

基于 Argus 图像的舟山东沙海滩对连续 风暴的响应研究*

郭俊丽^{1,2} 时连强² 陈沈良¹ 叶清华³

(1. 华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室 上海 200241; 2. 自然资源部第二海洋研究所 国家海岛开发与
管理研究中心 杭州 310012; 3. 荷兰三角洲研究院 代尔夫特 2614HV)

摘要 海滩对风暴的响应是一个复杂的过程,尤其在连续风暴发生时。本研究利用 Argus 视频监测系统拍摄连续图像,从海滩地貌、剖面、海滩滨线、海滩宽度等方面,定量分析了舟山东沙海滩对连续风暴“马勒卡”和“暹芭”的响应特征,并初步探讨了影响海滩地形地貌变化对连续风暴响应的因素。结果表明:(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 $-54.56\text{m}^3/\text{m}$,风暴“马勒卡”使整个海滩滨线平均后退 14.75m,风暴“暹芭”使得海滩滨线相对于两次风暴前后退 10.91m;(2)在海滩自身因素、外部动力因素以及人类活动等共同作用下海滩对连续风暴产生了复杂的响应。

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

中图分类号 P737.1; P714+.7 doi: 10.11693/hyhz20181200285

在全球变化和人类活动的影响下,目前海滩正面临普遍侵蚀和退化之势。全球有 70% 的砂质海岸遭受侵蚀(陈吉余, 2010),我国则有 49.5% 的砂质海岸处于侵蚀状态(罗时龙等, 2013)。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。近年来,风暴所引起的海滩严重侵蚀在全球各地频繁发生,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问题(Dinu *et al.*, 2017),尤其是连续风暴事件及其引起的海滩变化对于理解海岸演化和评估风暴危害具有重要意义(Zhong *et al.*, 2017)。

海滩对连续风暴的响应在国外已有不少研究,学者们主要针对岸线和海滩宽度的变化进行分析(Yoon *et al.*, 2007)。不同类型的海滩对连续风暴的响应是不同的,研究表明开敞型的海滩受风暴影响更为显著(Puig *et al.*, 2016)。而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(Karunaratna *et al.*, 2014)。但目前国内对于海滩应对风暴的研究报道多集中于对单个风暴的研究(蔡锋等, 2006; 陈子燊等, 2009; Qi *et al.*, 2010),且多以海滩剖面和沉积物粒度特征分析海滩对风暴的响应。

目前有多种技术被用于海滩监测,包括利用 Real-time kinematic Global Positioning System (RTK GPS)、Differential Global Positioning System (DGPS) 和 Light Detection And Ranging (LiDAR) 等对海滩风暴前后的状况进行监测(Ge *et al.*, 2017; 郭俊丽等, 2018)。近年来,Argus 等视频图像监测系统也逐渐被应用。每种监测方法都有其优缺点,但在风暴发生时最经济可行的监测技术-视频图像监测优势突出(Archetti *et al.*, 2016)。鉴于此,本文以浙江舟山东沙海滩为例,利用 Argus 监测数据以及东沙海滩近岸水动力数据,深入开展海滩对连续风暴的响应研究,为海滩可持续利用与养护管理提供科学依据。

* 海洋公益性行业科研专项经费项目, 201405037 号。郭俊丽, 博士研究生, E-mail: jlguo0826@163.com

通信作者: 时连强, 正高级工程师, E-mail: lqshi@sio.org.cn

收稿日期: 2018-12-04, 收修改稿日期: 2019-01-14

1 材料与方法

1.1 研究区域与风暴概况

1.1.1 研究区域 东沙滩位于浙江省舟山市朱家尖岛的东部(图 1), 全长约 1440m, 宽约 250m, 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(郭俊丽等, 2018)。研究区冬、春季盛行风向为 NW、NNW, 夏季盛行风向为 SSE、SE。所处海域波浪年平均波高 0.5m, 年平均周期 3.6s, 常波向为 N、NE、SE, 大浪多集中于 8—10 月, 以风浪为主。该区域潮汐性质为正规半日潮, 潮流流向为 SE-NW, 平均潮差 2.5—2.8m (夏小明等, 2014)。

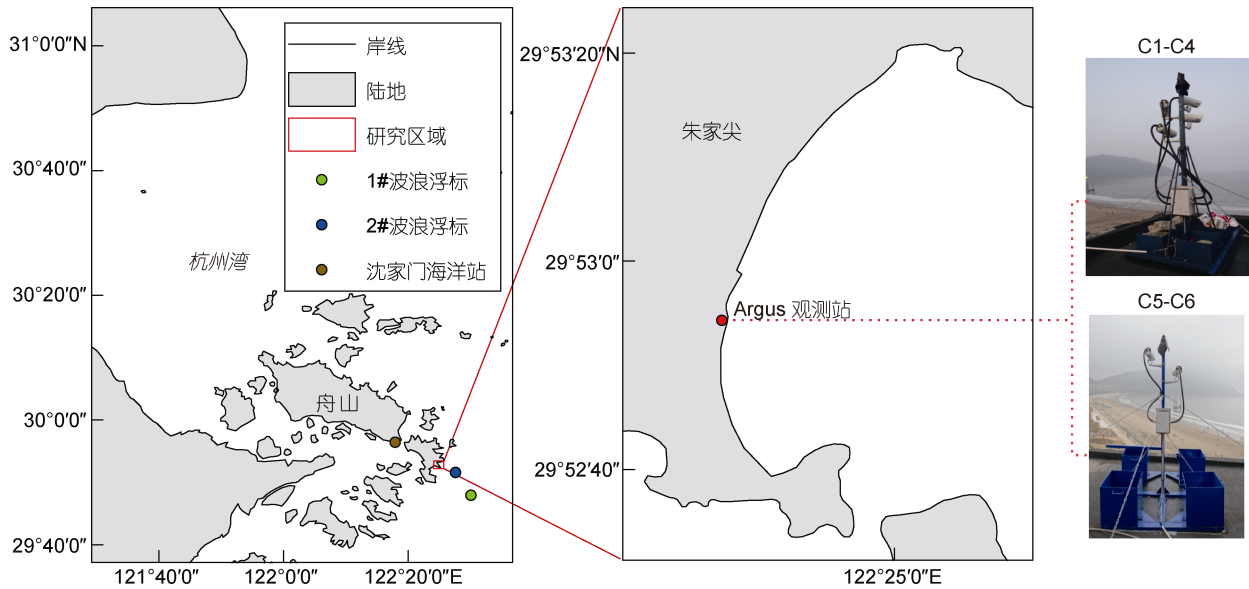


图 1 研究区域及 Argus 观测站位置示意

Fig.1 Location of the study area and the Argus observation station

1.1.2 风暴概况 1949—2016 年浙江省共有 43 个台风登陆, 登陆的台风个数有明显的上升趋势。每年平均登陆 1.2 个, 7—9 月是台风登陆最多的季节(许浩

恩等, 2009)。2016 年虽没有台风登陆, 但显著影响研究区的风暴有 2 个且时间接近, 即风暴“马勒卡”和风暴“暹芭”(移动路径如图 2)。

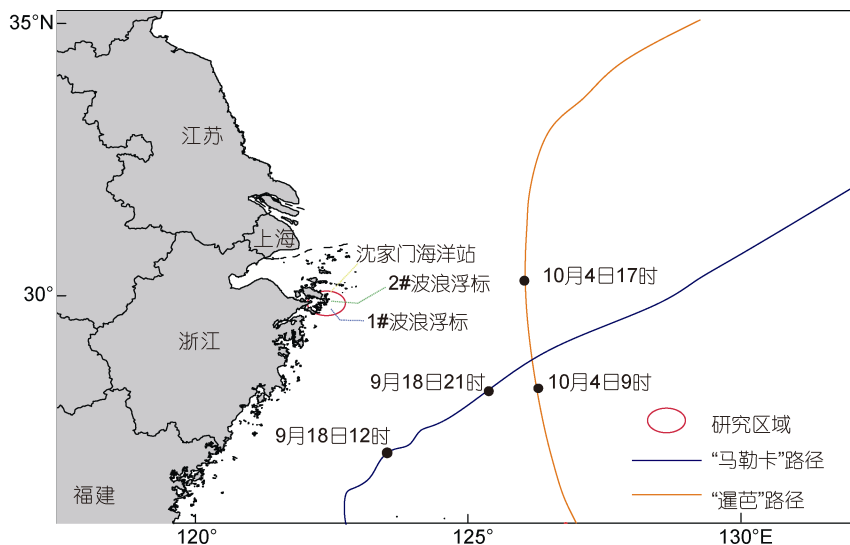


图 2 风暴“马勒卡”、“暹芭”路径图

Fig.2 The route of storm “Malakas” and “Chaba”

风暴“马勒卡”(Malakas)9月13日2时在西北太平洋海域生成,9月15日20时升级为强台风,中心最大风速达42m/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。风暴“暹芭”(Chaba)9月28日2时在西北太平洋海域生成,10月2日8时升级为超强台风。10月4日9时开始影响浙江东部海域。10月4日17时左右“暹芭”与舟山群岛附近擦肩而过(风暴数据获取自台风路径实时发布系统: <http://typhoon.zjwater.gov.cn>)。

1.2 数据获取与处理

1.2.1 数据获取 自2015年5月Argus视频监测系统安装在舟山东沙海滩安装成功后(图1),已经获得了实时且连续的监测图像数据,包括瞬时图像、时均图像、方差图像(Aarninkhof, 2003),图像分辨率为2448×2048像素。本研究主要利用时均图像分析海滩的变化。从图像数据集中选取2016年9月16—21日(风暴“马勒卡”前后)以及2016年10月4—5日(风暴“暹芭”前后)的图像进行分析处理。

为获得波浪数据,在近岸布设了两个浮标进行波浪观测,如图2所示,其中1#浮标位置为(122.5°E, 29.8°N),2#浮标位置为(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,观测仪器采用挪威的声学多普勒剖面流速仪(Acoustic Wave and Current, AWAC)。由于海滩前沿潮位和湾口潮位差别不大,因此本研究直接采用距研究区最近的沈家门海洋站(29.93°N, 122.3°E, 距研究区约12.83km)获取的潮位数据。

1.2.2 数据处理 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。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。深水区波浪数据由1#波浪浮标(水深约20m)测得,以此为边界条件,结合地形水深、岸线以及风速风向数据,采用正交网格,建立Delft3D SWAN波浪模型(Komen *et al.*, 1994)。模型的计算范围在29.75°—30°N和122.2°—122.9°E,主要包括朱家尖岛东部海域,模型的网格大小约为:100m×100m。获取用于验证模型结果数据的2#波浪浮标(水深大约16m)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)。为保证模型模拟结果的可靠性,我们将2#波浪浮标观测到的数据

与同时间段模拟结果进行对比验证,结果表明误差(有效波高相对误差:18.87%;波周期相对误差:11.79%)在可以接受的范围之内。此后,将模拟得到的海滩前沿波高和周期与实测潮位数据一同输入到Argus水边线模型中。

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Inertial Beach Mapper(IBM)应用模块获取的,利用Argus视频图像监测系统*iBathy*模块可以获得整个滩面的地形数据(Aarninkhof, 2003)。为了验证通过*iBathy*插值所获地形数据的准确性,我们使用RTK GPS于2016年5月4日对东沙海滩又进行了现场勘测,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85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。将RTK GPS数据及Argus地形插值结果中对应点的高程进行比较(图3),发现垂向相对误差为15%,所有控制点高程误差平均值为0.145m,小于视频监测系统设计时的误差最大值0.25m。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,得出平面距离误差平均值为11.73m(剔除异常值),误差值主要集中在0—10m,误差众数在允许范围(0.5—20m)内(Holland *et al.*, 1997; Aarninkhof, 2003)。垂向和平面误差均在可接受范围内,可进行下一步计算。

验证Argus所获地形数据的准确性后,我们通过分析潮间带海滩体积变化和海滩滨线位置表征海滩的冲淤变化(Holland *et al.*, 1997; Aarninkhof, 2003)。为便于分析,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 6个摄像头融合图像为基础,在滩面上每隔100m设置一条剖面,从北向南依次设置15条(由*y*=900到*y*=-500,图4)。

2 结果与分析

通过分析海滩剖面变化可以较好地掌握海滩对风暴的响应状况,本文首先通过Argus视频监测系统的地形反演模块获得海滩的地形插值数据,然后以此为基础进行剖面单宽淤积量、海滩滨线位置变化量、海滩出露水面宽度等的计算,进而分析东沙海滩的地形对风暴的响应。

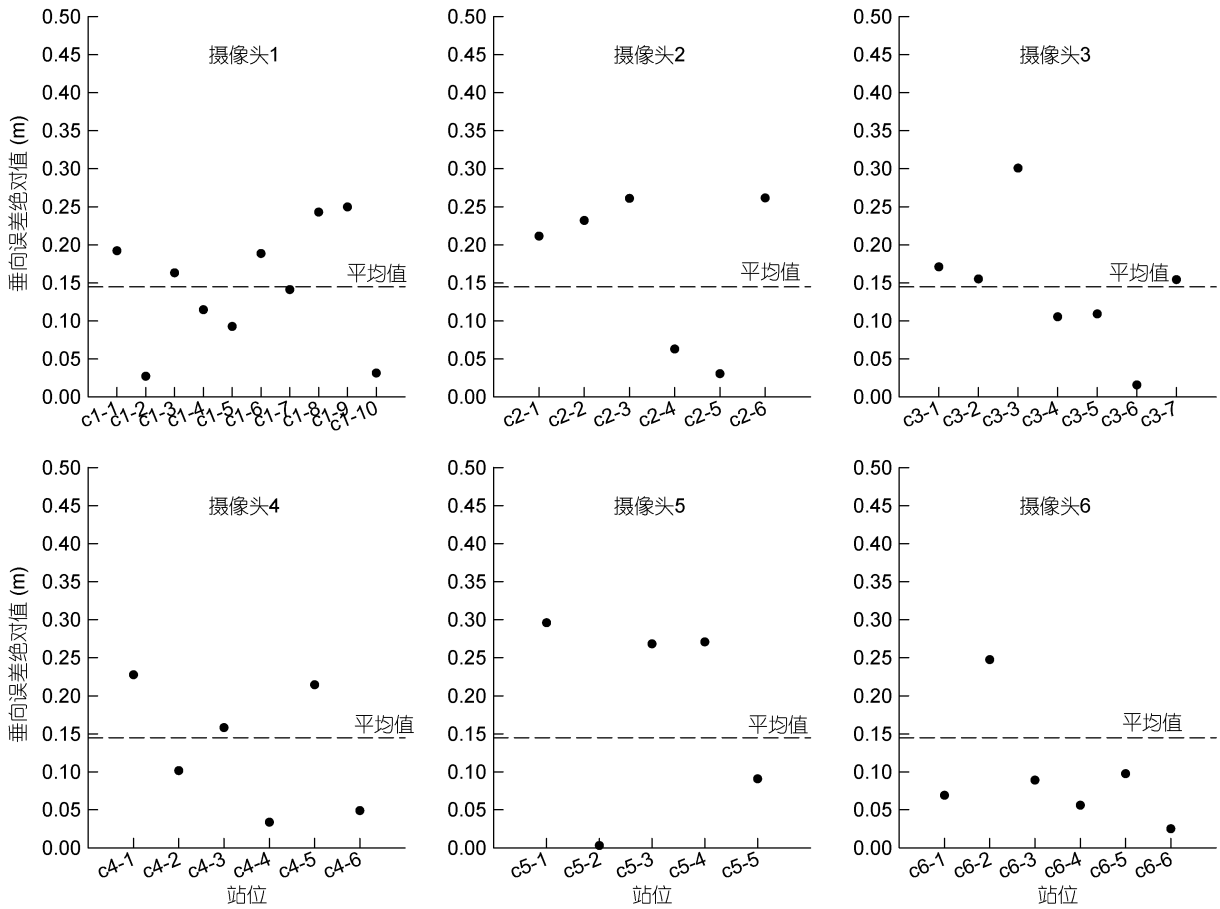


图 3 各摄像头垂向误差验证

Fig.3 Verification of vertical errors of each camera

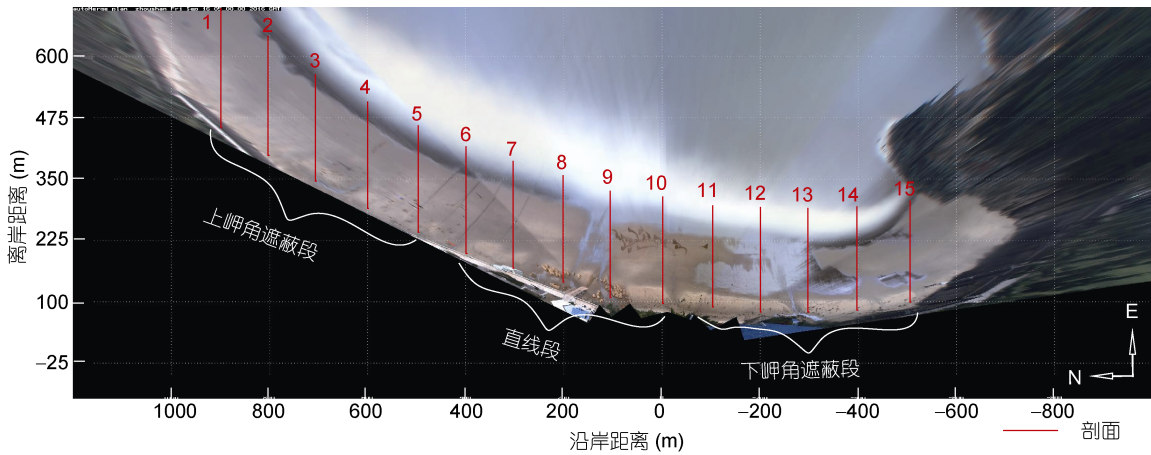


图 4 剖面设置图

Fig.4 The section settings

2.1 海滩滨线及出露水面的海滩宽度的响应

通过提取每个剖面滨线的位置(图 5), 我们计算出了海滩滨线的进退量。结果表明风暴“马勒卡”使整个海滩滨线相对于风暴前平均向陆后退了 14.75m, 而风暴“暹芭”使得海滩滨线相对于两次风暴前后退

了 10.91m。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。

本文以海堤为上界、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,结果显示在正常波况下,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 113.06m,第一次风暴发生后海滩宽度变为 98.31m,第二次风暴发生后宽度则又变为 102.15m。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。

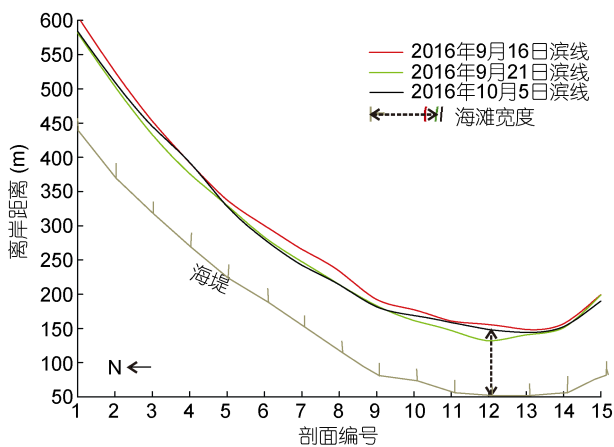


图5 风暴前后海滩滨线位置变化及海滩宽度示意图
Fig.5 Changes in the position of the intertidal shoreline and beach width before and after storms

2.2 风暴期间海滩剖面的冲淤及形态变化

由图 6a 可知,风暴“马勒卡”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,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6b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,有沿岸的分异现象(图6c)。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6d、图6e所示。在随后风暴“暹芭”过后,海滩再遭受了较

严重的侵蚀,其中直线段侵蚀最为严重,15个剖面平均单宽侵蚀 $54.56\text{m}^3/\text{m}$ (图6f、图6g)。

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。

2.2.1 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的冲淤分布不一致。从每个剖面的冲淤分布来看(图7),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。风暴“暹芭”发生后剖面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。

2.2.2 直线段 东沙海滩直线段(剖面6—10)在风暴“马勒卡”发生前后普遍侵蚀(图8),各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多年平均海平面为界,多年平均海平面上呈现为侵蚀状态、以下为轻微淤积。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,但各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4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,连续的风暴明显加剧了直线段剖面的侵蚀。

2.2.3 下岬角遮蔽段 由图9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,各剖面单宽淤积量由北至南的侵蚀强度大致呈现逐渐变弱的趋势。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,且在沿岸上未呈现出明显的体积变化规律。

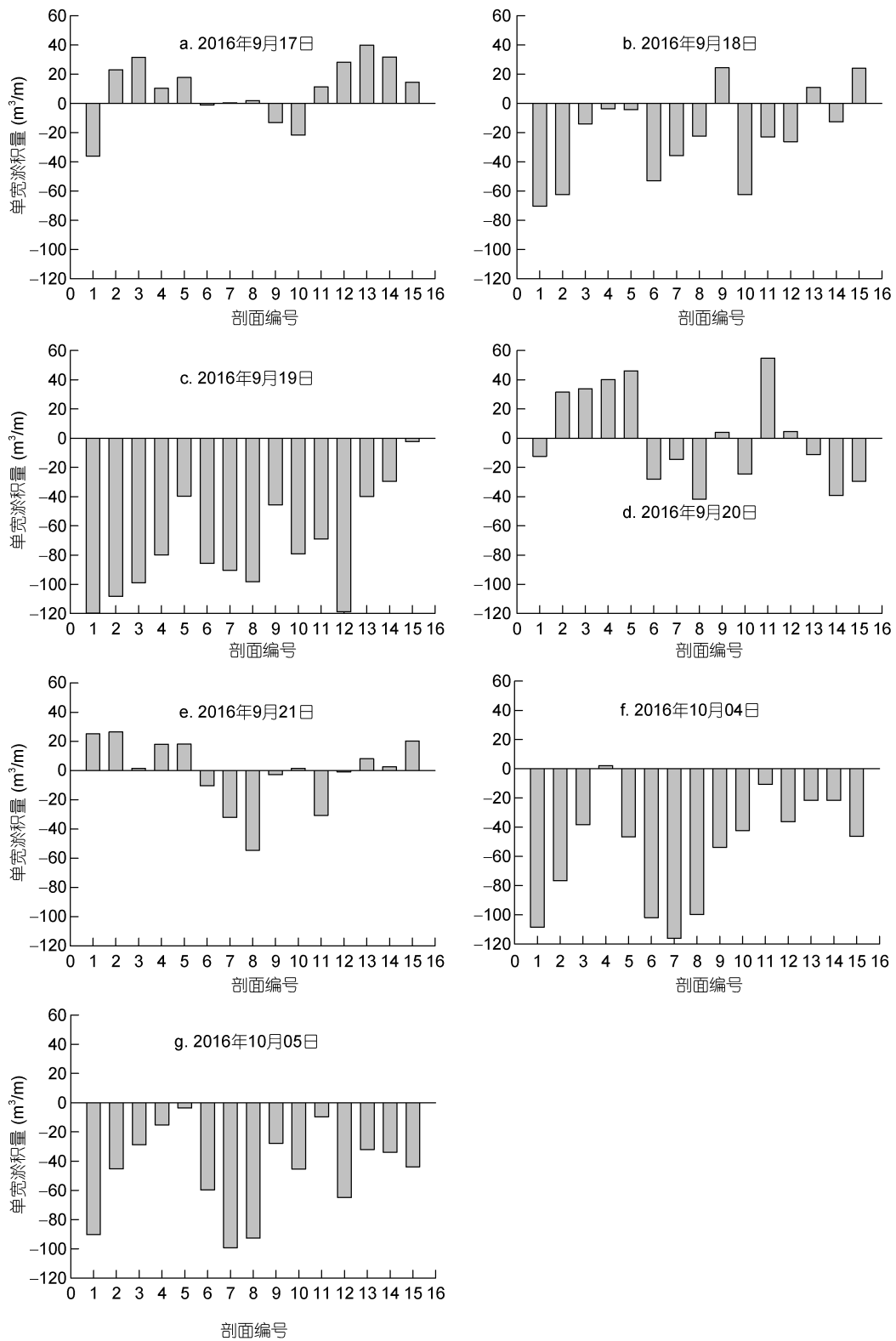


图 6 风暴发生期间各剖面单宽体积变化量
Fig.6 Single-width volume change of various sections during storms

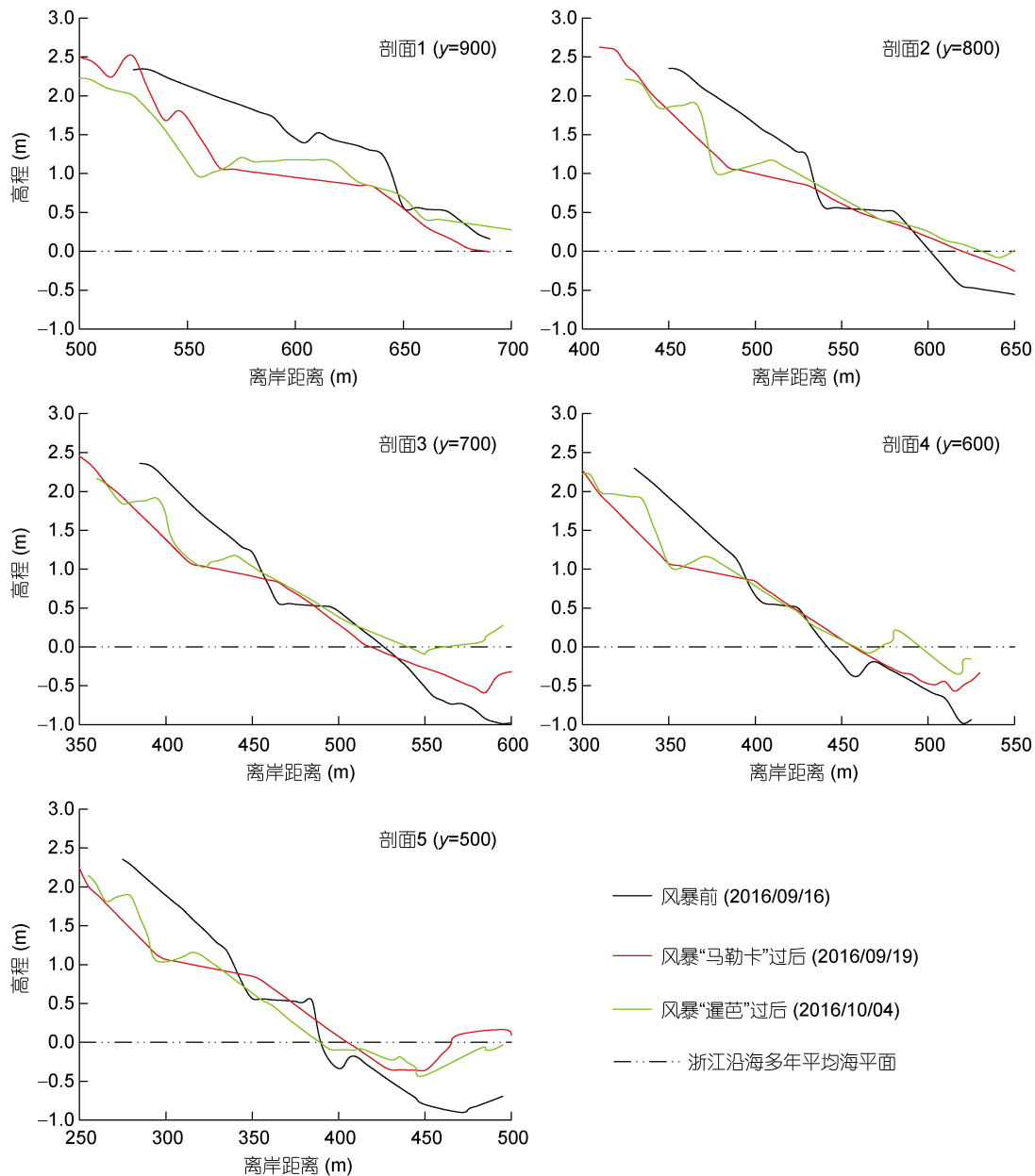


图7 上岬角遮蔽段剖面
Fig.7 Sections of the upper shadow zone

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。

3 讨论

东沙海滩的冲淤变化对连续风暴“马勒卡”和“暹芭”的响应,可从海滩自身因素(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。

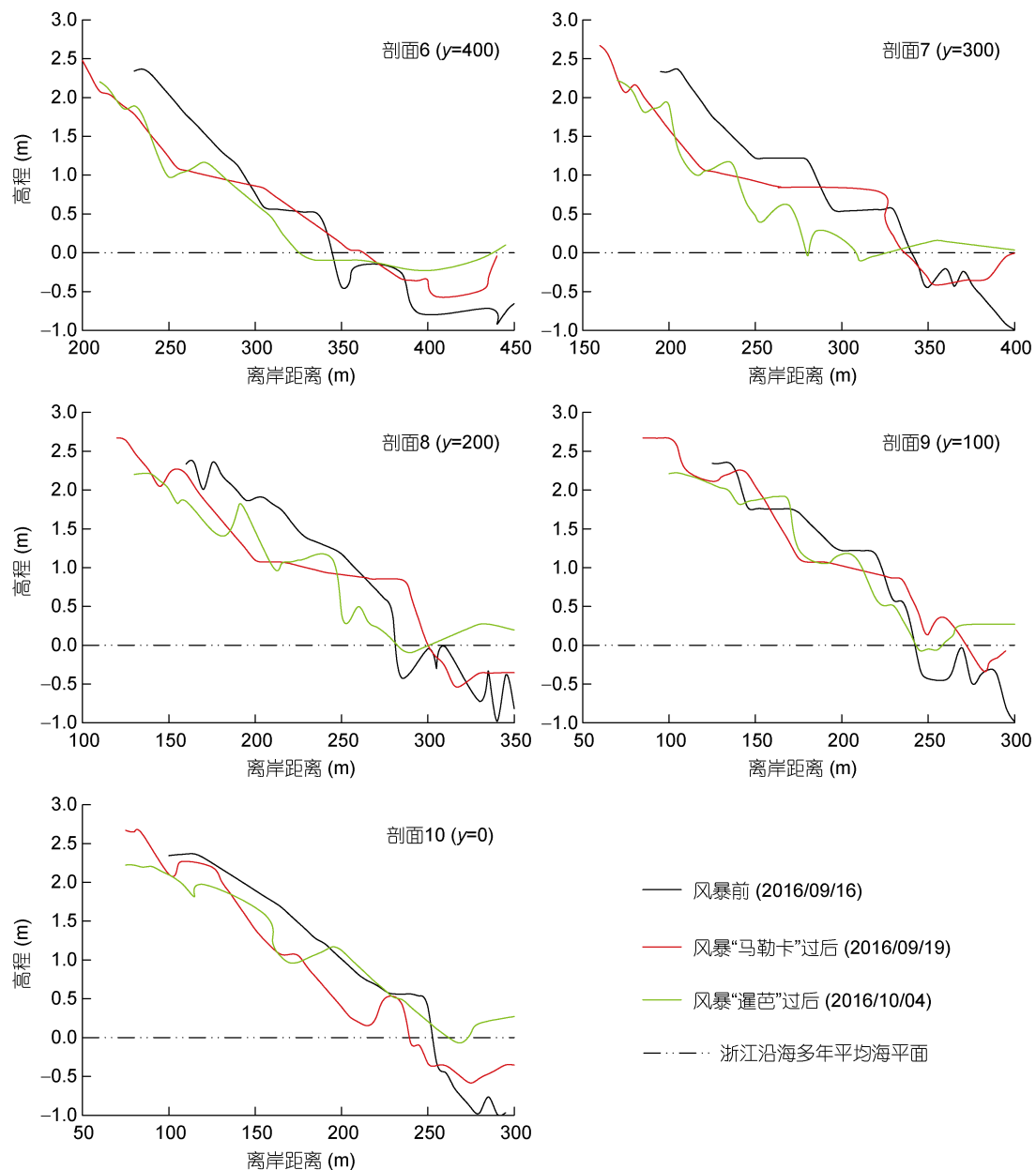


图 8 直线段剖面

Fig.8 Sections of the straight zone

3.1 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。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(郭俊丽等, 2018)。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。此外,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,泥沙来源有限,

风暴的发生造成泥沙损失之后很难得到补给。

3.2 外部动力因素

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,浙江登陆型和近海转向型的台风引起的增水最强(许浩恩等, 2009),而风暴“马勒卡”和风暴“暹芭”都是近海转向

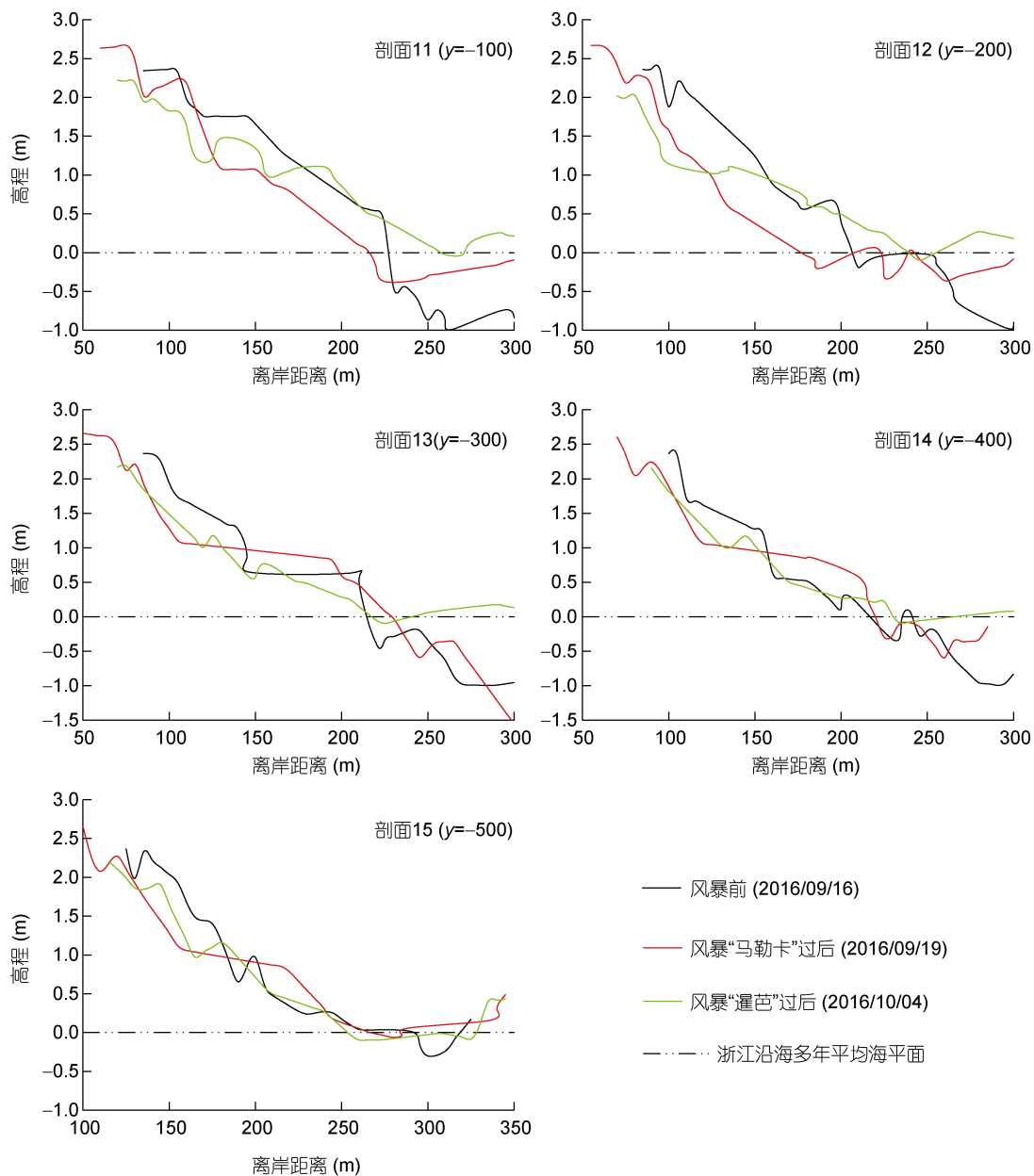


图9 下岬角遮蔽段剖面

Fig.9 Sections of the lower shadow zone

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“暹芭”到达东沙海滩近岸时主要为偏东向的波浪(图10),最大波高达2.4m,波向与海滩的走向近乎垂直,波浪正面冲击海滩。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。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(许浩恩等,2009),风暴“马勒卡”期间的主风向为北向(图10),并且在其影响浙江沿海期间风向保持北向,最大风速达11.3m/s,风暴“暹芭”发生期间的主风向是西北向和北向,观测到的风速最

大值为 11m/s, 而本研究区的平均风速仅 7.1m/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, 风暴“马勒卡”期间最大风暴增水值达 67cm(图 11), “暹芭”发生期间的最大风暴增水值为 51cm, 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 年的中国海平面公报显示 9 月浙江沿海海平面达到了历史同期的最高水平, 风暴“马勒卡”影响浙江沿海时恰逢天文大潮, 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, 同时这可能是风暴“马勒卡”作用强于风暴“暹芭”的原因之一。

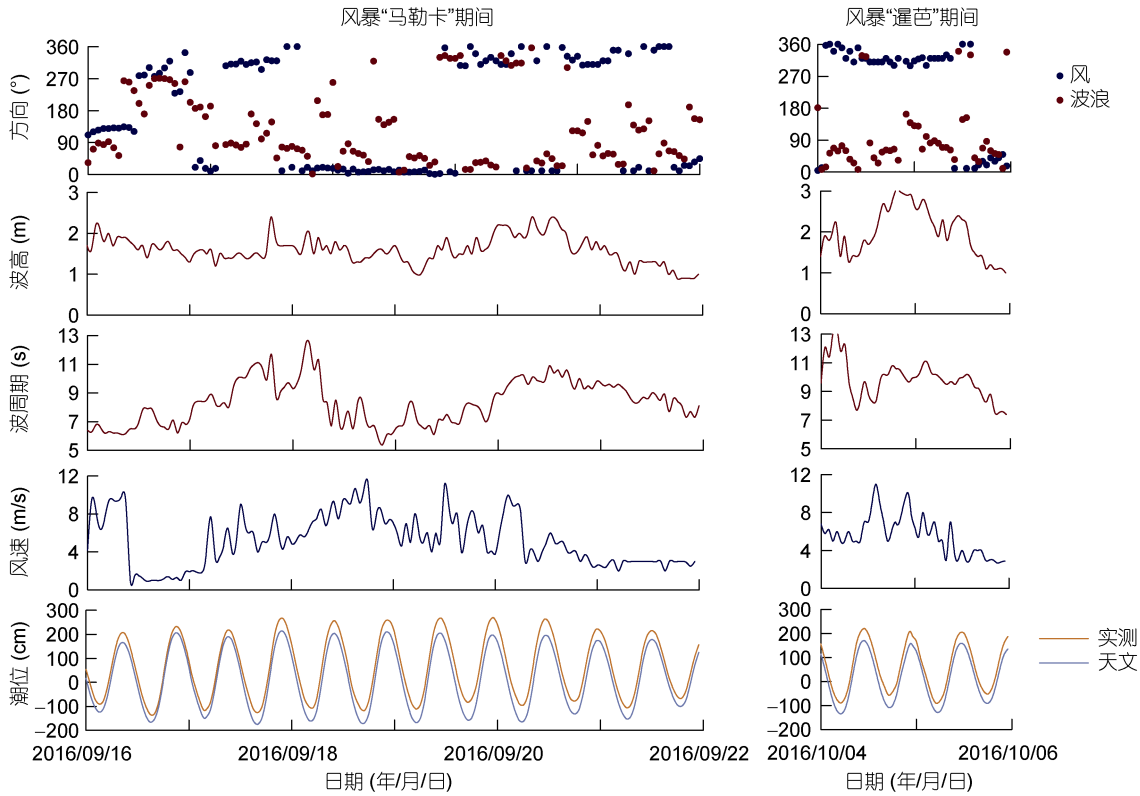


图 10 两次风暴发生期间的风况、波况及潮位
Fig.10 The wind, wave and tide during the two storms

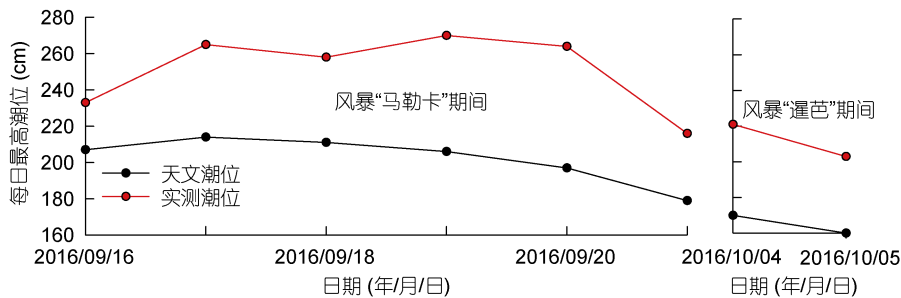


图 11 两次风暴发生期间每日最高潮位
Fig.11 Daily maximum tide during the two storms

3.3 人类活动

3.3.1 海堤与排水口 2015 年后, 东沙海滩沿岸海堤全线建成, 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 12a), 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

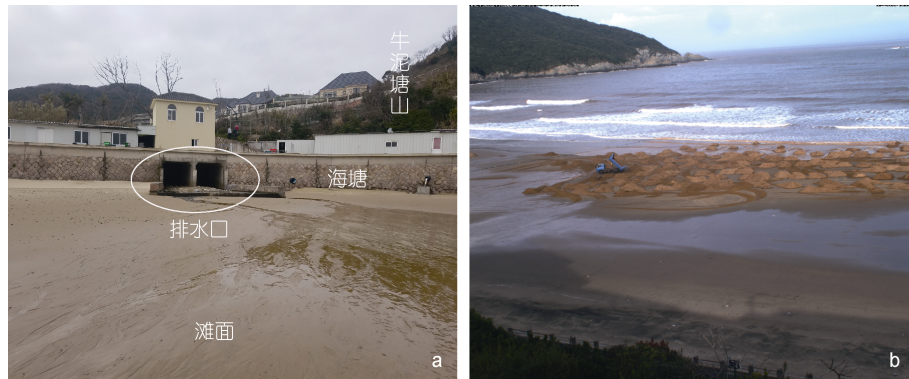


图 12 东沙海滩(常态)滩面的排水口(a)以及 C4 摄像头 2016 年 9 月 29 日拍摄的照片(b)

Fig.12 Drainage outlets on Dongsha beach (under normal condition) (a) and photo of the camera C4 on September 29, 2016 (b)

3.3.2 海滩补沙 我们在 Argus 监测图像中发现负责东沙海滩的朱家尖旅游开发投资有限公司在两次风暴中间进行了滩面补沙(图 12b), 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。据了解, 在两次风暴中间(2016 年 9 月 29—30 日)共补沙 700—800 车(车辆额定载重 9t 左右), 经粗略估算后的补沙量为 4200—4800m³。从我们获得的冲淤数据中计算得到第二次风暴后相对于第一次风暴后海滩整体约有 5000m³ 的淤积, 这说明在恢复中补沙起到了重要作用。

4 结论

风暴“马勒卡”发生后海滩单宽体积变化量平均值为-73.75m³/m, 风暴“暹芭”发生后海滩单宽体积变化量的平均值为-54.56m³/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, 另有部分剖面呈现出整体侵蚀。海滩各剖面的坡度在风暴发生皆呈变缓趋势。风暴“马勒卡”使整个海滩滨线平均向陆后退 14.75m, 风暴“暹芭”使得海滩滨线相对于两次风暴前向陆后退 10.91m。

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, 其沉积物来源有限使得风暴导致的泥沙损失很难得到补给。两次风暴期间的风向均为能使研究区附近海域产生

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。

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。

参 考 文 献

- 许浩恩, 陈海燕, 赵璐, 2009. 浙江影响热带气旋的几个统计特征. 浙江气象, 30(2): 4—8, 21
- 陈子燊, 王扬圣, 黄德全等, 2009. 台风影响下海滩前滨剖面时间变化差异性分析. 热带海洋学报, 28(6): 1—6
- 陈吉余, 2010. 中国海岸侵蚀概要. 北京: 海洋出版社
- 罗时龙, 蔡锋, 王厚杰, 2013. 海岸侵蚀及其管理研究的若干进展. 地球科学进展, 28(11): 1239—1247
- 夏小明, 陈连增, 2014. 中国海岛志(浙江卷第二册). 北京: 海洋出版社, 371—458
- 郭俊丽, 时连强, 童宵岭等, 2018. 浙江朱家尖岛东沙海滩对热带风暴“娜基莉”的响应及风暴后的恢复. 海洋学报, 40(9): 137—147
- 蔡锋, 雷刚, 苏贤泽等, 2006. 台风“艾利”对福建沙质海滩影响过程研究. 海洋工程, 24(1): 98—109
- Aarninkhof S G J, 2003. Nearshore Bathymetry derived from Video Imagery. Delft: Doctor Dissertation of Delft University of Technology, Delft University Press
- Archetti R, Paci A, Carniel S *et al*, 2016. Optimal index related to the shoreline dynamics during a storm: the case of Jesolo beach. Natural Hazards and Earth System Sciences, 16(5): 1107—1122
- Dinu I, García-León M, Gràcia V *et al*, 2017. Using numerical modelling to analyze beach profiles response to extreme storms along the Danube Delta coast, Romania.

- Geo-Eco-Marina, 23: 45—69
- Ge Z P, Dai Z J, Pang W H *et al*, 2017. LIDAR-based detection of the post-typhoon recovery of a meso-macro-tidal beach in the Beibu Gulf, China. *Marine Geology*, 391: 127—143
- Holland K T, Holman R A, 1997. Video estimation of foreshore topography using trinocular stereo. *Journal of Coastal Research*, 13(1): 81—87
- Karunarathna H, Pender D, Ranasinghe R *et al*, 2014. The effects of storm clustering on beach profile variability. *Marine Geology*, 348: 103—112
- Komen G J, Cavaleri L, Donelan M *et al*, 1994. *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*. Cambridge, UK: Cambridge University Press
- Puig M, Del Río L, Plomaritis T A *et al*, 2016. Contribution of storms to shoreline changes in mesotidal dissipative beaches: case study in the Gulf of Cádiz (SW Spain). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(12): 2543—2557
- Qi H H, Cai F, Lei G *et al*, 2010. The response of three main beach types to tropical storms in South China. *Marine Geology*, 275(1—4): 244—254
- Yoon H S, Kang T S, Nam S Y *et al*, 2007. Measuring coastline morphodynamics using video-based techniques at Haeundae Beach, South Korea. *Journal of Coastal Research*, 50(50): 1106—1111
- Zhong X J, Yu P, Chen S L, 2017. Fractal properties of shoreline changes on a storm-exposed island. *Scientific Reports*, 7(1): 8274

RESPONSE OF DONGSHA BEACH IN ZHOUSHAN TO CONTINUOUS STORMS BASED ON ARGUS IMAGES

GUO Jun-Li^{1,2}, SHI Lian-Qiang², CHEN Shen-Liang¹, YE Qing-Hua³

(1. *State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China;*

2. *Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources of China, Hangzhou 310012, China;*

3. *Deltares, Delft 2614HV, the Netherlands*)

Abstract Beach response to storms is a complex process. We used the continuous images taken by the Argus video monitoring system and analyzed quantitatively the response of Dongsha beach to storms in the aspects of beach geomorphology, profile, beach shoreline, and beach width. We quantified the beach response to two continuous storms Malakas and Chaba, and discussed the factors affecting the response. The results show that the average value of beach volumetric change after the storm Malakas was $-73.75\text{m}^3/\text{m}$, and that after storm Chaba was $-54.56\text{m}^3/\text{m}$. Storm Malakas caused the average retreat of 14.75m of entire beach shoreline, and that by Chaba was 10.91m from the shoreline state before the two storms. Therefore, interaction among the nature of each beach, external dynamic factors, and human activities complicated the responses to the two continuous storms in the Dongsha beach.

Key words Argus video monitoring system; Dongsha beach; continuous storms; beach response to storm