

张尧, 刘旭楠, 刘强, 等. 华南休闲海滩沙坝触发的裂流风险及特征研究[J]. 海洋学报, 2020, 42(9): 9–21, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2020.09.002

Zhang Yao, Liu Xu'nan, Liu Qiang, et al. Study on the risk and characteristics of rip currents over sandbars at South China's recreational beaches[J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(9): 9–21, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2020.09.002

# 华南休闲海滩沙坝触发的裂流风险及特征研究

张尧<sup>1</sup>, 刘旭楠<sup>1</sup>, 刘强<sup>1</sup>, 王斌<sup>1\*</sup>, 洪晓<sup>1,2</sup>, 周水华<sup>2</sup>, 张娟<sup>2</sup>, 孟潇洁<sup>3</sup>,  
李锐<sup>4</sup>, 陶金波<sup>4</sup>, 王岗<sup>5</sup>

(1. 自然资源部海洋减灾中心, 北京 100194; 2. 国家海洋局南海预报中心, 广东 广州 510260; 3. 中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100; 4. 国家海洋局北海预报中心, 山东 青岛, 266061; 5. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 为应对频发的致命性海滩溺水事故, 自然资源部开展了我国首次滨海旅游区裂流灾害技术调查, 在华南地区发现大量滨海休闲海滩存在浅滩沙坝和裂流现象。作为全国调查的部分成果, 本文应用多种方法研究了广东省 3 个热门海滩沙坝触发的裂流机理、特征和演变规律。地形动力计算和卫星影像显示了沙坝形态、岸线形状以及裂流的高度动态性, 尤其在青澳湾裂流呈现非常规的反季节变化, 冬季风险较高而夏季风险较低。在相位解析水动力数值模拟中, 裂流表现出对沙坝形态、浪高、浪向的高度敏感性。沙坝间较宽间隙会产生尺寸较大的裂流区, 但比起窄沟槽不一定伴随更强的流速。当大部分水流集中从邻近的较宽通道回流入海时, 部分窄沟槽几乎没有裂流产生。裂流流速与浪高成正比与入射角成反比。数值模拟结果表明, 当入射角达到  $10^{\circ}\sim 30^{\circ}$  时, 沿岸流会取代离岸流占主导地位。现场调查也验证了在低潮时, 较浅的水深会放大水流和波浪的地形效应, 导致裂流风险加剧。本文研究结果可为滨海旅游区裂流灾害的工程减缓措施和公共警示提供有益参考。未来将会持续开展针对特定岸线的长期观测, 以为裂流预警报和风险管控积累足够的统计数据。

**关键词:** 裂流; 沙坝; 波浪; 海滩形态; 数值模拟; 灾害风险

中图分类号: P731.23

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2020)09-0009-13

## 1 引言

裂流(又流称离岸流)是由于海浪破碎和不均匀浅滩地形共同作用产生的狭窄、射束式水<sup>[1]</sup>。持续不断的破碎波浪在海岸带堆积的水体通过集中路径回流入海, 因此, 裂流容易出现在沙坝沟槽、岬角、凸出结构物附近, 通常与岸线接近垂直。它的位置、形态、强度和流幅随地形和水动力条件而变化, 并会产生反作用。从经验上讲, 大浪、落潮时裂流概率和强度可能较高。裂流速度可超过  $1\text{ m/s}$ <sup>[2]</sup>, 长度可达上百米, 表面平静具有迷惑性, 可快速将不谨慎的游泳者

卷入深水<sup>[3]</sup>。人在裂流的拖拽下容易恐慌和挣扎造成溺水。根据美国国家海洋与大气管理局统计, 裂流是海滩溺水事故的主要原因, 但这一点还没得到广泛认知, 给旅游吸引力维持、海滩管理、事故纠纷处理带来巨大困扰。因此, 裂流引起了广泛的研究兴趣<sup>[4-5]</sup>, 研究主题包括经验理论、数值模拟、物理试验、实地观测和灾害相关的研究等<sup>[6-8]</sup>。

## 2 研究背景

预判裂流风险的经验理论大致分为基于地形动力学的海滩分类模型和风险概率预报模型。地形动

收稿日期: 2019-06-14; 修订日期: 2019-10-16。

基金项目: 国家自然科学基金(51609043); 自然资源部海洋减灾中心业务项目(2018AB005)。

作者简介: 张尧(1988—), 男, 江苏省宿迁市人, 博士, 副研究员, 从事计算水动力及海洋灾害研究。E-mail: yzhang@nmhms.org.cn

\* 通信作者: 王斌。E-mail: soawb@hotmail.com

力学模型计算了无量纲化的泥沙沉降速率和浪潮参数。基于这两个参数的取值范围可将高度多样化的海滩分为8~9类,分别对应不同的海滩形态、浪潮环境和裂流风险等级。该理论较早被提出<sup>[9]</sup>,被广泛应用于海滩裂流风险的初步评估,理论方法也不断得到改进<sup>[10-12]</sup>。裂流风险概率预报模型则是基于波浪和水位的统计数据回归分析计算裂流发生的概率。结合近岸浪流数值模型,美国国家海洋与大气管理局将概率模型纳入了裂流风险预报的业务化系统<sup>[13]</sup>。然而除了灾害性裂流发生的可能性,这两种方法都无法提供更多的定量信息。

在波浪池里开展的按比尺缩小的物理实验可在特定沙坝地形上对各种浪流环境进行精细模拟复现。浪、流、复杂地形等不同因素的组合在数学上较难近似处理,但在物理实验中可以被很好地呈现<sup>[14]</sup>。固定或动态底床地形都可以实现,以研究波生流或水动力-底床相互作用。再利用示踪器、波高仪、流速仪等测量仪器对水动力特征进行观测和数据采集<sup>[15]</sup>。结合对流速以及浅滩沟槽的综合分析,可以更好地了解裂流结构和不稳定性。但物理实验存在一些弊端,造波环境被限制在较窄的波谱范围;比尺效应和测量误差不可避免;模型实验的成本相对较高,尤其是针对大量不同工况和组次的研究<sup>[16-19]</sup>。

伴随现在计算资源的进步,数值模拟已成为研究海岸动力过程的成熟手段,可针对不同情景的水深和动力条件进行大量组次的模拟,详细计算并输出裂流区的水面变化、流速和衰减长度等<sup>[20]</sup>。与物理实验不同,只要在数学方程上精准限定表达,数值模型就可模拟较广的波谱范围。特别对于裂流所固有的不稳定性和波-流相互作用,数值模拟能够输出时间和空间尺度上的详细信息,供后分析之用<sup>[21-24]</sup>。

利用专业仪器设备实地观测是评估裂流最直接的方法。通过采用低成本的GPS漂浮计记录在碎波带内较大时空范围的漂流速度和轨迹来描述裂流形态特点。流速仪的定点布放允许对特定的横截面或深度进行流速测量,有助于评估裂流长时间序列的连续变化<sup>[25-28]</sup>。船载ADCP和RTK也能够进行流速和水深测量<sup>[29-30]</sup>。此外,视频观测和X波段雷达将分别通过帧频分析和回波信号解析更直观地对裂流进行描绘<sup>[31-33]</sup>。裂流在离岸过程中会与入射波作用,导致海浪的轻微破碎和表面糙度增加,从而产生更高的雷达回波强度。因此车载或岸边固定的X波段雷达可通过解译回波散射强度来解析瞬时的水面形态,从而评估波浪场和流场的物理形态特性。

滨海旅游长期位居我国海洋产业首位,根据2018年《中国海洋经济统计公报》,滨海旅游业占国内海洋经济增加值比重的46.1%,是第二大产业——海洋交通运输的两倍之多。然而一些热门滨海休闲海滩存在危险的裂流现象和大量溺水事故记录,尤其是在广东、海南等省份。公众、媒体和海滩管理部门对裂流的概念也较为模糊,阻碍了滨海旅游安全意识提升。虽然大多海滨泳区都是浮绳包围的一片平静水域,海底相对平整,不利于复杂水动力环境生成。但当人们从大量更广泛的公共海滩下海进入不熟悉的水域时,仍会造成严重的安全问题。冲浪者有时会将裂流作为进入深水区的加速通道,但即使经验丰富、极其谨慎,也可能有很高的风险。虽然裂流严重威胁滨海游客的安全,给我国滨海旅游经济持续带来负面影响,但我国学术界对裂流的研究还较少,仅涉及海岸地貌、海滩养护和理想化的物理和数值模拟等主题<sup>[34-37]</sup>。裂流灾害防范长期缺乏关注,相关调查、观测、预报和科普宣教仍较实际需求滞后。Li<sup>[12]</sup>尝试对华南大量休闲海滩的裂流风险进行经验计算,然而更需求详实的调查和验证<sup>[38]</sup>,以更好地识别和保护暴露在风险中的滨海游客。

2017年以来,自然资源部海洋减灾中心开展了全国范围的裂流灾害防范工作,包括重点滨海旅游区的裂流风险排查和管控,排查技术方法包括经验分析、数值模拟、遥感解译和实地观测,研究裂流特征进而判定综合风险。这是我国针对裂流灾害防范的首次业务化尝试,以应对频繁发生的海滩溺水事故。排查的难点是裂流具有高度的时空变化性,这意味着仅仅依赖几次高强度的外业调查无法准确确定裂流的出现时间、地点和形态等规律。由于沙坝底床被波浪和水流不断重塑<sup>[39]</sup>,近岸环流也不断发生改变<sup>[40]</sup>,即使在高风险海滩也有可能不会遇上裂流,在低风险海滩偶尔也会出现裂流。因此,应采用统计分析和现场观测相互补充的方式评估裂流。

### 3 研究方法

本文采用了遥感解译、地形动力经验分析、数值模拟、现场染料示踪观测等多种技术方法对裂流开展调查研究。收集的数据涵盖水动力观测、水深地形、地质和气象等方面。研究目标区域是广东省52个有海域使用许可的滨海旅游区中3个最热门的狭长沙滩,各自有着不同的弧度和朝向(图1)。根据谷歌地球影像和基于地形动力学经验公式的计算结果,这3个海滩的沿岸沙坝形态和裂流呈现明显的季

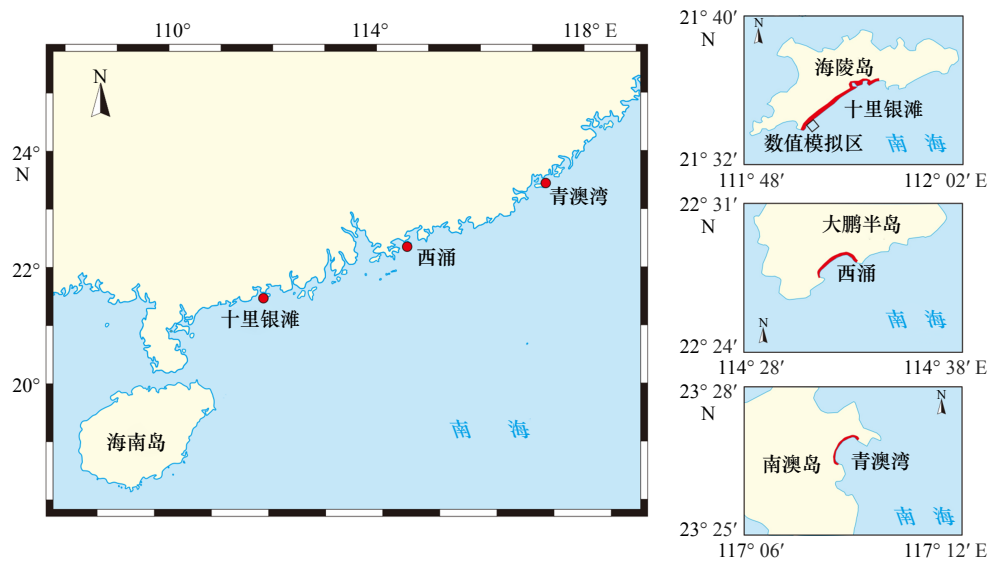


图1 华南3个研究目标海滩位置和形态示意图

Fig. 1 Location and profiles of the 3 investigated beaches in the South China

节性演变;通过数值模拟进一步研究了不同波浪条件下沿岸沙坝群触发的裂流灾害机理、形态和特征的研究;结合现场染料示踪观测,定量分析了特定位置的裂流并对数值计算结果进行了验证。浪高、浪向、沙坝形态等可能是裂流的主要影响因素<sup>[4]</sup>,研究结果可为风险管理、公共警示和工程缓释措施等提供有益参考。

### 3.1 资料收集

在每个调查省市,由当地政府提供当地滨海旅游海滩名录及其年游客数量统计。海滩旅游管理公司提供可能为裂流导致的溺水事故记录的具体时间和地点。作为裂流重要的分析依据,从卫星遥感、航空遥感、地面遥感等多源渠道收集海岸调查的遥感影像,以及获取的时间、空间分辨率、光谱波段、空间范围等辅助数据资料。此外,还收集了向海20 m等深线以内或向海2 km以内的高分辨率水深地形数据,用于数值模拟分析。局地海浪和潮汐数据涵盖了2015–2017年的逐月平均值,包括有效波高、相对潮差、高低潮位,数据来源包括海岸观测站、近岸浮标和后报再分析数据。对于海滩沟槽地貌的经验分析,一个重要的数据是调查海滩沙质粒径,采用取样中值 $D_{50}$ 的平均值表示。

### 3.2 遥感解译

本文研究的遥感数据采集包括卫星遥感图、有人或无人飞行器的航空遥感图或多源遥感数据的融合产品。影像拍摄时间尽量为大浪、低潮等裂流高发时段,且光学影像需要避开云的影响。重点排查区域

包括海滩弧形岸段、周期性凹凸海滩、平滑海滩交界处的凸岬、人工结构物附近。裂流在光学遥感影像呈现较规则或不规则的长条带形,光谱特征与周边白浪不同,一般位于浪裂线不连续的地方,即白浪中断的地方,表现为两条白色浪花之间的狭长水域,方向一般与岸线近似垂直,长度几十米甚至上百米,通过目视判读和计算机自动或人机交互解译,识别裂流特征,提取裂流长度和宽度等相关信息,判定裂流风险情况,筛选出可能的裂流风险岸段。

### 3.3 地形动力经验分析

经典海滩地形动力分析模型被改进并应用到海滩裂流评估中。模型基于对泥沙沉降参数( $\Omega$ )和浪潮参数( $RTR$ )的计算,将海滩分为8种类型,分别对应不同的裂流风险等级。该模型是由Msselink和Short<sup>[10]</sup>在1993年提出的,Scott等<sup>[11]</sup>于2011年进行了改进,基本反映了海滩对波浪、潮汐、泥沙运动等因素的一个综合地形动力响应。无量纲沉降参数定义为

$$\Omega = H_b / TW_s, \quad (1)$$

$$W_s = (RgD^2) / [C_1\nu + (0.75C_2RgD^3)^{0.5}], \quad (2)$$

式中, $H_b$ 是局地平均破碎浪高(单位:m); $T$ 是平均波周期(单位:s); $W_s$ 表示高潮位时的沙粒沉降速率(单位:m/s);标准重力加速度 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ;  $R$ 为沙/水比重(取1.65); $D$ 为海滩泥沙中值粒径(单位:m); $\nu$ 为水的动能黏度(取 $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ); $C_1 = 18$ ;  $C_2 = 1$ 。沉降参数表明了海滩泥沙的流动性,进而会影响潮滩、台地的地貌形态。其大值表明高消散型海滩,具有较高的波浪能和精细的泥沙;其小值代表反射型海滩,有较粗

的泥沙粒径和较小的波浪环境。除了波浪,潮汐是另一个主要的水动力效应。为了量化和比较波浪/潮汐的贡献,浪潮参数被定义为

$$RTR = TR/H_b, \quad (3)$$

$$H_b = 0.39g^{1/5} (TH_s^2)^{2/5}, \quad (4)$$

式中,  $TR$  表示当天或指定时间段的平均潮差;  $H_b$  是局地有效波高。这些参数可直接区分高能海浪条件导

致的沟槽海滩和潮汐控制的平坦海滩。根据以往经验研究结果,基于泥沙沉降参数和浪潮参数的阈值范围可将海滩分为 8 种类型各自对应不同的裂流风险等级(表 1)。这种海滩地貌动力模型可大致计算自然海滩的裂流风险,但不适用于波浪和流场受到显著影响的有人工结构物或河口附近的海滩,这些地方的裂流风险存在较大的不确定性。

表 1 基于地形动力学指标分析的滨海旅游海滩裂流风险等级表

Table 1 Beach characteristics and rip risk level based on morphodynamic values

海滩组别	沙粒沉降参数	浪潮参数	海滩类型	裂流风险
反射型	$\Omega < 2$	$RTR < 3$	完全反射型(R)	低
	$\Omega < 2$	$RTR > 7$	低潮台地形(LTT)	低
	$\Omega < 2$	$3 \leq RTR \leq 7$	低潮台地裂流型(LTTR)	中
中间状态型	$2 \leq \Omega \leq 5$	$RTR < 3$	沿岸沙坝型(B)	高
	$2 \leq \Omega \leq 5$	$3 \leq RTR \leq 7$	低潮冲流沙坝裂流型(LTBR)	高
消散型	$\Omega > 5$	$RTR < 3$	沙坝消散型(BD)	中
	$\Omega > 5$	$3 \leq RTR \leq 7$	无沙坝消散型(NBD)	低
超消散型	$\Omega > 2$	$RTR > 7$	平缓超消散型(UD)	低

### 3.4 数值模拟计算

波浪-水流相互作用会造成破波带的非线性、高频散复杂水动力环境,同时可能会出现波浪浅变、破碎、涡旋、湍流等现象。裂流的数值模拟属于小尺度区域模拟,需要准三维流场结构的计算。相位解析非静压模型对非线性近岸水动力的计算效率和近似精度较高,非静压修正和流速场的垂向结构求解等特点使其成为裂流模拟研究的理想工具<sup>[42-45]</sup>。出于稳定性考虑,可将水深地形的网格设置为  $dx = \min \left[ \frac{L}{20}, 2 \right]$  (m),而时间步长可遵循库朗数  $c = \frac{|u|dt}{dx} < 1$ 。基于观测数据的有效波高和谱峰周期,波浪环境采用标准的 JON-SWAP 不规则波谱分布。模拟时长应不小于 200 倍的谱峰周期( $T_p$ )已足以避免开始效应的干扰。计算出的流速和水面变化足以提供足够的信息来评估裂流尺寸和强度。

### 3.5 现场观测

在实地观测中,无人飞行器航拍可有效地获取裂流的光学或辐射激光影像。根据经验统计,在大潮日退潮时裂流发生的概率较大,可选作实地调查的时间。与卫星遥感影像相似,裂流的相对位置、流态、大小,甚至浅滩沙坝形态都可通过参照物来评估。裂

流的目视特征表现为不连续白浪之间相对平静的狭长水域,有时伴随泡沫、气泡甚至泥沙向海流去。裂流冲出破波带后会逐渐消散成较大范围的“裂流头”。环保彩色染料是一种直观的示踪剂,利用裂流表面流的特性描绘出流速、流幅和流态。彩染示踪剂的释放点通常选在裂流生成的汇流点,用无人机上的摄像机记录下整个示踪过程,后期再定量评估。本文研究选用酸性红#14 作为示踪剂,因为其在稀释和扩散的过程中仍可保持清晰可见。

## 4 结果分析

十里银滩位于粤西最大的岛屿——海陵岛的南侧。每年 5-10 月,其游客量累计可达 160 万人次。整个海滩非常狭长,长约 10 km,宽约 50~100 m。海滩剖面显示潮间带上部坡度较缓。海滩砂质中值粒径在 0.13~0.15 mm 之间,分选系数约为 0.09~0.12,偏态系数为 0.33~0.6,分选极好,属正偏态。海滩平均潮差为 1.54 m,平均大潮潮差为 3.76 m。如图 2 所示,附近海域月平均有效波高为 0.5~0.7 m,对应的周期和波长分别为 4.9~5.5 s、40~60 m。冬季的 ESE 和夏季的 S 为主要的波浪来向,而较大浪高通常出现在 6 月、7 月、11 月、12 月。图 3 为两幅谷歌地球卫

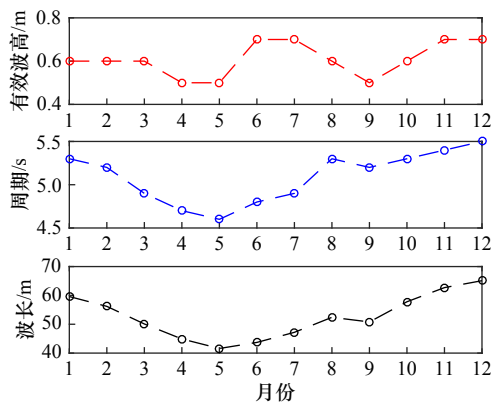


图2 十里银滩的波浪月平均数据

Fig. 2 Monthly wave statistics at the 10-mile Beach

星影像, 分别拍摄于2016年11月和2017年8月。由图3a可以看到十里银滩的白色海浪破碎线和沿岸浅滩沙坝被裂流沟槽所截断; 图3a中平静的水面下一条条裂流槽也清晰可见。因此, 可以确认海滩伴随沙坝发育, 对照表1可能为LTBR、B、BD其中一种类型。应用地形动力分析模型计算十里银滩12个月的沉降参数和浪潮参数(表2), 它们虽然表现出了一定的逐月变化, 但根据表1中的判定标准, 都处于裂流中等风险水平。

西涌海滩位于深圳市大鹏半岛南端, 每年有超过200万人次的游客到访。海滩长约5 km, 宽30~80 m, 海滩沙粒的中值粒径为0.22~0.34 mm, 分选系数和偏态系数分别在0.13~0.36和0.33~0.52之间, 为分选极好的正偏态。当地为不规则半日潮, 平均潮差为0.88 m, 平均大潮潮差为1.04 m。如图4所示, 海滩附近的月平均有效波高为0.4~0.7 m, 波周期在4.9~6.1 s之间, 对应波长为47.9~78.6 m。主要入射波向为夏季的S向和其余季节的ESE向。最大波高出现在7月、8月、11月、12月。表3为沉降参数和浪潮

参数的逐月计算结果, 两个参数基本没有太大的逐月变化, 根据计算结果海滩为B类型海滩, 裂流风险较高。图5为收集到的西涌海滩遥感影像, 可以看出海滩岸线形态和碎浪带宽度呈现出明显的季节变化, 沿岸沙坝和裂流区在遥感影像中清晰可见, 尤其是在图5c, 海浪白帽和泥沙被离岸水流持续地向海推出。因此, 根据卫星影像判断西涌海滩为高度动态的、伴有沿岸沙坝发育的海滩, 全年裂流风险较高, 这也验证了地形动力模型计算的结果。

作为广东东部著名的滨海旅游景区, 青澳湾的海滩平整、宽阔, 砂质细腻, 水质清澈, 是天然的海水浴场。2017年青澳湾游客量累计达到了100万人次, 其中5~10月为高峰期。海滩全长2.9 km, 宽度在80~100 m之间, 根据实地剖面测量结果, 潮间带的坡度为 $4^{\circ}$ ~ $5^{\circ}$ , 低潮时滩面平缓, 沙质均匀, 泥沙粒径无空间分布变化, 中值粒径约为0.08~0.12 mm, 分选系数为0.04~0.09, 偏态系数为0.35~0.59, 由高潮线往中潮线逐渐细化, 分选极好, 峰态狭窄。青澳湾地区也属不规则半日潮形, 平均潮差为1.29 m, 平均大潮潮差为1.69 m。湾口全年月平均有效波高为0.4~0.8 m(图6), 呈现出明显的季节变化, 冬季高夏季低, 这也暗示裂流风险可能也存在时间变化。值得注意的是, 浪高的季节差异可能是由于湾口朝东而广东省大部分海滩主要朝南, 当地冬季东来向的波浪对青澳湾影响较大, 因此10月至翌年1月湾口月平均有效波高可达0.8 m, 而10月正是游客数量的高峰时间。根据地形动力分析(表4), 青澳湾海滩夏季呈现出无沙坝消散型海滩, 裂流风险较低; 其余较冷的季节为有沙坝发育的消散型海滩, 有中等裂流风险。图7中青澳湾的4幅卫星影像显示其海岸线附近的裂流沟槽呈季节性周期变化。2013年冬季(图7b)与2016年冬

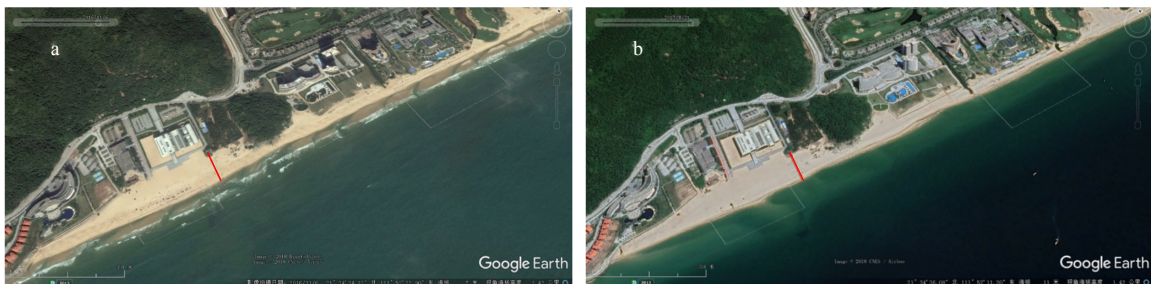


图3 十里银滩的谷歌地图卫星影像(红色线段为100 m)

Fig. 3 Google Earth satellite images at the 10-mile Beach (the red line represents 100 m)

a. 2016年11月6日; b. 2017年8月21日

a. November 6, 2016; b. August 21, 2017

表 2 十里银滩月平均裂流风险等级的地形动力模型计算结果

Table 2 Monthly rip current risk at the 10-mile Beach calculated by the morphodynamic model

月份	RTR	$\Omega$	海滩类型	风险等级
1	1.9	10.9	BD	中
2	1.8	11.0	BD	中
3	2.1	11.4	BD	中
4	2.4	10.1	BD	中
5	2.3	10.3	BD	中
6	1.4	13.2	BD	中
7	1.7	13.0	BD	中
8	1.6	10.9	BD	中
9	2.4	9.5	BD	中
10	1.9	10.9	BD	中
11	1.6	12.2	BD	中
12	1.5	12.1	BD	中

表 3 西涌海滩月平均裂流风险等级的地形动力模型计算结果

Table 3 Monthly rip current risk at the Xichong Beach calculated by the morphodynamic model

月份	RTR	$\Omega$	海滩类型	风险等级
1	1.1	3.0	B	高
2	1.1	3.1	B	高
3	1.1	3.2	B	高
4	1.3	2.8	B	高
5	1.6	2.4	B	高
6	1.1	3.4	B	高
7	1.0	3.7	B	高
8	1.0	3.5	B	高
9	1.3	2.7	B	高
10	1.1	3.1	B	高
11	0.9	3.4	B	高
12	0.9	3.3	B	高

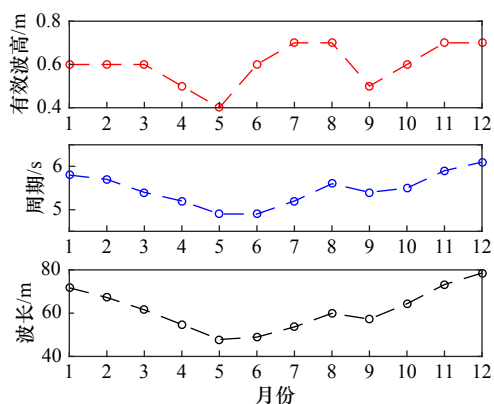


图 4 西涌海滩的波浪月平均数据

Fig. 4 Monthly wave statistics at the Xichong Beach

季(图 7d)的卫星影像非常相似,多条近 100 m 长的裂流沟凹入海滩,碎浪带内大量白色浪花勾勒了较大的波浪和平静的裂流区。然而,2010 年 8 月和 2015 年 8 月拍摄的卫星照片(图 7a,图 7c)显示了均匀平坦的潮间带海滩和浅滩,没有沙坝或沟槽产生。与冬季相比,夏季的海滩和碎浪区宽度更窄,入射波高更小。这些遥感影像观察结果总体上与地形动力分析计算相符,但与炎热的夏季海滩可能会有更多的裂流的预期认知不同。

为了定量研究局地裂流对入射波高、波向、沙坝

群特点等影响因素的敏感性,本文进一步分析十里银滩裂流观测和数值模拟的部分结果。在现场调查中,从高潮位到低潮位期间,间歇性地航拍照片和视频,结果发现这也与一些经验描述相符,低潮放大了浅滩地形对波浪和水流的影响。图 8a 为 2018 年 7 月 11 日十里银滩海岸周期性沙坝和裂流的航拍照片,与卫星影像观察到的情况类似(图 3)。图 8b 为拍摄到完整的巨大裂流头形态,估算长度超过 100 m,堪比美国、澳大利亚等深水岸线拍摄到的裂流。由于当日有效波高约为 1.4 m,是 7 月月平均波高 0.7 m 的两倍,波向为 SE-SSE,几乎垂直于岸线,裂流现象较为明显,所以还开展了一次染料示踪现场实验,以捕捉水流流态并对流速进行定量评估。实验视频截图(图 9)显示该沟槽处的裂流路径呈直线,流速大约为 0.5 m/s。实验结果为后续的数值模拟提供了初步的验证。

图 10a 示意了基于遥感和观测影像解译的水深地形,1 km×1 km 的正方形模拟区域位于广东省海陵岛十里银滩的南海一号博物馆前,其中沙坝和 4 个裂流通道的(编号 1~4)清晰可见。破碎的海浪造成沙坝上的水面抬高,而裂流沟中的水面较低,这提供了一个持续驱动裂流产生的压力梯度。本文采用 Boussinesq

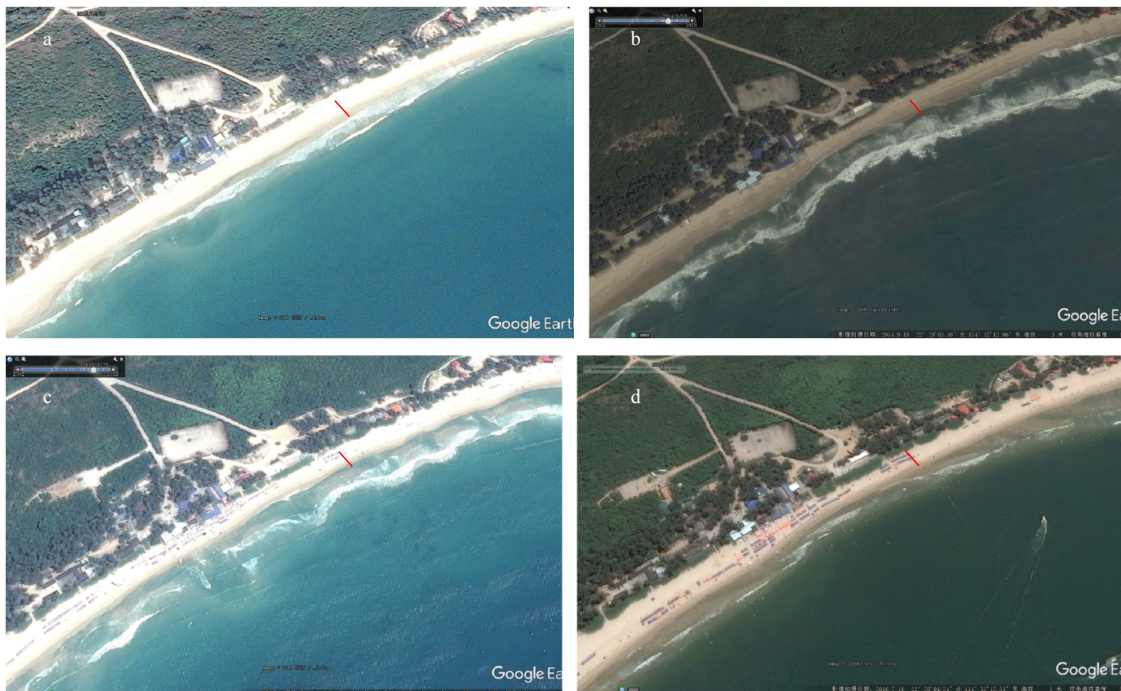


图5 西涌海滩的谷歌地图卫星影像(红色线段为100米)

Fig. 5 Google Earth satellite images at the Xichong Beach (the red line represents 100 m)

a. 2013年12月30日; b. 2014年9月18日; c. 2015年8月25日; d. 2016年7月16日  
 a. December 30, 2013; b. September 18, 2014; c. August 25, 2015; d. July 16, 2016

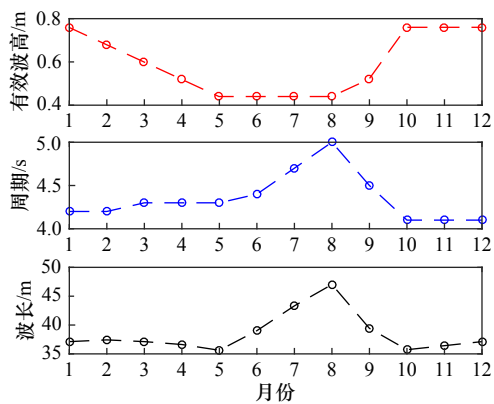


图6 青澳湾的波浪月平均数据

Fig. 6 Monthly wave statistics at the Qing'ao Bay

相位解析模型 FUNWAVE<sup>[46]</sup> 针对不同的波浪条件开展了大量组次的数值模拟, 计算结果与彩染示踪试验(2号通道)对比验证。考虑到当地7月份的平均有效波高约为0.7 m, 在此我们选取了5组不同浪高、浪向的数值模拟工况进行分析(表5)。每个工况的模拟时长为50 min, 输出间隔为50 s, 以确保足够的时长来避免开始效应、达到稳定状态和获取统计规律。

图10b-f分别显示了5组敏感性测试的计算结果, 5组结果中4个沟槽通道大多都出现了裂流现象, 强度和形态各异。1号和4号沟槽出现了较大的倾斜弧形裂流区, 但弧度方向相反, 这可能是由

表4 青澳湾月平均裂流风险等级的地形动力模型计算结果  
 Table 4 Monthly rip current risk at the Qing'ao Bay calculated by the morphodynamic model

月份	RTR	$\Omega$	海滩类型	风险等级
1	1.8	21.1	BD	中
2	2.1	19.0	BD	中
3	2.3	16.5	BD	中
4	2.7	14.3	BD	中
5	3.2	11.9	NBD	低
6	3.2	11.8	NBD	低
7	3.1	11.3	NBD	低
8	3.0	10.9	NBD	低
9	2.6	13.9	BD	中
10	1.9	21.4	BD	中
11	1.9	21.4	BD	中
12	1.9	21.4	BD	中

于沙坝缝的不对称性造成的。测试1(图10b)为2018年7月12日当日水动力环境的模拟结果。1号沟槽出现的裂流流幅最大, 宽为20~50 m, 长为



图 7 青澳湾的谷歌地图卫星影像(红色线段为 100 m)

Fig. 7 Google Earth satellite images at the Qing'ao Bay (the red line represents 100 m)

a. 2010 年 8 月 5 日; b. 2013 年 11 月 27 日; c. 2015 年 8 月 23 日; d. 2016 年 12 月 18 日

a. August 5, 2010; b. November 27, 2013; c. August 23, 2015; d. December 18, 2016

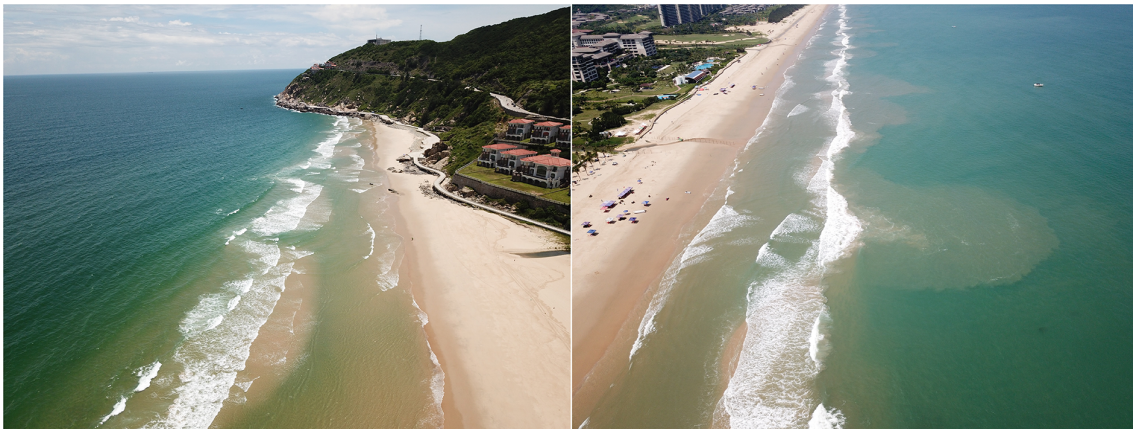


图 8 十里银滩沙坝和裂流通道(a)及裂流头(b)航拍照片

Fig. 8 Aerial photo of sandbars and rip channels (a), and rip head (b) at the 10-mile Beach

表 5 不同模拟工况下的入射波浪条件

Table 5 Incident wave conditions for the numerical simulation

模拟工况	入射波高/m	波向	周期/s	相对岸线的入射角度/(°)
1	1.4	SE-SSE	4.9	0
2	1.2	SE-SSE	4.9	0
3	0.7	SE-SSE	4.9	0
4	0.7	SSE	4.9	11.25
5	0.7	S	4.9	33.75

50~100 m, 平均最大流速约为 0.6 m/s; 4 号沟槽的裂流尺寸比 1 号的稍小, 但速度却低了很多, 最大平均流速仅为 0.3 m/s; 2 号通道有一条垂直岸线的裂流,

计算的平均最大流速为 0.45 m/s, 与现场试验结果相似; 3 号缺口无明显裂流。据此, 裂流的流幅可能和沙坝间缺口的大小成正比。有趣的是, 最大流速并



图9 2018年7月12日海陵岛十里银滩裂流染料示踪试验视频截图(数模案例的2号通道)

Fig. 9 Video snapshots of the dye-tracer in the rip current at channel 2 of the 10-mile Beach of Hailing Island on July 12, 2018

没有出现在裂流区,而是在沙坝头附近,显示了这里的涡旋流速较大,而浪高在裂流通道中较大。从图 10b 至图 10d 为入射波高从 1.4 m 降到 0.7 m 的 3 个工况计算结果,入射角为正向  $0^\circ$ ,周期也相同。可以看出,波高较大产生的裂流流速增大,而流态和位置并没有明显变化。从图 10d 至图 10f 可以看出,即使入射波高和周期一样而入射角有微小差别,也会导致有效波高的大小和分布的差异,并且驱动出完全不同的裂流形态。随着入射方向逐渐向南偏移,有效波高显著增大,沿岸流取代成为主要的波生流,离岸流逐渐消失。从图 10f 可以看到偏角超过  $30^\circ$  的入射波产生了较强的沿岸流,流速达到了  $0.8\sim 1.0$  m/s。模拟结果表明了裂流对浪高、入射波向、沙坝群形态等有很高的敏感性。虽然沙坝缺口为裂流的产生提供了可能性,但当大部分水流通过临近较宽的通道回流入海时,有些小的沙坝间隙中可能几乎不会有裂流产生。

## 5 结论和展望

本文对华南地区 3 个典型的休闲海滩沿岸沙坝所造成的裂流机理和演变规律进行了分析研究,采用了海滩地形动力经验分析、遥感解析、实地观测和数值模拟等方法相互辅助。当地波浪观测数据的季节性变化表明受南海季风效应影响较大。地形动力模型计算和卫星遥感照片证实了海滩岸线、

沙坝形态、裂流都具有很强的动态性。青澳湾的裂流风险的季节变化较为反常,冬季高夏季低;而十里银滩和西涌海滩的裂流风险几乎不随季节变化。这是由裂流的海滩剖面、波高、相对潮差、泥沙细度等各种影响指标导致的。参考波浪方向,青澳湾独特的临海方向可能是造成裂流风险非常规季节性变化的重要原因。虽然地形动力模型对裂流风险的经验分析结果较为合理,但它在一些情况下会有局限性,如极端海洋事件引起的海岸突变或有边界限制的裂流。

除了经验分析和遥感影像外,通过现场观测和数值模拟还对沙坝影响下的裂流机理进行了补充定量研究。裂流的流态和流速对波浪和沙坝特征有较强的敏感性。沙坝间较宽的通道产生的裂流流幅较狭窄缺口的要大,但不一定伴随更快的流速。裂流流速被证明与波高成正比,与入射偏角成反比,当入射角超过  $10^\circ$  时沿岸流逐渐取代离岸流成为主导。现场观测证实,在低潮时较浅的水深放大了地形对波浪和水流的影响,此时裂流最为强劲,这也与一些文献中的经验描述相符。本文研究结果可为工程缓释、公众警示等提供科学参考。由于裂流是非持久的偶发性现象,需要对特定岸线进行长期观测,以为今后的裂流预报和风险管控积累足够的统计数据。

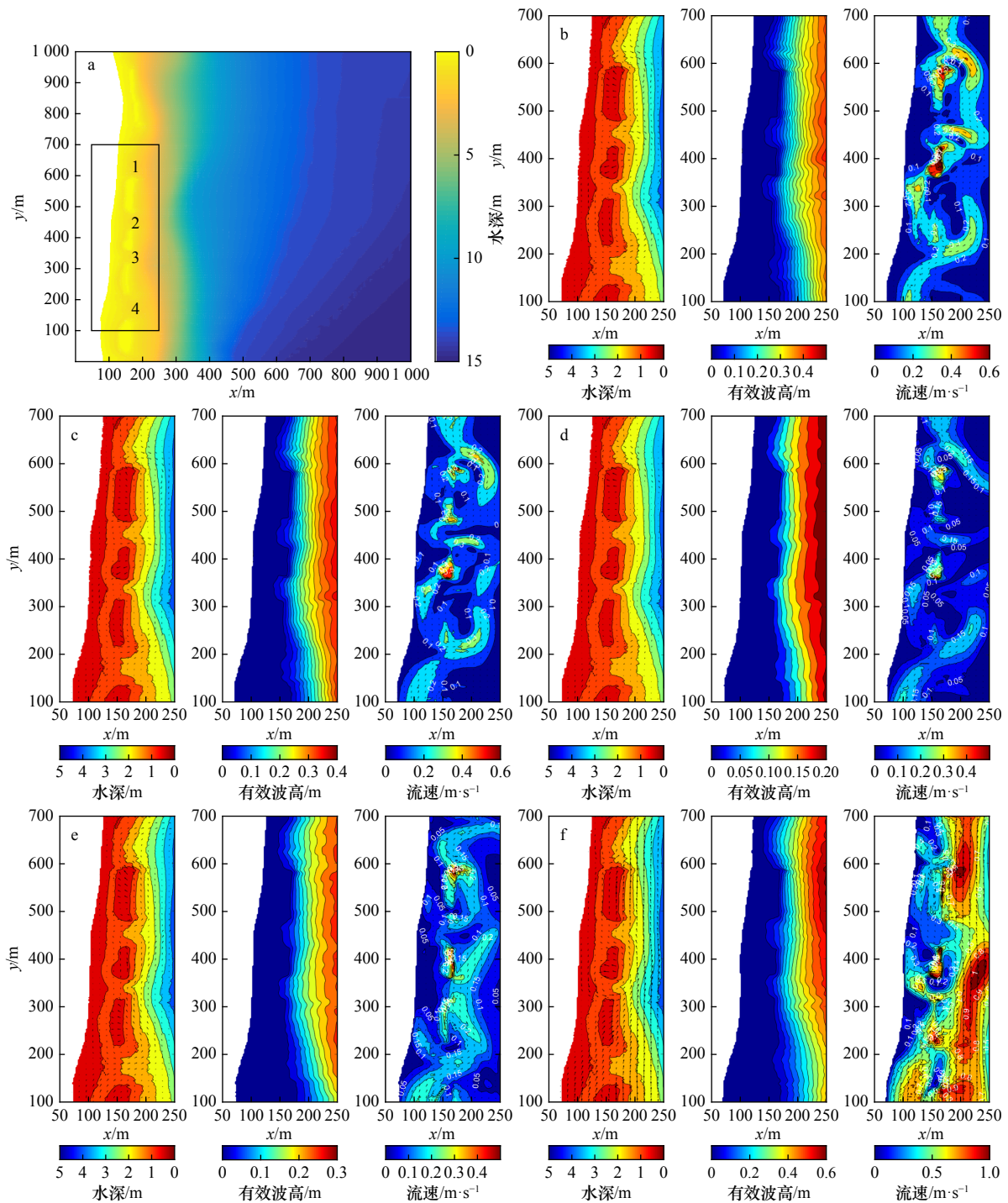


图 10 数值模拟的十里银滩水深地形及沙坝裂流通道分布(a)和 5 组有效波高和平均流速的计算结果(b-f)

Fig. 10 Bathymetry with sand bars and 4 rip channels in the simulated area at 10-mile Beach (a), and computed results of significant wave heights and averaged velocities for 5 cases (b-f)

b. 入射波高 1.4 m, 入射角  $0^\circ$ ; c. 入射波高 1.2 m, 入射角  $0^\circ$ ; d. 入射波高 0.7 m, 入射角  $0^\circ$ ; e. 入射波高 0.7 m, 入射角  $11.25^\circ$ ; f. 入射波高 0.7 m, 入射角  $33.75^\circ$

b.  $H_{incident}=1.4\text{ m}, \theta=0^\circ$ ; c.  $H_{incident}=1.2\text{ m}, \theta=0^\circ$ ; d.  $H_{incident}=0.7\text{ m}, \theta=0^\circ$ ; e.  $H_{incident}=0.7\text{ m}, \theta=11.25^\circ$ ; f.  $H_{incident}=0.7\text{ m}, \theta=33.75^\circ$

参考文献:

[1] Dalrymple R A, MacCmahan J H, Reniers A J H M, et al. Rip currents[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2011, 43(43): 551-581.

- [2] 王彦, 邹志利. 海岸裂流的研究进展及其展望[J]. 海洋学报, 2014, 36(5): 170–176.  
Wang Yan, Zou Zhili. Progress and prospect of rip currents[J]. Haiyang Xuebao, 2014, 36(5): 170–176.
- [3] Drozdowski D, Shaw W, Dominey-Howes D, et al. Surveying rip current survivors: Preliminary insights into the experiences of being caught in rip currents[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2012, 12(4): 1201–1211.
- [4] Alvarez-Euacuria A, Orfila A, Olabarrieta M, et al. A nearshore wave and current operational forecasting system[J]. *Journal of Coastal Research*, 2010, 26(3): 503–509.
- [5] Austin M, Scott T, Brown J, et al. Temporal observations of rip current circulation on a macro-tidal beach[J]. *Continental Shelf Research*, 2010, 30(9): 1149–1165.
- [6] Benassai G, Aucelli P, Budillon G, et al. Rip current evidence by hydrodynamic simulations, bathymetric surveys and UAV observation[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2017, 17(9): 1493–1503.
- [7] Macmahan J H, Thornton E B, Reniers A J H M. Rip current review[J]. *Coastal Engineering*, 2006, 53(2/3): 191–208.
- [8] Castelle B, Scott T, Brander R W, et al. Rip current types, circulation and hazard[J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 163: 1–21.
- [9] Wright L D, Short A D, Green M O. Short-term changes in the morphodynamic states of beaches and surf zones: An empirical predictive model[J]. *Marine Geology*, 1985, 62(3/4): 339–364.
- [10] Masselink G, Short A D. The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: A conceptual beach model[J]. *Journal of Coastal Research*, 1993, 9(3): 785–800.
- [11] Scott T, Masselink G, Russell P. Morphodynamic characteristics and classification of beaches in England and Wales[J]. *Marine Geology*, 2011, 286(1/4): 1–20.
- [12] Li Zhiqiang. Rip current hazards in South China headland beaches[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2016, 121: 23–32.
- [13] Dusek G, Seim H. A probabilistic rip current forecast model[J]. *Journal of Coastal Research*, 2013, 289(4): 909–925.
- [14] 王彦, 邹志利. 平直沙坝海岸叠加波浪的裂流试验[J]. 水科学进展, 2015, 26(1): 123–129.  
Wang Yan, Zou Zhili. Experimental study of rip currents by intersecting wave on barred beach[J]. *Advances in Water Science*, 2015, 26(1): 123–129.
- [15] 彭石, 邹志利. 海岸裂流的浮子示踪法实验测量[J]. 水动力学研究与进展, 2012, 26(6): 645–651.  
Peng Shi, Zou Zhili. Experimental measurement of rip currents with video-tracked drifters[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2012, 26(6): 645–651.
- [16] Haller M C, Dalrymple R A, Svendsen I A. Experimental study of nearshore dynamics on a barred beach with rip channels[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2002, 107(C6): 3061.
- [17] Kennedy A B, Thomas D. Drifter measurements in a laboratory rip current[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2004, 109(C8): C08005.
- [18] Kennedy A B, Zhang Y. The stability of wave-driven rip current circulation[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2008, 113(C3): C03031.
- [19] Castelle B, Michallet H, Marieu V, et al. Laboratory experiment on rip current circulations over a moveable bed: Drifter measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2010, 115(C12): C12008.
- [20] Suanda S H, Feddersen F. A self-similar scaling for cross-shelf exchange driven by transient rip currents[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(13): 5427–5434.
- [21] Weir B, Uchiyama Y, Lane E M, et al. A vortex force analysis of the interaction of rip currents and surface gravity waves[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2011, 116(C5): C05001.
- [22] Marchesiello P, Benshila R, Almar R, et al. On tridimensional rip current modeling[J]. *Ocean Modelling*, 2015, 96: 36–48.
- [23] Yu J, Chen S Y. Hydrodynamic instability mechanism for rip currents[J]. *Studies in Applied Mathematics*, 2015, 135(2): 196–223.
- [24] Zhang Chi, Zhang Qingyang, Zheng Jinhai, et al. Parameterization of nearshore wave front slope[J]. *Coastal Engineering*, 2017, 127: 80–87.
- [25] Schmidt W E, Woodward B T, Millikan K S, et al. A GPS-tracked surf zone drifter[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2003, 20(7): 1069–1075.
- [26] McCarroll R J, Brander R W, Turner I L, et al. Lagrangian observations of circulation on an embayed beach with headland rip currents[J]. *Marine Geology*, 2014, 355: 173–188.
- [27] Scott T, Austin M, Masselink G, et al. Dynamics of rip currents associated with groynes—field measurements, modelling and implications for beach safety[J]. *Coastal Engineering*, 2016, 107: 53–69.
- [28] MacMahan J, Thornton B E. Low-cost handheld global positioning system for measuring surf-zone currents[J]. *Journal of Coastal Research*, 2009, 25(3): 744–754.
- [29] MacMahan J H, Thornton E B, Stanton T P, et al. RIPEX: observations of a rip current system[J]. *Marine Geology*, 2005, 218(1/4): 113–134.
- [30] Radermacher M, De Schipper M A, Reniers A J H M. Sensitivity of rip current forecasts to errors in remotely-sensed bathymetry[J]. *Coastal Engineering*, 2018, 135: 66–76.
- [31] Holman R, Haller M C. Remote sensing of the nearshore[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2013, 5(1): 95–113.

- [32] Yoon S B, Park W K, Choi J. Observation of rip current velocity at an accidental event by using video image analysis[J]. *Journal of Coastal Research*, 2014, 72(S): 16–21.
- [33] Haller M C, Honegger D, Catalán P A. Rip current observations via marine radar[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2014, 140(2): 115–124.
- [34] 解鸣晓, 张玮. 近岸波生流运动三维数值模拟及验证[J]. *水科学进展*, 2011, 22(3): 391–399.  
Xie Xiaoming, Zhang Wei. 3D numerical modeling of nearshore wave-induced currents[J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(3): 391–399.
- [35] 胡日军, 吴建政, Ping Dong, 等. 海岸沙坝横向迁移研究综述[J]. *水科学进展*, 2016, 27(5): 784–791.  
Hu Rijun, Wu Jianzheng, Ping Dong, et al. A review of cross-shore migration of nearshore sandbar[J]. *Advances in Water Science*, 2016, 27(5): 784–791.
- [36] 房克照, 尹继伟, 邹志利. 单沟槽沙坝海岸的裂流实验研究[J]. *水动力学研究与进展*, 2013, 28(3): 363–369.  
Fang Kezhao, Yin Jiwei, Zou Zhili. Experiment study on rip current of barred beach with a single channel[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2013, 28(3): 363–369.
- [37] 孟凡昌, 李本霞. 裂流的研究综述[J]. *海洋预报*, 2017, 34(1): 82–89.  
Meng Fanchang, Li Benxia. Review on the study of the rip current[J]. *Marine Forecasts*, 2017, 34(1): 82–89.
- [38] Moulton M, Dusek G, Elgar S, et al. Comparison of rip current hazard likelihood forecasts with observed rip current speeds[J]. *Weather and Forecasting*, 2017, 32(4): 1659–1666.
- [39] 张弛, 郑金海, 王义刚. 波浪作用下沙坝剖面形成过程的数值模拟[J]. *水科学进展*, 2012, 23(1): 104–109.  
Zhang Chi, Zheng Jinhai, Wang Yigang. Numerical simulation of wave-induced sandbar formation[J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(1): 104–109.
- [40] Zheng Jinhai, Zhang Chi, Demirbilek Z, et al. Numerical study of sandbar migration under wave-undertow interaction[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2014, 140(2): 146–159.
- [41] 房克照, 邹志利, 刘忠波. 沙坝海岸上裂流的数值模拟[J]. *水动力学研究与进展*, 2011, 26(4): 479–486.  
Fang Kezhao, Zou Zhili, Liu Zhongbo. Numerical simulation of rip current generated on a barred beach[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2011, 26(4): 479–486.
- [42] Haas K A, Svendsen I A, Haller M C, et al. Quasi-three-dimensional modeling of rip current systems[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2003, 108(C7): 3217.
- [43] Long J W, Özkan-Haller H T. Offshore controls on nearshore rip currents[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2005, 110(C12): C12007.
- [44] Johnson D, Pattiaratchi C. Boussinesq modelling of transient rip currents[J]. *Coastal Engineering*, 2006, 53(5/6): 419–439.
- [45] Zhang Yao, Kennedy A B, Tomiczek T, et al. Validation of Boussinesq–Green–Naghdi modeling for surf zone hydrodynamics[J]. *Ocean Engineering*, 2016, 111: 299–309.
- [46] Shi Fengyan, Kirby J T, Harris J C, et al. A high-order adaptive time-stepping TVD solver for Boussinesq modeling of breaking waves and coastal inundation[J]. *Ocean Modelling*, 2012, 43–44: 36–51.

## Study on the risk and characteristics of rip currents over sandbars at South China's recreational beaches

Zhang Yao<sup>1</sup>, Liu Xu'nan<sup>1</sup>, Liu Qiang<sup>1</sup>, Wang Bin<sup>1</sup>, Hong Xiao<sup>1,2</sup>, Zhou Shuihua<sup>2</sup>, Zhang Juan<sup>2</sup>,  
Meng Xiaojie<sup>3</sup>, Li Rui<sup>4</sup>, Tao Jinbo<sup>4</sup>, Wang Gang<sup>5</sup>

(1. National Marine Hazard Mitigation Service, Ministry of Natural Resources, Beijing 100194, China; 2. South China Sea Prediction Center, State Oceanic Administration, Guangzhou 510260, China; 3. Engineering College, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 4. North China Sea Marine Forecasting Center, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China; 5. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** In responding to deadly drowning accidents, China's first operational attempt on the rip current hazard prevention for coastal tourism was carried out by the National Marine Hazard Mitigation Service (NMHMS). A great number of recreational beaches in South China are found developing littoral sand bars and rip currents. Present paper, which is part of the nation-wide work, investigate the mechanism, characteristics, and evolution sandbar-induced rip current at three most visited beaches employing multi-techniques as complementary tools. The

alongshore sandbar morphology, shorelines, and rip currents are highly dynamic with seasonal variations evidenced by the morphodynamic calculation and the satellite image interpretation. Unconventional contrary seasonal evolution of the rip current is identified at Qing'ao Bay with higher risk in cooler seasons. The rip current shows high sensitivity to the sandbar group pattern, the wave height, and the incident direction according to the phase-resolving hydrodynamic modelling. The wider rip channel between sandbars generated larger rip size compared to narrower gaps, but is not necessarily accompanied by stronger flow velocity. The rip current might be totally absent in small channels when majority of water flows out through neighboring broader pathways. The flow velocity is demonstrated proportional to the wave height and inversely proportional to the incident angle. Alongshore currents dominated over rip currents as the wave incident angle reached  $10^{\circ}$ – $30^{\circ}$  in the numerical simulation. It is verified in the field observation that the rip current is most hazardous at low tide when shallower water depth intensifies the topographic effect on waves and currents. The study result provides useful reference for the engineering mitigation and public warning of beach rip hazard. In near future, long time observation for specific sections of shoreline would be conducted to accumulate enough statistics for the rip current prediction and risk governance.

**Key words:** rip current; sandbar; wave; morphodynamics; numerical modelling; marine hazard