

# 基于地形动力学的华南海滩裂流风险研究

李志强

广东海洋大学工程学院, 广东 湛江 524088

**摘要:** 海滩是人们海滨旅游首选目的地, 具有重要的旅游经济价值。裂流是海滨旅游的潜在威胁, 已经造成了重大的生命和财产损失。本文基于  $\Omega$ -RTR 海滩状态模型( $\Omega$  为无维沉降速率参数, RTR 为相对潮差)提出了海滩裂流风险评价方法, 在收集华南沿海 51 个海滩波浪要素、潮差、泥沙粒径等地形动力要素的基础上, 对海滩裂流风险进行了初步评估。结果表明福建南部岸段、粤东的汕尾岸段、粤西的阳江、茂名岸段、海南的东部岸段和南部岸段裂流风险最大。通过与遥感图像和有关的报道比较, 探讨了评估结果的合理性。本文结果可为海滩浴场的选址和管理提供参考, 但对具体海滩裂流风险评估还需做更多现场观测。

**关键词:** 裂流; 地形动力学; 海滩风险; 溺水事故

中图分类号: P731.21; X820.4; X43 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2015)01-0008-07

## Study on the rip current hazard of South China beaches based on beach morphodynamics

LI Zhi-qiang

Ocean Engineering Department, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China

**Abstract:** Beach is often the first coastal tourism destination of people, which has important tourism economic value. Rip currents are potential hazard to the visitors who go to the beach, and have caused significant loss of life and property. A rip current hazard assessment method is proposed here based on the beach state model of Masselink and Short ( $\Omega$ -RTR model,  $\Omega$  is dimensionless fall velocity, RTR is spring tide range). After collecting morphodynamic parameters (wave parameters, tidal range and sediment grain size) of 51 South China beaches, a preliminary assessment of the rip current hazard was carried out using the  $\Omega$ -RTR method. Results show that the coast sections of southern Fujian, Shanwei of eastern Guangdong, Yangjiang and Maoming of western Guangdong, eastern and southern Hainan have the highest rip current risk. The evaluation results were compared with remote sensing images and related media reports. Although the results are helpful to select and manage recreational beach locations, more field observations must be taken for a more specific assessment of beach rip current risk hazard.

**Key words:** rip current, morphodynamic, beach hazard, beach drowning accident

海洋与海岸带旅游是世界旅游业发展最快的领域之一(Hall, 2001)。《中国海洋经济统计公报(2012)》表明, 我国滨海旅游业规模持续增大, 2012 年实现增加值 6972 亿元, 是海洋经济中最大的行业, 占海洋经济总产值的 33.9%(国家海洋局, 2013)。海滩是人们海滨旅游首选目的地, 在世界上所有的资源类型中, 海滩是吸纳游客最多、创造税收最多的旅游地(Agrardy, 1993)。欧美发达国家海滩旅游非常普遍, 美国“旅行顾问”网站对 2012 年准备旅行的人调查发

现海滩是他们首选的旅行目的地, 44%的被调查者表示计划到海滩度假(TripAdvisor, 2011)。《ABC/华盛顿邮报》的调查表明海滩是最受欢迎的暑假目的地(ABC/Washington Post, 2012), 72%的美国人表示海滩是度暑假的最佳选择, 40%的美国人在海滩度假法定假期, 52%的人计划在未来一年去海滨度假。迈阿密海滩的旅游税收比黄石公园、大峡谷和约塞米蒂国家公园三者之和还要多(Houston, 1996)。

作为一种旅游资源, 海滩是一种松散沉积物的

收稿日期: 2014-04-03; 修订日期: 2014-05-06。林强编辑

基金项目: 国家自然科学基金项目(40806036); 广东省教育厅育苗工程项目; 广东海洋大学自然科学基金青年团队项目(c1212157)。

作者简介: 李志强(1974~), 男, 湖南省郴州市人, 博士, 副教授, 从事海岸地形动力学研究。E-mail: qiangz1974@163.com

堆积体,在波浪、潮汐、潮流、地质地貌背景等诸多因素的作用下,呈现出复杂的地形动力状态组合,给旅游者和旅游管理者带来诸多安全隐患,其中裂流是造成海滨旅游安全事故的最重要原因。澳大利亚和美国是世界上海滨浴场安全管理和救援最成熟的国家,但2000年至2010年期间,美国和澳大利亚仍发生500000起海滩溺水救援事件。澳大利亚每年约有25000起,其中89%与裂流有关(Short et al, 1994)。据美国救生协会估计,80%救援与裂流有关,每年有超过100人死于海滩溺水(Lascody, 1998; Lushine, 1991)。在1960~2000年之间,美国海滩溺水事故造成的损失估计超过42亿美元(Brander et al, 2011)。

我国有数百个优良海滩分布于漫长的海岸线上,吸引了大量游客和当地居民前往游玩。由于游客对海滩环境的不熟悉及海滩浴场管理的不到位,我国每年都会发生大量的海滩溺水事故,给人们生命财产带来巨大的损失。迄今,我国海滩裂流的研究无论从理论上还是运用上都极少有报道。本文将基于海滩地形动力学理论对华南海滩裂流风险做一些探讨。

## 1 裂流及其危险性

裂流最先由Shepard(1936)命名,是一种较强的、狭窄的、向海的流。裂流由裂流头、颈、向岸流、补偿流和裂流槽等结构组成,裂流起源于岸线附近,向海伸出碎波带之外(Shepard, 1941; Inman et al, 1973; Short, 2007)(图1)。裂流对悬沙、泡沫、浮游生物、营养成分、人类或其他漂浮物质等的扩散和穿过碎波带起重要作用(Short, 2007; Clarke et al, 2007; Brown et al, 2009; Vagle et al, 2001)。Inman et al(1973)形象地把裂流比喻为将物质从碎波带输运到内陆架的“高速公路”。

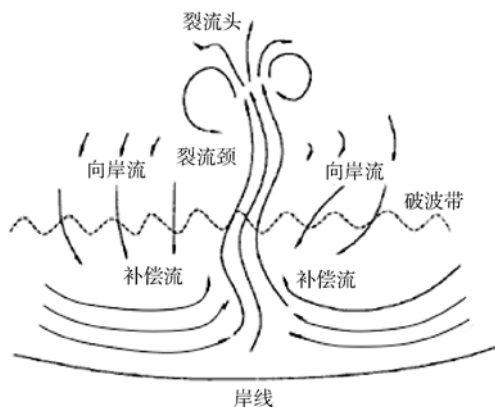


图1 裂流示意图

Fig. 1 Sketch of a rip current

较强的离岸流速是裂流造成溺水事故的主要原因。现场观测和理论研究得到的裂流速度多在 $0.3\sim 1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Brander, et al, 2011),但也曾经观测到流速超过 $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,甚至 $3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的裂流(Short, 2007)。因此,裂流向海流动速度往往超过一个强壮男人游泳的速度,能够快速地将海滩游泳者带到深水,对游泳者来说是一个危险的杀手。佛罗里达死于裂流的人数超过死于闪电、飓风和风暴的人数(Lascody, 1998; Lushine, 1991)。裂流的出现有时具有突发性,给遭遇裂流的游泳者造成恐慌,更加剧了裂流溺水事故的后果。1938年2月6日,澳大利亚悉尼著名的Bondi海滩一个突发的大浪引起裂流,使约250人被卷入裂流并激发恐慌,造成5人死亡,为此新南威尔士在该海滩事故发生75周年时设立裂流警示教育日(Brander, 2013)。

## 2 海滩地形动力学模型与裂流风险

### 2.1 海滩地形动力学模型

裂流是海滩上的一种特殊现象,与海滩地形、近岸带水力要素组合密切相关。通过大量的现场观测,海岸地貌动力学家提出了多种地形动力学模式来描述这种海滩地形组合与动力要素的关系。

Wright et al(1985)对澳大利亚海滩进行现场调查后提出无维沉降速率参数( $\Omega$ )模型: $\Omega = H_b/W_s T$ 。式中, $H_b$ 是破波波高, $W_s$ 是泥沙沉降速率, $T$ 是波浪周期。该模型把海滩状态分成为3种基本类型: $\Omega > 6$ 时,为消散型; $\Omega$ 介于1~6之间时为过渡性,其中又可以分成低潮台地、横向沙坝和裂流、韵律沙坝和海滩、沿岸沙坝槽谷4个状态; $\Omega < 1$ 时,海滩为反射型。该模型是基于澳大利亚的小潮差海岸环境提出的,没有考虑到潮差对海滩状态的影响,对于中间状态海滩的4个类型区分往往需要研究者进行主观判断。

考虑到海滩地形组合不仅与波浪要素有关,还取决于波浪与潮差的相互作用,Masselink et al(1993)在无维沉降速率模型的基础上引入相对潮差(relative tide range,用参数RTR表示),建立较为系统的分类模型。参数定义为: $RTR = TR/H_b$ 。式中,TR为大潮平均潮差。使用参数RTR和 $\Omega$ 组合,将海滩划分为4组8类,其划分的类型及特征分别是:

1) 反射组( $\Omega < 2$ )。当 $\Omega < 2$ 和 $RTR < 3$ 时为完全反射型海滩(Reflective beaches,简称R类)。当RTR为3~7, $\Omega < 2$ 时为有裂流的低潮台地海滩(low tide terrace with rips,简称LTTR类),该类海滩有陡的、高潮反射性海滩,而在低潮位附近形成相对平坦的

台地, 并伴有裂流。当  $RTR > 7$  时为没有裂流的低潮台地海滩(low tide terrace without rips, 简称 LTT 类), 该类海滩显著的特征具有均匀的、无变化的低潮台地, 没有裂流。

2) 中间状态组( $2 \leq \Omega \leq 5$ )。当  $RTR < 3$  时为沙坝海滩(Barred beaches, 简称 B 类), 该类海滩沙坝地形可由横向沙坝和裂流交替组成, 可能出现韵律形态沙坝或线状沙坝。当  $3 \leq RTR \leq 7$  时为低潮沙坝/裂流海滩(low tide bar/rip, 简称 LTBR 类), 可能会有冲流沙坝及低潮位附近的沙坝和裂流地形。

3) 消散组( $\Omega > 5$ )。当  $\Omega > 5$  和  $RTR < 3$  时, 为沙坝消散型海滩(barred dissipative beaches, 简称 BD 类), 剖面特征是具有水下沿岸沙坝-槽谷地形, 碎波带类有较强的长重力波。当  $RTR > 3$  时为没有沙坝的消散海滩(non-barred dissipative beaches, 简称 NBD 类)。该类海滩更加消散, 规模不变, 但更平缓, 没有沙坝。

4) 超消散海滩。当  $\Omega > 2$  且  $RTR > 7$  时为超消散海滩(ultra-dissipative beaches, 简称 UD 类), 海滩通常平缓、无变化, 且潮间带较宽。中间状态  $\Omega$  值(2~5)的超消散海滩, 高潮碎波带环境可能是中间状态到反射型, 而在  $\Omega > 5$  的超消散海滩上, 整个潮汐周期内, 碎波带环境都是消散的。

## 2.2 海滩裂流风险等级

根据该模型对海滩裂流的描述, 参照相关研究的成果(Scott et al, 2011; 林雪美, 2009), 同时结合裂流与近岸沙坝的关系, 可以认为上述各类海滩中, LTBR 和 B 类海滩裂流出现的概率最大, 对海滩游泳者的威胁也最大, 可以认为是高风险海滩。BD 和 LTTR 类海滩有可能出现裂流, 海滩裂流风险中等。LTT、NBD、UD、R 裂流出现的可能性很小, 属于裂流风险很小的海滩。由此建立的裂流风险模型见图 2。需要说明的是, 这里仅根据裂流出现的可能性来讨论海滩浴场的风险性, 没有考虑其他因素对游泳安全性的影响。因为根据 Short et al(1994)研究,

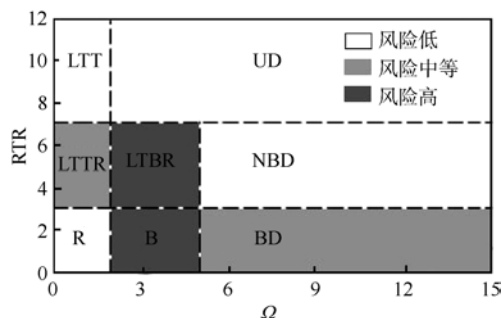


图 2 裂流风险评价模型

Fig. 2 Rip current hazard model

由于碎波带宽度及海滩底部回流的影响, 消散海滩也是十分危险的海滩。

## 3 数据收集与处理

### 3.1 数据收集

选取福建、广东、海南和广西沿岸 51 个岬间海滩(岬间弦长在 1km 以上)(图 3), 收集各海滩的地形动力参数值(图 4)。动力因子数据主要引自《中国海湾志(第七、八、十一分册)》(中国海湾志编纂委员会, 1993a、b、c)、《中国海岸带水文》(1995)、黄方(1995)、苏纪兰 等(2005)、王宝灿 等(2006)。由于研究者使用的观测资料不同, 波高、潮差特征值有一定差异, 本文通过取中间值的方法确定。波高取多年平均波高, 由于我国早期近岸波浪观测是用光学测波仪为主, 因此波高值实为十分之一大波波高( $H_{1/10}$ )的多年平均值, 使用时先转换成平均波高。潮差数据选用多年平均潮差和最大潮差(由于获得全部海滩多年平均大潮潮差存在困难, 后面相对潮差指数计算也采用最大潮差)。个别海湾波高和潮位数据缺乏, 采取对相邻海湾线性插值的办法得到。泥沙粒径部分来自《中国海湾志(第十一分册)》(1993c)、王宝灿 等(2006)和曹惠美 等(2006)的观测数据; 部分是作者多年现场采样积累, 泥沙样品均为正常波况下采样获得, 然后通过实验分析得到平均粒径。

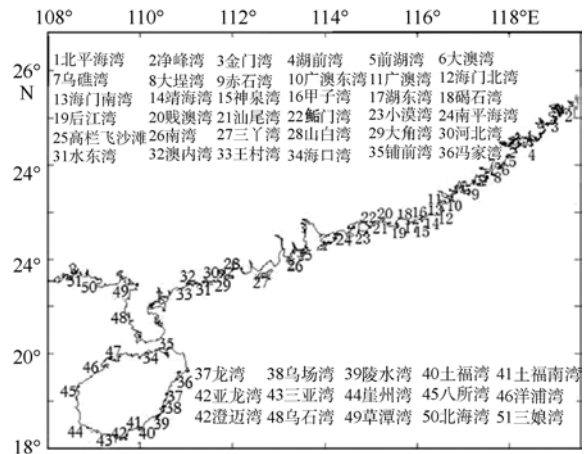


图 3 51 个岬间海滩位置示意图

Fig. 3 Locations of 51 beaches in South China

### 3.2 数据处理

破波波高采用 Komar et al(1972)提出的公式计算:

$$H_b = 0.39g^{1/5} (TH_\infty^2)^{2/5}$$

其中,  $H_b$  为破波波高,  $T$  为波周期,  $H$  为深水波高,  $g=9.8\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$  为重力加速度。

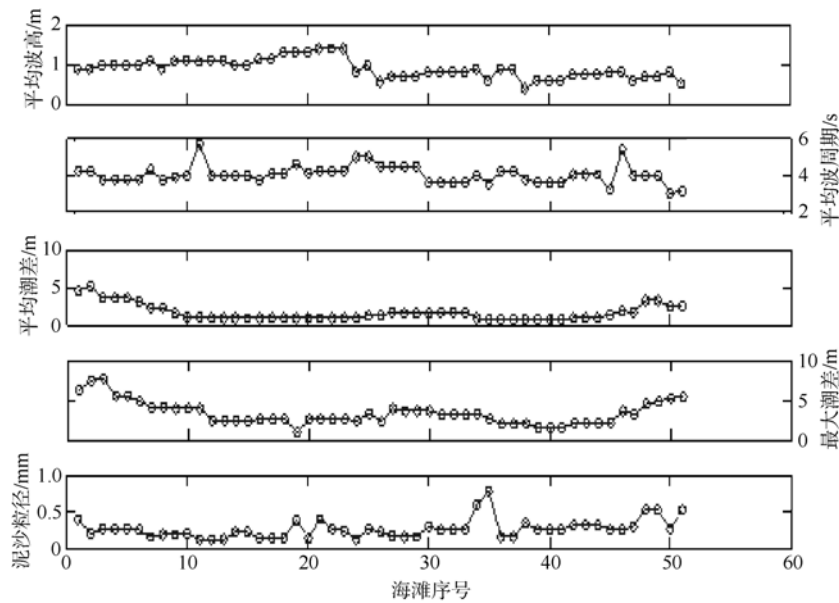


图4 51个海滩地形动力参数

Fig. 4 Morphodynamics of 51 beaches in South China

泥沙沉降速率按 Ferguson et al(2004)提出的公式计算:

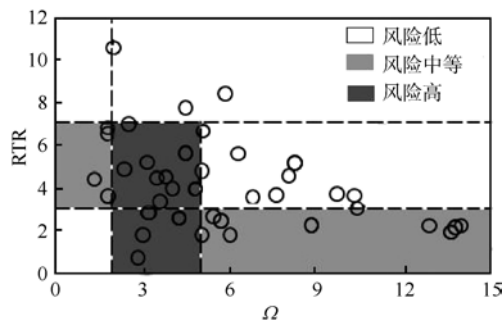
$$\omega = (RgD^2) / \left[ C_1 v + (0.75 C_2 RgD^3)^{0.5} \right]$$

其中,  $\omega$  为泥沙沉降速率;  $R$  为沉积物水下比重, 按石英取为 1.65;  $g$  为重力加速度;  $D$  为泥沙中值粒径;  $C_1$ 、 $C_2$  为常数, Ferguson et al(2004)建议  $C_1=18$ 、 $C_2=1$ ;  $v$  为运动黏滞,  $v=1.0 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  (水温  $20^\circ\text{C}$ )。

## 4 结果与讨论

### 4.1 结果

计算各海滩的无量沉降速率参数  $\Omega$  和相对潮差参数 RTR, 并绘制  $\Omega$ -RTR 散点图(图 5)。由  $\Omega$  参数来看, 华南海滩主要为中间状态海滩。国外不少研究以  $\Omega$  参数来区分海滩的危险性, 但需要现场观测和主观判断, 所以对海滩裂流的风险评估操作起来有难度。但这里以 Masselink et al(1993)提出的模型来划分, 具有很好的区分度。各海滩的地形

图5  $\Omega$ -RTR 散点图Fig. 5 Scatter plot of the  $\Omega$ -RTR model results

动力状态类型和危险性见表 1。可以看到, 华南海岸的裂流风险普遍较大, 其中福建南部岸段、粤东的汕尾岸段、粤西的阳江和茂名岸段、海南的东部岸段和南部岸段裂流风险最大。

### 4.2 典型海滩裂流风险分析

为探讨上述评估结果的合理性, 下面以水东湾和海南南部海滩为例对海滩裂流风险性进行探讨。

水东湾位于广东茂名市境内, 水东海滩有“中国第一滩”美誉。水东海滩在相对潮差分类模型中为低潮沙坝/裂流海滩(LTBR 类)。根据陈子荣等(1990, 1991, 1995)的观测及现场调查, 堆积的水下地形(沙坝)在海湾中间岸段自西向东消失。但水下水上地形之间转换关系明显。当水下准周期性形成的沙坝向岸迁移连接时, 水上部分则建造起滩肩。碎波带存在侵蚀性裂流——滩角过程。根据遥感图像也可以看到, 在低潮时, 碎波带出现典型的低潮沙坝和裂流地形(图 6a), 而在高潮时该海滩裂流出现的概率很小, 几乎不存在明显的裂流现象(图 6b), 符合低潮沙坝/裂流海滩特征。该海滩在低潮时游泳危险性大。

海南岛是我国最具热带风情的旅游区, 海滩观光和游泳是到海南旅游者的首选目的地。随着到海南旅游的人数日益增多, 海滩溺水事故也显著上升。大东海、三亚湾、亚龙湾、海棠湾等海滩已经成为游泳溺水事故高发区。2004 年 7 月 18 日晚, 海南省三亚大东海 7 人溺水, 3 名游泳者溺水死亡(苏隐墨, 2004)。2005 年“五一”黄金周期间, 大东海有 70 多名游客溺水, 其中 3 名游客死亡, 67 名被救起

表 1 华南 51 个海滩地形动力状态类型与裂流危险性

Tab. 1 Beach state and rip current hazard of 51 beaches in South China

海滩	状态类型	裂流风险	海滩	状态类型	危险性	海滩	状态类型	裂流风险
北平海湾	UD	低	碣石湾	BD	中	铺前湾	LTTR	中
净峰湾	NBD	低	后江湾	B	高	冯家湾	BD	中
金门湾	UD	低	贱澳湾	BD	中	龙湾	BD	中
湖前湾	LTBR	高	汕尾湾	B	高	乌场湾	LTBR	高
前湖湾	LTBR	高	鲘门湾	BD	中	陵水湾	B	高
大澳湾	NBD	低	小漠湾	BD	中	土福湾	B	高
乌礁湾	NBD	低	南平海湾	NBD	低	土福南湾	B	高
大埕湾	NBD	低	高栏飞沙滩	LTBR	低	亚龙湾	B	高
赤石湾	NBD	低	南湾	LTBR	高	三亚湾	B	高
广澳东湾	NBD	低	三丫湾	NBD	低	崖州湾	B	高
广澳湾	NBD	低	山白湾	NBD	低	八所湾	BD	中
海门北湾	BD	中	大角湾	NBD	低	洋浦湾	LTBR	高
海门南湾	BD	中	河北湾	LTBR	高	澄迈湾	LTBR	高
靖海湾	BD	中	水东湾	LTBR	高	乌石湾	LTTR	中
神泉湾	BD	中	澳内湾	LTBR	高	草谭湾	LTTR	中
甲子湾	BD	中	王村湾	LTBR	高	北海湾	NBD	低
湖东湾	BD	中	海口湾	LTTR	中	三娘湾	LTT	低



图 6 水东(a、b)、亚龙湾(c)、大东海(d)海滩遥感影像(箭头所指为裂流)

Fig. 6 Remote sensing images of Shuidong (a,b), Yalongwan (c) and Dadonghai (d) beaches. The arrows indicate rip currents

(苏隐墨, 2005)。2013年8月9日, 有11名游客溺水获救, 1名游客溺亡(利声富 等, 2013)。根据当地人的描述, 这些海滩“虽然看起来都是被湛蓝的海水所覆盖, 但水下的地形却不尽相同……海底被冲刷得坑坑洼洼, 有很多深坑、海沟和斜坡, 而这些深坑和海沟容易导致海水聚集, 从而容易形成暗流……表面上看是海浪朝岸上涌, 实际上是海水暗流往海里抽, 这种情况下游泳非常危险”(苏隐墨, 2005)。这些所谓的深坑、海沟实际上就是裂流槽, 暗流就是裂流。从分类来看, 海南南部海滩基本属于沙坝海滩(B类)。图6c、d分别为大东海和亚龙湾的遥感影像,

可以清晰地看到发育良好的沙坝和裂流槽。现场照片也可以看到波浪在近岸沙坝顶部破碎, 碎波带内泥沙被裂流带到碎波带外, 形成典型的裂流颈和裂流头结构(图 7)。

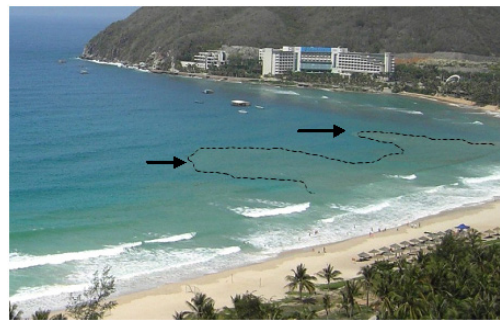


图 7 大东海裂流照片

箭头所示颜色偏浑浊带, 虚线标示裂流范围

Fig. 7 Rip currents in Dadonghai beach (indicated by arrows and dashed line)

#### 4.3 讨论

华南地区海岸线漫长, 海岸动力环境复杂, 为提取各种要素带来了一定困难, 要素的选取也有一定的不确定性和误差。由于我国近岸海洋水动力观测站点有限, 本文对水动力要素的提取采用了多种来源资料综合和主观判断, 并结合插值的方法, 会对最后的结果产生一定影响。同时, 海滩的泥沙分布和现场采样具有一定的随机性, 也会对结果产生影响。此外, 海滩状态模型虽然广泛适用, 但在多变、复杂海岸环境下的有效性还有不少争议。结合

相关的研究成果及现场的大量观测, 分类结果大致与实际海滩状态基本一致, 特别是与重要的旅游海滩吻合较好。

需指出的是, 海滩虽然存在裂流, 但在没有裂流发育的位置游泳是相对安全的。本文结论是通过海滩平均地形动力状态来进行裂流风险的初步估计, 可为海滩浴场的选址和管理提供参考。裂流在海滩上出现的可能性和出现的位置与波浪的方向、波高大小、长重力波、潮汐涨落等有关(Short, 2007; MacMahan et al, 2004; Munk, 1949; Smith et al, 1995)。要掌握具体海滩的裂流情况, 还需开展现场的长期观测, 本文只能提供一个平均的状况。对于高风险的海滩浴场管理, 需要加强对裂流的实时

监控。

## 5 结论

海滩是旅游者最向往的旅游目的地之一, 但海滩裂流给海滩管理者带来了巨大挑战。本文基于海滩地形动力学模型建立了海滩裂流风险的评估方法, 对华南海滩的裂流风险进行了初步探讨。结果表明, 福建南部岸段、粤东的汕尾岸段、粤西的阳江和茂名岸段、海南的东部岸段和南部岸段裂流风险最大。结论与调查结果、相关溺水事故报道大致吻合, 对海滩浴场的选址和管理有参考意义, 但更详尽的具体海滩裂流风险评估需要做更多现场长期观测。

## 参考文献

- 曹惠美, 蔡锋, 苏贤泽. 2006. 华南沿海若干砂质海滩沉积物粒度特征的分析[J]. 海洋通报, 4: 436–45.
- 陈子荣, 李春初. 1990. 弧形海岸中间过渡带海滩剖面的地貌动态分析[J]. 海洋科学, 2: 6–12.
- 陈子荣, 李春初, 罗章仁. 1991. 广东水东湾弧形海岸切线段海滩剖面的过程分析[J]. 海洋学报, 1: 82–90.
- 陈子荣. 1995. 弧形海岸海滩地貌对台风大浪的响应特征[J]. 科学通报, 40(23): 2168–2170.
- 国家海洋局. 2013. 中国海洋经济统计公报(2012)[R]. 北京: 海洋出版社: 4.
- 黄方, 叶春池. 1995. 广东海岛海洋水文[M]. 广州: 广东科技出版社: 10–77.
- 利声富, 王龙凤. (2013-08-14)[2014-03-30]. 三亚大东海溺水事故频发, 因海域暗流旋涡流多[EB/OL]. <http://news.hainan.net/hainan/shixian/qn/sanya/2013/08/14/1506441.shtml>.
- 林雪美, 黄翊翔, 沈淑敏. 2009. 台湾东北部福隆海滩类型和裂流分布之长期变动研究[J]. 地理研究(台湾), 50: 47–65.
- 苏纪兰, 袁业立. 2005. 中国近海水文[M]. 北京: 海洋出版社, 305–351.
- 苏隐墨. (2004-07-20)[2014-03-30]. 三亚大东海 18 日 7 人溺水 3 游客死亡 4 人获救[EB/OL]. [http://news.xinhuanet.com/newscenter/2004-07/20/content\\_1616951.htm](http://news.xinhuanet.com/newscenter/2004-07/20/content_1616951.htm).
- 苏隐墨. (2005-05-09) [2014-03-30]. 海南三亚五一期间 70 多人溺水 3 名游客身亡[EB/OL]. <http://news.sina.com.cn/c/2005-05-09/10536588274.shtml>.
- 王宝灿, 陈沈良, 龚文平, 等. 2006. 海南岛港湾海岸的形成于演变[M]. 北京: 海洋出版社: 8–183.
- 《中国海岸带水文》编写组. 1995. 中国海岸带水文[M]. 北京: 海洋出版社: 132–172.
- 中国海湾志编纂委员会. 1993a. 中国海湾志: 第七分册(福建北部海湾) [M]. 北京: 海洋出版社: 207–212.
- 中国海湾志编纂委员会. 1993b. 中国海湾志: 第八分册(福建南部海湾) [M]. 北京: 海洋出版社: 10–327.
- 中国海湾志编纂委员会. 1993c. 中国海湾志: 第十一分册(海南省海湾) [M]. 北京: 海洋出版社: 67–75.
- ABC/WASHINGTON POST. (2012-1-20)[2014-03-30] Summer vacation perennial: The mountains or the beach[EB/OL]. <http://www.langerresearch.com/uploads/1127a31FavorabilityNo31.pdf>.
- AGRARDY T M. 1993. Accommodating ecotourism in multiple use planning of coastal and marine protected areas[J]. Ocean Coast Manage, 20: 219–239.
- BRANDER R W, BRADSTREET A, SHERHER S, et al. 2011. Responses of swimmers caught in rip currents: Perspectives on mitigating the global rip current hazard[J]. International Journal of Aquatic Research and Education, 5: 476–482.
- BRANDER R. 2013. Bondi mass rescue and the myth of the collapsing sand bar [J]. Lifeguard Magazine, 8: 27.
- BROWN J, MACMAHAN J H, RENIERS A, et al. 2009. Surf zone diffusivity on a Rip Channeled Beach [J]. J Geophys Res, 114: C11. doi:10.1029/2008JC005158.
- CLARKE L, ACKERMANN D, LARGIER J. 2007. Dye dispersion in the surf zone: measurements and simple models [J]. Continental Shelf Research, 27: 650–669.
- FERGUSON R I, CHURCH M. 2004. A simple universal equation for grain settling velocity [J]. J Sediment Geol, 74: 933–937.
- HALL C M. 2001. Trends in ocean and coastal tourism: the end of the last frontier[J]. Ocean coast manage, 44: 601–618.
- HOUSTON J R. 1996. International tourism and US beaches [J]. Shore & Beach, 4: 3–4.
- INMAN D L, BRUSH B M. 1973. Coastal challenge [J]. Science, 181: 20–32.
- KOMAR P, GAUGHAN M K. 1972. Airy wave theory and breaker height prediction[C]// Proceedings of the 13th Conference on Coastal Engineering, Vancouver: ASCE: 405–418.
- LASCODY R L. 1998. East Central Florida rip current program [J]. National Weather Digest, 22(2): 25–30.
- LUSHINE J B. 1991. A study of rip current drownings and related weather factors [J]. National Weather Digest, 16: 13–19.

- MACMAHAN J H, RENIERS A J H M, THOMTON E B, et al. 2004. Surf zone eddies coupled with rip current morphology[J]. *J Geophys Res*, 109: C07004. doi:10.1029/2003JC002083.
- MASSELINK G, SHORT A D. 1993. The effect of tide range on beach morphodynamics, a conceptual model[J]. *J Coast Res*, 9: 785–800.
- MUNK W H. 1949. Surf beats[J]. *Transition American Geophysical Union*, 30: 849–854.
- SCOTT T M, RUSSELL P E, MASSELINK G, et al. 2011. Rip current hazards on large-tidal beaches in the United Kingdom. [C] // LEATHMAN S, FLETEMEYER J. *Rip Currents: Beach Safety, Physical Oceanography and Wave Modeling*. New York: CRC Press: 225–243.
- SHEPARD F P. 1936. Undertow, rip tide or rip current[J]. *Science*, 84: 181–182.
- SHEPARD F P, EMERY K O, LAFOND E C. 1941. Rip currents: A process of geological importance[J]. *J Geol*, 49: 338–369.
- SHORT A D, HOGAN C L. 1994. Rip currents and beach hazards: Their impact on public safety and implications for coast manage [J]. *J Coast Res*, SI(12): 197–209.
- SHORT A D. 2007. Australian rip systems—friend or foe[J]. *J Coast Res*, SI(50): 7–11.
- SMITH J A, LATGIER J L. 1995. Observations of nearshore circulation: rip currents[J]. *J Geophys Res*, 100: 10967–10975.
- TRIPADVISOR. (2011-11-08)[2014-03-20]. Trip Advisor Announces 2012 Travel Trends Forecast[EB/OL]. [http://www.tripadvisor.com/PressCenter-i4894-c1-Press\\_Releases.html](http://www.tripadvisor.com/PressCenter-i4894-c1-Press_Releases.html).
- VAGLE S, FARMER D M, DEANE G B. 2001. Bubble transport in rip currents[J]. *J Geophys Res*, 106, 11677–11689.
- WRIGHT L D, SHORT A D, GREEN M O. 1985. Short-term changes in the morphodynamic states of beaches and surf zones: An empirical model[J]. *Mar Geol*, 62(3–4): 339–364.