辨率的变化有很好的理解才能更好地进行图像特征的量化，这可以通过图像坐标 (u, v) 和真实坐标 (x, y, z) 之间的对应关系来描述(图 3-3)，Argus 系统中已经建立了成熟的对应关系(Holland et al., 1997)。图像和真实世界坐标之间的关系是通过摄像机位置 (x_c, y_c, z_c) 、有效焦距 f (与摄像机水平视野 δ 直接相关, Lippmann and Holman, 1989; Aarninkhof, 2003) 和三个摄像机角度(倾角 τ 、方位角 φ 和滚动角 σ) 定义的方向这三个参数来建立的。角度 τ 、 φ 和 σ 分别是垂向上相对于 z 轴的旋转、水平方向上相对于 xy 平面的旋转以及焦平面相对于地平线的旋转。标准摄影测量方法可通过以下共线方程实现 (x, y, z) 到 (u, v) 的转换:

$$u = \frac{L_1x + L_2y + L_3z + L_4}{L_9x + L_{10}y + L_{11}z + 1} \quad (\text{式 3-1})$$

$$v = \frac{L_5x + L_6y + L_7z + L_8}{L_9x + L_{10}y + L_{11}z + 1} \quad (\text{式 3-2})$$

其中 $L_1 \sim L_{11}$ 是七个未知数 ($\tau, \varphi, \sigma; x_c, y_c, z_c; f$) 的线性函数的系数。这七个未知数可以借助通过已知的图像和现实世界坐标获取的一系列参考点 (也称为地面控制点 (Ground Control Points), 或 GCP) 来确定。为了获得坐标转换所需要的地面控制点, 2015 年 5 月安装前用 RTK GPS 测量了海滩周围明显轮廓的控制点以及滩面上的控制点 (如图 3-4a)。通过图像校正与坐标转换, 将处理后的 6 个摄像头的图像进行图像以一定的角度融合, 获得海滩的全景图与平面图 (图 3-4b、图 3-4c)。

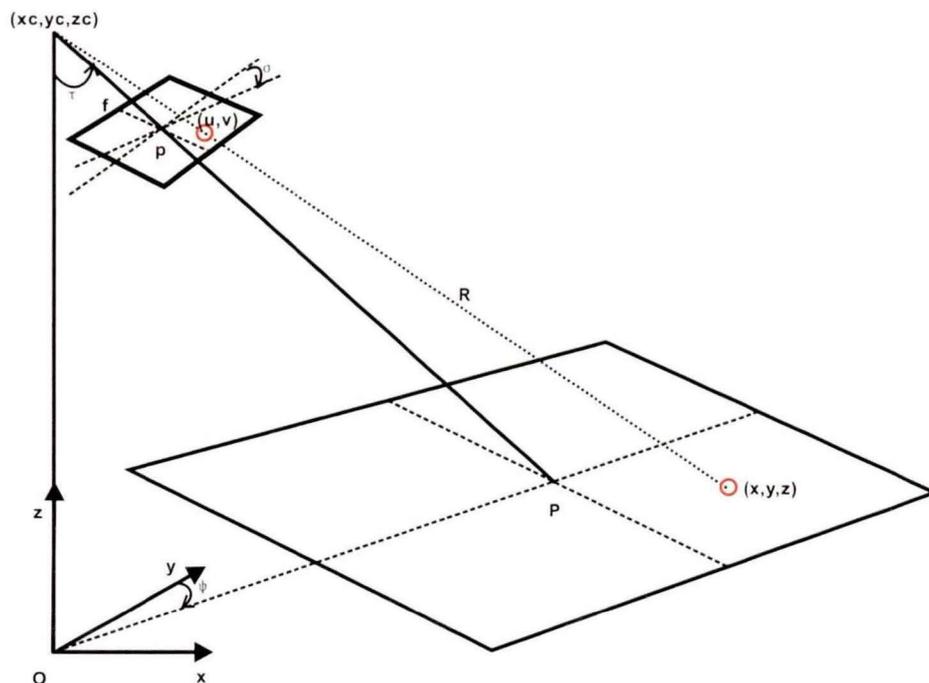


图 3-3 坐标转换原理示意图 (Aarninkhof,2003)

Fig 3-3 Schematic diagram of coordinate conversion principle (Aarninkhof, 2003)

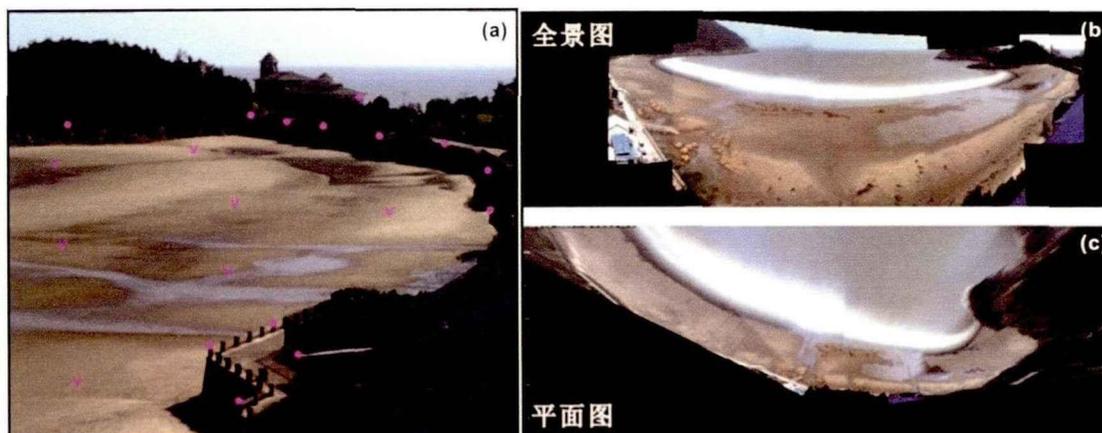


图 3-4 (a) C1 摄像头安装控制点测量示意图 (原点为海滩周围的明显轮廓控制点, V 为滩面上的控制点); (b) 和 (c) 东沙海滩 2016 年 9 月 16 日的全景图与平面图

Figure 3-4 (a) Schematic diagram of camera C1 control point measurement before installation (The circle dot is the outline control point around the beach, and V is the control point on the beach), (b) Panorama view of Dongsha beach on September 16, 2016 (c) plan view of Dongsha beach on September 16, 2016

3.4 边线识别及高程获取

3.4.1 IBM 工作原理

在利用 Argus 系统量化海滩的地形时首先要提取海滩各个时刻的水边线, 而水边线是通过 Argus 系统中的 IBM (Inertidal Beach Mapper) 应用模块获取的, 其工作界面如图 3-5 所示。IBM 应用模块主要包含两个模型: 水边线识别模型和水边线高程模型 (图 3-6)。IBM 水边线识别模型原理是根据图像颜色或亮度的独特强度值来区分干像素和湿像素的聚类。彩色视频图像通常以 RGB 空间编码, 其中每个像素的颜色和亮度被定义为红、绿和蓝 (RGB) 原色的混合。然而 RGB 空间本身就结合了颜色和亮度信息, 这使得 RGB 图像在颜色或亮度信息的基础上识别海岸线的适用性有所降低。因此 IBM 将感兴趣区内的像素强度转换为处理颜色 (色调、饱和度) 和亮度信息的 hsv (“Hue Saturation Value”) 色彩空间 (图 3-7), hsv 色彩空间比 RGB 色彩空间更符合需求 (Russ, 1995)。色调范围介于 0 和 1 之间, 从红色 (色调=0) 经过橙色、黄色、绿色 (色调=0.5)、蓝色、紫色

和再次回到红色（色调=1）。对于黑色和白色，饱和度也介于 0 和 1 之间，对于主颜色（红、绿、蓝）和次颜色（青、品红、黄）采用值 1。色彩值信息包含亮度级别，范围介于 0 和 1 之间，0 代表黑色，1 代表白色。

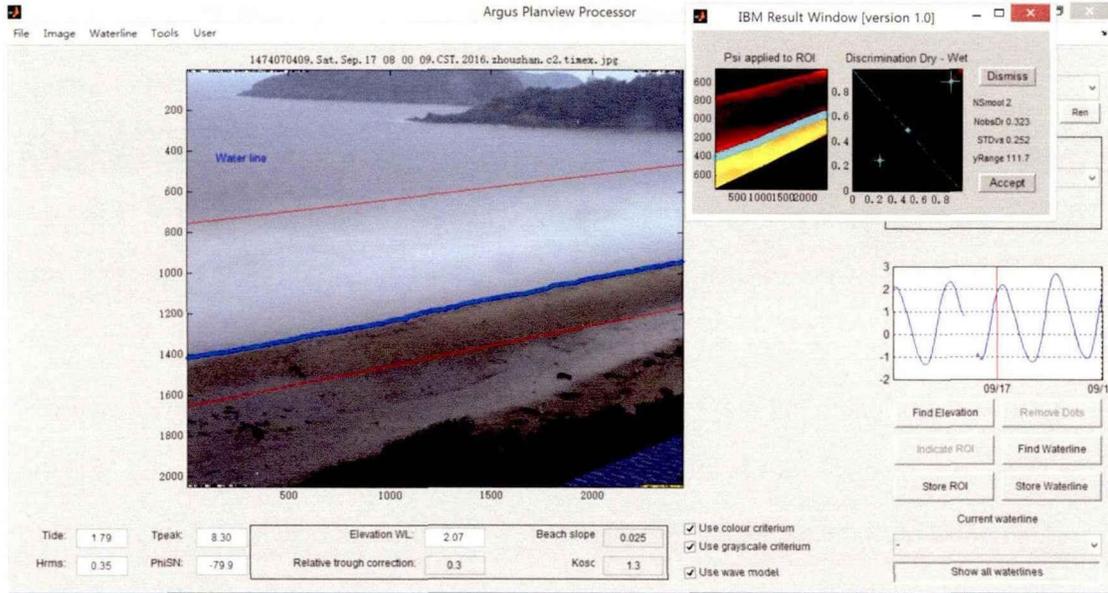


图 3-5 IBM 模块工作界面

Figure 3-5 Working interface of IBM module

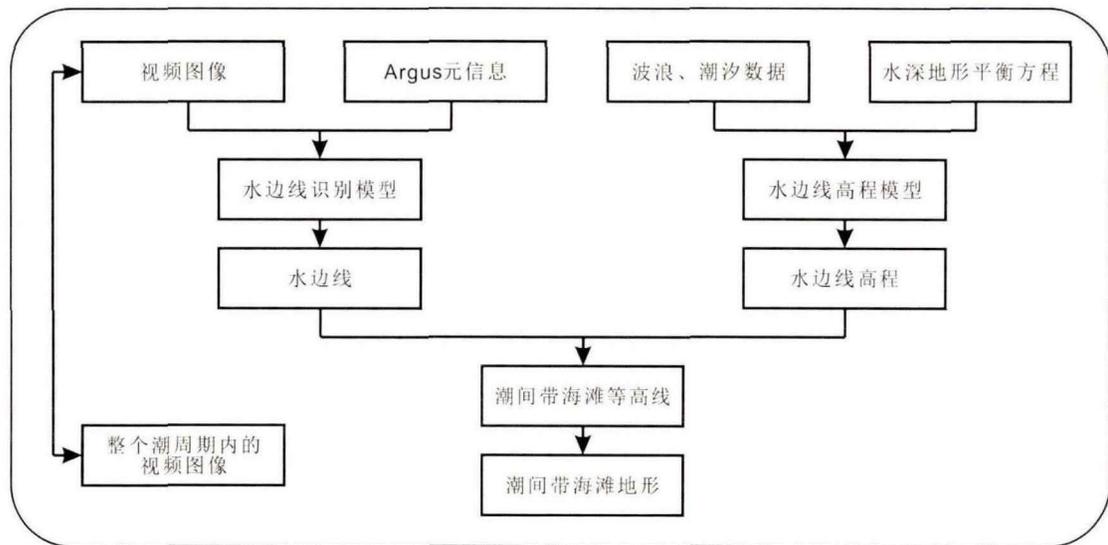


图 3-6 IBM 模块工作原理

Figure 3-6 Working principle of IBM module

IBM 水边线识别首先要在兴趣区 (Region Of Interest, ROI) 内进行像素强度值采样, 然后在色相饱和空间中对这些强度进行分类, 进而对原始像素强度进行滤波以去除异常值, 并在 0 和 1 之间进行缩放以改善干燥和湿润像素群之间的对比度, 更详细的识别见参考文献 (Aarninkhof, 2003), 在此不再赘述。

由于 Argus 系统中的 IBM 模型旨在从时均图像中识别水边线的位置, 因此 IBM 高程模型必须考虑在平均时间内影响水边线瞬时位置的所有物理过程 (Janssen, 1997), 即潮位, 风生或浪生增水, 破波引起的波增水和漩涡振荡等。水边线高程 (即水位) Z_0 (式 3-3) 受参考水位 $Z=Z_{ref}$ 以上的潮汐变化 ΔZ_{tide} 、风暴潮引起增加的水位 ΔZ_{storm} 以及局部风增水 ΔZ_{wind} 的共同影响, 公式如下:

$$Z_0 = Z_{ref} + \Delta Z_{tide} + \Delta Z_{storm} + \Delta Z_{wind} \quad (\text{式 3-3})$$

ΔZ_{storm} 即由气压梯度力和风场产生的平均水位的大幅上涨, 而 ΔZ_{wind} 则是水边线和测量杆之间的作用在水体上的风切应力引起的额外局部水位上升。水边线的高程最好采用在野外测站或感兴趣区 10 km 内的测量水位数据以估算 ΔZ_{tide} 和 ΔZ_{storm} 的贡献量。如果没有本地测量的水位数据, ΔZ_{tide} 和 ΔZ_{storm} 也可以通过潮汐和风暴潮模型计算出来 (Aarninkhof, 2003)。

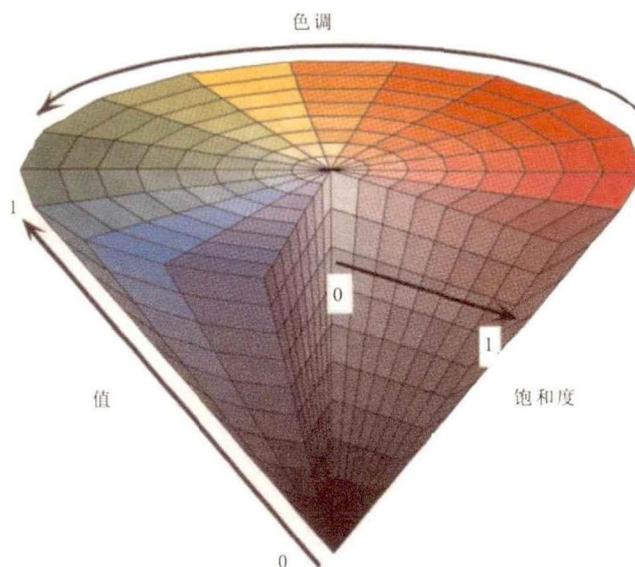


图 3-7 hsv 色彩空间 (Aarninkhof, 2003)

Figure 3-7 hsv color space (Aarninkhof, 2003)

3.4.2 波浪潮位观测

为了获得 IBM 模型计算所需要的海滩前沿浪数据，我们在近岸布设了两个浮标进行波浪的观测，如图 2-1 所示，其中 1#浮标地理位置为 (122.5° E, 29.8° N)，2#浮标地理位置为 (122.46° E, 29.86° N)。前者进行长期的逐时观测，后者进行为期一个月（2016 年 7 月 6 日~2016 年 8 月 7 日）的逐时观测。波浪观测仪器采用挪威的声学多普勒剖面流速仪（AWAC，图 3-8a），每小时观测采样满足各态历经性和平稳性，最大采样频率：2 Hz，单元大小：0.4~2 m，波向误差： $\pm 2^{\circ}$ ，波高误差： $\pm 0.15\%$ ，波高测量范围：0.0~10.0 m，波向测量范围：0~360 $^{\circ}$ 。观测站位海域有往来船只，且离岸较近，考虑到仪器装置的安全保障和观测质量等因素，不宜采用重力式浮标的观测技术，波浪仪搭载自释放防拖式 AWAC 基座（图 3-8b）。

潮位数据获取自沈家门海洋站(29.93° N, 122.3° E, 距研究区约 12.83 km)。

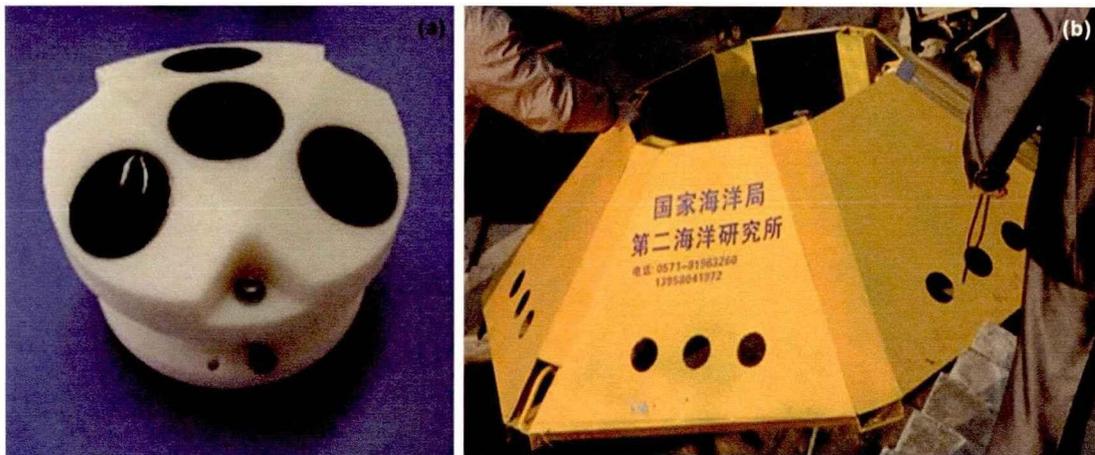


图 3-8 (a) 声学多普勒波浪剖面流速仪，(b) 自释放防拖式 AWAC 基座

Figure 3-8 (a) Acoustic Doppler Wave Profile Velocimeter, (b) Self-releasing anti-drag base of AWAC

3.4.3 风暴期间东沙海滩附近海域的风况、波浪与潮位

风暴“马勒卡”发生期间波向主要为东北、东、东南（图 3-9），最大波周期 12.4 s，平均波周期 8.34 s，最大有效波高 2.4 m（东向浪），发生于 2016 年 9 月 20 日 8 时，平均有效波高 1.6 m；风暴“马勒卡”发生期间平均风速达 5.24 m/s（图 3-10），风速最大值为 11.3 m/s，发生于 2016 年 9 月 18 日 6 时，风暴“马勒卡”期间的主风向为北向，并且在其影响浙江沿海期间风向保持北向；风暴期间海滩附近海域的最大潮位 270 cm（图 3-11），出现时间为 9 月 19 日 23 时，且在 9 月 20 日呈现最大风暴增水值为 67 cm。

风暴“暹芭”发生期间平均风速达 5.51 m/s，风速最大值为 11 m/s，发生于 2016 年 10 月 4 日 14 时，风暴“暹芭”期间的主风向为北向和西北向；“暹芭”发生期间的主要波向为东北向、东南向，最大波周期 13.4 s，平均波周期 9.8 s，最大有效波高 3 m（东向浪），发生于 2016 年 10 月 4 日 19 时，平均有效波高 1.97 m，风暴期间海滩附近海域的最大潮位 221 cm，出现在 10 月 4 日 11 时，“暹芭”发生期间的最大风暴增水值为 51 cm。

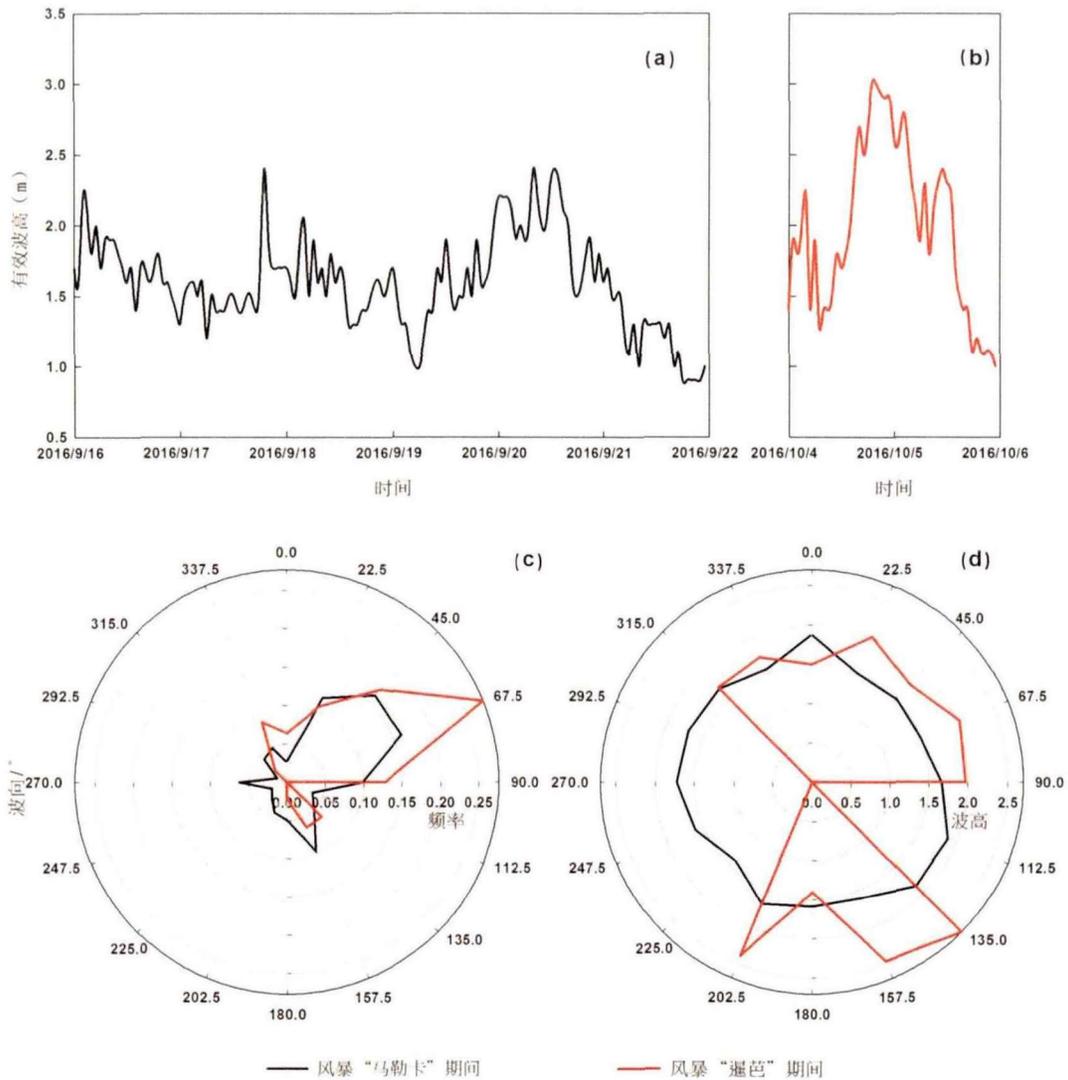


图 3-9 风暴发生期间波浪状况 (a.风暴“马勒卡”发生期间有效波高; b.风暴“暹芭”发生期间有效波高; c. 两次风暴发生期间各波向频率; d. 两次风暴发生期间各波向平均有效波高)

Figure 3-9 Wave conditions during storms (a. Effective wave heights during the storm "Malakas"; b. Effective wave heights during the storm "Chaba"; c. wave direction occurrence frequency during storms; d. The average effective wave heights of various directions during storms)

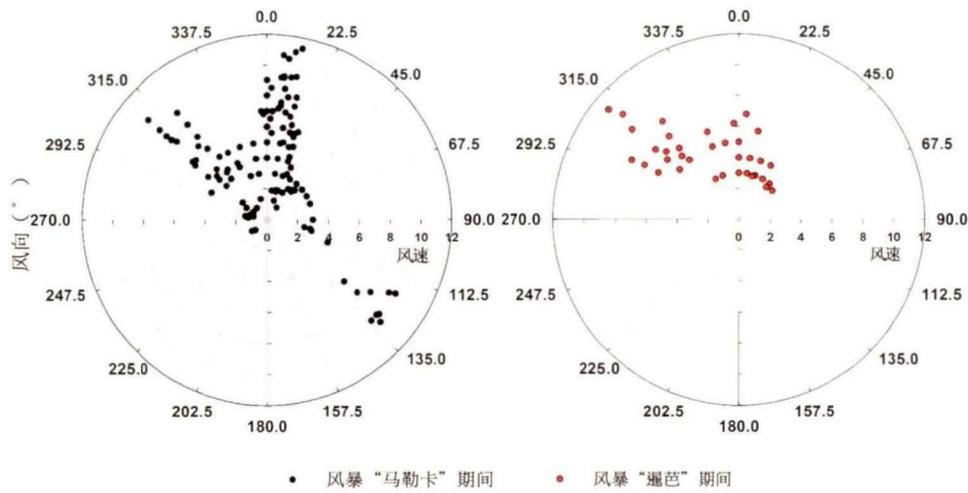


图 3-10 风暴发生期间的风况

Figure 3-13 Wind conditions during storms

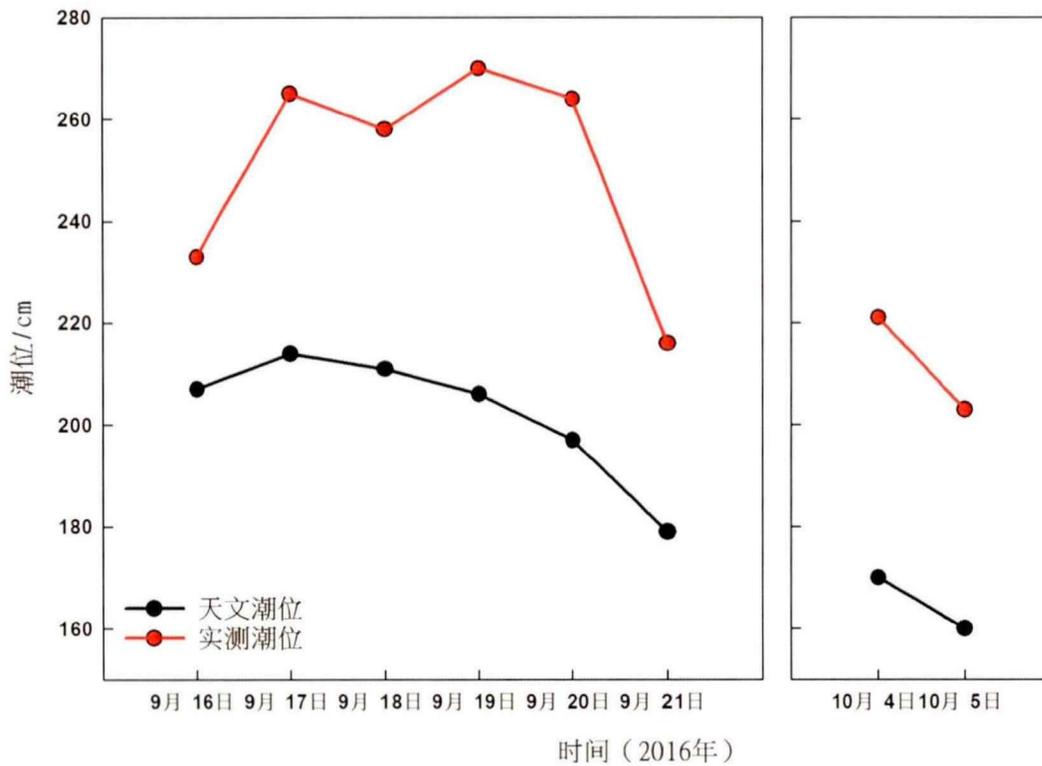


图 3-11 风暴期间潮位状况

Figure 3-14 Tidal level during storms

3.4.4 海滩前沿波浪模拟

Argus 水边线计算模型中需要海滩前沿水位数据作为输入, 而海滩前沿水位是波高和潮位之和。海滩前沿潮位和湾口潮位差别不大, 因此我们直接采用沈家门海洋站获取的潮位数据。由于缺乏海滩前沿的波浪数据, 因此我们利用由深水区波浪数据驱动的数学模型来推算海滩前沿的波浪。为保证模型模拟结果的可靠性, 我们将野外现场观测数据与同时间段模拟结果进行对比验证。然后将模拟得到的海滩前沿波高和周期与潮位数据一同输入到 Argus 水边线模型中。

(1) 模型参数设置

本研究以 1#波浪浮标 (水深大约 20 m) 测得的朱家尖岛外的波浪数据为边界条件, 结合地形水深、岸线、以及风速风向数据, 采用正交网格 (图 3-12), 建立 Delft3D SWAN 波浪模型, 模拟计算东沙海滩的前沿波浪。2#波浪浮标 (水深大约 16 m) 在网格中的位置是 (87,48), 东沙海滩所需波浪数据在网格中的位置是 (36,47)。模型的计算范围在 $29.75^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 和 $122.2^{\circ}\sim 122.9^{\circ}\text{E}$ 之间, 主要包括朱家尖岛东部海域; 模型的网格大小约为: $100\text{ m}\times 100\text{ m}$; 因高程验证需要 2016 年 5 月 4 日的数据, 而两次风暴发生的时间分别为 2016 年 9 月 16 日-9 月 21 日、10 月 4 日-10 月 5 日, 综合考虑后将模拟时间段设置为 2016 年 5 月 4 日 00:00 至 2016 年 10 月 6 日 23:00, 每小时计算一次波浪场; 在模拟过程中考虑了水深变化引起的波浪破碎、底部摩擦造成的能量损耗以及波浪绕射、折射和白帽损失 (Komen et al.,1994) 等物理现象。

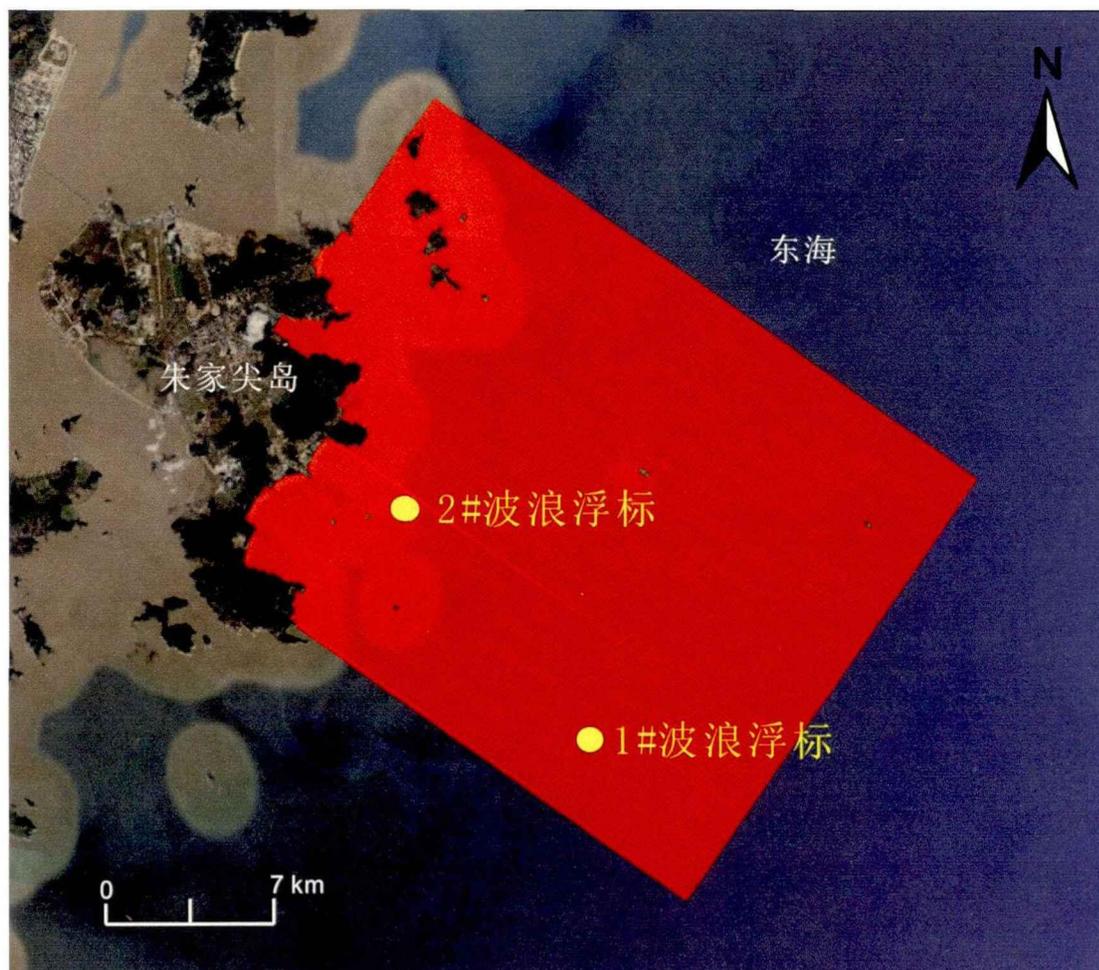


图 3-12 波浪计算网格示意图

Figure 3-12 Wave computing grid

(2) 波浪模拟验证

由于东沙海滩走向为 NNE-SSW，而模型默认波浪是由海向陆传播，因此部分西向浪 ($225^{\circ}\sim 315^{\circ}$) 的模拟波高为零，这虽然符合实际情况，模型结果也是合理正确的，但在同观测据对比时我们把西向和偏西向的模拟结果排除在分析之外。实测数据与模拟结果的对比如图 3-13 所示，模拟的有效波高和波峰周期与实测数据基本一致，相对误差分别为 18.87% 和 11.79% (结果为去除偏西向浪之后的相对误差)。图中红色点为验证观测站 (2#波浪浮标) 于 2016 年 7 月 6 日 15 时至 2016 年 8 月 7 日 9 时观测获得的波浪数据，黑色点为同时间段该测站波浪模型计算结果。

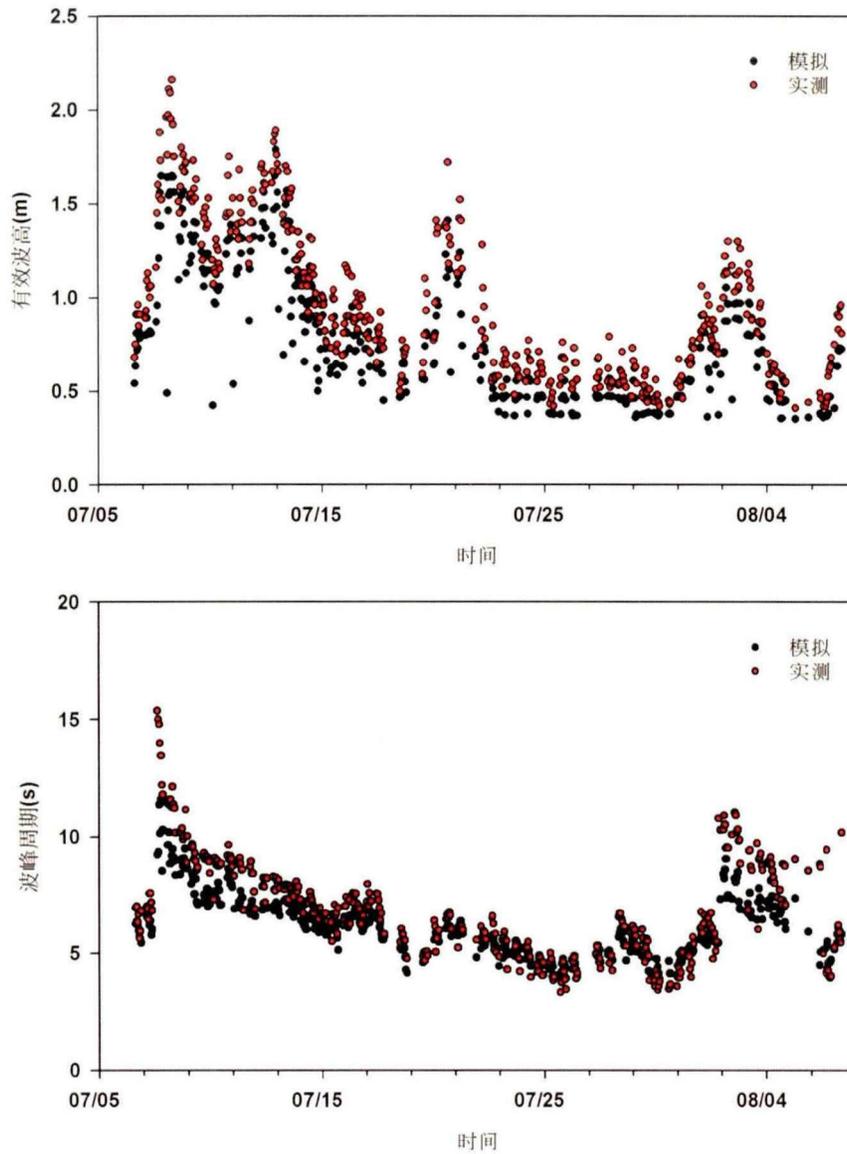


图 3-13 波浪模拟验证图

Figure 3-13 Wave Simulation Verification

(3) 误差分析

(a) 水深地形数据和风场数据有误差

受各种主观和客观因素影响，工作人员在进行水动力测量时存在一定误差。而且并不是每个点的水深数据都是实际测得的。模拟过程中所用的整个计算范围里的水深数据需要由部分实测数据处理得来。该处理过程中使用了插值计算，因此模拟所用的水深跟实际水深有一定的出入。同时，风场数据也是由模型计算得来的，只能最大限度地接近实际情况，这也会引起误差。

(b) 观测数据也有误差

在我们的实际观测中，由于技术人员的操作水平、仪器的精确度和天气状况等原因，最终的观测数据会存在一定的误差。观测数据本身有误差是模拟误差存在的原因之一。

误差固然存在，但总体上讲，模拟值与观测值拟合较好，误差仍在可以接受的范围之内且对后续数据处理的影响不大。

3.5 地形插值与误差分析

利用 Argus 视频图像监测系统中的 iBathy 模块可以获得整个滩面的地形数据，其所采用的插值方法为 Matlab 线性插值，操作界面如图 3-14 所示。

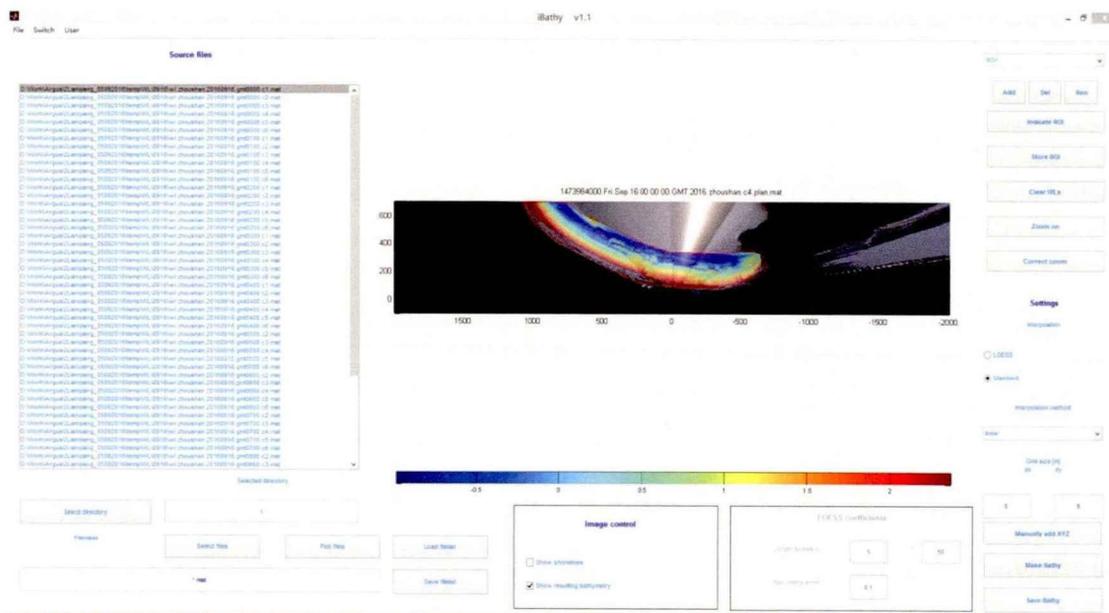


图 3-14 iBathy 模块工作界面

Figure 3-14 Working interface of iBathy module

为了验证通过 iBathy 插值所获数据的误差，我们使用 RTK GPS 于 2016 年 5 月 4 日对东沙海滩又进行了一次现场勘测，共在潮间带内测量 41 个控制点以验证视频测量数据的精度（高程均为国家 1985 黄海高程），C1~C6 摄像头覆盖范围内控制点个数分别为 11、6、7、6、5、6（图 3-15）。

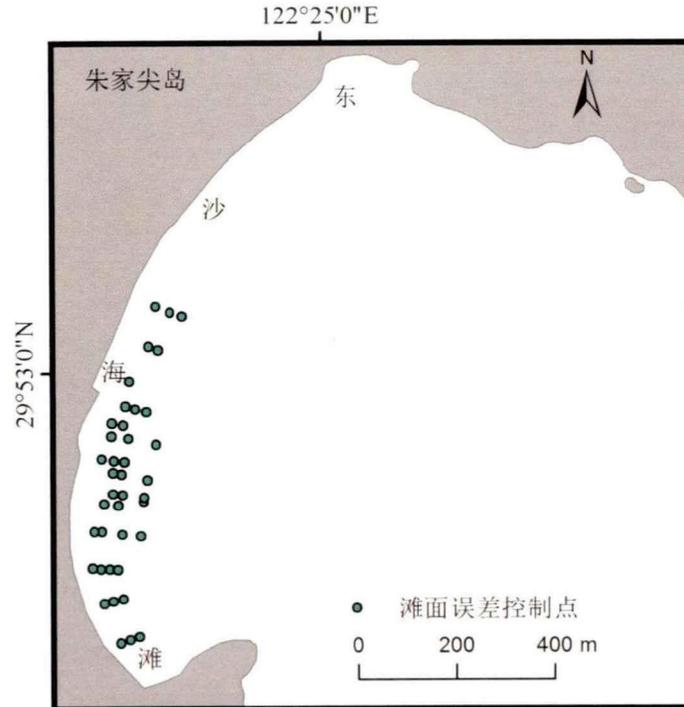


图 3-15 滩面误差控制点站位

Figure 3-15 The error ground control points station of beach

将 RTK GPS 滩面地形勘测点及 Argus 地形插值结果中对应点的高程进行比较,发现垂向相对误差为 15%且误差全部分布在 0.3 m 以下(图 3-16),6 个摄像头(C1~C6)误差平均值为 0.145 m,小于视频监测系统设计时的误差最大值 0.25m,与很多已有研究相比数值相当(Holland et al., 1997; Harley et al., 2007; Holman et al., 2007; Siegle et al., 2007; Ruggiero and List, 2009; Alegria and Masselink, 2010; Archetti and Romagnoli, 2011; Archetti et al., 2015)。我们通过比较两控制点之间的实测距离与 Argus 数据算得的两点距离来测算平面距离误差(图 3-27),得出平面距离误差平均值为 11.73 m(剔除异常值),误差值主要集中在 0~10 m,误差众数在允许范围(0.5~20 m)内(Aarninkhof, 2003)。误差分布呈现出以下规律:离 Argus 观测站距离越近,垂向和平面误差越小;误差控制点之间的间距越大,平面距离误差越大。

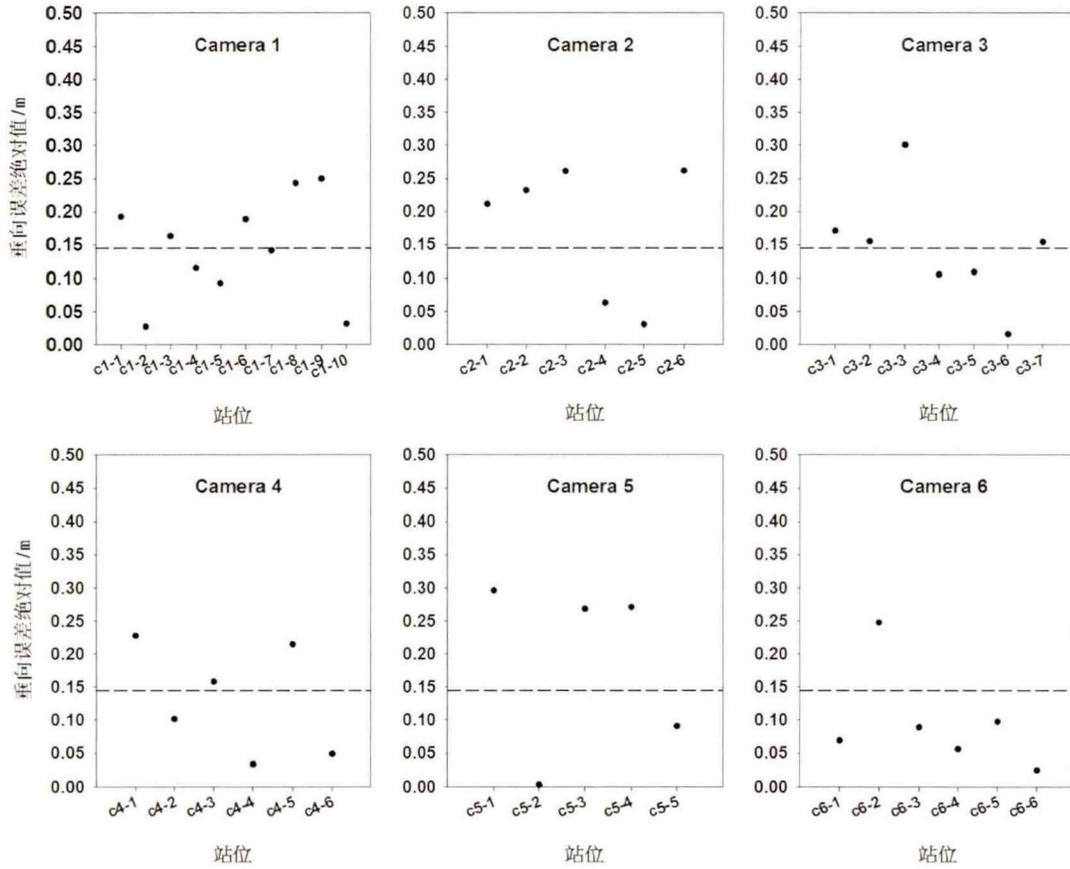


图 3-16 各摄像头垂向误差验证

Figure 3-16 Verification of vertical errors of each camera

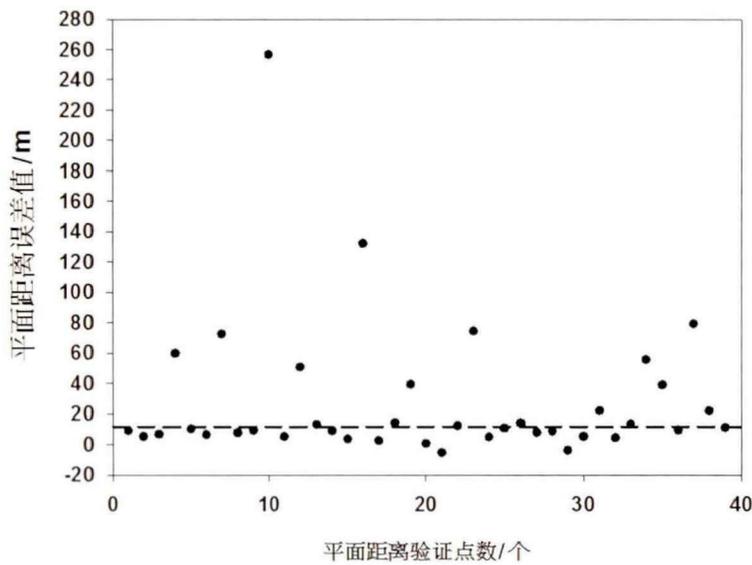


图 3-17 平面距离误差验证

Figure 3-17 Verification of planar distance error

3.6 潮间带冲淤量与滨线位置变化量计算

潮间带海滩体积变化即风暴前后剖面内的横向剖面沙体积 (Hamm et al., 2003), 其边界由海塘脚在海岸边的位置和平均大潮最高最低水边线位置构成(图 3-18), 以潮间带海滩体积的变化量代表剖面的冲淤情况。

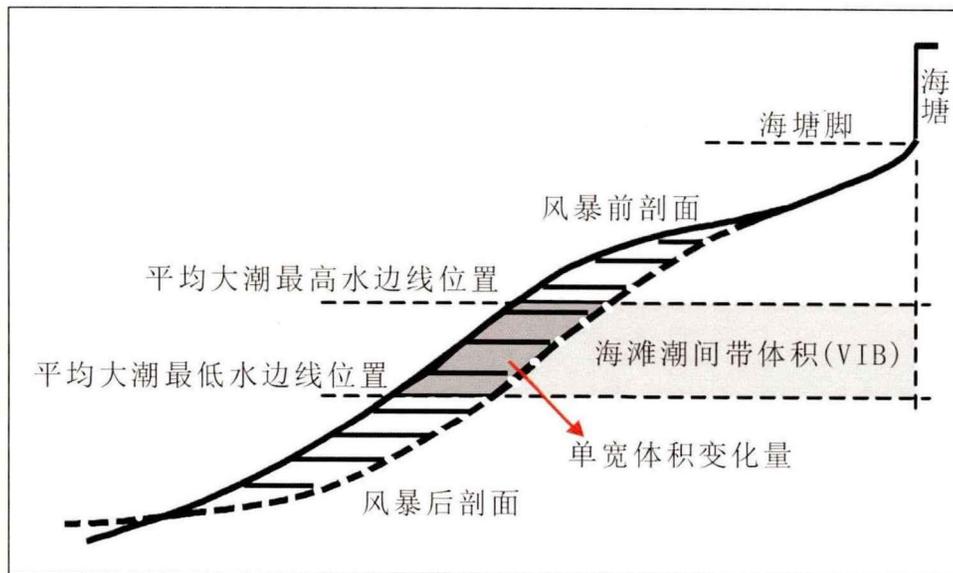


图 3-18 冲淤量计算原理

Figure 3-18 Calculation of scour volume

除了采用冲淤量表示风暴前后海滩的变化外, 另引入海滩滨线位置 (X_{mcl}), 如图 3-19, X_{mcl} 由位于平均低水位以上 H 高度处的海塘脚和平均低水位以下的等深度 H 处的深度等值线之间的跨岸剖面中砂质沉积物的体积所确定 (Hamm et al., 2003)。通过长期的视频图像监测与计算, 我们可以预测瞬时滨位置, 同时将其与基础滨线位置相比较。

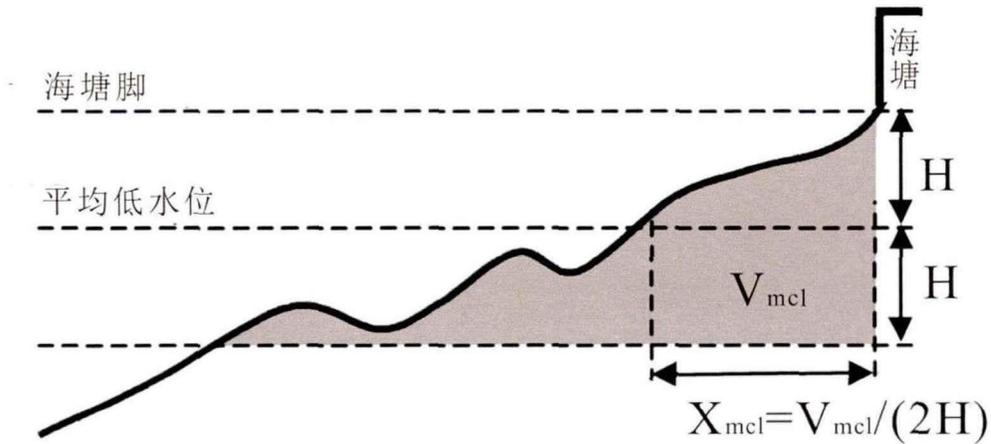


图 3-19 海滩滨线位置示意图

Figure 3-19 Intertidal shoreline

为了便于分析，根据海滩平面形态，我们将东沙海滩划分为上岬角遮蔽段、直线段和下岬角遮蔽段。所获得的图像数据坐标系均以 Argus 观测站位置为原点，沿岸方向（y 轴）向北和离岸方向（x 轴）向东为正。以 Argus 六个摄像头融合图像为基础，在滩面上每隔 100 m 设置一条剖面（图 3-20），从北向南依次设置 15 条（由 $y=900$ 到 $y=-500$ ）。

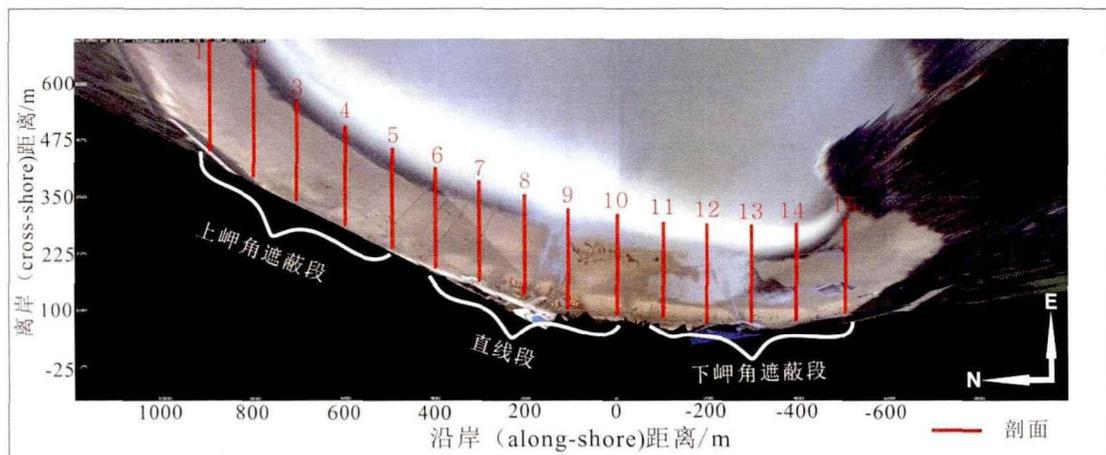


图 3-20 剖面设置图

Figure 3-20 Section Settings

3.7 表层沉积物采集与粒度分析原理

为了分析东沙海滩风暴前后表层沉积物变化特征，我们分别于 2016 年 9 月 10 日、2016 年 10 月 10 日进行了两次沉积物采集。在海滩的北部、中部、南部共设置了 9 条采样断面（图 2-1），使用 RTK GPS 追踪测线使两次采样位置保持一致，每条断面分别设高滩、中滩、低滩三处采样点。采样时去除海滩表面杂质覆盖，取厚度 3~5 cm 的表层沉积物装入样品袋，而后运至实验室进行测量。

在室内处理中，首先取适量砂质样品进行纯水浸泡、清洗去除盐分，之后放烘箱中干燥 24 h，再置于烧杯中冷却至室温，采用 SFY-D 音波震动式全自动筛分粒度仪进行粒度分析。

粒径即沉积物颗粒的大小，通常以 Φ 值表示粒径：

$$\Phi = -\log_2 D / (\log_2 2) \quad (\text{式 3-4})$$

其中 D 为沉积物的颗粒直径，单位为 mm。根据福克-沃德公式（Folk and Ward, 1957）计算海滩沉积物的平均粒径（ M_z ）、分选系数（ δ ）、偏态（ S_k ）和峰态（ K_g ），计算公式为：

$$M_z = \frac{(\Phi_{16} + \Phi_{50} + \Phi_{84})}{3} \quad (\text{式 3-5})$$

$$\delta = \frac{\Phi_{84} - \Phi_{16}}{4} + \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{6.6} \quad (\text{式 3-6})$$

$$S_k = \frac{\Phi_{84} + \Phi_{16} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{84} - \Phi_{16})} + \frac{\Phi_{95} + \Phi_5 - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{95} - \Phi_5)} \quad (\text{式 3-7})$$

$$K_g = \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{2.44(\Phi_{75} - \Phi_{25})} \quad (\text{式 3-8})$$

采用 Φ 值作为粒径单位，应用 $\Phi/4$ 间隔进行计算。各粒度参数的分级描述见表。

表 3-1 粒度各参数及其分级描述 (Folk and ward, 1957)

Table 3-1 Particle size parameters and their hierarchical descriptions (Folk and ward, 1957)

分选系数	分选性	偏态值	定性描述	峰态值	定性描述
<0.35	分选很好	-1.00~-0.30	极负偏	<0.67	很宽平
0.35~0.50	分选好	-0.30~-0.10	负偏	0.67~0.90	宽平
0.50~1.00	分选中等	-0.10~0.10	近对称	0.90~1.11	中等
1.00~2.00	分选较差	0.10~0.30	正偏	1.11~1.50	窄尖
2.00~4.00	分选差	0.30~1.00	极正偏	1.50~3.00	很窄尖
>4.00	分选极差	-	-	>3.00	极窄尖

第4章 海滩对连续风暴的响应特征

4.1 海滩剖面对连续风暴的响应

海滩剖面是波浪、潮汐、泥沙等因素相互作用的结果，它的物质组成、坡度以及地貌形态结构的时空变化在一定程度上反映了海滩响应系统的主要过程(陈子燊, 2000), 通过分析海滩剖面的变化可以较好地掌握海滩对风暴的响应状况。为此, 本文首先通过 Argus 视频监测系统的 iBathy 应用模块获得海滩的地形插值数据(图 4-1~图 4-8), 然后以此为基础进行剖面单宽淤积量、坡度、海滩滨线位置变化量、海滩出露水面宽度等的计算, 进而分析东沙海滩在风暴发生期间的地形变化特征。

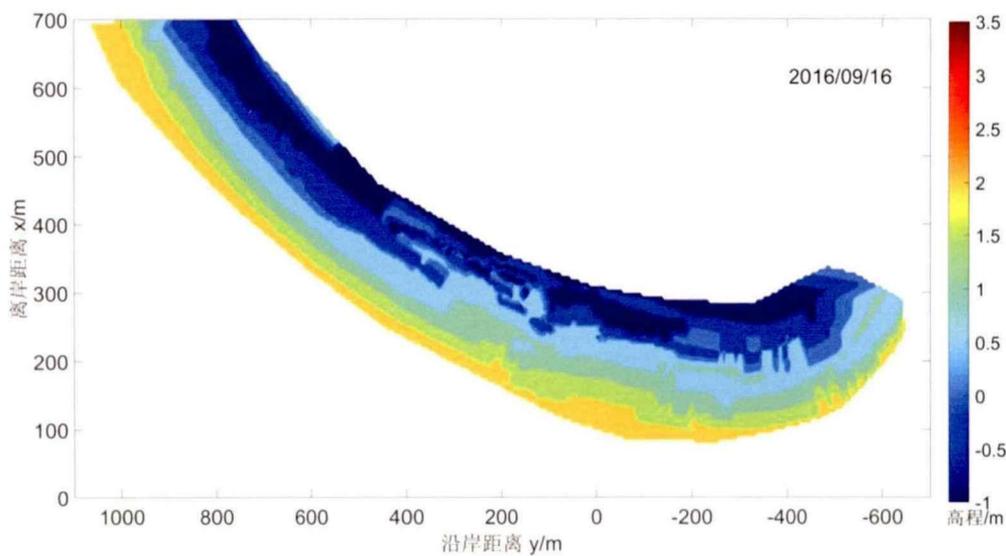


图 4-1 2016 年 9 月 16 日滩面地形图

Figure 4-1 Topography of Dongsha beach on September 16, 2016

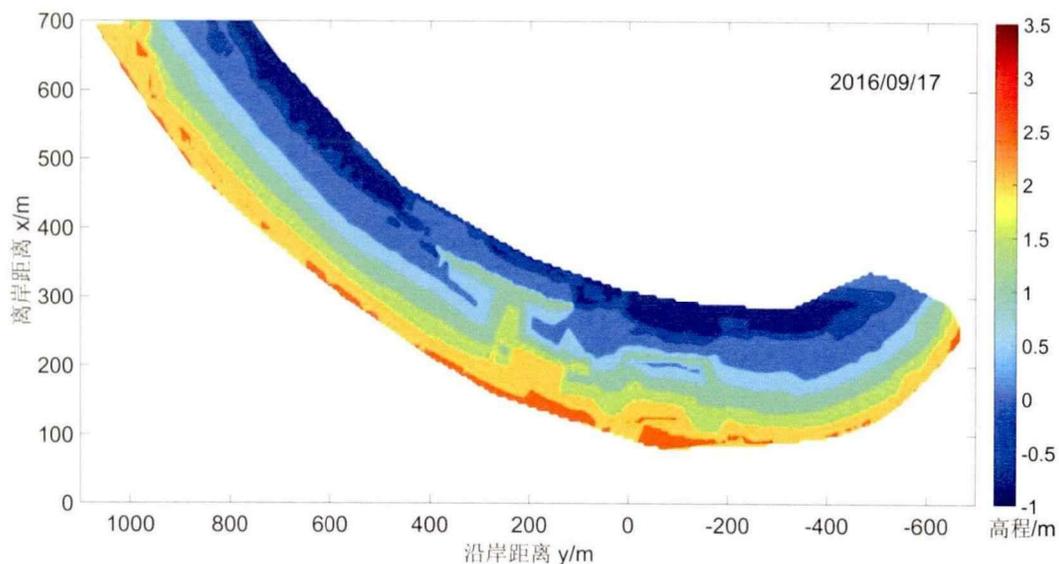


图 4-2 2016 年 9 月 17 日滩面地形图

Figure 4-2 Topography of Dongsha beach on September 17, 2016

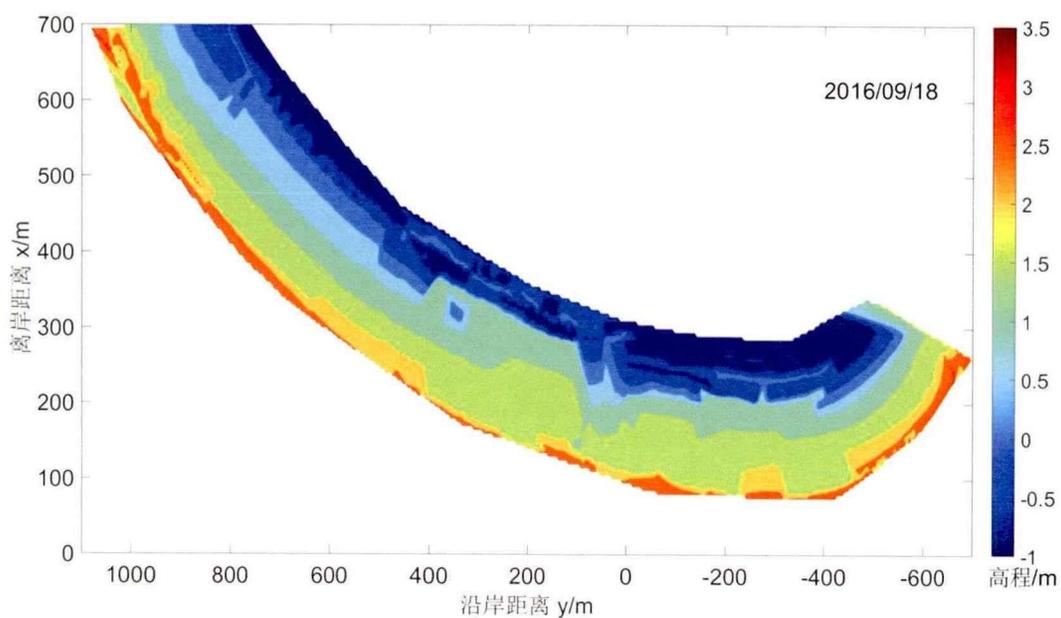


图 4-3 2016 年 9 月 18 日滩面地形图

Figure 4-3 Topography of Dongsha beach on September 18, 2016

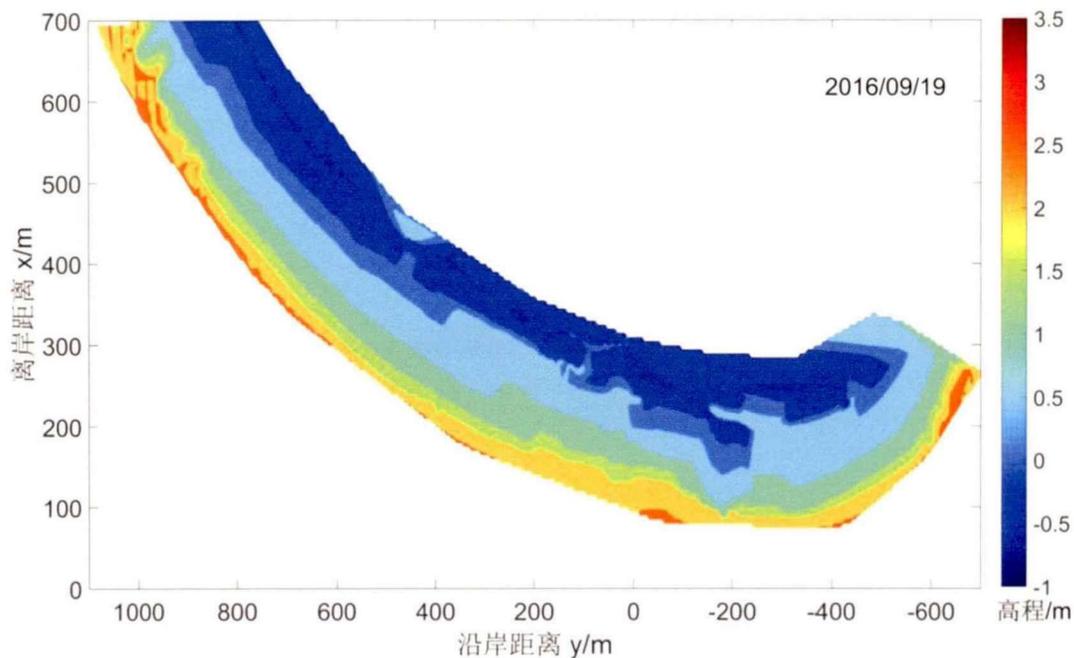


图 4-4 2016 年 9 月 19 日滩面地形

Figure 4-4 Topography of Dongsha beach on September 19, 2016

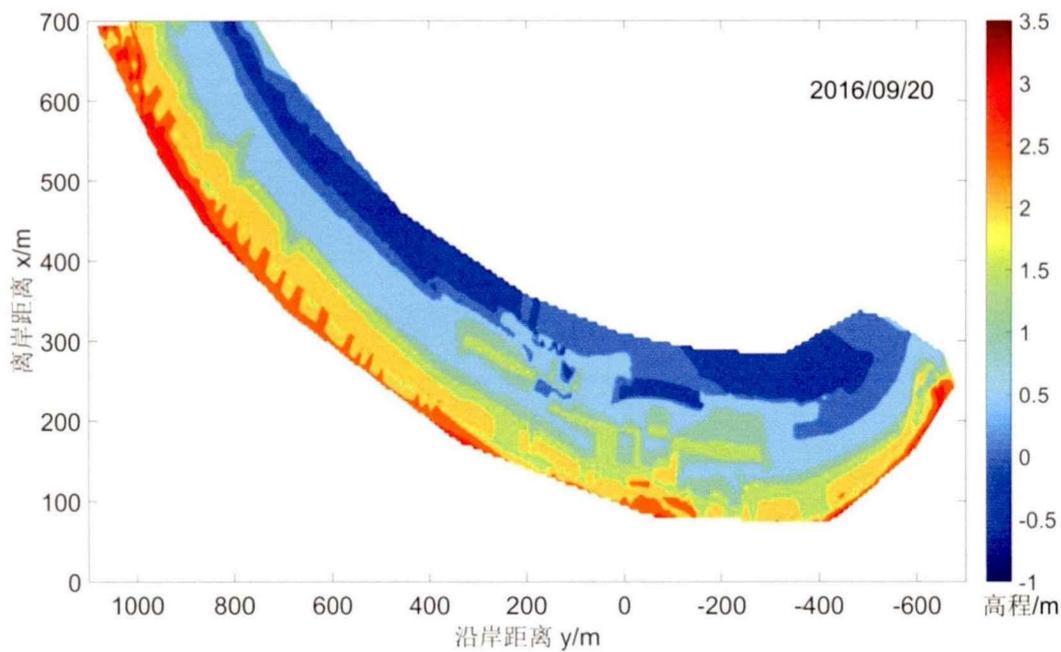


图 4-5 2016 年 9 月 20 日滩面地形图

Figure 4-5 Topography of Dongsha beach on September 20, 2016

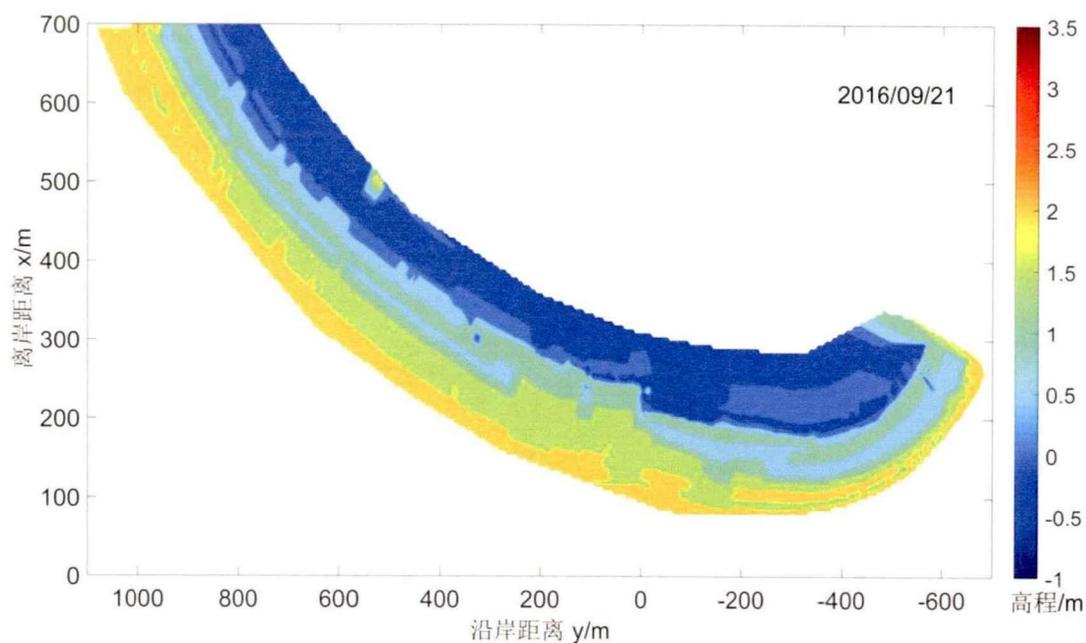


图 4-6 2016 年 9 月 21 日滩面地形图

Figure 4-6 Topography of Dongsha beach on September 21, 2016

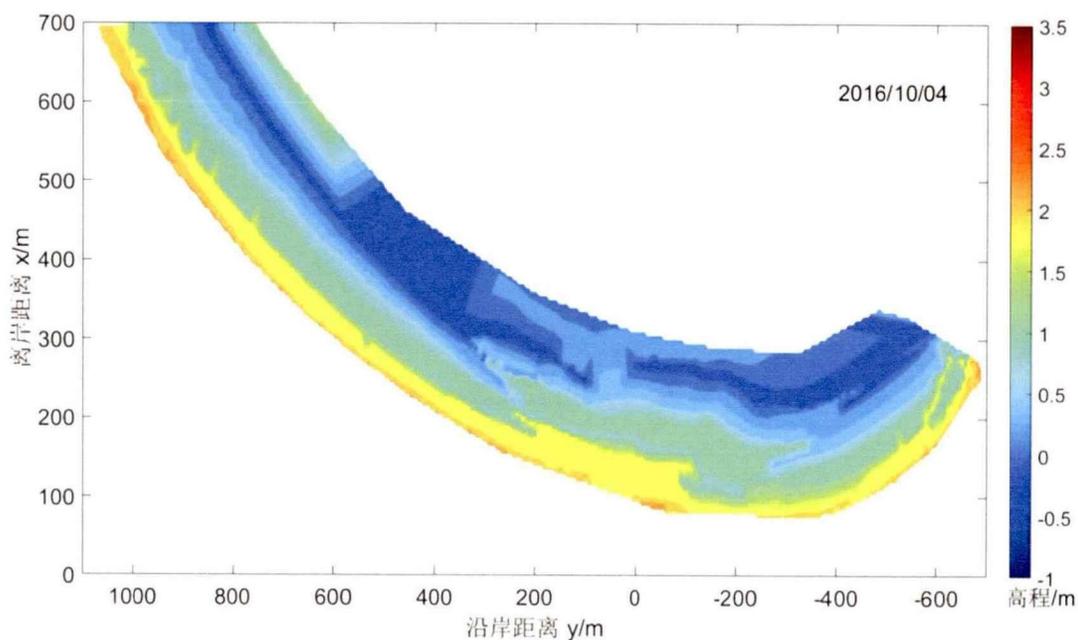


图 4-7 2016 年 10 月 4 日滩面地形图

Figure 4-7 Topography of Dongsha beach on October 4, 2016

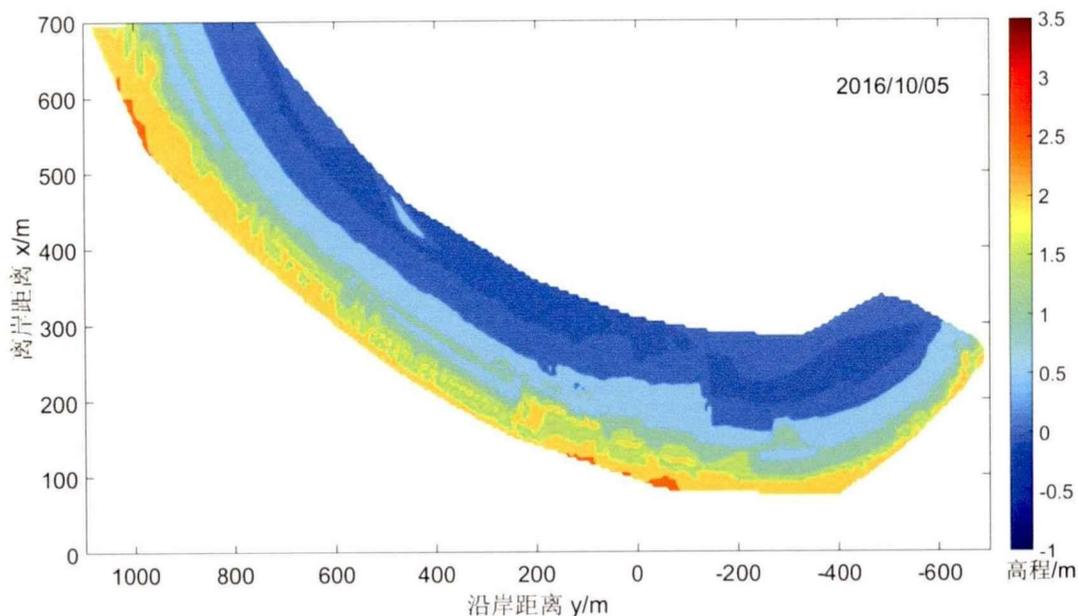


图 4-8 2016 年 10 月 5 日滩面地形图

Figure 4-8 Topography of Dongsha beach on October 5, 2016

4.1.1 风暴期间海滩剖面的冲淤及形态变化

由图 4-9 (a) 可知, 风暴“马勒卡”严重影响东沙海滩前(2016 年 9 月 17 日) 仅有 4 个剖面出现侵蚀, 其他剖面有略微的淤积或保持不变, 海滩上 15 个剖面的单宽体积变化量平均值为 $9.26 \text{ m}^3/\text{m}$, 这时的海滩较为稳定, 上下岬角遮蔽段略微淤积, 直线段冲淤平衡。2016 年 9 月 18 日研究区进入了风暴“马勒卡”的七级风圈区, 如图 4-9 (b) 所示, 海滩各剖面开始出现侵蚀, 15 个剖面单宽体积变化量平均值为 $-22.03 \text{ m}^3/\text{m}$, 以上岬角遮蔽段和直线段的侵蚀为主, 下岬角遮蔽段侵蚀程度较弱。2016 年 9 月 19 日, 风暴“马勒卡”过后, 海滩遭受了全面的严重侵蚀, 单宽体积变化量的平均值为 $-73.75 \text{ m}^3/\text{m}$, 平面上的侵蚀程度由北至南逐渐递减, 有沿岸的纵向输沙现象(图 4-9 (c))。之后风暴逐渐消亡, 海滩虽仍有少量的侵蚀, 但有开始恢复的迹象, 如图 4-9 (d)、(e) 所示。在第二次风暴“暹芭”过后, 海滩再一次遭受了较严重的侵蚀, 其中直线段的侵蚀最为严重, 海滩 15 个剖面平均单宽侵蚀 $54.56 \text{ m}^3/\text{m}$ (图 4-9 (f)、(g))。

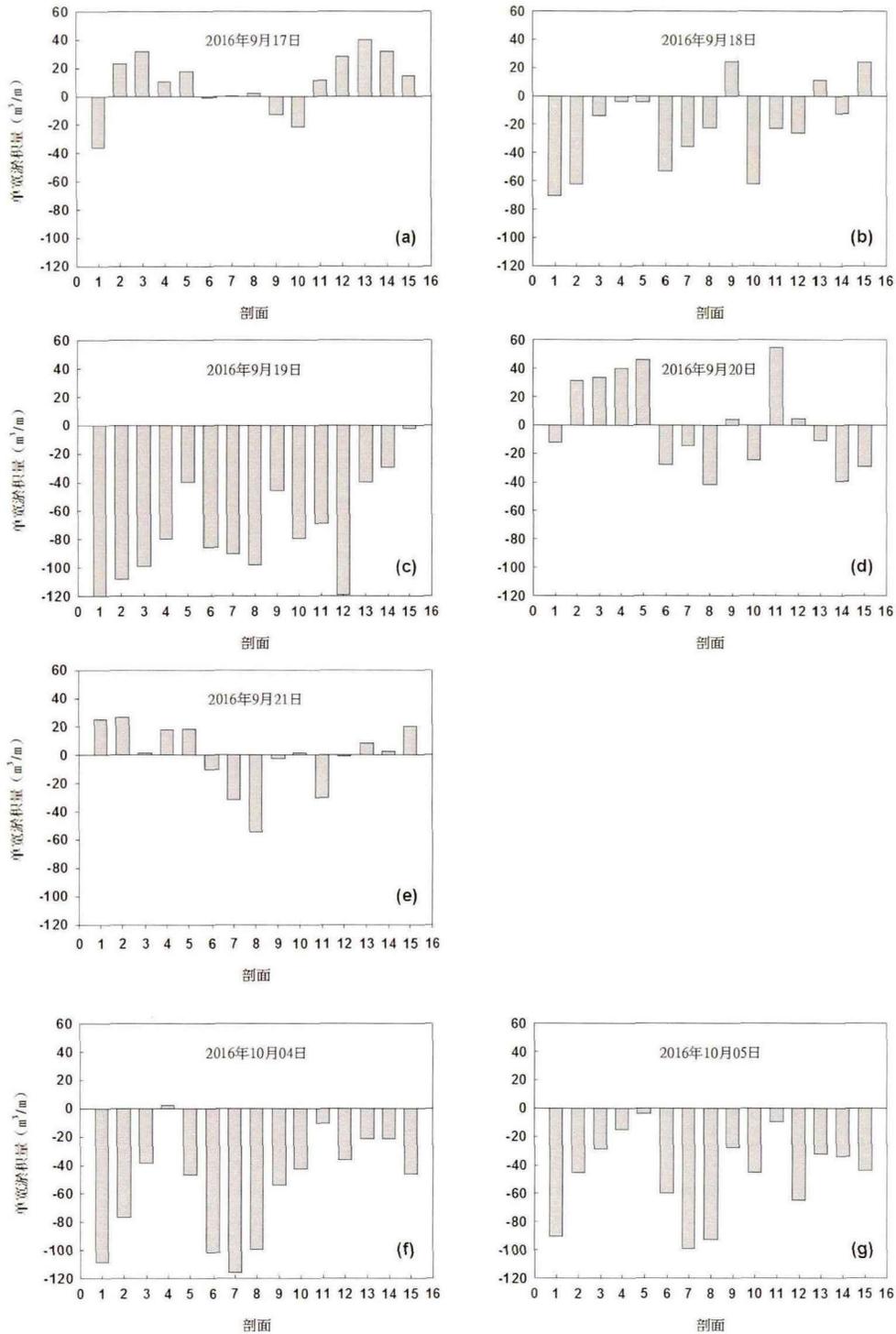


图 4-9 风暴发生期间各剖面单宽体积变化量

Figure 4-9 Single-width volume change of various sections during storms

海滩不同岸段剖面的冲淤及形态变化不尽相同，下面我们分别对东沙海滩上岬角遮蔽段、直线段和下岬角遮蔽段的变化情况进行分析：

(1) 上岬角遮蔽段

风暴“马勒卡”过境后海滩上岬角遮蔽段（剖面 1~5）各剖面单宽体积变化量由北至南依次为-120.5 m³/m、-108.3 m³/m、-98.9 m³/m、-79.9 m³/m、-39.7 m³/m（表 4-1），由此可见，自北至南侵蚀强度逐渐减弱，与通常状况（受岬角保护的位置侵蚀程度较弱（Aagaard et al., 2005; Puig et al., 2016））下的冲淤分布不一致。从每个剖面的冲淤分布来看（图 4-10），除剖面 1 以外，上岬角遮蔽段剖面变化主要表现为多年平均海平面以上强烈侵蚀、以下略微淤积。同时，各剖面的侵蚀均较为严重，其中，剖面 1 侵蚀最为显著并且冲淤分界线比其他剖面略高。

表 4-1 风暴后各剖面单宽体积变化量

Table 4-1 Single-width volumetric change of each section after storms

剖面	单宽体积变化量 (m ³ /m)	
	第一次风暴后	第二次风暴后
1	-120.5	-108.5
2	-108.3	-76.7
3	-98.9	-38.3
4	-79.9	2.1
5	-39.7	-46.6
6	-85.7	-101.9
7	-90.4	-116.1
8	-98.3	-99.7
9	-45.58	-53.77
10	-79.25	-42.3
11	-69.04	-10.74
12	-118.84	-36.25
13	-39.81	-21.7
14	-29.58	-21.6
15	-2.43	-46.3
平均值	-73.75	-54.56

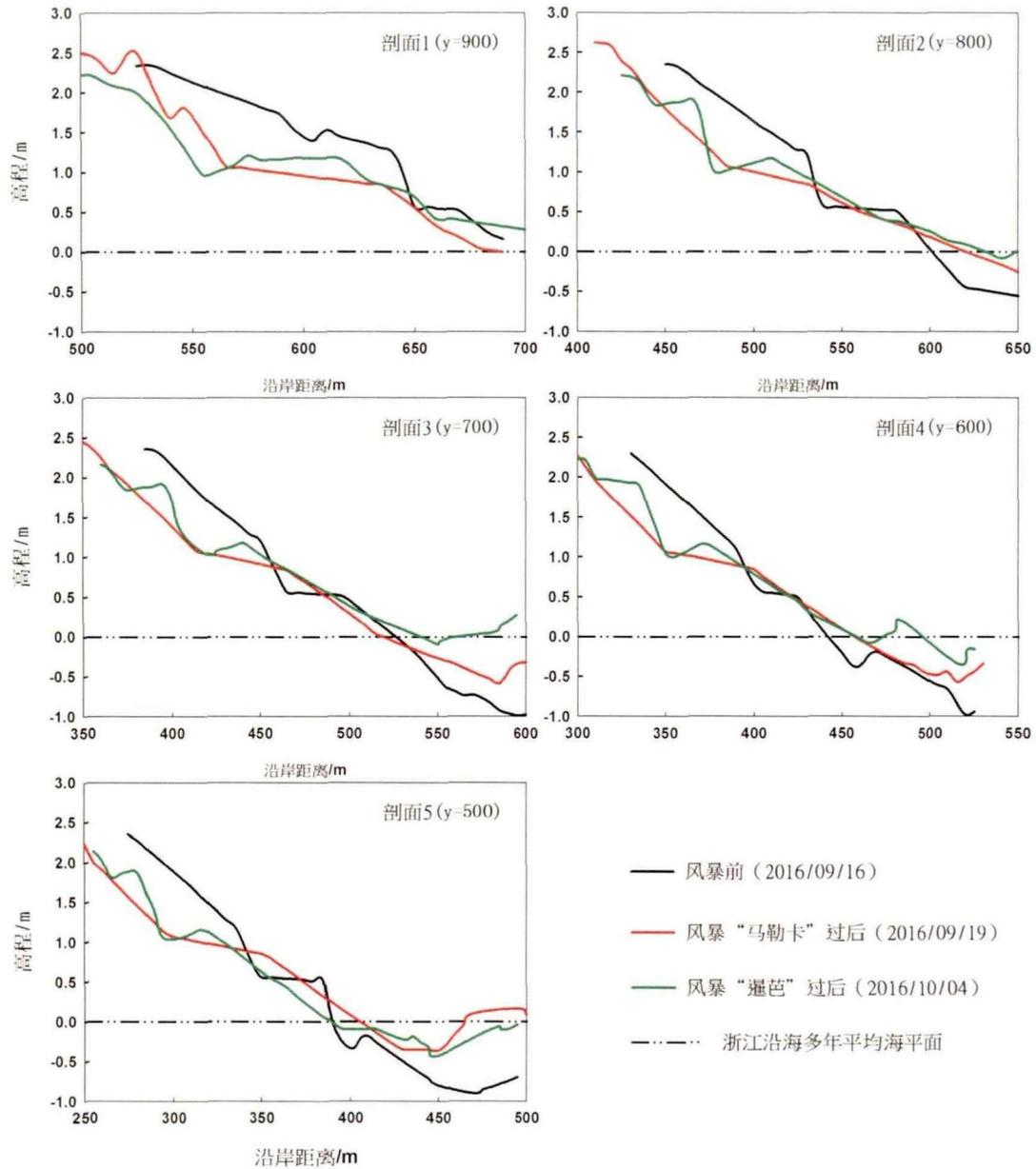


图 4-10 上岬角遮蔽段剖面

Figure 4-10 Sections of the upper shadow zone

风暴“暹芭”发生后上岬角遮蔽段各剖面的单宽体积变化量由北至南依次为 $-108.5 \text{ m}^3/\text{m}$ 、 $-76.7 \text{ m}^3/\text{m}$ 、 $-38.3 \text{ m}^3/\text{m}$ 、 $2.1 \text{ m}^3/\text{m}$ 、 $-46.6 \text{ m}^3/\text{m}$ (表 4-1)，剖面 1 同样表现出强烈的侵蚀，剖面 4 则表现出略微的淤积。剖面的冲淤分布规律与“马勒卡”发生后基本一致，但单宽侵蚀量较小。

风暴前后上岬角遮蔽段的平均坡度变化也很大(表 4-2), 风暴前为 1/69, 第一次风暴“马勒卡”过后变为 1/99, 第二次风暴“暹芭”过后则变为为 1/103, 风暴后各剖面坡度均呈现变缓的趋势。

表 4-2 风暴前后海滩各剖面坡度

Table 4-2 Slope of each section of the beach before and after the storm

剖面	坡度		
	风暴前	第一次风暴后	第二次风暴后
1	1/65	1/75	1/97
2	1/69	1/97	1/101
3	1/64	1/109	1/125
4	1/67	1/105	1/97
5	1/69	1/116	1/97
6	1/67	1/94	1/104
7	1/61	1/95	1/103
8	1/57	1/85	1/118
9	1/53	1/85	1/101
10	1/60	1/70	1/93
11	1/64	1/82	1/106
12	1/64	1/82	1/112
13	1/64	1/61	1/111
14	1/60	1/81	1/105
15	1/84	1/104	1/108

(2) 直线段

东沙海滩直线段（剖面 6~10）各剖面在风暴“马勒卡”发生前后普遍侵蚀（图 4-11），各个剖面的形态与上岬角遮蔽段相比较为曲折。直线段 5 个剖面冲淤分布亦是以多年平均海平面为界，多年平均海平面以上呈现为侵蚀状态、以下为轻微淤积。风暴“马勒卡”过境后海滩直线段各剖面单宽体积变化量由北至南依次为 $-85.7 \text{ m}^3/\text{m}$ 、 $-90.4 \text{ m}^3/\text{m}$ 、 $-98.3 \text{ m}^3/\text{m}$ 、 $-45.58 \text{ m}^3/\text{m}$ 、 $-79.25 \text{ m}^3/\text{m}$ （表 4-1）。

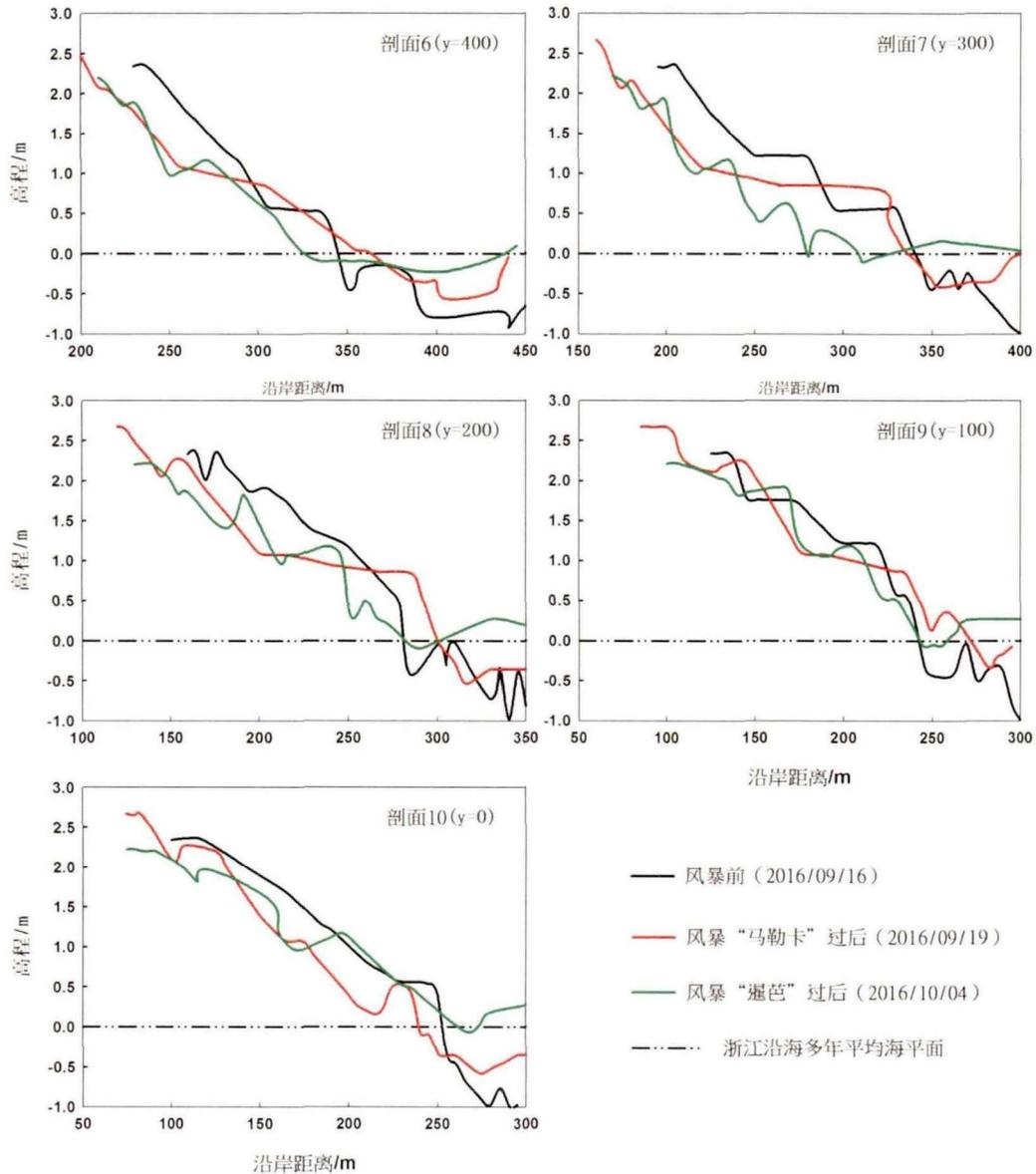


图 4-11 直线段剖面

Figure 4-11 Sections of the straight zone

风暴“暹芭”过后海滩直线段单个剖面的冲淤特征与“马勒卡”发生后大体相似，但单个剖面的冲淤情况不同，除剖面 10（靠近下岬角遮蔽段）以外，其他四个剖面在风暴“暹芭”发生后侵蚀程度比风暴“马勒卡”发生后侵蚀更加严重，剖面形态更为曲折。风暴“暹芭”过后直线段各剖面单宽体积变化量由北至南分别为 $-101.9 \text{ m}^3/\text{m}$ 、 $-116.1 \text{ m}^3/\text{m}$ 、 $-99.7 \text{ m}^3/\text{m}$ 、 $-53.77 \text{ m}^3/\text{m}$ 、 $-42.3 \text{ m}^3/\text{m}$ （表 4-1），连续的风暴明显加剧了直线段剖面的侵蚀。

风暴发生前海滩直线段各剖面的平均坡度的变化也比较大（表 4-2），风暴前为 1/60，第一次风暴“马勒卡”过后降为 1/86，而第二次风暴“暹芭”发生后则变为 1/104，连续风暴的发生使剖面的平均坡度显著变缓，且变缓程度大于上岬角遮蔽段。

（3）下岬角遮蔽段

由图 4-12 可见，海滩下岬角遮蔽段（剖面 11~15）在“马勒卡”发生前后各剖面均遭受侵蚀。风暴发生后各剖面形态的变化仍以多年平均海平面为界，多年平均海平面以上主要呈侵蚀状态，以下为轻度淤积，且靠近直线段区域的剖面侵蚀较为严重，剖面 12 侵蚀尤为显著。风暴“马勒卡”过境后下岬角遮蔽段各剖面单宽淤积量由北至南依次为 $-69.04 \text{ m}^3/\text{m}$ 、 $-118.84 \text{ m}^3/\text{m}$ 、 $-39.81 \text{ m}^3/\text{m}$ 、 $-29.58 \text{ m}^3/\text{m}$ 、 $-2.43 \text{ m}^3/\text{m}$ （表 4-1），侵蚀强度大致呈现出逐渐变弱的趋势。

海滩下岬角遮蔽段在“马勒卡”过境后剖面虽有略微恢复，但风暴“暹芭”的出现使海滩再一次遭受侵蚀，侵蚀强度与马勒卡前后相比相对较弱。下岬角遮蔽段剖面仍表现出平均海平面以上侵蚀、以下淤积的特征。风暴“暹芭”发生后下岬角遮蔽段各剖面单宽体积变化量分别为 $-10.74 \text{ m}^3/\text{m}$ 、 $-36.25 \text{ m}^3/\text{m}$ 、 $-21.7 \text{ m}^3/\text{m}$ 、 $-21.6 \text{ m}^3/\text{m}$ 、 $-46.3 \text{ m}^3/\text{m}$ （表 4-1），未呈现出明显的体积变化规律。

由表 4-2 可知，在风暴发生前下岬角遮蔽段各剖面的平均坡度为 1/71，风暴“马勒卡”过后变为 1/82，风暴“暹芭”过后则又变为 1/108。

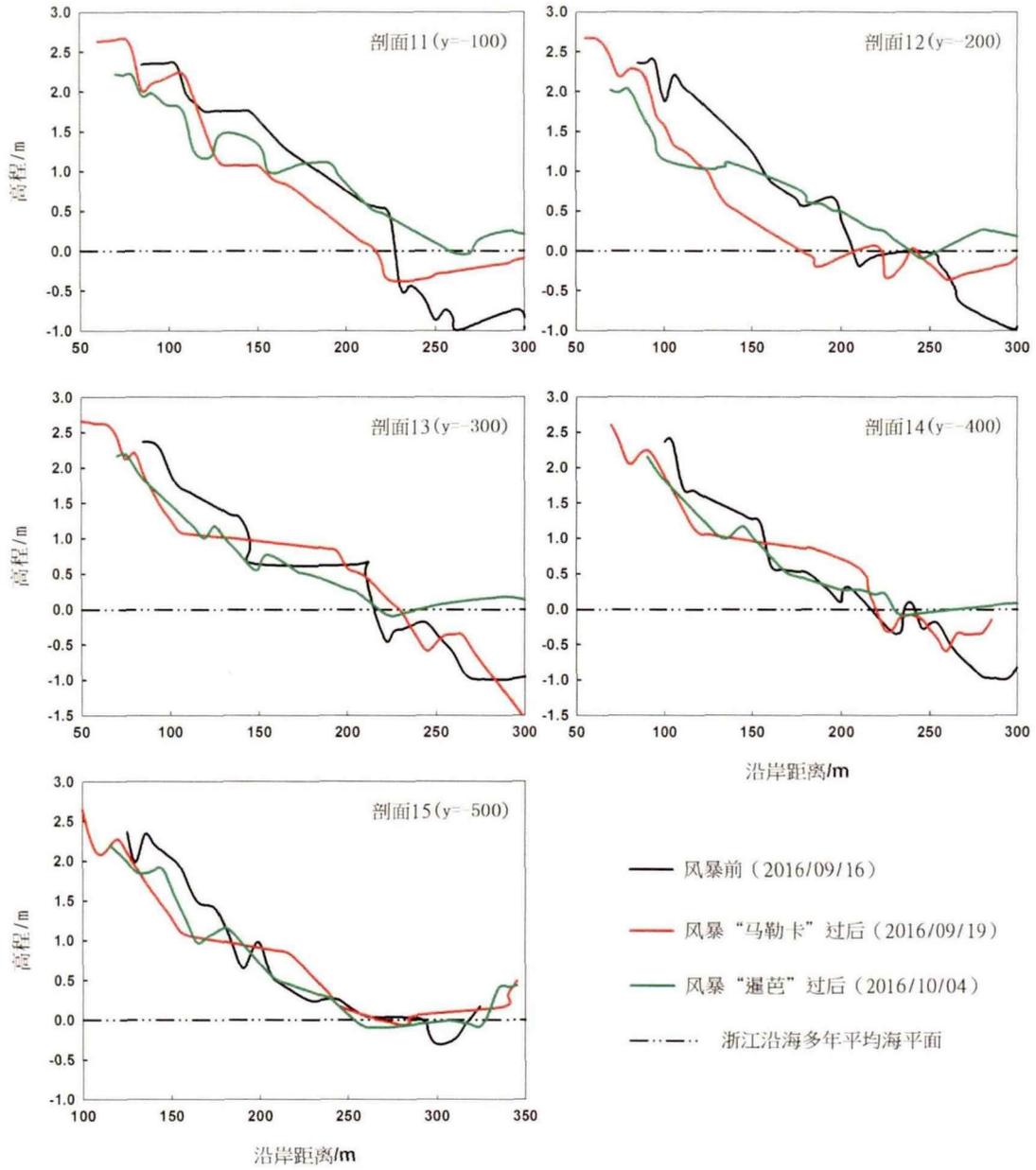


图 4-12 下岬角遮蔽段剖面

Figure 4-12 Sections of the lower shadow zone

综合两次风暴对海滩的作用情况,我们发现海滩的直线段侵蚀最为严重,其次是上岬角遮蔽段,最后是下岬角遮蔽段。其中,上岬角遮蔽段(除剖面 1 以外)和下岬角遮蔽段(除剖面 12 以外)均表现出侵蚀强度由北至南依次递减。两次风暴发生后海滩大部分剖面冲淤分布以浙江沿海的多年平均海平面为分界线,呈现出上冲下淤的基本特征,而另外一小部分剖面则接近全线侵蚀。海滩各剖面的坡度在风暴发生后普遍降低,直线段剖面坡度变化最为显著。

此外,通过对比两次风暴后的平均单宽体积变化量,可看出第二次风暴后的平均变化量小于第一次,这说明连续的风暴虽使海滩遭受了两次侵蚀,但并不是侵蚀量的简单累加。

4.1.2 海滩滨线及出露水面的海滩宽度的响应

海滩滨线代指潮间带的下界,在一定程度上与海滩宽度变化规律相对应。通过提取每个剖面滨线的位置(图 4-13),我们计算出了海滩滨线的进退量。风暴“马勒卡”使整个海滩滨线相对于风暴前平均向陆后退了 14.75 m,而风暴“暹芭”使得海滩滨线相对于两次风暴前后退了 10.91 m。第二次风暴后海滩滨线未表现出更大程度的向陆后退,反而呈向海前进的趋势,我们猜测这可能与补沙有关。

海滩不同位置的潮间带滨线后退程度不同且与剖面形态变化相呼应,直线段剖面后退最为严重,上岬角遮蔽段和下岬角遮蔽段相对较轻。与美国《海滨防护手册》所报道的海滩经过一次中等强度风暴袭击后的状态相对照(U S Government printing office, 1975),风暴“马勒卡”和风暴“暹芭”袭击东沙海滩时,都大体相当于强风暴浪对海岸的侵蚀。

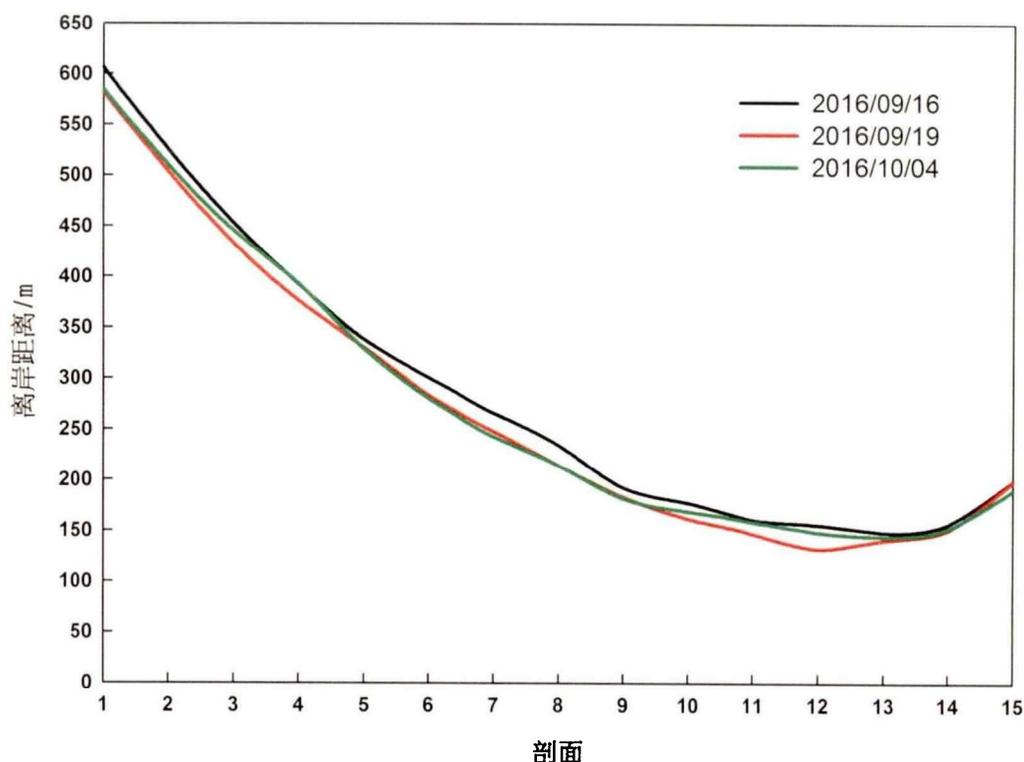


图 4-13 风暴前后海滩潮间带滨线位置变化

Figure 4-13 Changes in the position of the intertidal shoreline before and after storms

海滩滩面宽度是表征海滩状态的重要指标之一，学者们根据需要通常用干滩宽度、平均高(低)潮位时滩面宽度和低潮线以上的海滩宽度等代表海滩宽度(李占海等, 2000; Williams et al., 1992)。为了研究方便, 本文以海滩滨线为下界计算海滩出露水面的宽度(即低潮线以上的海滩宽度)并分析其变化。

由表 4-3 可知, 在没有风暴的常波况状态下, 上岬角遮蔽段的海滩宽度最大, 下岬角遮蔽段次之, 直线段最小。风暴发生前, 海滩平均滩面宽度为 113.06 m, 第一次风暴发生后海滩宽度变为 98.31 m, 第二次风暴发生后宽度则又变为 102.15 m。从两次风暴后宽度的变化程度上看, 第一次风暴发生后宽度减小十几米, 之后恢复到接近风暴前状态, 但第二次风暴的发生使宽度再一次缩减, 但程度相对较轻。

表 4-3 风暴期间海滩宽度变化

Table 4-3 Changes in beach width during storms

剖面	海滩宽度 (m)							
	09/16	09/17	09/18	09/19	09/20	09/21	10/04	10/05
1	156.00	148.77	141.92	131.90	153.53	161.04	134.31	137.94
2	145.13	149.71	132.64	123.47	151.43	150.41	129.79	136.05
3	127.84	134.14	125.04	108.05	134.61	128.14	120.18	122.09
4	117.02	119.10	116.29	101.03	125.06	120.61	117.43	113.97
5	107.67	111.23	106.81	99.73	116.88	111.30	98.36	106.95
6	105.33	105.10	94.71	88.18	99.73	103.25	84.94	93.39
7	110.52	110.60	103.39	92.44	107.62	104.11	87.31	90.66
8	113.76	114.14	109.29	94.10	105.40	102.86	93.81	95.22
9	107.33	104.70	112.21	98.22	108.13	106.76	96.58	101.78
10	102.36	98.04	89.89	86.52	97.46	102.67	93.90	93.28
11	100.74	103.02	96.16	86.94	111.70	94.62	98.60	98.80
12	100.64	106.29	95.41	76.87	101.57	100.47	93.39	87.66
13	93.50	101.48	95.69	85.53	91.26	95.11	89.16	87.07
14	94.81	101.18	92.30	88.90	86.97	95.32	90.49	88.02
15	113.22	116.13	118.03	112.74	107.34	117.26	103.96	104.44
均值	113.06	114.91	108.65	98.31	113.25	112.93	102.15	103.82

4.2 海滩沉积地貌对连续风暴的响应

4.2.1 海滩地貌对连续风暴的响应

风暴的发生将改变滩面的地貌状况,砾石的分布特征是滩面地貌形态改变最为显著的表现,本文将主要利用砾石带的变化分析海滩地貌对连续风暴的响应。

如图 4-15~4-20 所示,风暴的发生,使得滩面地貌发生了明显的变化,砾石带的变化尤为显著。C1、C2 摄像头所覆盖的滩面(海滩南部)在风暴前有略微凸起的滩脊且滩面基本没有砾石出露,而第一次风暴后滩面上则出现了大量的颗粒稍细的砾石,滩面明显更平缓一些,滩脊完全消失;第二次风暴后滩面与第一次风暴后状况类似,但滩面上的砾石相对较少(图 4-15~图 4-16)。风暴前 C3、C4、C5 摄像头覆盖的滩面基本无明显的砾石出露,第一次风暴后前滨细颗粒的砾石明显增多(C5 照片中砾石出露尤为显著),海滩坡度变化没有南部明显;第二次风暴后该岸段滩面出现了颗粒较大的砾石。C6 摄像头覆盖的北部滩面风暴前砾石主要集中在后滨海塘脚附近,第一次风暴后滩面出现了大量的细颗粒砾石以及少量的粗颗粒砾石;第二次风暴后滩面出露大量砾石,粗颗粒砾石增多。

海滩砾石带对连续风暴的响应呈现出以下特征:从横向上看,风暴后滩面砾石增加,颗粒稍细的砾石遍布整个滩面,颗粒较粗的砾石在海塘脚分布较多。在纵向的分布上,海滩不同岸段出露的砾石量不同,风暴前后都呈现出北部和中部砾石出露较多、南部相对较少。



图 4-15 C1 摄像头风暴前后 snap 图像 (a 为风暴前, b 为风暴“马勒卡”后, c 为风暴“暹芭”后; 红线中的区域为砾石带)

Figure 4-15 Snap images before and after storms of camera C1 (a is the image before the two storm, b is the image after the storm “Malakas”, c represents the image after the storm “Chaba”; the area in the red line is the gravel belt)

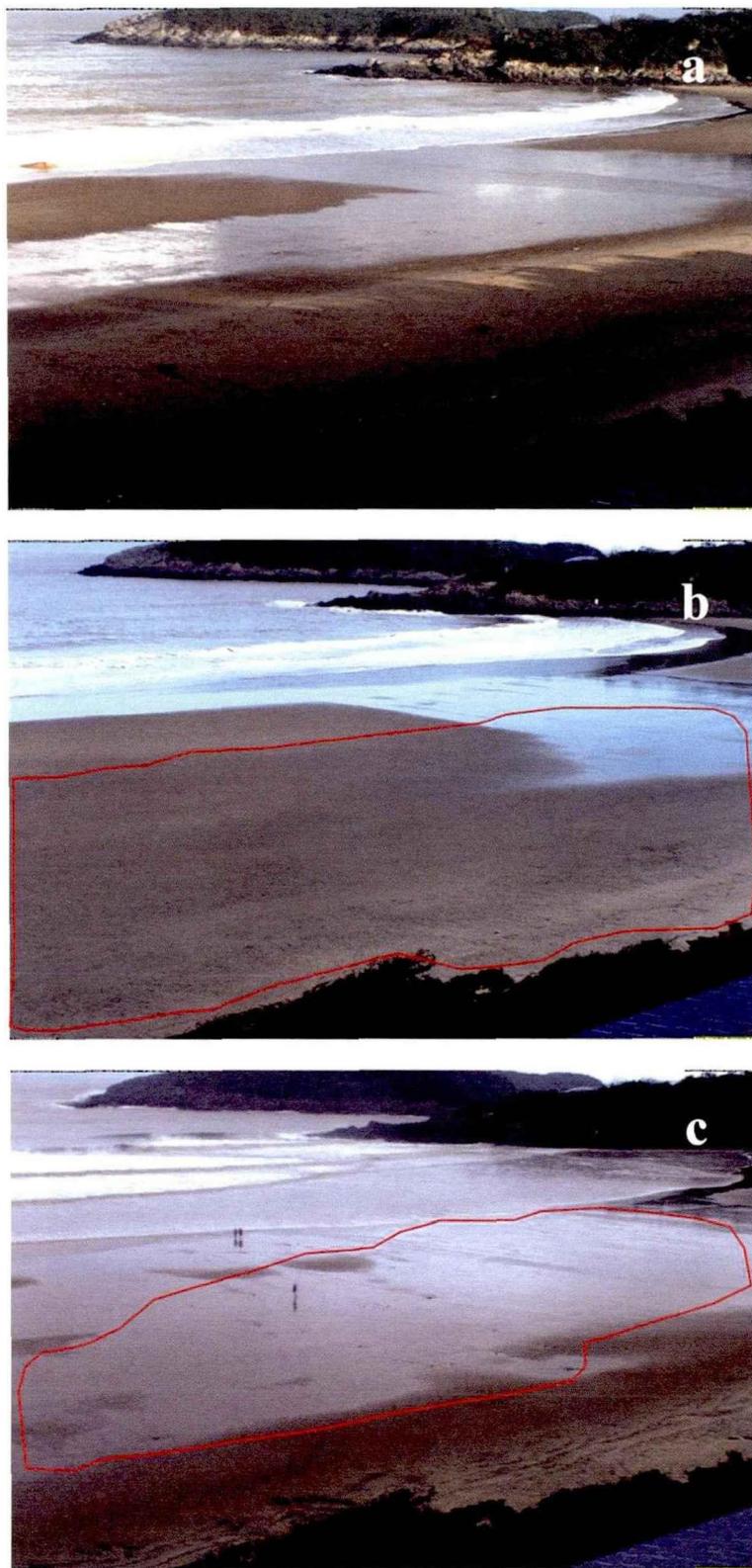


图 4-16 C2 摄像头风暴前后 snap 图像

Figure 4-16 Snap images before and after storms of camera C2

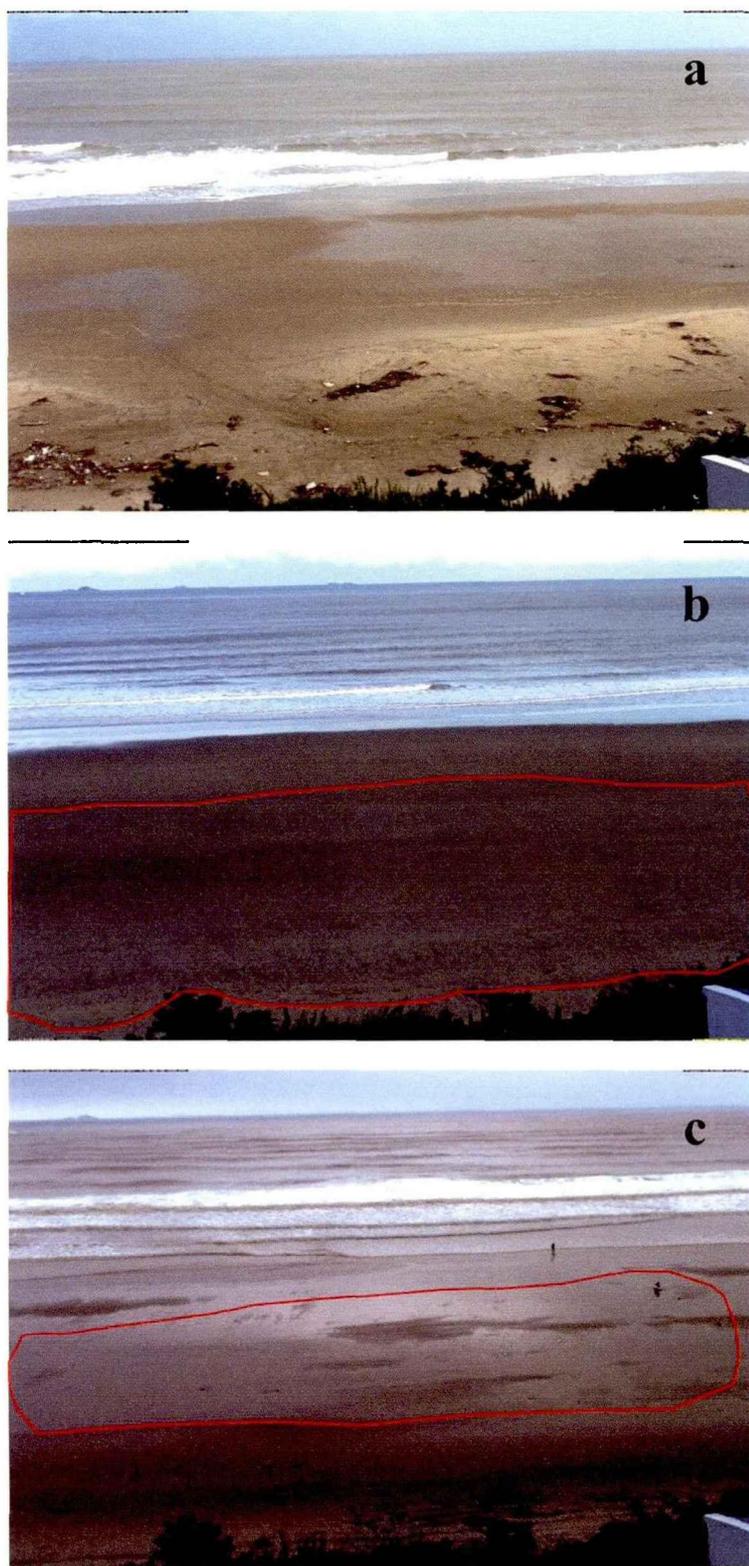


图 4-17 C3 摄像头风暴前后 snap 图像

Figure 4-17 Snap images before and after storms of camera C3

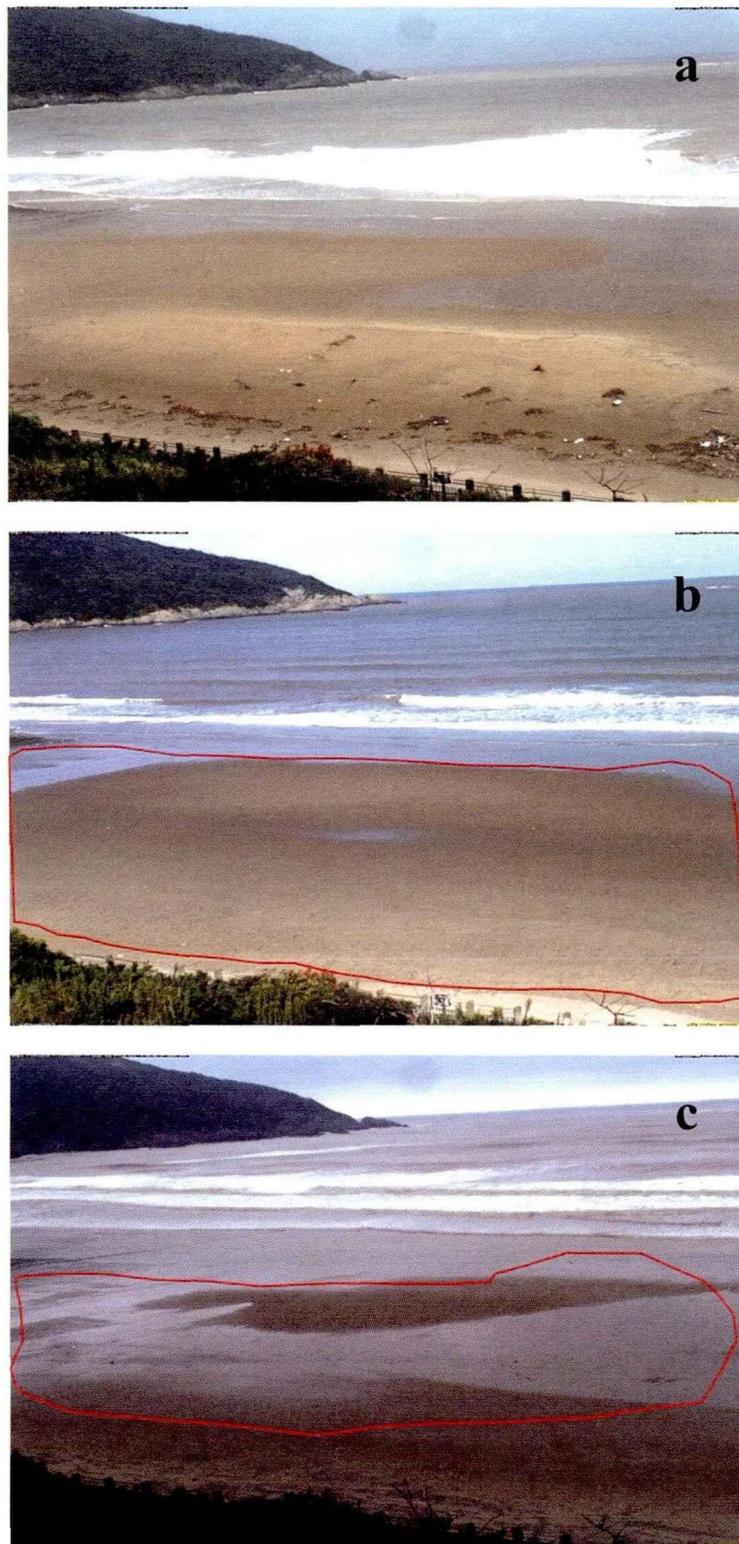


图 4-18 C4 摄像头风暴前后 snap 图像

Figure 4-18 Snap images before and after storms of camera C4

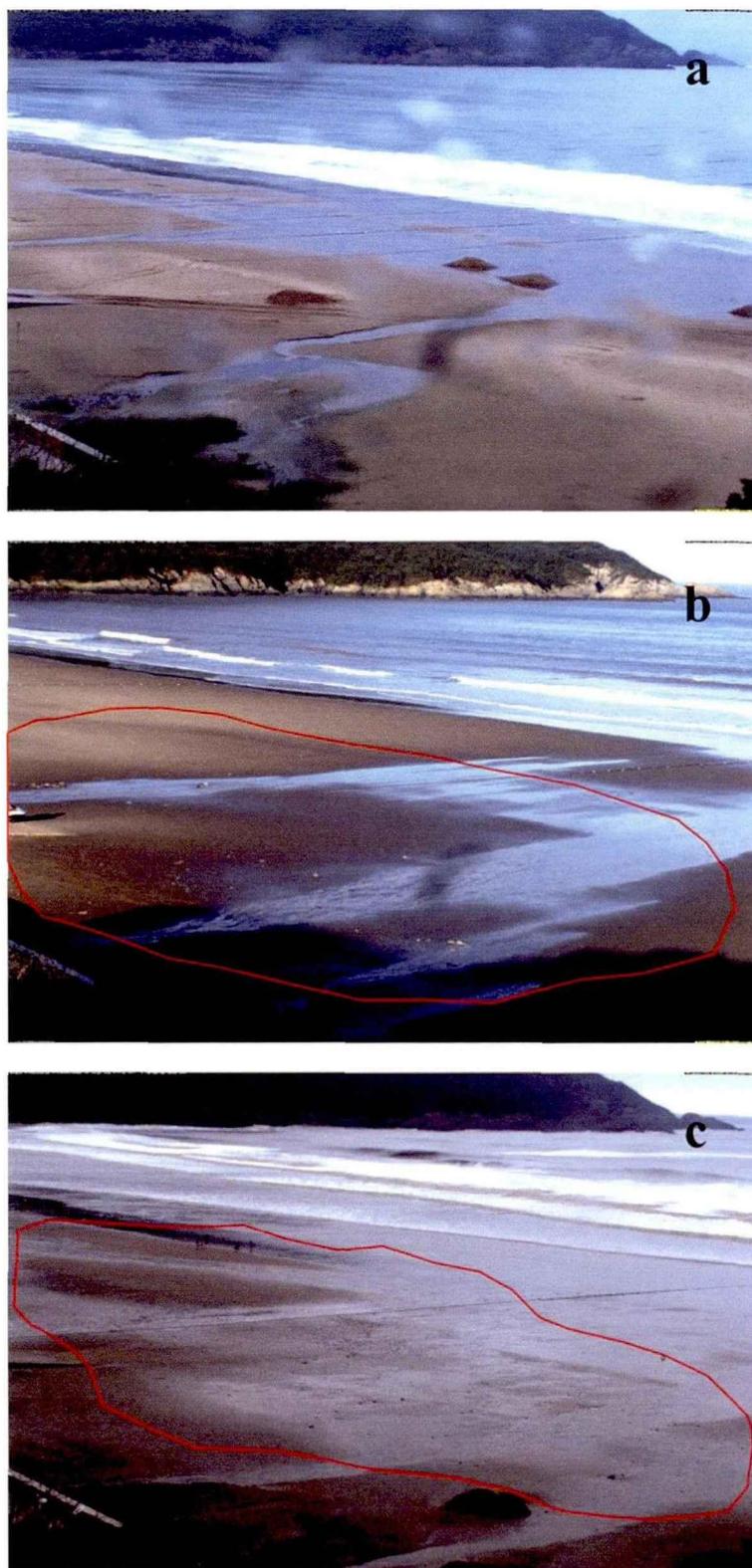


图 4-19 C5 摄像头风暴前后 snap 图像

Figure 4-19 Snap images before and after storms of camera C5

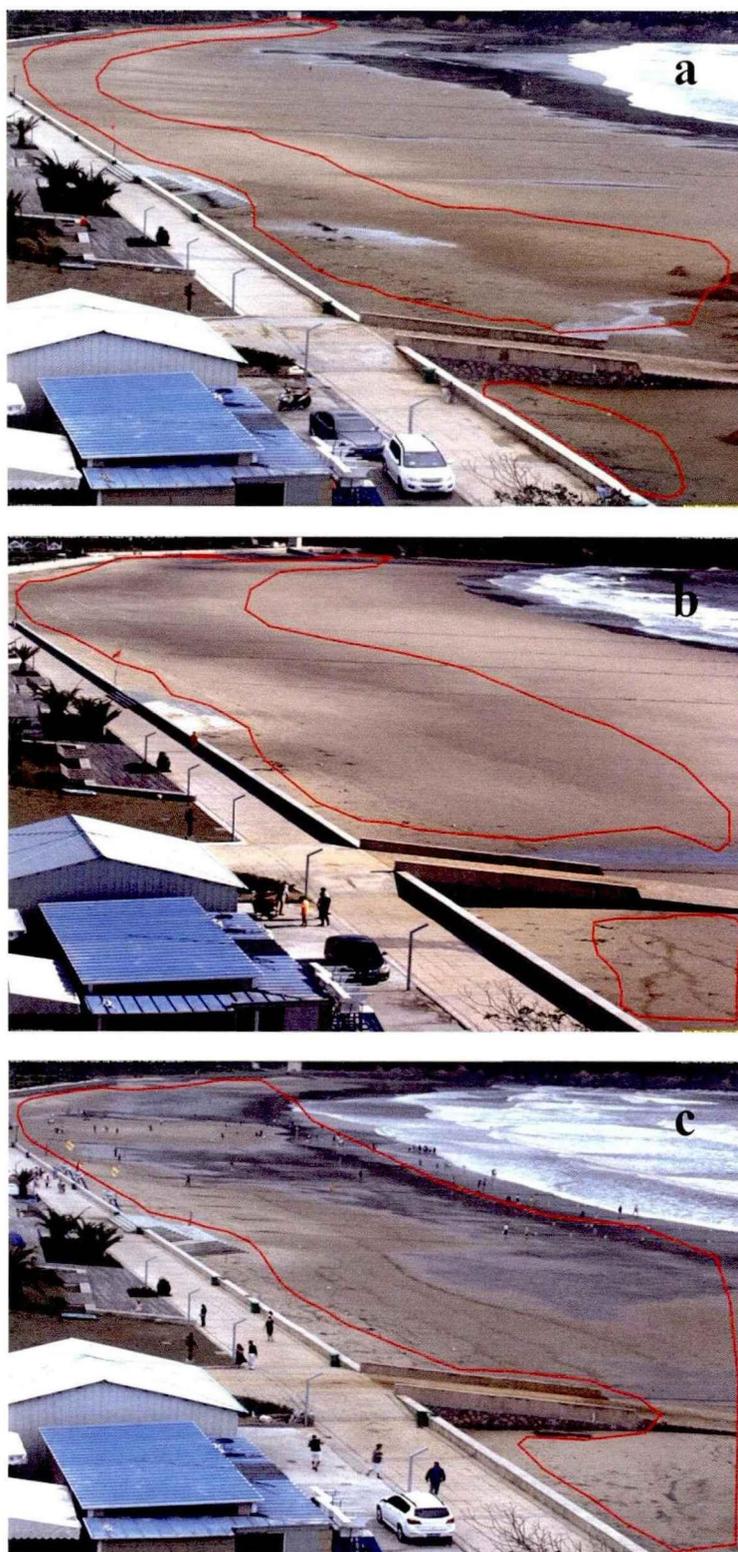


图 4-20 C6 摄像头风暴前后 snap 图像

Figure 4-20 Snap images before and after storms of camera C6

4.2.2 海滩表层沉积物粒度特征对风暴的响应

沉积物的粒径变化往往与地形和水动力条件有关,而风暴的发生通常引起水动力状况的突变,因此,对海滩表层沉积物粒度特征变化进行分析可以更好地掌握海滩对风暴的响应状况。本文通过对风暴前和连续风暴后的沉积物数据进行分析,得出以下结果(图4-21,表4-4):

表 4-4 风暴前后海滩不同部位沉积物中各组分含量分布

Table 4-4 Distribution of components in sediments in different parts of the beach before and after storms

采样位置	砾 (%)		砂 (%)		粉砂 (%)		黏土 (%)	
	风暴前	风暴后	风暴前	风暴后	风暴前	风暴后	风暴前	风暴后
北部高滩	0.02	50.86	99.98	49.14	0	0	0	0
北部中滩	0.35	18.24	99.65	81.76	0	0	0	0
北部低滩	0.29	28.15	99.71	71.85	0	0	0	0
中部高滩	26.05	50.28	73.95	49.72	0	0	0	0
中部中滩	0	18.56	100	81.44	0	0	0	0
中部低滩	0.24	0	99.76	54.06	0	45.94	0	0
南部高滩	0.71	1.04	99.28	98.96	0.01	0	0	0
南部中滩	0.21	0.58	99.79	99.42	0	0	0	0
南部低滩	0	0	100	99.97	0	0.03	0	0

(1) 海滩沉积物的组分

海滩的沉积物主要由单个颗粒的砾石、砂和粉砂组成,在不同环境(尤其是水动力异常强的环境与较弱的环境)下沉积物的粒度组分常有明显的变化。

从总体上看, 风暴前东沙海滩沉积物的组分主要为砂和少量的砾, 而风暴后砾组分增多。海滩沉积物各组分含量在横向上的分布变化表现为: 风暴前砾主要在高滩位置出现, 风暴后除中部低滩和南部低滩处沉积物中均含有砾; 风暴前沉积物中的砂组分含量差异不明显, 而风暴后中滩沉积物的砂组分含量是最高的; 风暴后海滩中部低滩处的沉积物粉砂含量达45.94%, 而其他岸段的沉积物样品中在风暴前后都几乎没有粉砂。海滩表层沉积物各组分含量在纵向上的分异变化表现为: 风暴前海滩北部、中部和南部的各组分含量相似, 风暴后北部和中部的砂含量减少、砾含量增多, 风暴前后海滩的北部和中部各组分含量变化很大, 而海滩南部沉积物的组分并没有呈现出明显的变化。

(2) 中值粒径和平均粒径

中值粒径和平均粒径是表征沉积物粒度特征的重要指标, 用来说明粒度分布的主要趋势, 反映了沉积介质的平均动能, 具有成因上的意义(王颖和朱大奎, 1994)。连续风暴前整个海滩的平均粒径和中值粒径分别为 1.46ϕ 和 1.49ϕ , 连续风暴后整个海滩的平均粒径和中值粒径分别为 1.3ϕ 和 1.87ϕ , 风暴前后滩面沉积物平均粒径和中值粒径差异显著, 风暴后呈现出整体的粒径变粗。从横向分异上看, 高滩处的沉积物粒径最粗, 中滩次之, 低滩的粒径最细, 海滩中部的横向分异最为明显; 从纵向上看, 风暴前纵向上的粒径分布较均一, 海滩南部沉积物的粒径最细且变化最小, 而风暴后北部和中部沉积物的粒径明显大于南部。

(3) 分选性

沉积物的分选性即颗粒大小的均匀性, 分选程度与沉积环境密切相关。连续风暴前沉积物的平均分选系数为0.59, 连续风暴后的平均分选系数为1.29, 沉积物的分选程度明显变差。在横向上, 风暴前后分选程度都表现为低滩最好, 中滩次之, 高滩的分选性最差。在纵向上, 风暴发生前, 海滩沉积物的分选程度差异不大; 风暴发生后, 海滩的北部和中部分选较差, 而海滩南部分选相对较好。分选性与平均粒径之间有良好的相关性: ϕ 值越大, 平均粒径越细, 分选系数越小, 分选性越好(图4-22)。

(4) 偏态和峰态

偏态指示了颗粒频率分布的不对称程度。风暴前海滩沉积物的偏态整体上呈现为近对称的状态(偏态值集中在-0.5~0之间),也就是说风暴前海滩沉积物的颗粒分布较为均匀;风暴后海滩沉积物的偏态则负偏更为明显(偏态值集中在-2~0.5之间),即粗细颗粒分布变得更加不均匀,其中北部和中部更为显著,细颗粒含量的增多与分选变差相对应。风暴前偏态的空间分异明显,风暴后偏态的空间分异趋向均一化。

峰态用来表示频率曲线尖锐或钝圆的程度。若峰态值小,则说明沉积物有几个来源直接混合而未经改造,若一个来源占优势则成尖峰。风暴前海滩沉积物的峰态值集中在0.5~1之间,呈现为未经改造的较宽平的峰态,风暴后沉积物的峰态值集中在1~2之间,峰态变尖。沉积物的峰态在沿岸上的分异表现为:风暴前峰态的沿岸分异不明显;风暴后北部和中部的沉积物峰态变窄,南部的峰态变化不大。在横向上的分异则表现为:风暴前高、中、低滩的峰态值分布都较为均一;风暴后沉积物受到扰动较大,高滩和中滩沉积物峰态变化显著,低滩的峰态最为平坦。

将沉积物的变化与海滩地形对比可发现,风暴后海滩受严重侵蚀的岸段沉积物表现为普遍的粗化且分选性变差,而侵蚀稍弱或略有堆积的位置,沉积物则呈现出颗粒变细、分选性变差的特征。

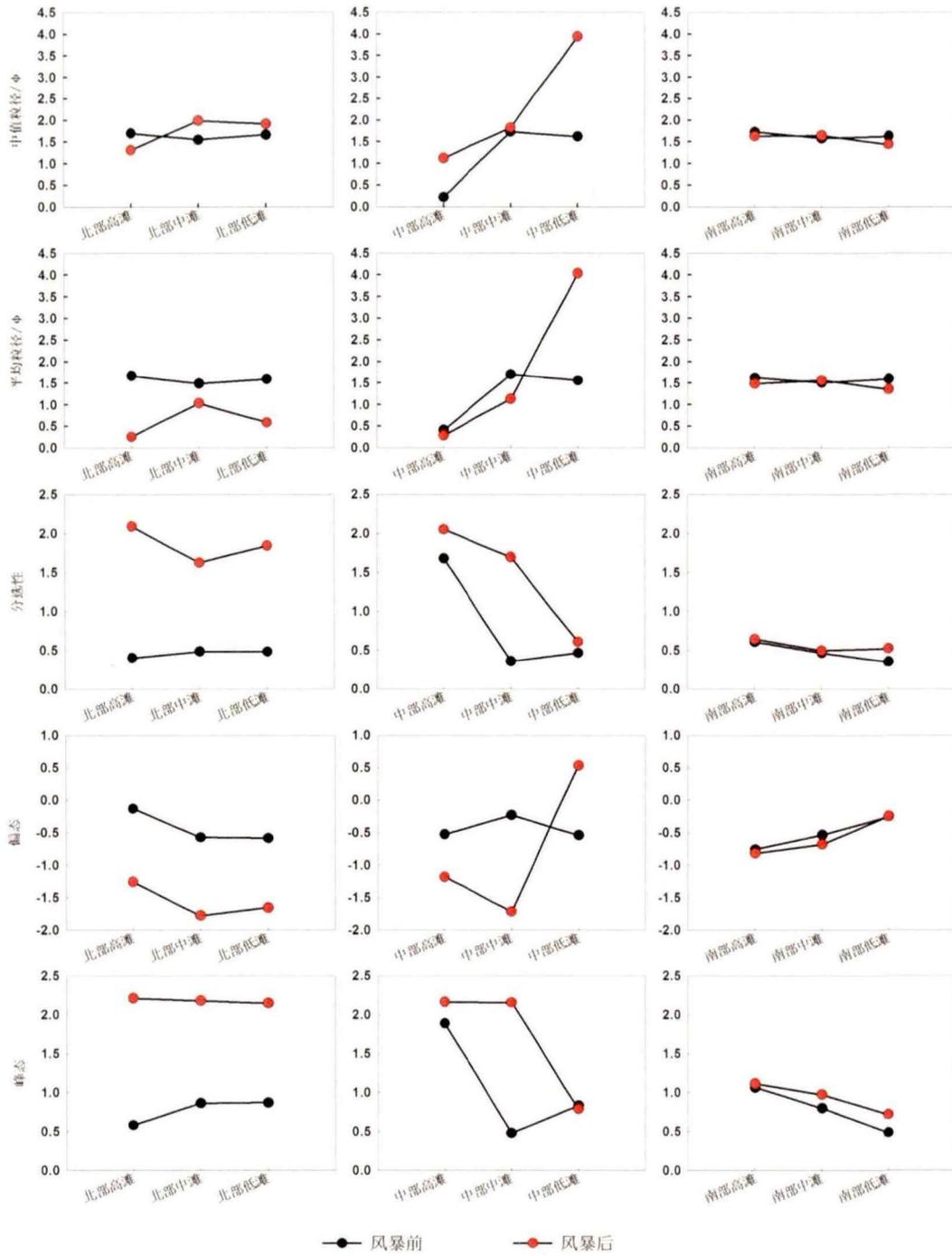


图 4-21 风暴前后沉积物特征变化

Figure 4-21 Changes of sediment characteristics before and after storm

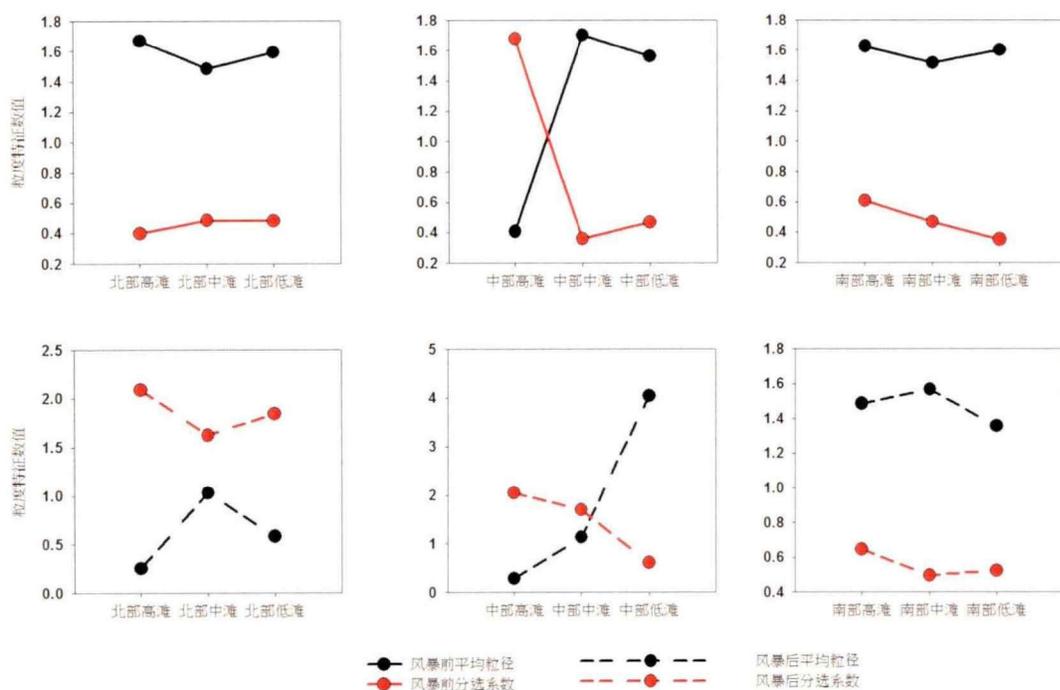


图 4-22 平均粒径与分选系数之间的相关性

Figure 4-22 The correlation between the average particle size and the sorting coefficient

第5章 连续风暴作用下海滩变化的影响因素分析

前文研究了东沙海滩剖面 and 沉积地貌对连续风暴的响应, 与此相对应, 接下来我们将试图分析连续风暴作用下影响海滩剖面、表层沉积物粒度特征变化的因素。

5.1 连续风暴作用下海滩剖面变化的影响因素分析

与其他同类型的海滩相比(表 5-1), 东沙海滩剖面的冲淤变化对风暴“马勒卡”和风暴“暹芭”的响应程度较为剧烈。通过对比我们发现不同海滩对同一风暴的响应不同, 例如下大海和宴镜海滩对 9916 号台风的响应、卒子村海滩和岩下村海滩对台风“艾利”的响应, 这说明海滩本身的形态是海滩响应的其中一个重要影响因素。同时, 国内外学者发现同一海滩对不同风暴的响应也是不同的, 本研究中东沙海滩对风暴“马勒卡”和风暴“暹芭”的不同响应结果也证实了这一点, 这说明风暴自身的强度、路径等指标以及由此带来的波浪、潮位、风等方面的异常是影响海滩响应的另一个重要因素。而在全球海平面不断上升的大背景下, 海平面变化也是一个不容忽视的影响因素。此外, 海滩作为滨海旅游业的重要依托, 人们对其需求的增多使得旅游管理部门对海滩开发的力度加大, 人类活动对海滩的影响亦不容小觑。因此, 下面我们将尝试从海滩自身因素(平面形态、地质地貌条件等)、外部动力因素(风暴、波浪、潮汐、风、海平面异常升高等)以及人类活动等方面进行探讨。

表 5-1 与其他研究区侵蚀程度的比较

Table 5-1 Comparison with other study areas of erosion

岬湾海滩	单宽侵蚀量 (m^3/m)	台风	参考文献
广东下大海海滩	183.4	8616 号	陈子燊, 1995
广东宴镜海滩	85.2	8616 号	陈子燊, 1995
厦门岛五通西海滩	40~130	9914 号	蔡锋等, 2002
高栏岛飞沙湾海滩	55.3	伊布都	蔡锋等, 2004
南日岛卒子村海滩	78.4	艾利	蔡锋等, 2006
南日岛岩下村海滩	64.49	艾利	蔡锋等, 2006
浙江象山皇城海滩	49.6	海葵	童宵岭等, 2014
英国 Slapton 海滩	40	长时间系列风暴	Alegria et al., 2010
美国 Delaware 的海滩	14.68	十月的冬季风暴	Roberts et al., 2013
法国 Truc vert 海滩	25	长时间系列风暴	Coco et al., 2014
美国火岛中部海滩	36.3	飓风 Sandy	Nelson and Hapke et al., 2015
青岛石老人海滩	98.2	长时间系列台风	冯哲等, 2016
海南岛木兰湾海滩	41	威马逊	龚昊等, 2017
舟山东沙海滩	73.75	马勒卡	本文
舟山东沙海滩	54.56	暹芭	本文

5.1.1 海滩自身因素

东沙海滩是典型的岬湾型海滩，而对岬湾海滩，一定条件下，台风浪的强弱不是地貌响应强烈程度的唯一决定因素，湾口朝向和岬湾地形也起着重要作用（蔡锋等，2008）。东沙海滩岸线的地形走向 SSW-NNE，与其走向垂直方向的风浪显著作用于海滩的发育与演变。东沙海滩湾口朝向东南，南北有岬角或海岛遮蔽，这使得东南向浪对其地貌变化影响最大。

由图 5-1 可知，东沙海滩抛物线模拟结果与其实际滨线相差甚远，表明东沙海滩尚未达到静态平衡状态。从长期来看，东沙海滩处于极度不稳定之中，由于实际滨线在静态平衡形态的靠海侧，海岸的凹入度较静态平衡形态小，波浪在由

湾外向湾内传播的过程中以折射为主，波浪作用加强，海岸将处于侵蚀状态，风暴发生时侵蚀更加强烈。

东沙海滩附近以丘陵地貌为主，山势平缓，没有入海河流的物质输入，海滩沉积物主要源于风、水动力对近岸基岩的冲刷以及岛陆岩石的风化、搬运，风暴的发生造成泥沙损失之后很难得到补给。



图 5-1 东沙海滩抛物线模拟结果

Figure 5-1 Parabola simulation results at Dongsha Beach

5.1.2 外部因素

风暴中心到研究区的距离是影响海滩对风暴响应程度的重要因素，强台风“马勒卡”发生时研究区进入了它的七级风圈区，而风暴“暹芭”虽为超强台风，其发生时研究区并未进入风圈内，风暴强度、到研究区距离的不同使得海滩剖面对两次风暴的响应状况不同。对本研究区域造成重大影响的台风，其路径方向依次为近海转向类、外海转向类、福建沿海登陆类、浙江沿海登陆类等，浙江登陆型和近海转向型的台风引起的增水最强（王雷等，2011），而风暴“马勒卡”和风暴“暹芭”都是近海转向型，但“马勒卡”的转向发生于风暴影响研究区的时间，而风暴“暹芭”的转向发生于影响风暴影响研究区后，这可能也是风暴“马勒卡”对研究区作用更强一些的原因之一。

风暴“马勒卡”和风暴“暹芭”到达东沙海滩近岸时主要为偏东向的浪（图 3-13），浪向与海滩的走向近似垂直，波浪直接正面冲击海滩。直线段向海敞开，水动力直接强烈作用于该岸段，这使得直线段侵蚀最为严重且整个岸段的剖面形态较为曲折，上下岬角对波能的削弱使得侵蚀程度相对较轻。而上岬角遮蔽段因弯曲程度小于下岬角遮蔽段，剖面的侵蚀相对严重。此外，波浪引起的沿岸流使得泥沙由北向南沿岸输移，北部泥沙流失并在南部堆积，这也是下岬角遮蔽段剖面侵蚀程度小的原因之一。

使舟山附近海域产生增水的主风向是东北风，次风向是北风（项素清，2003），风暴“马勒卡”期间的主风向为北向，并且在其影响浙江沿海期间风向保持北向，最大风速达 11.3 m/s，风暴“暹芭”发生期间的主风向是西北向和北向，风速最大值为 11 m/s，而本研究区的平均风速仅 7.1 m/s。两次风暴期间的风向均为能使研究区附近海域产生增水的风向，水位的异常增高使得海滩剖面的冲淤表现更加明显。

海平面上升的累计效应会加剧台风风暴潮和海岸侵蚀。2016 年 9 月份浙江沿海海平面达到了历史同期的最高水平（图 5-2），风暴“马勒卡”影响浙江沿海时恰逢天文大潮，天文大潮遇上台风风暴的袭击，季节性高海平面、天文大潮和风暴增水的叠加使得海滩侵蚀更加严重（国家海洋局，2016），同时这可能是风暴“马勒卡”作用强于风暴“暹芭”的原因之一。

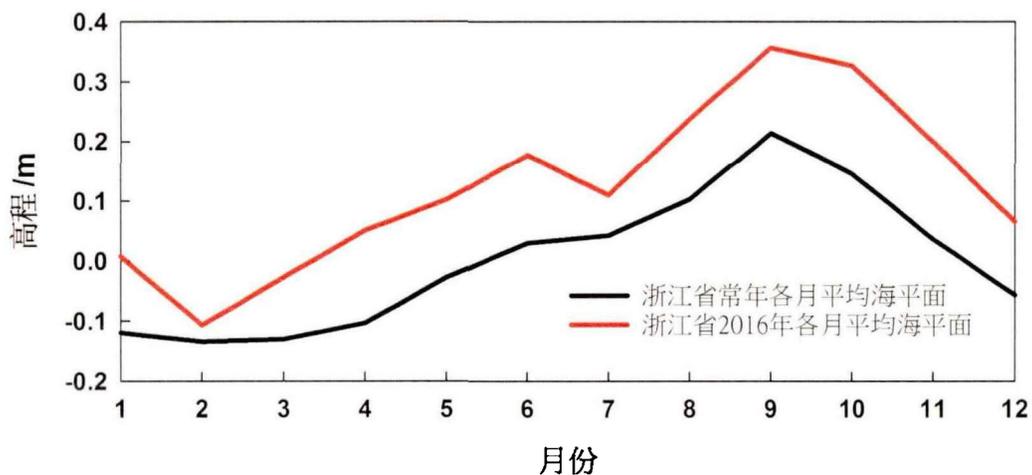


图 5-2 浙江沿海平均海平面（据 2016 年中国海平面公报）

Figure 5-2 The mean sea level of Zhejiang Province(quoted from 2016 China Sea Level Bulletin)

5.1.3 人类活动

(1) 海堤与排水口

2015 年后，东沙海滩沿岸海堤全线建成。它的建立使海滩后滨变窄并且阻隔了海滩后方的泥沙，而泥沙来源影响了海滩地貌的发育。由于得不到充足的砂源，东沙海滩的滩脊-沙坝形态发育迟缓，海滩在遭受破坏后地形恢复较缓慢。

值得注意的是，受岬角保护的剖面 1 在风暴“马勒卡”发生后侵蚀却最为强烈。除了受风暴引起的沿岸输沙的影响，该剖面的严重侵蚀也可能与位于滩面上的排水口有关（图 5-3），水流从滩面流向大海会带走滩面的泥沙并破坏滩面本来的面貌，再加上风暴作用的叠加，这才导致岬角的保护作用在海滩北部没那么明显，排水口的位置距离剖面 1 最近，因此剖面 1 单宽侵蚀强度最高。另外，下岬角遮蔽段剖面本应表现出侵蚀强度较弱的特征，而剖面 12 则表现出了强烈的侵蚀，这也可能与该剖面附近的排水口密切相关。



图 5-3 东沙海滩（常态）滩面的排水口

Figure 5-3 Drainage outlets on Dongsha beach (under normal condition)

(2) 海滩补沙

我们在 Argus 监测图像中发现在两次风暴中间负责东沙海滩的朱家尖旅游管理公司进行了滩面补沙(图 5-4), 由于海滩补沙能快速拓宽干滩, 第二次风暴后海滩出露水面的宽度大于第一次风暴后。据负责东沙海滩的管理人员统计, 在两次风暴中间(2016 年 9 月 29 日-30 日)共补 700~800 车, 经粗略计算后的补沙量为 2000~10000 m^3 。从我们的冲淤数据中, 可以发现第二次风暴后相对于第一次风暴后有约 5250 m^3 的淤积, 这说明补沙起到了作用。



图 5-4 C4 摄像头 2016 年 9 月 29 日的照片

Figure 5-4 Photo of the camera C4 on September 29, 2016

5.2 连续风暴作用下海滩沉积地貌变化的影响因素分析

风暴的发生改变了水动力环境,使得海滩沉积物的运动受到扰动,而沉积物的粒度特征可以反映沉积动力条件,沉积物的粒度越粗,动力条件越强。在海滩沉积环境中,沉积物颗粒较粗则表明该处的水动力条件比较强,即沉积环境是高能的;沉积物颗粒较细则说明水动力条件较弱,沉积环境是低能的。沉积物的空间分异分为横向和纵向两种,水动力条件发生显著变化时两种分异都会随之发生变化。

海滩表层沉积物的横向分选受水动力作用明显,风暴发生期间水动力异常增强,高滩的泥沙从上部冲刷下来在低滩堆积,海滩表层沉积物受到强烈扰动。常波况下水位不能将后滨高滩全部淹没,而风暴发生时水位增高,离岸流携带高滩处的泥沙到低滩区域,在水流离岸与向岸运动的交汇处泥沙发生堆积。风暴“马勒卡”和“暹芭”发生时引起的风暴潮增水分别达 65 cm、51 cm (图 3-14),水位的升降带走高滩部位表面的细颗粒沉积物,使得海滩高滩处粒径粗化最明显。由于高滩细粒泥沙的向海运动在中滩处也有一定的堆积,中滩部位粒径的变粗程度相对高滩较小,但中滩部位因为水动力较强仍然呈现出整体的粗化。细粒泥沙的堆积使得海滩的低滩处整体呈现出变细的特征,海滩中部低滩尤为明显,常波况下东沙海滩的沉积物是由海向陆逐渐变细的,中部低滩采样位置离岸最远使得该处沉积物比其他部位粒径更细。沉积物的分选性、峰态和偏态都与沉积物的粒径相关,在横向上也表现出了相应的变化。

海滩泥沙粒径除横向分异的变化外,还表现出沿岸分异上的系统变化,这种变化是由沿岸能量的变化引起的。较细的砂沉积在被岬角保护的低波能区,波浪在这里发生了折射,削弱了波能。而在海滩开阔的区域,因没有岬角的保护完全暴露于波浪作用之下,这使得海滩直线段沉积物的粒径最粗且粒径的变化也是最大的。海滩的上岬角遮蔽段因岬角弯曲程度不如下岬角遮蔽段,沉积物的粒度变化程度比下岬角遮蔽段大。风暴期间东北向(主波向)的波浪引起的自北向南的沿岸输沙作用,细粒沉积物在海滩的下岬角遮蔽段得到更多的堆积。

砾石、砂和粉砂等沉积物在不同部位的不同组分含量的分布使海滩不同部位地貌特征各异,风暴期间的强水动力使细粒泥沙向海运输、粗颗粒的砾石在滩面

出露，沉积物的一系列变化引起滩面地貌（如砾石带的变迁）的相应变化。

第6章 结论

本文利用 2016 年的 Argus 视频图像数据、东沙海滩近岸波浪、潮位、风等水动力数据以及滩面表层沉积物粒度数据,借助数值模拟与 Argus 应用模块反演获得了东沙海滩滩面地形数据,进而从海滩地貌、剖面、海滩滨线、海滩宽度、表层沉积物粒度特征等方面分析了海滩对连续风暴“马勒卡”和“暹芭”的响应特征,并从海滩自身因素、外部动力因素以及人类活动等方面,探讨了影响风暴对海滩变化的因素,最终获得以下主要结论:

(1) 风暴“马勒卡”发生后海滩单宽体积变化量平均值为 $-73.75 \text{ m}^3/\text{m}$,风暴“暹芭”发生后海滩单宽体积变化量的平均值为 $-54.56 \text{ m}^3/\text{m}$ 。连续风暴发生前后海滩的侵蚀程度整体呈现出:直线段>上岬角遮蔽段>下岬角遮蔽段,剖面形态的变化均表现出以浙江沿海的多年平均海平面为分界线上冲下淤的基本特征,而另外一小部分剖面呈现出几乎整个剖面的侵蚀。海滩各剖面的坡度在风暴发生皆呈变缓趋势。

(2) 风暴“马勒卡”使整个海滩滨线平均后退 14.75 m, 风暴“暹芭”使得海滩滨线相对于两次风暴前后退 10.91 m; 风暴发生前, 海滩平均滩面宽度为 113.06 m, 第一次风暴发生后海滩宽度变为 98.31 m, 第二次风暴发生后宽度则又变为 102.15 m。

(3) 海滩表层沉积物粒度特征的变化: 从横向上分异的变化上看, 因水动力对沉积物的分选, 粒径较细的沉积物随水流向海运动, 使得高滩和中滩粒径变粗, 低滩粒径变细; 从纵向上看, 因岬角的保护作用与沿岸输沙的影响, 海滩下岬角遮蔽段沉积物最稳定, 直线段和上岬角遮蔽段受水动力扰动显著。

(4) 砾石、砂和粉砂等沉积物在不同部位的不同组分含量的分布使海滩不同部位地貌特征各异, 风暴期间的强水动力使细粒泥沙向海输运、粗颗粒的砾石在滩面出露, 沉积物的一系列变化引起滩面地貌(如砾石带的变迁)的相应变化。

(5) 东沙海滩湾口朝向东南, 南北有岬角或海岛遮蔽, 这使得东南向浪对其地貌变化影响最大, 其沉积物主要源于风、水动力对近岸基岩的冲刷以及岛陆岩石的风化、搬运, 风暴的发生造成泥沙损失之后很难得到补给。两次风暴期间的风向均为能使研究区附近海域产生增水的风向, 水位的异常增高使得海滩剖面的冲淤表现更加明显, 海平面上升的累积效应也会加剧台风风暴潮和海岸侵蚀。

海堤的建立阻隔了泥沙来源使得海滩遭受侵蚀后得不到后方的补给,排水口流出的水流加剧了滩面的侵蚀,两次风暴中间的海滩补沙起到了一定的作用。

第7章 展望

7.1 存在的问题

与利用传统方法对 2014 年强热带风暴“娜基莉”的监测（郭俊丽等，2018）相比（表 5-2），运用 Argus 视频图像监测系统最突出的特点是不仅可以监测风暴前后海滩地形地貌的变化，还可以监测海滩在风暴发生整个期间的变化。我们从获得的数据中可以清楚地看到风暴“马勒卡”与风暴“暹芭”发生期间每一天的剖面冲淤量及海滩滨线的进退量，通过这些数据可以分析风暴发生期间海滩的整个变化过程。

但是，本次研究中，发现存在以下问题：

（1）因海滩长度较大，距离 Argus 观测站较远的海滩部位因像素限制无法获得更精准的地貌形态变化分析。平均垂向误差达到 14.5cm，这种精度能够满足海滩风暴的研究，但可能无法用于平常条件下海滩地形变化小的情况。

（2）模拟波浪结果与实际波浪存在一定误差，间接影响水边线高程的计算，进而导致冲淤量计算产生误差；

（3）沉积物的采集位置并不能保证两次采集完全一致，使得粒度结果有一定的误差。另外，第一次风暴后没有采样，无法对比第一次风暴后和第二次风暴后沉积物的差异。

（4）本论文对连续风暴作用下影响海滩变化因素的分析还只是定性的，既缺少对各个因素作用机制的深入探讨，也没有各因素对海滩变化贡献的定量分析。

表 5-2 两种监测方法在东沙海滩的应用对比

Table 5-2 The application of two methods on Dongsha Beach

监测方法	GPS RTK	Argus 视频图像监测
剖面数	12	15
测量时所耗人力	6	无
覆盖时间范围	风暴前后	风暴整个过程
风暴等级	强热带风暴	强台风、超强台风
平均单宽体积变化量	-6.12 m ³ /m	-73.75 m ³ /m、-54.56 m ³ /m
数据精度	~0.8 cm	~14.5 cm

7.2 未来的研究展望

(1) 从时间尺度上来讲, 受 Argus 系统监测时间较短、所获数据较少所限, 本论文只进行了短期风暴事件的研究。为了更加准确地掌握东沙海滩的动力地貌演变过程, 在后续的研究中, 计划利用 Argus 图像数据进行东沙海滩年际和季节性地貌演变规律的研究。

(2) 从空间尺度上来讲, 本研究仅仅提取并利用了海滩滩面地形数据, 而缺少水下地形数据, 显然, 这无法全面地反映海滩整个系统对风暴的响应特征。为此, 在后续的研究中, 计划利用 Argus 图像数据进行近岸水下地形反演的研究, 以更全面地了解东沙海滩对风暴的响应特征。

(3) 为更深入地掌握连续风暴作用下影响海滩变化的因素, 计划在现有研究的基础上, 对各个因素作用机制深入探讨, 定量分析各因素对海滩变化的贡献。

参考文献

- Aagaard T, Kroon A, Andersen S, et al. Intertidal beach change during storm conditions; Egmond, The Netherlands[J]. *Marine Geology*, 2005, 218(1-4):65-80.
- Aarninkhof S G J. Nearshore Bathymetry derived from Video Imagery[D]. Delft University Press, 2003.
- Alegria A R D, Masselink G, Kingston K, Williams J, Buscombe D. Monitoring storm impacts on a gravel beach using the Argus video system[J]. *Coastal Engineering*, 2008, 2633-2645.
- Alegria A R D, Masselink G. Storm response and beach rotation on a gravel beach, Slapton Sands, U.K.[J]. *Marine Geology*, 2010, 278(1-4): 77-99.
- Alegria A R D, Williams J J, Masselink G. Application of XBeach to model storm response on a macrotidal gravel barrier[J]. *Coastal Engineering Proceedings*, 2011,1(32): 39.
- Angnuureng D B, Almar R, Senechal N, et al. Shoreline evolution under sequences of storms from 6-year video observation at a meso-macrotidal beach[J]. *Coastal Sediments*, 2015: The Proceedings of the Coastal Sediments 2015.
- Archetti R, Romagnoli C. Analysis of the effects of different storm events on shoreline dynamics of an artificially embayed beach[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2011, 36(11): 1449-1463.
- Archetti R, Paci A, Carniel S, et al. Optimal index related to the shoreline dynamics during a storm: the case of Jesolo beach[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2015, 3(11):7089-7134.
- Archetti R, Paci A, Carniel S, Bonaldo D. Optimal index related to the shoreline dynamics during a storm: the case of Jesolo beach[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2016, 16: 1107-1122.
- Baart F, van Ormondt M, de Vries J V T, van Koningsveld M. Morphological impact of a storm can be predicted three days ahead[J]. *Computers & Geosciences*, 2016, 90: 17-23.
- Balouin Y, Giusti M, Tesson J, Gervais M. Morphological feedback between nearshore bars and shoreline dynamics during storm events-video observations at Sete beach,

- France[C]// 2013,151-160.
- Balouin Y, Tesson J, Gervais M. Cuspate shoreline relationship with nearshore bar dynamics during storm events-field observations at Sete beach, France.[J]. *Journal of Coastal Research*, 2013, 65(sp1): 440-445.
- Bastos A P, Lira C, Rui T, et al. Morphological storm threshold: an example from a pocket beach in the west Portuguese Coast[C]// 3ª Conferência Sobre Morfodinâmica Estuarina E Costeira - Mec. 2015.
- Bramato S, Ortega-Sánchez M, Mans C, Losada M A. Natural recovery of a mixed sand and gravel beach after a sequence of a short duration storm and moderate sea states[J]. *Journal of Coastal Research*, 2010, 28(1): 89-101.
- Brooks S M, Spencer T, Christie E K. Storm impacts and shoreline recovery: Mechanisms and controls in the southern North Sea[J]. *Geomorphology*, 2017, 283:48-60.
- Brown J, Ciavola P, Masselink G, Mccall R, Plater A. Preface to special issue: Monitoring and modelling to guide coastal adaptation to extreme storm events in a changing climate[J]. *Natural Hazards and Earth System Science*, 2016, 16: 463-467.
- Brunn P. Sea level as a cause of shore erosion[J]. *Journal of waterways and Harbour Division, ASCE*.1962, (88):117-130.
- Burvingt O, Masselink G, Russell P, et al. Classification of beach response to extreme storms[J]. *Geomorphology*, 2017, 295:722-737.
- Castelle B, Turner I L, Bertin X, et al. Beach nourishments at Coolangatta Bay over the period 1987–2005: Impacts and lessons[J]. *Coastal Engineering*, 2009, 56(9):940-950.
- Castelle B, Bujan S, Ferreira S, Dodet G. Foredune morphological changes and beach recovery from the extreme 2013/2014 winter at a high-energy sandy coast[J]. *Marine Geology*, 2017, 385: 41-55.
- Chen Z. Analysis of the dynamic characteristics and stochastic simulation on variations of beach volumes[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1995, 14(3):393-403.
- Coco G, Senechal N, Rejas A, et al. Beach response to a sequence of extreme storms[J]. *Geomorphology*, 2014, 204: 493-501.
- Davidson M, Koningsveld M V, Kruif A D, et al. The CoastView project: Developing

- video-derived Coastal State Indicators in support of coastal zone management[J]. *Coastal Engineering*, 2007, 54(6-7):463-475.
- Dinu I, Garcia M, Gracia V, et al. Using numerical modelling to analyze beach profiles response to extreme storms along the Danube Delta coast, Romania. *Geo-Eco-Marina*, 2017, 23:45-69.
- Enckevort I M J V, Ruessink B G. Effect of hydrodynamics and bathymetry on video estimates of nearshore sandbar position[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2001, 106(C8):16969-16979.
- Fairley I, Davidson M, Kingston K. A video based investigation into the morphological impacts of storms behind a series of detached breakwaters[C]// *Icee*. 2008.
- Folk R. and Ward W. Brazos River Bar: a study on the significance of grain size parameters[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1957, 27(1):3-26.
- Fragakis C. Preface to the special issue shore nourishment in europe [J]. *Coastal Engineering*, 2002, 47(2):79-80.
- Gervais M, Balouin Y, Certain R. A conceptual morphodynamic model including storm impacts for microtidal barred beaches[C]// *Coastal and Maritime Mediterranean Conference*. 2015.
- Gervais M, Balouin Y, Certain R. The major control parameters of storm morphological evolution on a microtidal barred beach[C]// *Coastal and Maritime Mediterranean Conference*. 2013.
- Ge Z, Shi H, Mei X, et al. Semi-automatic recognition of marine debris on beaches[J]. *Sci Rep*, 2016, 6:25759.
- Hamm L, Capobianco M, Dette H H, et al. A summary of European experience with shore nourishment[J]. *Coastal Engineering*, 2003, 47(2):237-264.
- Harley M, Turner I L, Short A D, et al. An empirical model of beach response to storms - SE Australia[C]// *Coasts and Ports*. 2009:623-4.
- Harley M D, Valentini A, Armaroli C, Perini L, Calabrese L, Ciavola P. Can an early-warning system help minimize the impacts of coastal storms? A case study of the 2012 Halloween storm, northern Italy[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2016,

- 16(1): 209-222.
- Holland, K. T. & R. A. Holman. Video estimation of foreshore topography using trinocular stereo. *Journal of Coastal Research*, 1997, 13(1):81–87.
- Holman R A, Stanley J. The history and technical capabilities of Argus[J]. *Coastal Engineering*, 2007, 54(6–7):477-491.
- Huisman B, De Schipper M A, Ruessink B G. Sediment sorting at the Sand Motor at storm and annual time scales[J]. *Marine Geology*, 2016, 381: 209-226.
- Janssen P C. Intertidal beach level estimation from video images[D]. Delft University of Technology. 1997.
- John G. Field, Gotthilf Hempel, Colin P. Summerhayes. 2020年的海洋科学、发展趋势和可持续发展面临的挑战[M]. 海洋出版社, 2004.
- Karunaratna H, Pender D, Ranasinghe R, et al. The effects of storm clustering on beach profile variability[J]. *Marine geology*, 2014, 348: 103-112.
- Komar P D. *Beach Processes and Sedimentation* [M]. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1976: 249-287.
- Komen G J. *Dynamics and modelling of ocean waves*[M]. Cambridge University Press, 1994.
- Koningsveld M V, Davidson M, Huntley D, et al. A critical review of the CoastView project: Recent and future developments in coastal management video systems[J]. *Coastal Engineering*, 2007, 54(6–7):567-576.
- Kroon A, Davidson M A, Aarninkhof S G J, et al. Application of remote sensing video systems to coastline management problems[J]. *Coastal Engineering*, 2007, 54(6–7):493-505.
- Lippmann, T. C. & R. A. Holman. Quantification of sand bar morphology: a video technique based on wave dissipation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 995–1011.
- Ma Y, Li G. Evolution history and trend of the modern Huanghe River Delta[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 29(2):40-52.
- Masselink G, Austin M, Scott T, Poate T, Russell P. Role of wave forcing, storms and NAO in outer bar dynamics on a high-energy, macro-tidal beach[J]. *Geomorphology*, 2014,

- 226: 76-93.
- Masselink G, Scott T, Conley D, et al. Regional variability in Atlantic storm response along the southwest coast of England[Z]. 2015.
- Masselink G, Scott T, Poate T, et al. The extreme 2013/2014 winter storms: hydrodynamic forcing and coastal response along the southwest coast of England[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2016, 41(3): 378-391.
- Mccall R T, Masselink G, Poate T, et al. Modelling the morphodynamics of gravel beaches during storms with XBeach-G[J]. *Coastal Engineering*, 2015, 103: 52-66.
- Morton R A and Sallenger A H Jr. Morphological impacts of extreme storms on sandy beaches and barriers[J]. *Journal of Coastal Research*, 2003, 19(3):560-573.
- Nelson T R, Hapke C J. SHOREFACE RESPONSE AND RECOVERY TO HURRICANE SANDY: FIRE ISLAND, NY[C]// *Coastal Sediments*. 2015:3000.
- Ojeda E, Guillén J. Shoreline dynamics and beach rotation of artificial embayed beaches[J]. *Marine Geology*, 2008, 253(1-2):51-62.
- Ojeda E, Guillén J, Ribas F. The morphodynamic responses of artificial embayed beaches to storm events[J]. *Advances in Geosciences*, 2010, 26(26):99-103.
- Plant N G, Holland K T, Puleo J A. Analysis of the scale of errors in nearshore bathymetric data[J]. *Marine Geology*, 2002, 191(1-2):71-86.
- Poate T, Masselink G, Mccall R M, Russell P, Davidson M. 2014. Storm-driven cusp behaviour on a high energy gravel beach[J]. *Journal of Coastal Research*, 70(sp1): 645-650.
- Poate T, Masselink G, Mccall R, et al. UK storms 2014: gravel beach response[M]//*The Proceedings of the Coastal Sediments 2015*.
- Poate T, Mccall R, Masselink G, et al. CONTRASTING STORM IMPACTS ON GRAVEL BEACHES—EXAMPLES FROM SOUTH ENGLAND[J]. *Coastal Engineering Proceedings*, 2012, 1(33): 84.
- Puig M, Del Río L, Plomaritis T A, et al. Contribution of storms to shoreline changes in mesotidal dissipative beaches: case study in the Gulf of Cádiz (SW Spain) [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2016, 16(12): 2543.

- Ranasinghe R, Holman R, Schipper M D, et al. Quantifying nearshore morphological recovery time scales using argus video imaging: Palm Beach, Sydney and Duck, North Carolina[C]// *ICCE*. 2012.
- Raber B, Sanabria A M, Sanchez J C. Mapping Colombia's coastline: LIDAR helps preserve fragile marine ecosystems. (Base Mapping) [J]. *Geo World*, 2007.
- Roberts T M, Wang P, Puleo J A. Storm-driven cyclic beach morphodynamics of a mixed sand and gravel beach along the Mid-Atlantic Coast, USA[J]. *Marine Geology*, 2013, 346: 403-421.
- Ruggiero P, List J H. Improving Accuracy and Statistical Reliability of Shoreline Position and Change Rate Estimates[J]. *Journal of Coastal Research*, 2009, 25(5):1069-1081.
- Russ J C. *The Image Processing Handbook*, 4, Edition[M]. 1995.
- Ruessink B G, Grinten R M V D, Vonhögen-Peeters L, et al. Nearshore evolution at Noordwijk (NL) in response to nourishments, as inferred from Argus video imagery[J]. University of Twente, 2012.
- Sancho-García A. Beach inundation and morphological changes during storms using video monitoring techniques[D]. Universitat Politècnica De Catalunya, 2012.
- Sancho-García A, Guillén J, Ojeda E. Storm-induced readjustment of an embayed beach after modification by protection works[J]. *Geo-Marine Letters*, 2013, 33(2-3): 159-172.
- Scott T, Masselink G, O'Hare T, Davidson M, Russell P. 2015. Multi-annual sand and gravel beach response to storms in the southwest of England[M]//*The Proceedings of the Coastal Sediments 2015*.
- Scott T, Masselink G, O'Hare T, et al. The extreme 2013/2014 winter storms: Beach recovery along the southwest coast of England[J]. *Marine Geology*, 2016, 382.
- Senechal N, Coco G, Castelle B, et al. Storm impact on the seasonal shoreline dynamics of a meso- to macrotidal open sandy beach (Biscarrosse, France)[J]. *Geomorphology*, 2015, 228:448-461.
- Sherman D J, Hales B U, Potts M K, et al. Impacts of Hurricane Ike on the beaches of the Bolivar Peninsula, TX, USA[J]. *Geomorphology*, 2013, 199(5):62-81.
- Siegle E, Huntley D A, Davidson M A. Coupling video imaging and numerical modeling

- for the study of inlet morphodynamics, *Marine Geology*, 2007, 236, 143–167.
- Simpson R H, Riehl H. The hurricane and its impact[J]. *Geographical Journal*, 1981, 149(1):88.
- Splinter K D, Strauss D R, Tomlinson R B. Assessment of post-storm recovery of beaches using video imaging techniques: a case study at Gold Coast, Australia[J]. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 2011,49(12): 4704-4716.
- Splinter K D, Carley J T, Golshani A, et al. A relationship to describe the cumulative impact of storm clusters on beach erosion[J]. *Coastal Engineering*, 2014, 83(83):49-55.
- Thornton E, Dalrymple T, Drake T, et al. State of Nearshore Processes Research: II[J]. *Usace Wes Cedas Hypas*.www.usace.army.mil, 2000.
- U.S. Army coastal engineering research center Shore protection manual[M] U.S. Government printing office Washington,DC,20402,1975.
- Veenstra J. Operational storm impact forecast information for the coast: design, implementation in MorphAn and evaluation of an operational coastal storm impact application[D]. 2016.
- Williams A T, Leatherman S P, Simmons S L.Beach aesthetic values: the SW peninsula[R]. UK. Proc. Int. Coastal Congress, 1992, 251-262.
- Wright L D, Short A D. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis[J]. *Marine Geology*, 1984, 56(1):93-118.
- Xiao S, Li A, Liu J, et al. Coherence between solar activity and the East Asian winter monsoon variability in the past 8000 years from Yangtze River-derived mud in the East China Sea[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2006, 237(4):293-304.
- Yates M L, Guza R T, O'Reilly W C. Equilibrium shoreline response: Observations and modeling[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2009, 114.
- Yoon H S, Kang T S, Nam S Y, et al. Measuring coastline morphodynamics using video-based techniques at Haeundae Beach, South Korea[J]. *Journal of Coastal Research*, 2007, 50(50):1106-1111.
- Yu F, Switzer A D, Lau A Y A, et al. A comparison of the post-storm recovery of two sandy

- beaches on Hong Kong Island, southern China[J]. *Quaternary International*, 2013, 304: 163-175.
- Zhu Z. Storm Induced Beach Profile Changes along the Coast of Treasure Island, West-Central Florida, USA[D]. *Graduate Theses and Dissertations*. 2016.
- 蔡锋, 苏贤泽, 杨顺良, 等. 厦门岛海滩剖面对9914号台风大浪波动力的快速响应[J]. *海洋工程*, 2002, 20(2):85-90.
- 蔡锋, 苏贤泽, 夏东兴. 热带气旋前进方向两侧海滩风暴效应差异研究--以海滩对0307号台风“伊布都”的响应为例[J]. *海洋科学进展*, 2004, 22(4):436-445.
- 蔡锋. 华南沙质海滩动力地貌过程[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.
- 蔡锋, 雷刚, 苏贤泽, 等. 台风“艾利”对福建沙质海滩影响过程研究[J]. *海洋工程*, 2006, 24(1):98-109.
- 蔡锋, 戚洪帅, 夏东兴. 华南海滩动力地貌过程[M]. 北京: 海洋出版社, 2008:11-12.
- 蔡锋. 中国海滩养护技术手册[M]. 北京: 海洋出版社, 2015:1-10.
- 陈洪德, 严钦尚, 项立嵩. 舟山朱家尖岛 现代海岸沉积[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 1982(2):80-94.
- 陈吉余. 中国历史时期的海岸线[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1988
- 陈吉余, 陈沈良. 河口海岸环境变异和资源可持续利用[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2002, 22(2):1-7.
- 陈吉余. 中国海岸侵蚀概要[M]. 北京: 海洋出版社, 2010.
- 夏小明. 中国海岛志浙江卷第二册[M]. 北京: 海洋出版社, 2014, 371-458.
- 陈燕萍. 海南博鳌海滩表层沉积物粒度特征及其对风暴过程的响应[D]. 华东师范大学, 2012.
- 陈子燊. 弧形海岸海滩地貌对台风大浪的响应特征[J]. *科学通报*, 1995, 40(23):2168-2170.
- 陈子燊. 海滩剖面时空变化过程分析[J]. *海洋通报*, 2000, 19(2):42-48.
- 陈子燊, 王扬圣, 黄德全, 等. 台风影响下海滩前滨剖面时间变化差异性分析[J]. *热带海洋学报*, 2009, 28(6):1-6.
- 程林, 时连强, 夏小明, 等. 浙江朱家尖岛东沙海滩沉积与地貌动态变化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2014(1):37-44.

- 戴志军, 陈子, 李春初. 岬间海滩剖面短期变化的动力作用分析[J]. 海洋科学, 2001, 25(11):38-41.
- 戴志军, 李春初. 华南弧形海岸动力地貌过程[M].上海: 华东师范大学出版社,2008.
- 冯哲, 王永红, 易李达玲.岬湾海滩剖面中长期变化特征及其控制因素——以青岛石老人海滩为例[J]. 海洋科学, 2016, 40(7):100-109.
- 龚昊, 陈沈良, 钟小菁, 等.海南岛东北部海滩侵蚀与恢复对连续台风的复杂响应[J]. 海洋学报, 2017, 39(5):68-77.
- 龚昊.海滩的侵蚀与恢复对连续台风的复杂响应[D]. 华东师范大学, 2017.
- 国家海洋局.2016年中国海平面公报[R].2016.
- 国家海洋局第二海洋研究所.浙江省海岛海岸带调查成果集成报告[R].2012.
- 郭俊丽, 时连强, 童宵岭等.浙江朱家尖岛东沙海滩对强热带风暴“娜基莉”的响应及风暴后的恢复[J].海洋学报. (录用待刊)
- 雷刚. 福建砂质海岸沉积地貌的风暴效应研究[D]. 国家海洋局第三海洋研究所, 2005.
- 雷刚, 蔡锋. 福建江田下沙沙滩沉积地貌组合对台风的响应模式[J]. 台湾海峡, 2005, 24(3):395-403.
- 李明杰, 吴少华, 刘秋兴,等. 风暴潮、大潮对广西涠洲岛西南沙滩侵蚀的影响分析[J]. 海洋学报, 2015, 37(9):126-137.
- 黎树式,戴志军,葛振鹏,等.强潮海滩响应威马逊台风作用动力沉积过程研究——以北海银滩为例[J]. 海洋工程, 2017, 35(3):89-98.
- 李占海,柯贤坤,周旅复. 海滩旅游资源质量评比体系[J]. 自然资源学报, 2000, 15(3):229-235.
- 李志龙,陈子燊,戴志军.粤东汕尾岬间海滩体积短期变化分析[J].中山大学学报(自然科学版), 2004, 43(2):112-116.
- 刘海江,时连强.海岸带实时实地视频观测ARGUS技术[J].海洋工程,2016, 34(2):80-87.
- 陆建新. 浙江省908专项海岛调查区域气候专题调查研究报告[R]. 杭州:浙江省海洋监测预报中心, 2010, 54-67.
- 罗光富, 邓兵, 杨世伦. 长江水下三角洲向南延伸泥质带浅地层结构及沉积物特征初探——以朱家尖岛以东海域为例[J]. 沉积学报, 2014, 32(2):296-305.
- 罗时龙, 蔡锋, 王厚杰. 海岸侵蚀及其管理研究的若干进展[J]. 地球科学进展, 2013,

- 28(11):1239-1247.
- 骆永明. 中国海岸带可持续发展中的生态环境问题与海岸科学发展[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(10):1133-1142.
- 彭俊, 蔡锋, 雷刚. 0418号台风过境后近岸沉积物粒度特征参数的变化分析[J]. 海洋湖沼通报, 2008(2):37-45.
- 邵超, 戚洪帅, 蔡锋,等. 海滩-珊瑚礁系统风暴响应特征研究--以1409号台风“威马逊”对清澜港海岸影响为例[J]. 海洋学报, 2016, 38(2):121-130.
- 童宵岭, 时连强, 夏小明,等. 1211号台风对浙江象山皇城海滩剖面的影响分析[J]. 海洋工程, 2014, 32(1):84-90.
- 王宝灿, 黄仰松. 海岸动力地貌[M]. 华东师范大学出版社, 1989.
- 王宏基. 山东半岛波浪能资源的调查与模拟分析研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014
- 王雷, 李晓丽, 徐哲永. 近50年影响舟山的台风气候特征分析[J]. 海洋预报, 2011, 28(5):36-43.
- 王永红. 海岸动力地貌学[M]. 科学出版社, 2012.
- 王颖. 中国海洋地理[M]. 科学出版社, 1996.
- 王颖, 朱大奎. 海岸地貌学[M]. 高等教育出版社, 1994.
- 吴晗, 杨世伦, 邓兵,等. 长江口外泥沙向南输运速率的变化探讨——以朱家尖岛附近海域为例[J]. 上海国土资源, 2014, 35(1):77-82.
- 吴建, 拾兵. 近岸补沙养护海滩研究综述[J]. 海洋科学, 2011, 35(8):108-112.
- 夏东兴, 王文海, 武桂秋,等. 中国海岸侵蚀述要[J]. 地理学报, 1993(5):468-476.
- 项素清. 舟山港台台风风暴潮的分析及预报[C]// 中国气象学会2003年年会“热带气旋和季风”分会. 2003:35-39.
- 向荣, 杨作升, 郭志刚,等. 济州岛西南泥质区粒度组分变化的古环境应用[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2005, 30(5):582-588.
- 许浩恩, 陈海燕, 赵璐. 浙江影响热带气旋的几个统计特征[J]. 浙江气象, 2009, 30(2):4-8.
- 杨世伦. 海岸环境和地貌过程导论[M]. 海洋出版社, 2003.
- 于吉涛, 陈子燊. 砂质海岸研究进展[J]. 热带地理, 2009, 29(2), 112-116.
- 于吉涛, 丁圆婷, 程璜鑫,等. 0709号台风影响下粤东后江湾海滩地形动力过程研究[J].

- 海洋学报, 2015, 37(5):76-86.
- 岳保静, 廖晶, 高茂生, 等. 山东半岛砂质海滩动力地貌演化特征[J]. 海洋科学, 2017, 41(4):118-127.
- 张朝阳, 杨世伦, 罗向欣, 等. 舟山群岛朱家尖岛以东近岸海域沉积物粒度特征[J]. 上海国土资源, 2012, 33(4):39-43.
- 张国栋, 王益友, 朱静昌, 等. 现代滨岸风暴沉积——以舟山普陀岛、朱家尖岛为例[J]. 沉积学报, 1987(2):21-32, 150-151.
- 张锁平, 张春田. 近海视频测量与应用[J]. 海洋技术学报, 2006, 25(1):11-19.
- 赵玉杰. 沙滩游憩价值评估综述[J]. 海洋开发与管理, 2007, 24(3):113-116.
- 郑承忠, 翁宇斌, 杨顺良. 厦门岛东南岸沙滩近期剖面变化研究[J]. 热带海洋学报, 2005, 24(4):73-80.

在校期间发表论文情况

郭俊丽, 杨旻, 高建华, 张晨晨, 盛辉, 白凤龙, 张道来. 浙闽沿岸泥质区南部表层沉积物中多环芳烃的分布、来源及生态风险评价[J]. 海洋环境科学, 2017, 36(6): 826-831.

郭俊丽, 时连强, 童宵岭, 郑禹君, 徐岱璐, 蒋祖荫. 浙江朱家尖岛东沙海滩对强热带风暴“娜基莉”的响应及风暴后的恢复[J]. 海洋学报 (已录用).

张晨晨, 高建华, 郭俊丽, 盛辉, 白凤龙, 张道来. 长江口及废黄河口海域表层沉积物中多环芳烃分布特征和生态风险评价[J]. 海洋通报, 2018, (1): 38-44.

晁海娟, 高建华, 贾建军, 张晨晨, 郭俊丽, 薛成凤. 长江口及其邻近海域表层沉积物的有机质物源变化分析[J]. 海洋环境科学, 2017, 36(2): 237-242.

致谢

时光匆匆，三年硕士生活即将结束。在南京大学和海洋二所的这三年美好时光令我非常不舍，无论是学习还是生活我都成长许多。硕士阶段是人生中十分珍贵的一段，我将永远铭记在这期间的每一刻。

首先要感谢我的导师时连强老师和高建华老师。从开学课程的选择、室内数据处理、野外工作准备与实践，到毕业论文的定稿，时老师都悉心指导，在我每一次遇到挫折时耐心地帮助我走出困境，在生活和学业上引导我积极向上使我不断成长。从开始对海滩研究一无所知，到河海研讨会上做口头报告，时老师无私地提供了一切实践与交流的机会使我不断进步。高老师对己对人的严谨态度时刻影响着我們，从开始对海洋的懵懂到深入了解，跟着高老师从丹东到北海几乎走遍了整个东部沿海，每一次野外与室内工作都使我受益颇多。感恩在硕士这三年遇到两位老师，借此机会向二位老师表达诚挚的谢意。

感谢叶清华老师在波浪模拟、图像数据处理方面的帮助，感谢汪亚平老师、夏小明老师、贾建军老师、杨旻老师、陈一宁老师、陆莎莎博士、范亦婷秘书、沈刚博士在三年的学习与生活中提供的建议与帮助，感谢赵宁曦老师在我初到南大时的指导与建议，感谢南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室与国家海岛开发与管理研究中心的各位老师三年来的谆谆教诲，使我在人生与求学的道路上均获益良多。

感谢王欣凯师兄提供波浪模型所需要的岸线、水深数据和技术指导，感谢蔡廷禄师兄、刘毅飞师兄在野外工作中的指导与关照，感谢童宵岭师兄、李源师兄、陈仁哲师兄、郑禹君、徐岱璐、蒋祖荫帮助采集与分析样品，感谢张晨晨、黄梅、盛辉、熊吉连、吕存娟、薛成凤三年来的照顾，感谢于睿师兄、晁海娟师姐在小论文写作时的帮助，感谢刘强、夏添、艾乔、孙鸿程、黄思龙和昆山楼 409 的每一位同学营造愉悦的学习生活环境。

感谢我的男朋友常洋在我论文写作整个过程中的鼓励、陪伴与技术支持，从数据处理到论文写作、修改都使我充满力量，有你的每一天都是开心快乐的。感谢我的父母和妹妹为我营造温馨的家庭环境，给我满满的爱使我快乐地成长。

本研究受到海洋公益性行业科研专项（201405037）和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项（JT1303）资助。

《学位论文出版授权书》

本人完全同意《中国优秀博硕士学位论文全文数据库出版章程》(以下简称“章程”),愿意将本人的学位论文提交“中国学术期刊(光盘版)电子杂志社”在《中国博士学位论文全文数据库》、《中国优秀硕士学位论文全文数据库》中全文发表。《中国博士学位论文全文数据库》、《中国优秀硕士学位论文全文数据库》可以以电子、网络及其他数字媒体形式公开出版,并同意编入《中国知识资源总库》,在《中国博硕士学位论文评价数据库》中使用和在互联网上传播,同意按“章程”规定享受相关权益。

作者签名: 邵连强
2018年5月28日

论文题名	基于 Argus 监测数据的海滩对连续风暴的响应研究——以舟山东沙海滩为例				
研究生学号	MG1527009	所在院系	地理与海洋科学学院	学位年度	2018 年
论文级别	<input checked="" type="checkbox"/> 硕士 <input type="checkbox"/> 博士	<input type="checkbox"/> 硕士专业学位 <input type="checkbox"/> 博士专业学位			(请在方框内画钩)
作者 Email					
导师姓名	时连强、高建华				

论文涉密情况:

不保密

保密, 保密期 (年 月 日 至 年 月 日)

注: 请将该授权书填写后装订在学位论文最后一页(南大封面)。