

李志强, 朱雅敏. 基于地形动力学的海滩裂流安全性评价——以三亚大东海为例[J]. 热带地理, 2015, 35 (1): 96-102.
LI Zhiqiang, ZHU Yamin. Beach Safety Evaluation Based on Rip Current Morphodynamic: A Case Study of Dadonghai of Sanya, China[J]. Tropical Geography, 2015, 35 (1): 96-102.

基于地形动力学的海滩裂流安全性评价 ——以三亚大东海为例

李志强¹, 朱雅敏²

(1. 广东海洋大学 工程学院, 广东 湛江 524088; 2. 国家海洋局 珠海海洋环境监测中心站, 广东 珠海 519015)

摘 要: 文章基于海滩地形动力学模型建立了海滩安全性评价方法, 认为低潮沙坝/裂流海滩类和沙坝类海滩出现裂流概率最大, 沙坝消散类和有裂流的低潮台地类海滩裂流风险中等, 没有裂流的低潮台地海滩、没有沙坝的消散海滩、超消散型、完全反射型海滩裂流风险很小。以三亚大东海为例, 利用该评价方法分析了海滩溺水事故频发的原因, 结果显示: 1) 该海滩状态以沙坝型和低潮沙坝/裂流海滩型为主, 属于高风险海滩, 此结论与当地救生实践吻合; 2) 该海滩溺水事故发生的根本原因为裂流危险性高, 故容易发生溺水事故。

关键词: 海滩安全性; 地形动力; 裂流; 溺水事故; 大东海

中图分类号: P737.17

文献标志码: A

文章编号: 1001-5221 (2015) 01-0096-07

海滩是松散沉积物的堆积体, 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, 其中海滩戏水和游泳引起的溺水事故最为常见。每年世界上都有大量关于海滩溺水事故的报道, 作为海滨浴场安全管理和救援最为成熟的国家——澳大利亚和美国, 2000—2010 年期间两国共发生了约 500 000 起海滩溺水救援事件。澳大利亚每年约有 25 000 起溺水事故; 1960—2000 年, 美国海滩溺水事故造成的损失估计超过 42 亿美元^[1], 每年有超过 100 人死于海滩溺水事故^[2-3]。近年来, 我国海滩溺水事故频发, 给人们的生命和财产造成了重大的损失。例如厦门, 据不完全统计^[4], 厦门六大海滨浴场 2004—2007 年溺水死亡人数达 174 人。因此, 开展对海滩浴场安全性的研究与评估具有重要意义。

大量的理论研究、现场观测数据统计表明, 裂流是导致海滩溺水事故的主要原因。如澳大利亚救生协会的数据表明, 89% 的海滩溺水事故与裂流有关^[5]; 据美国救生协会估计, 80% 的海滩救援事件与裂流有关, 而在佛罗里达州仅因裂流造成的溺水死

亡人数就已超过死于闪电、飓风和风暴的人数总和^[2-3]。Klein 等^[6]对 6 年的海滩救援数据分析, 发现巴西海滩 90% 的救援与裂流有关; Woodward 等^[7]分析 2006—2011 年的海滩救援数据, 发现英国 67% 海滩溺水事故与裂流有关, 救生员从 5 798 次裂流中救出了 12 607 人。我国缺乏海滩溺水事故救生统计数据, 但研究表明^[4], 我国沿岸海滩每年都发生大量的溺水事故。国内目前对裂流的研究开展很少, 仅有的成果主要围绕裂流的动力特征和数值模拟进行^[8-11], 而关于裂流与海滩安全性的研究则少有涉及。因此, 本文以溺水事故高发的三亚大东海海滩为例, 基于海滩地形动力状态分类模型, 建立裂流风险评价方法, 对大东海海滩安全性进行研究, 探究该海滩溺水事故高发的原因, 以期相关的结论能为海滩浴场的选址、海滩安全管理和救生提供参考。

1 裂流及其危险性

裂流最先由 Shepard 于 1936 年命名, 是一种较强的、狭窄的、向海的流^[12]。裂流的结构包括裂流头、裂流颈、补偿流、向岸流、裂流槽等要素 (图 1)。裂流在一定的海滩地形组合和动力条件下形成,

收稿日期: 2014-04-03; 修回日期: 2014-08-11

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 (C12157)

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

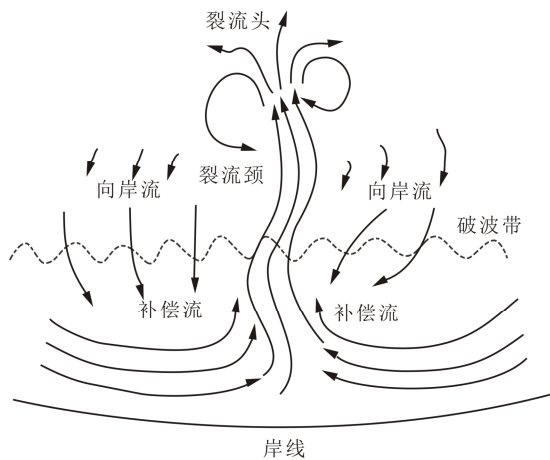


图1 裂流示意图

Fig.1 Sketch map of rip current

也会因礁石或海岸建筑物（堤坝等）而引起。裂流对于碎波带内物质扩散到碎波带外起重要作用，例如：悬沙输运、泡沫、浮游生物、营养成分、人类或其他漂浮物质^[13-17]。

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0.3~1 m/s^[18]，但也曾经观测到流速超过2 m/s，甚至达3 m/s的裂流^[13]。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，对于游泳者来说是一个危险的杀手。且裂流的出现有时具有突然性，给遭遇裂流的游泳者造成恐慌，加大了裂流溺水事故发生的可能性。1938-02-06，澳大利亚悉尼著名的Bondi海滩一个突发性大浪引发了裂流，使约250人被卷入裂流中，激发恐慌情绪，造成5人死亡^[19]。

裂流对于我国公众来说是一个较陌生的概念，人们常用的海滩“暗流”“回流”等称谓实际上指的就是裂流。例如有海滩工作人员描述：“大潮时，打在浴场东边礁石上的海浪会形成一股回流，打在浴场西边码头上的海浪也会形成一股回流，两股回流交汇时就形成了暗流，从东西两侧向中间靠拢。……，有大浪的情况下暗流的速度就像湍急的河水一般，……，海水中的暗流让游客在沙子中站不稳，被水流‘抽’进海水中”^[20]，这实际上就是典型的由海岸结构物引起的裂流。

2 裂流危险性评价方法

研究表明，除礁石和建筑物引起的裂流外，裂流与海滩地形动力状态密切相关^[21-22]。因此，本文基于海滩地形动力状态模型来建立对海滩浴场的安

全性评价方法。

2.1 海滩地形动力状态模型

最先得到广泛认同的海滩地形动力状态模型是Wright等^[21]提出的无维沉降速率参数（ Ω ）模型：

$$\Omega = H_b/W_s T \quad (1)$$

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：当 $\Omega > 6$ 时，为消散型；当 $1 \leq \Omega \leq 6$ 时，为过渡型，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；当 $\Omega < 1$ 时，海滩为反射型。过渡型海滩都会发育裂流，但其中的4个类型区分需要研究者通过现场观测进行主观判断。

考虑到海滩状态不仅与波浪要素有关，还取决于波浪与潮差的相互作用。Masselink等^[22]在无维沉降速率模型的基础上引入相对潮差（用参数 RTR 表示），建立较为系统的分类模型。参数定义为：

$$RTR = TR/H_b \quad (2)$$

式中： TR 为大潮平均潮差。使用参数 RTR 和 Ω 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（R类）。当 $3 \leq RTR \leq 7$ ， $\Omega < 2$ 时为有裂流的低潮台地海滩（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（LTT类），该类海滩显著的特征是具有均匀的、无变化的低潮台地，没有裂流。

2) 中间状态组（ $2 < \Omega < 5$ ）。当 $RTR < 3$ 时为沙坝海滩（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，有裂流。当 $3 \leq RTR \leq 7$ 时为低潮沙坝/裂流海滩（LTBR类），碎波带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（BD类），剖面特征是具有水下沿岸沙坝-槽谷地形。当 $RTR > 3$ 时为没有沙坝的消散海滩（NBD类）。该类海滩更加消散，没有沙坝。

4) 超消散海滩。当 $\Omega > 2$ 且 $RTR > 7$ 时为超消散海滩（UD类），海滩通常平缓、无变化，且潮间带较宽。中间状态 Ω 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 裂流危险性评价方法

Masselink 等^[22]的海滩地形动力学模型对各类海滩是否存在裂流作了较好的划分。同时,理论和现场观测表明,裂流的形成与发育通常都与近岸沙坝的形态密切相关^[12,18,21-25]。基于这些结论,本文建立裂流危险性评价方法:没有沙坝发育的 LTT 类、UD 类、R 类、NBD 类裂流出现的可能性很小,属于裂流危险性很小的海滩,对游泳者来说属于最安全海滩。中间状态组的 LTBR 类和 B 类海滩,由于碎波带基本上一直发育有沙坝,裂流出现的概率最大,对海滩游泳者的威胁也最大,最不安全。Scott^[24]、林雪美等^[25]的大量现场观测也证实了这一现象。BD 和 LTR 类海滩分别由于能量消散和仅在部分时间段可能出现裂流,海滩裂流风险中等。下面以三亚大东海海滩为例,用该裂流风险评价方法研究海滩安全性。

3 大东海海滩裂流危险性评价

3.1 大东海海滩概况

大东海位于三亚市东郊,西距三亚约 3 km,东与榆林港毗邻,是一个天然形成的向南开敞袋状浅水海湾(图 2)。大东海阳光明媚,水暖沙平,是冬泳避寒胜地和度假休闲者进行潜海观光、海水浴、阳光浴的理想之地,被国家旅游局评为中国“四十佳”旅游景点之一。大东海海滩在兔尾岭和鹿回头 2 个山头中间,呈月牙形,海滩长约 2 km,沙细白,水质优良,景色优美,是海南著名的旅游海滩之一。



图 2 大东海位置示意

Fig.2 Location of Dadonghai

3.2 大东海溺水事故

大东海属于公共海滩,三亚市政府委托公司管理,免费向游人开放。据统计^[26],夏季每天到大东海游泳的游客有 2 000 多人,高峰期游泳的游客更是高达 3 000 余人。虽然管理公司配有 86 名专业搜救员,每天有 28~30 名搜救员值班巡逻,但大东海的溺水事故仍是频发。根据近 10 年当地媒体公开报道初步整理的溺水事故(表 1),可以看到溺水人数达数百人,死亡数十人。救生员感叹旅游高峰期“救人救到手软”,更有媒体把大东海海滩称为“夺命海滩”^[27-28]。

3.3 大东海海滩裂流与安全性分析

3.3.1 大东海裂流描述 据当地居民和救生员的描述,大东海海滩“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

表 1 近 10 年媒体公开报道的大东海溺水事故初步汇总

Tab.1 Drowning accidents reported by the media in recent 10 years

时间	溺水事故概述	数据来源
2004-07-18	7 人溺水, 3 人死 4 人获救。	苏隐墨 ^[29]
2004-07-30	2 天救起 12 名溺水者。	高虹 ^[30]
2005-05-01-07	黄金周期间, 共有 3 名游客游泳时溺水死亡, 有 67 名溺水者被救起。5 月 1 日当天有 7 人溺水、1 名湖北游客失踪; 5 月 2 日, 一位广东湛江籍 30 多岁游客溺水死亡; 5 日早晨, 一名四川籍的游客溺水身亡; 5 月 6 日, 共有 26 人溺水。	苏隐墨 ^[27]
2005-05-09	2 人溺水获救。	张帅等 ^[31]
2007-08-09	11 名游客溺水, 全部被救生员救出。	王红卫 ^[32]
2009-08-23	1 名俄罗斯女游客游泳溺亡。	张瑜 ^[33]
2011-09-28	1 名溺水男子被救起, 由于溺水时间过长死亡。	张瑜 ^[34]
2012-05-07	大东海 5 天内 50 余人溺水获救。	徐一豪 ^[35]
2012-06-18	4 名学生到大东海游泳, 2 名学生溺水身亡。	柴彦明 ^[36]
2012-06-21	2012 年 1-6 月期间大东海有 70 余人遇险、14 人死亡失踪。	利声富 ^[37]
2012-08-05-12	4 人溺水失踪最后死亡, 而获救的溺水者还有很多。	利声富等 ^[38]
2013-08-01-21	8 月 4 日, 湖南籍黄某救溺水女儿时溺亡, 当天有 8 人溺水获救; 8 月 9 日, 1 名游客溺亡, 当天有 11 名游客溺水获救; 8 月 16 日, 1 位湖南籍准大学生溺水身亡。据三亚大东海管理有限公司提供的材料, 从 8 月 1 日至今, 大东海旅游区共救起溺水者 80 人, 另外 4 人溺水身亡。	张瑜 ^[39]

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”^[40]。这里所谓的深坑、海沟实际上就是典型的裂流槽,暗流就是裂流。利用 Google Earth 2009-06-30(图 3-a)和 2010-06-01(图 3-b)的遥感影像,可清晰地看到大东海的裂流现象。可看到在较大的波浪条件下,碎波带裂流生成,悬沙被裂流带到碎波带外,形成典型的裂流头(见图 3-a)。虽然波浪较小,但前期发育良好的裂流槽仍清晰可见(见图 3-b)。从现场照片也可以看到碎波带内泥沙被裂流带到碎波带外(图 4)。这进一步表明,大东海海滩发育有典型的裂流,是造成海滩溺水事故的主要原因。

3.3.2 资料收集与处理 为分析大东海海滩地形动力状态,收集相关的水动力和沉积物数据。根据大东海湾内榆林海洋水文站和内村站的观测^[41-42],大东海多年平均波高 0.5 m,平均波周期为 3.5 s。全年以风浪占优势,年出现频率为 80%,涌浪出现频率为 41%。强浪向为 SSW,最大波高为 4.6 m,出现在 9 月;次强浪向为 SW,最大波高为 4.3 m,出现在 8 月。SE-S 向波高较小,NW 和 NE 向波浪对海湾影响小。大东海为不正规日潮,平均潮差为 0.85 m,平均最大潮差为 2.0 m。涨潮流速和落潮流速都比较小,为 10~20 cm/s。海滩表层泥沙平均粒径为 1.94Φ (0.356 mm)^[43]。平均波高 (\bar{H})、平均波周期 \bar{T} 和平均大潮差 (TR) 具有月变化(表 2)^[41]。

无维沉降速率参数 (Ω) 计算时,破波高采用 Komar 等^[44]提出的公式计算:

$$H_b = 0.39g^{1/5} (TH_\infty^2)^{2/5} \quad (3)$$

式中: H_b 为破波波高; $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, 为重力加速度; T 为波周期; H_∞ 为深水波高。

泥沙沉降速率按 Ferguson 等^[45]提出的公式计算:

$$\omega = (RgD^3) / [C_{1v} + (0.75C_2RgD^3)^{0.5}] \quad (4)$$

式中: ω 为泥沙沉降速率; R 为沉积物水

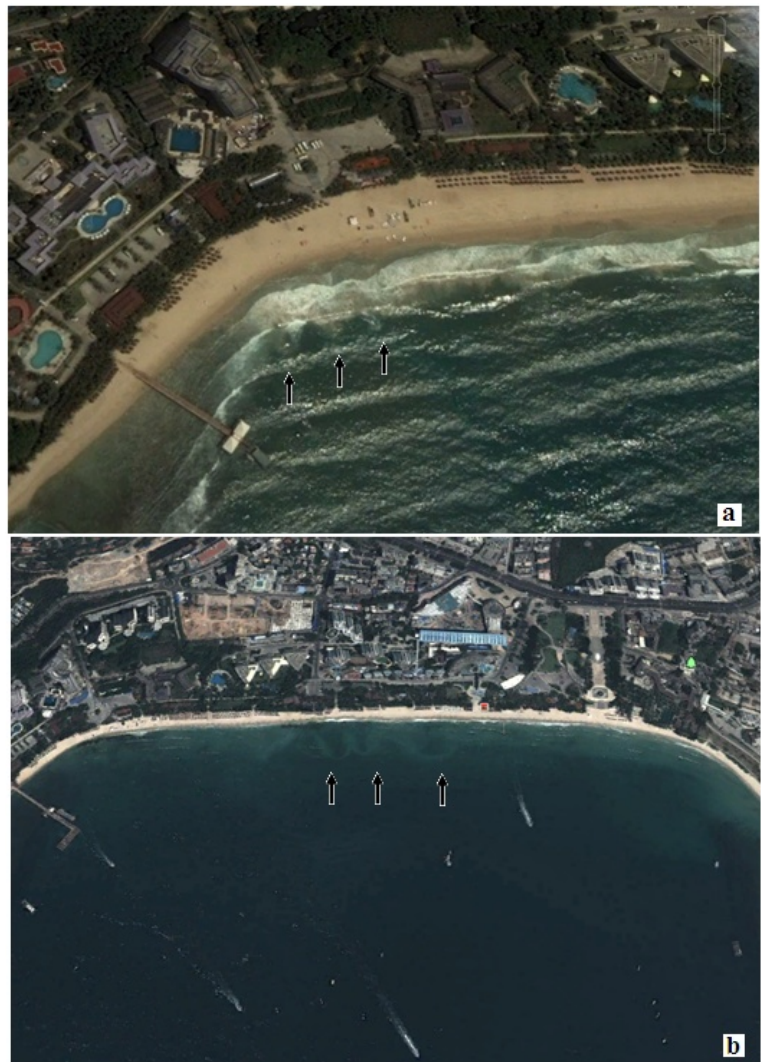
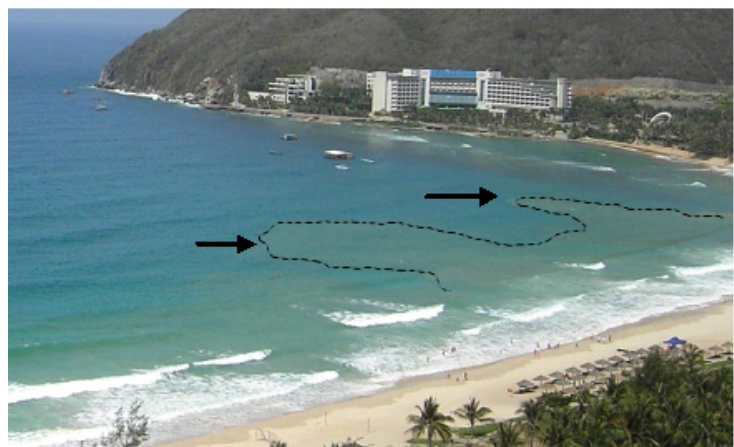


图 3 大东海遥感影像中的裂流现象(箭头所示)

Fig.3 Rip currents in the remote sensing images (indicated by arrows)



图注: 箭头所示颜色偏浑浊带, 虚线标示裂流范围。

图 4 大东海裂流照片

Fig.4 Rip currents in the Dadonghai beach (indicated by arrows)

表2 大东海波浪、潮差特征值统计

月份	\bar{H}/m	\bar{T}/s	TR/m
1	0.3	2.8	2.01
2	0.4	3.4	1.79
3	0.6	3.9	1.53
4	0.4	3.6	1.71
5	0.5	4.2	1.91
6	0.6	2.0	4.40
7	0.7	4.0	1.98
8	0.8	3.6	1.81
9	0.6	3.9	1.56
10	0.4	3.0	1.60
11	0.2	2.5	1.87
12	0.2	2.4	1.97
年平均	0.48	3.5	2.01

下比重,按石英取为1.65; D 为泥沙中值粒径; C_1 、 C_2 为常数, Ferguson等建议 $C_1 = 18$ 、 $C_2 = 1$; ν 为运动粘滞, $\nu = 1.0 \times 10^{-6} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ (水温为 20°C)。

3.3.3 大东海海滩状态与裂流 计算得到大东海各月和年平均的 Ω 、 RT 值及海滩状态(表3)。可以看到,大东海海滩的无维沉降速率参数 Ω 值全年在2~3.5之间,依照 Wright等的分类,表明该海滩属于过渡状态,全年都可能生成裂流。根据 Masselink等的海滩分类,大东海逐月的平均海滩状态为11、12月份属于超消散海滩(UD类),出现裂流的可能性较小;其余各月属于中间状态组海滩,以低潮沙坝/裂流海滩(LTBR类)为主(1-2、4-6、10月),但在旅游旺季的7-9月均属于沙坝海滩(B类)。这2种类型都是裂流出现概率最大、危险性最高的海滩类型,说明大东海海滩的危险性很高。7-9月是暑假旅游高峰期,大量的游客下水游泳,同时也造成了大量的溺水事故(见表1),正好与此时段大

表3 大东海海滩状态变化

Tab.3 Dadonghai beach states in a year

月份	Ω	RTR	海滩状态
1	2.94	6.70	LTBR
2	2.83	4.48	LTBR
3	2.98	2.55	B
4	2.7	4.28	LTBR
5	2.61	3.82	LTBR
6	2.71	3.30	LTBR
7	3.11	2.83	B
8	3.57	2.26	B
9	2.98	2.60	B
10	3.13	4.00	LTBR
11	2.74	9.35	UD
12	2.83	9.85	UD

东海为高危险性的沙坝海滩吻合。图4现场拍摄的照片即清晰地显示出波浪在沙坝破碎,同时沙坝被裂流冲断,悬沙被离岸裂流带到碎波带外侧的现象。

4 讨论

旅游安全是旅游业的生命线,没有安全,也就没有旅游业。我国很重视内陆河、湖溺水,但对于海滩溺水事故的认识还远远不够,甚至存在误区。大量的现场救援实践和当地居民的经验说明我国多数海滩存在裂流,对海滩旅游者来说是一个重大的安全隐患。海滩是我国重要的旅游资源和人们首先选择的旅游目的地之一,必须加强对海滩安全性的评估研究。

国外海滩安全性评价模型多以 Wright 等的无维沉降速率参数(Ω)模型为基础,其中可能出现裂流的为过渡型海滩,包含低潮台地、横向沙坝和裂流、韵律沙坝和海滩、沿岸沙坝槽谷4个状态。这4个状态的区分需要通过现场观测,再进行主观判别确定,工作量极大,具有不确定性,给海滩危险性评价造成困难。本文以 Masselink 等海滩地动力状态模型为基础,结合裂流与沙坝的依存关系,并综合相关现场观测成果,建立海滩安全性(或危险性)评价方法。该方法既有一定的理论基础和实践依据,同时具有定量区分裂流出现可能性的特征,操作简便。通过以大东海这一典型的、溺水事故频发的海滩为例,分析得出该海滩溺水事故发生的根本原因为裂流危险性高,容易发生溺水事故,此结论与当地新闻媒体报道溺水事故高发的事实吻合,同时也与国外的相关研究结论^[5-7]一致,可为当地旅游者和管理者起到警示作用。因此,该评价方法具有合理性,可为相关海滩的安全性评估、浴场选址和管理提供指导。

本文虽然对大东海海滩安全性的逐月变化进行了探讨,但海滩裂流的出现还有更小的时间尺度。因为海滩裂流的出现与波高、波向、潮位的变化密切相关^[2-3,25]。海滩在一定波高、波向和潮位条件下是不会有裂流发育的,此时海滩的安全性也较高。对于特定海滩来说,裂流发育具有空间性,往往出现在海滩的特定岸段,没有裂流出现的岸段和裂流之间的岸段则相对安全。这种更加精细化的裂流预报和风险管理需要更多的现场地动力要素观测资料予以支持。

海滩具有复杂的水动力状况,隐藏着危险。对于管理者来说,应该加强对海滩裂流的掌握、警示

和海滩活动的监管。对于旅游者来说,一方面需要掌握一些海滩环境和救生的常识,更重要的是遵守现场管理,才能保证旅游安全。

参考文献:

- [1] BRANDER R W, BRADSTREET A, SHERKER S, et al. Responses of Swimmers Caught in Rip Currents: Perspectives on Mitigating the Global Rip Current Hazard[J]. *International Journal of Aquatic Research and Education*, 2011, 5: 476–482.
- [2] LASCODY R L. East Central Florida rip current program[J]. *National Weather Digest*, 1998, 22 (2): 25–30.
- [3] LUSHINE J B. A study of rip current drownings and related weather factors[J]. *National Weather Digest*, 1991, 16: 13–19.
- [4] 施纯志. 厦门市海滨浴场救生管理现状及救生管理系统研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2008: 14.
- [5] SHORT A D, HOGAN C L. Rip currents and beach hazards: Their impact on public safety and implications for coastal management[J]. *Journal Coastal Research*, 1994, 12 (SI): 197–209.
- [6] KLEIN A H, SANATANA G G, DIEHL F L, et al. Analysis of hazards associated with sea bathing: results of five years work in oceanic beaches of Sanata Catarina state, southern Brazil[J]. *Journal of Coastal Research*, 2003, 35 (SI): 107–116.
- [7] WOODWARD E, BEAUMONT E, RUSSELL P, et al. Analysis of rip current incidents and victim demographics in the UK[J]. *Journal of Coastal Research*, 2013, 65 (SI): 850–855.
- [8] 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.
- [9] 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: A辑*, 2012, 26 (6): 645–651.
- [10] 房克照, 邹志利, 刘忠波. 沙滩海岸上裂流的数值模拟[J]. *水动力学研究与进展: A辑*, 2011, 26 (4): 479–486.
- [11] 卢吉, 余锡平. 基于 Boussinesq 方程的近岸波流统一模型[J]. *水动力学研究与进展: A辑*, 2008, 23 (3): 314–320.
- [12] SHERPARD F P. Undertow, rip tide or rip current[J]. *Science*, 1936, 84: 181–182.
- [13] SHORT A D. Australian rip systems—friend or foe?[J]. *Journal of Coastal Research*, 2007, 50 (SI): 7–11.
- [14] CLARKE L, ACKMAN D, LARGIER J. Dye dispersion in the surf zone measurements and simple models[J]. *Continental Shelf Research*, 2007, 27: 650–669.
- [15] BROWN J, MACMAHAN J H, RENIERS A H M, et al. Surf zone diffusivity on a Rip Channeled Beach[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114 (C11). Doi: 10.1029/2008JC005158.
- [16] VAGLE S, FARMER D M, DEANE G B. Bubble transport in rip currents [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106: 11677–11689.
- [17] INMAN D L, BRUSH B M. Coastal challenge[J]. *Science*, 1973, 181: 20–32.
- [18] MACMAHAN J H, THOMTON E B, RENIERS A H M. Rip current review[J]. *Coastal Engineering*, 2006, 53: 191–208.
- [19] BRANDER R. Bondi mass rescue and the myth of the collapsing sand bar [J]. *Lifeguard Magazine*, 2013, 8: 27.
- [20] 吕璐. 青岛各大海水浴场安全隐患盘点[EB/OL]. [2014–03–26]. http://www.qingdaonews.com/content/2012-08/24/content_9385219.htm.
- [21] WRIGHT L D, SHORT A D, GREEN M O. Short-term changes in the morphodynamic states of beaches and surf zones: An empirical model [J]. *Marine Geology*, 1985, 62: 339–364.
- [22] MASSELINK G, SHORT A D. The effect of tide range on beach morphodynamics, a conceptual model[J]. *Journal of Coastal Research*, 1993, 9: 785–800.
- [23] DALRYMPLE R A, MACMAHAN J H, RENIERS A H M, et al. Rip Currents[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2011, 43: 551–581.
- [24] SCOTT T M, RUSSELL P E, MASSELINK G, et al. 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, 2011: 225–243.
- [25] 林雪美, 黄翊翔, 沈淑敏. 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)*, 2009, 50 (3): 47–65.
- [26] 刘丽萍. 三亚大东海频现溺亡, 拷问海滩私有化管理之痛 [EB/OL]. [2014–03–26]. <http://www.hinews.cn/news/system/2012/08/13/014799261.shtml>.
- [27] 苏隐墨. 大东海黄金周救起 67 名溺水者, 救人救到手软[EB/OL]. [2014–03–26]. <http://news.0898.net/2005/05/09/167867.html>.
- [28] 杨大杨. 三亚大东海频现溺水事件成“夺命海滩” [EB/OL]. [2014–03–26]. http://news.ifeng.com/gundong/detail_2013_08/10/28476732_0.shtml.
- [29] 苏隐墨. 三亚大东海 18 日 7 人溺水 3 游客死亡 4 人获救[EB/OL]. [2014–03–26]. http://news.xinhuanet.com/newscenter/2004-07/20/content_1616951.htm.
- [30] 高虹. 两天救起 12 名溺水者 大东海为何频频溺人[EB/OL]. [2014–03–26]. <http://news.sina.com.cn/c/2004-07-30/10153872235.shtml>.
- [31] 张帅, 许小东. 游客大东海游泳溺水, 边防干警一小时救两命 [EB/OL]. [2014–03–26]. http://www.hq.xinhuanet.com/hainan/2005-05/09/content_4195180.htm.
- [32] 王红卫. 三亚市大东海景区一天有 11 游客溺水 [EB/OL]. [2014–03–26]. http://www.hq.xinhuanet.com/hngov/2007-08/13/content_10837434.htm.
- [33] 张瑜. 一俄罗斯女游客大东海游泳溺亡 [EB/OL]. [2014–03–26]. <http://news.163.com/09/0823/09/5HD126QU000120GR.html>.
- [34] 张瑜. 一男三亚大东海游泳溺亡 [EB/OL]. [2014–03–26]. <http://www.hinews.cn/news/system/2011/10/07/013447539.shtml>.
- [35] 徐一豪. 大东海 5 天内 50 余人溺水获救 [EB/OL]. [2014–03–26]. http://ndwb.hinews.cn/html/2012-05/07/content_474221.htm.
- [36] 柴彦明. 4 名初中生大东海游泳 2 人失踪 [EB/OL]. [2014–03–26]. <http://www.hndnews.com/sanya/SYnews/2012-6-20/46254.html>.
- [37] 利声富. 三亚今年 14 人溺水死亡失踪, 海流莫测会游也危险 [EB/OL]. [2014–03–26]. <http://www.hinews.cn/news/system/2012/06/21/014549410.shtml>.
- [38] 利声富, 王龙凤. 三亚大东海溺水事故频发, 因海域暗流和旋涡流多 [EB/OL]. [2014–03–26]. <http://www.hinews.cn/news/system/2013/08/14/015943695.shtml>.

- [39] 张瑜. 大东海半个月 4 人溺水死亡[EB/OL]. [2014-03-26]. http://www.sanya.news.cn/2013-08/21/c_117027755.htm.
- [40] 苏隐墨. 海南三亚五一期间 70 多人溺水 3 名游客身亡 [EB/OL]. [2013-03-15]. <http://news.sina.com.cn/c/2005-05-09/10536588274.shtml>.
- [41] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志: 第十一分册 (海南省海湾) [M]. 北京: 海洋出版社, 1993: 160-163.
- [42] 王宝灿, 陈沈良, 龚文平, 等. 海南岛港湾海岸的形成于演变[M]. 北京: 海洋出版社, 2006: 156-157.
- [43] 曹惠美, 蔡锋, 苏贤泽. 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, 2006, 24 (4): 36-45.
- [44] KOMAR P, GAUGHAN M K. Airy wave theory and breaker height prediction[C]. ASCE: Proceedings of the 13th Conference on Coastal Engineering, 1972: 405-418.
- [45] FERGUSON R I, CHURCH M. A simple universal equation for grain settling velocity[J]. Journal of Sedimentary Geology, 2004, 74: 933-937.

Beach Safety Evaluation Based on Rip Current Morphodynamic: A Case Study of Dadonghai of Sanya, China

LI Zhiqiang¹, ZHU Yamin²

(1. Ocean Engineering Department of Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 2. Marine Environmental Monitor Center of Zhuhai, the State Oceanic Administration of China, Zhuhai 519015, China)

Abstract: Swimming is a popular activities for the beach tourists. In recent years, a large number of beach drowning accidents occurred in China, which were mainly caused by the rip currents. In this paper, a beach safety evaluation model is established based on the beach morphodynamic state model. The paper considers that low tide bar/rip and barred beaches have highest probability of rip currents, barred dissipative beaches and low tide terrace with rips beaches have medium risk of rip currents, and low tide terrace without rips, non-barred dissipative, ultra-dissipative and reflective beaches have low probability of rip currents. The model is used to evaluate the beach rip currents risk at Dadonghai, Sanya. The results show that Dadonghai beach has low tide bar/rip and barred beach states and has high rip current risk which accords with the local life-saving practices. This model can provide guidance for the beach safety evaluation and bathing beach management.

Key words: beach safety; morphodynamic; rip current; drowning accident; Dadonghai