

海南岛重点休闲海滩裂流风险评估

郭献泽^{1,2}, 郭豪爽^{1*}, 刘旭楠¹, 付馨逸³, 吴聪或¹, 张弛², 张尧¹

(1. 自然资源部海洋减灾中心, 北京 100194; 2. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学 海洋学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 采用裂流综合风险指数法, 通过地形动力分析、遥感影像解译、现场观测调查等多重手段对海南岛沿岸 66 个重点海水浴场裂流风险进行评估, 分析海南岛沿岸裂流分布特征。结果表明: 海南岛裂流风险存在明显区域性分布特征; 排查出的 20 个高风险浴场主要分布在东南沿岸的琼海、万宁、陵水和三亚等地, 多为沿岸沙坝型海滩, 遥感影像显示常年存在沙坝沟槽和裂流现象, 这与海南岛东南部的强浪条件有关; 西北部潮强浪弱, 海滩多为潮控型的平坦消散型海滩, 裂流风险相对较低。

关键词: 海南岛; 裂流; 地形动力分析; 遥感解译; 现场调查; 风险评估

中图分类号: P731.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2025)02-0046-12

0 引言

裂流又名离岸流, 由 Shepard^[1]于 1936 年首次提出。裂流是近岸一股强劲的射束式离岸水流, 它在海浪、水深和地形等因素的共同作用下引起^[2], 其速度可达数米每秒^[3], 对近岸泥沙、污染物、营养物质和生物物种的运输起着至关重要的作用^[4-6]。然而, 长期以来裂流备受关注的的原因却是其引发的海滩灾害, 它可以将毫无防备的游客卷入深水并导致溺亡, 是滨海旅游休闲人群的“杀手”。每年世界上都有大量关于海滩溺水事故的报道, 数据统计表明, 裂流是引起这些事故的主要原因^[7-11]。

裂流的形成和发育通常与近岸沙坝密切相关^[3], 因此, 对浅滩地形和剖面形态进行研究显得尤为重要。Dean^[12]提出无量纲泥沙沉落参数(Ω), 它同时包含了波浪特征和沉积物特征, 可用于评估海滩剖面形态。Wright 等^[13]对澳大利亚 11 个海滩的系统数据进行了收集和分析, 最终对 Ω 的阈值进行了确定, 并将海滩形态初步划分为反射型、过度型

和消散型, 但这一结论只针对小潮差环境, 不具备普适性。Masselink 等^[14]的研究表明了潮差的重要性, 海滩形态非单一由波浪或潮差决定, 而是两者共同作用的结果, 因此, 引入了无量纲参数——相对潮差 (Relative Tide Range, RTR), 以准确反映潮差对近岸海滩形态的影响。在此基础上, 提出了基于 Ω 和 RTR 的海滩地形地貌分类模型, 该模型可对所有潮波范围内的海滩进行分类。基于该模型, 李志强等^[15]建立了一套海滩裂流危险性评估方法, 不同类型海滩对应不同的裂流风险等级, 该方法操作简便, 被广泛采纳并应用于海滩浴场裂流风险评估^[15-17]。

Shepard 等^[18]曾对裂流进行了现场观测, 发现其往往伴有向外漂移的浑浊泥沙或白色泡沫, 或出现在波浪断裂处的深色平静水域。学者后续也多次利用浮球或染料示踪对裂流的特征、结构分布、漂移路径等进行捕捉^[19]。研究表明, 裂流强度与波高成正相关关系, 在低潮时段裂流更加强烈^[20-21], 因此, 裂流现场观测需要特别注意高波能以及低潮位

收稿日期: 2024-04-24。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52071350)。

作者简介: 郭献泽(2000-), 男, 硕士, 主要从事港口、海岸与近海工程研究。E-mail: xzguo@hhu.edu.cn

*通信作者: 郭豪爽(1994-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事海洋灾害调查及风险评估研究。E-mail: hsguo@nmhms.org.cn

附近时刻。在滨海旅游区,研究人员采用无人机对目标岸段进行图片和视频拍摄,捕捉到了碎浪带裂流现象^[22]。基于卫星图像数据的可用性提高,可通过解读历史遥感影像了解目标岸段裂流和沙坝地形情况^[23-24]。数值模拟以其高效且经济的特点,也逐步成为裂流研究的重要工具^[25-27],对于重点区域,可借助水动力模型对近岸流进行模拟,以观测裂流的幅度和速度。

海南岛四面环海,砂质岸线资源绵长丰富,滨海旅游产业发达。然而,由于水深、风大、浪急,海南岛沿岸海滩存在大量离岸流现象,溺水事故频发,严重威胁滨海游客生命安全,给滨海旅游经济持续带来负面影响。因此,本文通过地形动力分析、遥感影像解译、现场调查等多种手段对海南岛沿岸重点海水浴场裂流状况展开排查,并评估各浴场裂流风险等级。

1 研究区域

海南岛地处我国最南端,位于 $108^{\circ}37' \sim 111^{\circ}03'E$, $18^{\circ}10' \sim 20^{\circ}10'N$,北以琼州海峡与广东省划界,西隔北部湾与越南相对,东面和南面在南海与菲律宾、文莱、印度尼西亚和马来西亚为邻,海

岸线总长超过1 900 km,其中砂质岸线约为790 km。环岛沿海分布大量水上休闲娱乐区域,支撑着本省的滨海旅游业。本次排查共涉及海南岛112 km砂质岸线和66个海滩浴场,各浴场分布及名录分别见图1和表1。

2 数据和方法

2.1 数据来源

本文采用的海浪数据资料来源于自然资源部南海预报减灾中心2021—2022年业务化海浪预报数据集。本文对66个海滩浴场的海域深水波(水深约20 m处的波浪)进行统计分析,海浪要素主要包括逐月有效波高、波周期。潮差资料来源于浴场附近10个海洋站2021—2022年的逐月潮差,泥沙中值粒径来源于现场表层泥沙的粒度分析结果。66个浴场的地形动力参数统计结果见图2。各浴场岸段的遥感影像资料来源于自然资源部海洋减灾中心、海南测绘地理信息局、自然资源部海口海洋中心等单位收集的海南岛沿岸2019—2022年WorldView-2、WorldView-3、GeoEye-1、高分一号、高分二号、高分六号、高分七号、资源一号、资源三号、北京二号、北京三号、吉林一号、高景一号、高分辨



图1 海南岛66个海水浴场分布图

Fig.1 Distribution of 66 beaches in Hainan Island

表1 66个海水浴场名录

Tab.1 List of 66 beaches

序号	浴场名称	序号	浴场名称	序号	浴场名称
1	假日海滩浴场	23	威斯汀酒店海水浴场	45	天涯海角(浴场A)
2	西秀海滩浴场	24	雅居乐房地产公司海滨浴场	46	天涯海角(浴场B)
3	白沙门浴场	25	雅居乐4A级景区	47	国开行海南分行海滩项目(浴场A)
4	平海建设发展有限公司浴场	26	皇后湾公共海水浴场	48	国开行海南分行海滩项目(浴场B)
5	宝名置业有限公司海水浴场	27	亚龙湾假日度假酒店海水浴场	49	南山文化旅游区(浴场B)
6	“博鳌金湾海滩”浴场	28	亚龙湾海底世界旅游娱乐用海	50	南山文化旅游区(浴场A)
7	博鳌宝莲城海上娱乐城浴场	29	万利来房地产公司娱乐用海	51	崖州湾公共海水浴场
8	博鳌鳌庄海域	30	亚龙湾公共海水浴场	52	亿和鹏程国际游艇城项目浴场
9	玉带滩海域	31	天域实业有限公司娱乐用海	53	龙栖湾
10	山钦湾度假酒店浴场	32	红树林度假酒店娱乐用海	54	鱼鳞洲景区浴场
11	港北出海口门外海	33	美高梅度假酒店用海(浴场A)	55	海东方公园浴场
12	神州半岛(浴场C)	34	美高梅度假酒店用海(浴场B)	56	昌化小角
13	神州半岛第一湾	35	喜来登度假酒店娱乐用海	57	昌化中角
14	神州半岛(浴场A)	36	家化万豪度假酒店娱乐用海	58	昌化大角
15	南燕湾	37	金茂度假酒店娱乐用海	59	棋子湾海洋旅游综合体
16	石梅湾	38	金茂丽思卡尔顿酒店娱乐用海	60	峨蔓镇上下浦
17	石梅湾海洋旅游开发项目	39	太阳湾	61	光村镇银滩
18	日月湾	40	大东海公共海水浴场	62	昌拱海水浴场
19	陵水环球旅业公司潜水浴场	41	海韵度假酒店娱乐用海	63	道僚海水浴场
20	香水湾富力游艇码头海域	42	国光豪生度假酒店娱乐用海	64	包岸海水浴场
21	三特索道有限公司海水浴场	43	三亚湾公共海水浴场	65	太阳湾海水浴场
22	海南天朗度假酒店海水浴场	44	地中海俱乐部度假村娱乐用海	66	盈滨半岛浴场

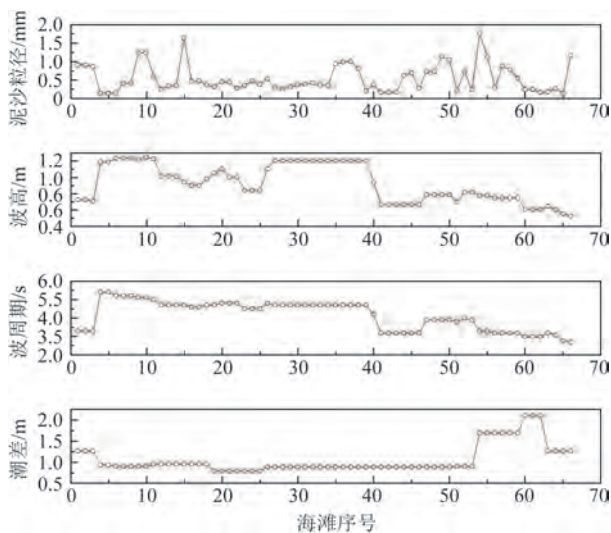


图2 66个浴场地形动力参数

Fig.2 Morphodynamic parameters of the 66 beaches

率多模综合成像卫星(Generalized Frequency Division Multiplexing, GFDM)等卫星遥感影像,空间分辨率为0.5~10 m,同时补充获取各海滩Google Earth历史遥感影像,共筛选浴场所在岸段图像909景。

2.2 研究方法

本文基于目标岸段的砂质分析、潮汐和海浪观测等数据,初步采用海滩地形动力分类模型,逐月计算各个海滩的断面类型以及所对应的裂流风险等级。此外,结合卫星遥感影像解译和现场观测调查对地形动力分析结果进行验证,综合评估各浴场的裂流风险状况。

2.2.1 海滩地形动力分析

本研究分析了海滩的大潮潮差、平均有效波高、浪向的逐月变化规律,采用海滩地形地貌动力

分类模型,基于 Ω 和RTR的计算结果,初步评估了海滩逐月断面类型及其对应的裂流风险等。计算公式为:

$$\Omega = H_b / Tw_s \quad (1)$$

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

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

$$w_s = g(R-1)D_{50}^2 / 18\nu \quad (4)$$

式中: H_b 为局地平均破碎浪高,单位为m; T 为平均波周期,单位为s; w_s 为高潮位时的沙粒沉降速率,单位为m/s; TR 是当天或指定时间段的平均潮差,单位为m;标准重力加速度 $g=9.81 \text{ m/s}^2$; R 是沙与水的比重,约为1.65; D_{50} 为海滩泥沙中值粒径,单位为m; ν 是水的运动粘度,取 $\nu=10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$; H_s 为局地有效波高,单位为m。裂流风险等级见表2。

2.2.2 遥感解译筛查

通过辐射校正、正射校正、影像配准、数据融合等流程完成标准遥感影像数据预处理,采用目视解译方式,逐季度筛查分析目标岸段的裂流现象或浅滩沟槽形态,重点排查弧形“口袋”海滩、周期性滩角发育岸段和海岬沙滩,辨别目标岸段有无浅滩沿岸沙坝、不连续白色浪花之间的深色狭长裂流区域、泥沙或白色泡沫向海漂移,以此判定海滩浴场离岸流风险情况。

2.2.3 现场观测调查

通过无人机对浴场区域(高程为-10~2 m)进行视频和照片拍摄,筛查裂流现象或沙坝、沟槽地形。对于最大潮差大于2 m的潮汐控制型海滩,选取大潮日的低潮时前1~2 h进行拍摄;对于最大潮差小于2 m的海浪控制型海滩,选取浪高较大日期

的低潮时前1~2 h进行拍摄。基于无人机影像拍摄分析结果,可在排查的海滩范围内选取裂流高发位置,投放漂浮染料观测特定潮汐、海浪条件下的离岸流流速、流幅等强度指标。同时,走访相关部门,了解当地离岸流及溺水事故发生情况,补充收集各海滩历史溺水事故记录、视频监控影像等资料,佐证离岸流风险分析结果。

2.2.4 风险综合评估判定

综合利用遥感解译和现场调查结果,对地形动力分析指数进行修正。参照《滨海旅游区裂流灾害风险排查技术规程》^[28],采用裂流综合风险指数法计算海南省本岛沿岸66个重点海滩浴场裂流风险等级。按表3确定地形动力分析、遥感解译筛查以及现场调查等方法的风险指数值,通过式(5)计算 I_R ,最终根据表4综合判定各浴场裂流风险等级。计算公式为:

$$I_R = I_{MD} + \max(I_{SA}, I_{UA}, I_{FD}) \quad (5)$$

式中: I_R 为裂流综合风险指数; I_{MD} 为海滩地形动力分析风险指数; I_{SA} 为遥感影像解译分析风险指数; I_{UA} 为观测风险指数; I_{FD} 为走访问问风险指数。

3 结果与分析

3.1 海南岛裂流分布特征分析

本次排查结果呈现较大的区域性差异,海南岛东南部裂流风险普遍高于其他地区。研究共排查出高风险浴场20个,主要集中在东南沿岸的琼海、万宁、陵水、三亚东段,这些浴场的海滩地形动力分析结果在多数月份乃至全年均存在沿岸沙坝,现场

表2 基于海滩地形动力分类的裂流风险等级表^[28]

Tab.2 Scale of rip currents risk based on sandy beach morphodynamic classification

海滩组别	Ω	RTR	海滩类型	裂流风险
反射型	$\Omega < 2$	$RTR < 3$	完全反射型(R)	低
		$RTR > 7$	低潮台地形(LTT)	低
		$3 \leq RTR \leq 7$	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
		$3 \leq RTR \leq 7$	低潮沙坝裂流型(LTBR)	高
消散型	$\Omega > 5$	$RTR < 3$	沙坝消散型(BD)	中
		$3 \leq RTR \leq 7$	无沙坝消散型(NBD)	低
超消散型	$\Omega > 2$	$RTR > 7$	平缓超消散型(UD)	低

表 3 风险指数判定^[28]
Tab.3 Risk index determination

排查方法	排查结果	风险指数值
地形动力分类 (I_{MD})	高风险	50
	中风险	20
	低风险	10
遥感影像解译 (I_{SA})	发现裂流	30
	发现裂流沟槽地形	20
	发现普通沟槽地形	10
	无裂流迹象	0
现场无人机观测 (I_{UA})	发现裂流	30
	发现裂流沟槽地形	20
	发现普通沟槽地形	10
	无裂流迹象	0
走访问问 (I_{FD})	发现裂流	20
	不确定或未发现裂流	0

表 4 滨海旅游区裂流灾害风险等级^[28]
Tab.4 Risk level of rip currents disaster in the coastal tourism areas

I_R	$I_R \geq 50$	$20 < I_R < 50$	$I_R \leq 20$
裂流风险等级	高	中	低

无人机观测和遥感影像解译结果都存在沙坝、明显裂流沟槽和裂流现象,因此具有较高的裂流风险;中风险浴场 16 个,多为沙坝消散型海滩,仅在部分时间可能出现裂流,具有一定的裂流风险;低风险浴场 30 个,主要分布在西部、北部和南部三亚西段,这些浴场多为无沙坝发育的反射型和无沙坝消散型海滩,几乎不具备裂流形成所需地形,不存在裂流现象。以上结论在遥感影像、现场观测、走访问问中也都能提供很好的验证。具体结果和风险分

表 5 海南省 66 个重点海水浴场排查结果
Tab.5 Survey results of 66 key bathing beaches in Hainan Province

序号	I_{SA}	I_{UA}	I_{FD}	I_{MD}	风险	序号	I_{SA}	I_{UA}	I_{FD}	I_{MD}	风险	序号	I_{SA}	I_{UA}	I_{FD}	I_{MD}	风险
1	0	0	20	R	中	23	30	10	0	B	高	45	0	0	0	R	低
2	0	0	0	R	低	24	30	20	20	B	高	46	0	0	0	BD	低
3	0	0	20	R	中	25	30	30	20	B	高	47	0	0	0	R	低
4	0	0	20	BD	中	26	30	20	20	B	高	48	0	0	0	--	低
5	0	0	20	BD	中	27	0	0	0	BD	低	49	0	0	0	R	低
6	0	0	0	BD	低	28	0	0	20	BD	中	50	0	0	0	R	低
7	30	10	0	B	高	29	0	0	20	BD	中	51	0	0	20	BD	中
8	30	30	20	B	高	30	0	30	20	BD	高	52	0	0	0	R	低
9	0	0	0	R	低	31	20	30	20	B	高	53	0	0	0	--	低
10	20	30	0	R	中	32	20	0	20	B	高	54	0	0	0	R	低
11	30	0	0	B	高	33	0	0	20	BD	中	55	0	0	0	R	低
12	30	30	0	BD	高	34	0	0	20	BD	中	56	0	0	0	BD	低
13	30	30	0	BD	高	35	0	0	0	R	低	57	0	0	0	R	低
14	30	30	0	BD	高	36	0	0	0	R	低	58	30	0	0	R	中
15	0	0	0	R	低	37	0	0	0	R	低	59	30	0	0	B	高
16	30	30	0	B	高	38	10	0	0	R	低	60	0	0	0	NBD	低
17	30	30	20	B	高	39	0	0	0	BD	低	61	10	0	0	NBD	低
18	30	30	0	B	高	40	30	30	20	B	高	62	10	0	0	NBD	低
19	0	0	0	BD	低	41	20	0	0	BD	中	63	10	10	0	BD	中
20	30	30	20	B	高	42	20	0	0	BD	中	64	0	0	0	BD	低
21	30	20	0	B	高	43	0	0	0	R	低	65	0	10	0	BD	中
	0	0	0	BD	低		20	0	0	BD	中						
22	0	0	0	BD	低	44	0	0	0	R	低	66	10	10	0	R	低

注:各指数值代表结果见 2.2 节;在地形动力分析中,由于 R 型、NBD 型都为低风险,因此风险指数值相同,但海滩形态具有较大差异,故用海滩类型表示用于区分;21 和 43 海滩岸段较长且沿岸泥沙采样存在较大差异,因此对岸段进行划分,其中 21 南侧岸段 I_{SA} 、 I_{UA} 、 I_{FD} 、 I_{MD} 和风险级别依次为 30、20、0、B、高,西侧岸段依次为 0、0、0、BD、低,43 东侧岸段依次为 0、0、0、R、低,西侧岸段为 20、0、0、BD、中;48、53 浴场由于存在人为干预,不利于水动力自然交换,地形动力分析方法不适用。



图3 海南省66个重点海水浴场离岸流综合风险等级分布图

Fig.3 Comprehensive rip currents risk level distribution of 66 key bathing beaches in Hainan Province

布状况分别见表5和图3。

裂流高风险区域主要集中在海南岛东南沿岸,这与海南岛所受的水动力条件密切相关。据统计,海南岛北部以偏东浪向为主,东部以偏东—东南浪向为主,南部以东南—偏南—西南浪向为主,西部以南偏西浪向为主。研究表明,海浪直接冲击下的海滩更容易发生裂流^[18],斜波入射在一定程度上会抑制离岸流^[21,29],这就使得东南部沿岸更容易有沙坝发育并形成裂流。水文数据统计结果也表明(见图2),东南部浪高较西北部更大,一般来说,波高越大,裂流越强^[20-21]。在潮差较小的情况下,波浪条件为水下沙坝沟槽形成和发育的主要因素,导致高波能的东南沿岸多出现沙坝沟槽地形。而潮差统计结果显示,海南岛西北侧海域(东方站、白马井站)潮差较大,平均潮差为160~210 cm,其他海域仅为79~130 cm,这使得西北片区潮控加强,遥感影像也多观察到潮汐控制的平坦消散型海滩。

对收集到的溺水事故的时空分布特征进行分析,从图4可以看出,东南沿岸的琼海、万宁、三亚为主要溺水事故发生地,事故占比超过80%。事故发生时间主要集中在4—8月,其占比超过60%,除夏

季下海游客较多这个因素外,可能也与海滩夏季更加危险有关。陆旭等^[30]曾收集了我国2001—2019年海滩游客安全事故并进行了分析,统计结果表明游客发生溺水事故的两个主要原因是裂流和近岸波浪破碎。本次数据虽为不完全统计,但也在一定程度上反映了海南岛裂流的时空分布特征。

3.2 典型海滩裂流风险分析

3.2.1 博鳌鳌庄海域

博鳌鳌庄海域位于琼海市博鳌湾岸段,为公共海滩,节假日期间游客众多,曾发生过多起溺水事故,调查中也发现裂流显著。海滩年均波高为1.23 m,年均潮差为0.9 m,相对潮差较小,波浪为主要驱动力。从地形动力分析结果可以看到(见表6),2—9月、11月的泥沙沉降参数为 $2 \leq \Omega \leq 5$,海滩属于沿岸沙坝型(B),1月、10月、12月的泥沙沉降参数 $\Omega > 5$,海滩属于沙坝消散型(BD)。沿岸沙坝型海滩为裂流高发类型之一,地形动力分析判定该浴场为高风险,风险指数 I_{MD} 为50。从博鳌鳌庄海域的卫星遥感影像可以看到,11月该岸段存在裂流沟槽地形(见图5a),1月碎波带较宽(见图5b),消散型较强,局部存

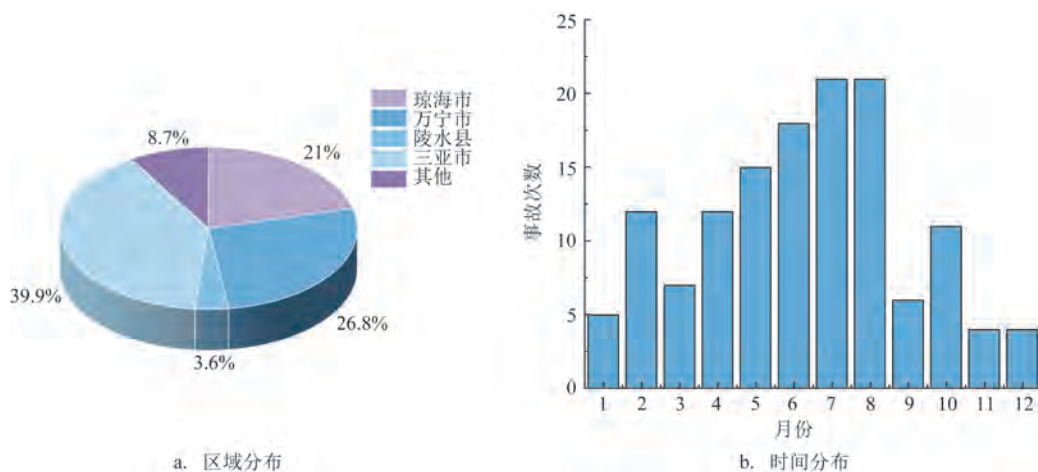


图4 溺水事故时空分布特征

Fig.4 Spatial and temporal distribution characteristics of drowning accidents

表6 博鳌鳌庄海域逐月地形动力分析

Tab.6 Monthly morphodynamic analysis of Aozhuang sea area in Boao Bay

月份	Ω	RTR	海滩类型	风险等级
1	5.04	0.47	BD	中
2	4.56	0.45	B	高
3	4.10	0.54	B	高
4	4.33	0.61	B	高
5	4.13	0.91	B	高
6	4.19	0.92	B	高
7	3.84	1.12	B	高
8	3.68	1.02	B	高
9	3.58	0.95	B	高
10	5.66	0.49	BD	中
11	4.83	0.56	B	高
12	5.87	0.44	BD	中
年均	4.48	0.71	B	高

在裂流现象,影像较好地验证了地形动力分析的结果,遥感影像解译分析风险指数 I_{SA} 为30。现场观测调查发现,该浴场破碎带较宽,沿岸有数道方向垂直于海岸线的沟槽,内有离岸流发生。在裂流区进行染色试验,染料投放位置和16 s后染料漂移范围见图6,漂移长度约为数十米,经估算现场离岸流流速约为0.4~0.5 m/s。现场无人机观测风险指数 I_{UA}

为30。调查时发现海滩上树立了多块警示牌,罗列了2017—2021年的8起溺水事件,与当地工作人员访谈了解到海滩曾出现过离岸流,并且在北风季(9月底一次年2月)浪大涨潮时多发,走访询问风险指数 I_{FD} 为20。综合评估判定,博鳌鳌庄海域裂流综合风险指数 I_R 为80,裂流灾害风险等级为高。

3.2.2 亚龙湾

亚龙湾是著名的滨海旅游胜地,游客流动性大,日均客流量可达数千人次,但据了解整个亚龙湾每年都有数起人员溺亡事件,该海域常年存在离岸流现象。亚龙湾年均有效波高 $H_s=1.2$ m,波周期 $T=4.7$ s,平均潮差 $TR=0.88$ m。本次排查了亚龙湾的12个浴场,整个岸段砂样粒度分析结果显示西侧多为细砂,湾顶为中砂,东侧为粗砂和砾砂。地形动力分析结果表明亚龙湾湾顶处为沿岸沙坝型海滩,从湾顶向两侧逐渐变为沙坝消散型海滩,最西侧趋于完全反射型海滩,裂流风险为中间段较高,向两侧逐渐降低。遥感影像解译也验证了地形动力分析的结果,影像显示湾顶处存在明显沟槽地形(见图7a),向两侧延伸并逐渐消失。2023年3月21日现场调查发现,湾顶处的天域度假酒店娱乐用海区域发现冲刷带离岸流(见图7b),裂流强度不大且不稳定,数秒后便消失,地形观测未发现沙坝沟槽。利用染色试验观测染料释放3 min后的结果(见图7c),在发现离岸流的位置释放染料,色块先沿岸漂移数十米,随即在沿岸和离岸方向都有扩散,可见



图5 博鳌鳌庄海域卫星影像

Fig.5 Satellite image of Aozhuang sea area in Boao Bay



图6 现场染色试验

Fig.6 Field dyeing test



图7 亚龙湾影像

Fig.7 Images of Yalong Bay

离岸流极其不稳定,且强度小于沿岸流。

地形动力分析和卫星遥感影像筛查结果均显示亚龙湾的海滩形态可能沿岸线存在较大差异。因此,补充开展亚龙湾岸段12个海滩的剖面/断面RTK勘测(见图8),每个断面起点位于高滩植被分界线并垂直于岸线。断面勘测结果见图9,断面特征分析见表7。从12个断面的总体情况来看,亚龙湾海滩滩面西侧较陡、东侧较平缓,湾顶附近由于沿岸汇流导致海滩后滨平缓宽阔,适合沙坝沟槽发育。断面勘测结果较好地验证了亚龙湾裂流风险中间高、两侧低的特征。



图8 12个海滩测量断面布设图
Fig.8 Layout of 12 beach surveying profiles

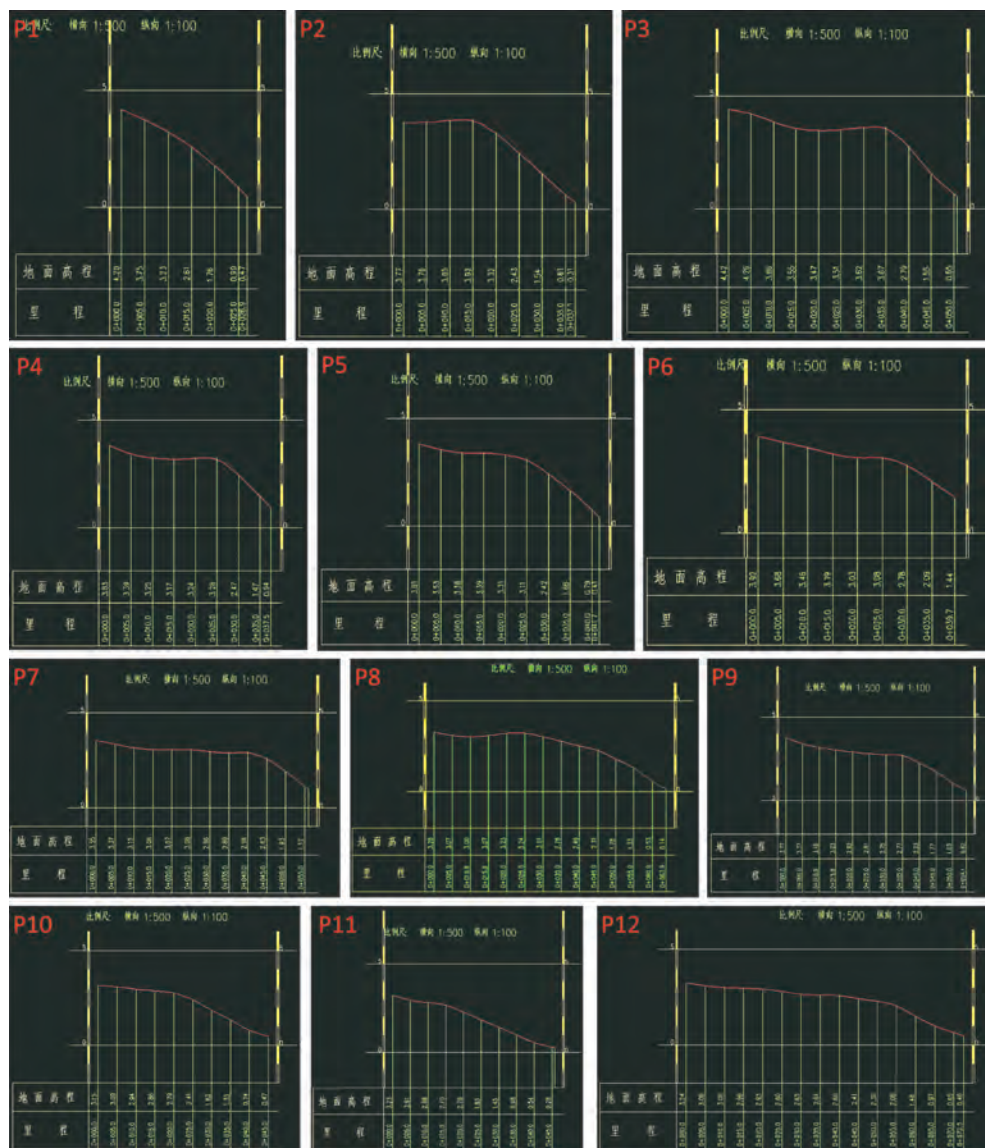


表7 亚龙湾海滩断面勘测结果
Tab.7 Yalong Bay beach profiles surveying results

断面	断面特征
P1	断面整体呈陡坡状, 坡度 13.9%, 属于反射型海滩
P2	后滨较为平缓, 前滨滩面呈陡坡状, 坡度 16.3%, 属于反射型海滩
P3	后滨较为平缓, 前滨滩面呈陡坡状, 坡度 15.1%, 属于反射型海滩
P4	后滨较为平缓, 前滨滩面呈陡坡状, 坡度 18.7%, 属于反射型海滩
P5	后滨较为平缓, 前滨滩面坡度 13.3%, 趋近沙坝消散型海滩
P6	断面后滨与前滨呈平缓复坡状, 前滨滩面坡度 11.2%, 属于沙坝消散型海滩
P7	断面具有宽阔且平缓起伏的后滨, 前滨滩面坡度 12.1%, 属于沿岸沙坝型海滩
P8	断面具有宽阔且平缓起伏的后滨, 前滨滩面坡度 11%, 属于沿岸沙坝型海滩
P9	断面具有宽阔的后滨, 后滨与前滨呈平缓复坡状, 前滨滩面坡度 11.3%, 海滩类型介于沿岸沙坝型与沙坝消散型之间
P10	断面后滨和前滨呈平缓复坡状, 前滨滩面坡度 9.3%, 属于沙坝消散型海滩
P11	断面后滨和前滨呈平缓复坡状, 前滨滩面坡度 8.0%, 属于沙坝消散型海滩
P12	断面具有宽阔的后滨, 后滨和前滨呈平缓复坡状, 且无明显滩肩, 前滨滩面坡度 9.3%, 属于沙坝消散型海滩

4 结论与展望

由于海滩地形动力分析法对各参数较为敏感, 水文观测数据和现场采砂存在一定的误差和随机性, 可能会导致裂流风险评估存在较大误差。本研究采用裂流综合风险指数法, 通过遥感影像解译和现场观测调查对地形动力分析结果进行修正, 对海南岛沿岸 66 个重点海水浴场裂流风险进行评估分析。水文数据显示, 海南岛东南部波浪更强, 西北部潮差更大。裂流风险评估结果也呈现出区域性差异, 排查出的 20 个高风险浴场主要集中在东南沿岸的琼海、万宁、陵水和三亚等地。地形动力分析显示这些区域多为波浪控制的沿岸沙坝型海滩, 影像多伴有沙坝沟槽地形和裂流现象, 由于这些区域多是著名的旅游区, 游客流动性大, 因此导致的溺水事故较多。而西北部多为潮控型的平坦消散型海滩, 裂流风险相对较低。基于本次排查结果, 各浴场应采取相应的管理措施, 对于裂流高发岸段, 严禁游客私自下水, 可在现场布置摄像头进行远程监控, 增加现场巡逻的频率和覆盖面积。现场访问还发现多数游客缺乏对裂流的认知, 管理部门应当对游客进行相关知识教育, 如普及裂流概念、告知如何识别裂流以及处于其中时如何逃生等。

需要指出的是, 短期的现场调查很难全面掌握

各浴场裂流的风险特征和动态规律, 即使在高风险海滩也不一定会遇到裂流, 而低风险海滩也可能出现裂流, 因此建议采用遥感影像、潮位和海浪观测数据进行全年、各季度、逐月份裂流分析; 同时, 根据沿海水文环境和岸线地形变化, 动态评估各浴场裂流风险分布。目前国际上部分国家已经把裂流预报作为日常冲浪区预报的一部分。基于此次的排查结果, 结合已有潮汐、海浪、遥感、现场观测视频等资料, 进一步探索海滩裂流监测预警预报模型, 从静态风险排查转向动态风险预报, 将成为后续研究的方向。

参考文献:

- [1] SHEPARD F P. Undertow, rip tide or "rip current" [J]. Science, 1936, 84(2173): 181-182.
- [2] DALRYMPLE R A, MACMAHAN J H, RENIERS A J H M, et al. Rip currents[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2011, 43: 551-581.
- [3] MACMAHAN J H, THORNTON E B, RENIERS A J H M. Rip current review[J]. Coastal Engineering, 2006, 53(2-3): 191-208.
- [4] SHORT A D. Australian rip systems-friend or foe? [J]. Journal of Coastal Research, 2007, 50(S1): 7-11.
- [5] SHANKS A L, MORGAN S G, MACMAHAN J, et al. Surf zone physical and morphological regime as determinants of temporal and spatial variation in larval recruitment[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2010, 392(1-2): 140-

- 150.
- [6] SINNETT G, FEDDERSEN F. The surf zone heat budget: the effect of wave heating[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(20): 7217-7226.
- [7] BRIGHTON B, SHERKER S, BRANDER R, et al. Rip current related drowning deaths and rescues in Australia 2004-2011[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2013, 13(4): 1069-1075.
- [8] DROZDZEWSKI 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.
- [9] SHORT A D. Handbook of beach and shoreface morphodynamics [M]. Chichester: Wiley, 2000.
- [10] LASCODY R L. East central Florida rip current program[J]. *National Weather Digest*, 1998, 22(2): 25-30.
- [11] LUSHINE J B. A study of rip current drownings and related weather factors[J]. *National Weather Digest*, 1991, 16(3): 13-19.
- [12] DEAN R G. Heuristic models of sand transport in the surf zone [C]//Australian Conference on Coastal Engineering. Sydney: Institution of Engineers, 1973: 208-214.
- [13] WRIGHT L D, SHORT A D. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis[J]. *Marine Geology*, 1984, 56(1-4): 93-118.
- [14] 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.
- [15] 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 Z Q, ZHU Y M. Beach safety evaluation based on rip current morphodynamic: a case study of Dadonghai of Sanya, China[J]. *Tropical Geography*, 2015, 35(1): 96-102.
- [16] 李志强. 基于地形动力学的华南海滩裂流风险研究[J]. *热带海洋学报*, 2015, 34(1): 8-14.
LI Z Q. Study on the rip current hazard of South China beaches based on beach morphodynamics[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2015, 34(1): 8-14.
- [17] 李志强, 陈杏文. 湛江东海岛裂流风险评价[J]. *海洋开发与管*
理, 2016, 33(S2): 73-78.
LI Z Q, CHEN X W. Rip Current risk at the beach of Donghai Island, Zhanjiang, China[J]. *Ocean Development and Management*, 2016, 33(S2): 73-78.
- [18] SHEPARD F P, EMERY K O, LA FOND E C. Rip currents: a process of geological importance[J]. *The Journal of Geology*, 1941, 49(4): 337-369.
- [19] AGAARD T, GREENWOOD B, NIELSEN J, et al. Mean currents and sediment transport in a rip channel[J]. *Marine Geology*, 1997, 140(1-2): 25-45.
- [20] CASTELLE B, SCOTT T, BRANDER R W, et al. Rip current types, circulation and hazard[J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 163: 1-21.
- [21] ZHANG Y, HONG X, QIU T, et al. Tidal and wave modulation of rip current dynamics[J]. *Continental Shelf Research*, 2022, 243: 104764.
- [22] 于华明, 张鲲鹏, 李松霖, 等. 威海国际海水浴场裂流调查与区划研究[J]. *中国海洋大学学报*, 2021, 51(3): 1-7.
YU H M, ZHANG K P, LI S L, et al. Investigation and regionalization of rip currents in Weihai international bathing beach[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2021, 51(3): 1-7.
- [23] ATHANASIOU P, DE BOER W, YOO J, et al. Analysing decadal-scale crescentic bar dynamics using satellite imagery: a case study at Anmok beach, South Korea[J]. *Marine Geology*, 2018, 405: 1-11.
- [24] ZHANG Y, HUANG W R, LIU X N, et al. Rip current hazard at coastal recreational beaches in China[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2021, 210: 105734.
- [25] 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): 10.
- [26] LONG J W, ÖZKAN-HALLER H T. Offshore controls on nearshore rip currents[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2005, 110(C12): C12007.
- [27] JOHNSON D, PATTIARATCHI C. Boussinesq modelling of transient rip currents[J]. *Coastal Engineering*, 2006, 53(5-6): 419-439.
- [28] 中华人民共和国自然资源部. HY/T 0298-2020 滨海旅游区裂流灾害风险排查技术规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
Ministry of Natural Resources, People's Republic of China. HY/T 0298-2020 Risk investigation of rip current at coastal recreational beach—Code of practice[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [29] HONG X, ZHANG Y, WANG B, et al. Numerical study of rip currents interlaced with multichannel sandbars[J]. *Natural Hazards*, 2021, 108(1): 593-605.
- [30] 陆旭, 张弛, 时健, 等. 我国海滩游客安全事故数据库和事故特征分析[J]. *海洋开发与管理*, 2021, 38(6): 3-11.
LU X, ZHANG C, SHI J, et al. Tourists accident database and accident characteristics of beach tourism in China[J]. *Ocean Development and Management*, 2021, 38(6): 3-11.

Risk assessment of rip currents at key beaches in Hainan Island

GUO Xianze^{1,2}, GUO Haoshuang^{1*}, LIU Xu'nan¹, FU Xinyi³, WU Congyu¹, ZHANG Chi², ZHANG Yao¹

(1. National Marine Hazard Mitigation Service, Beijing 100194, China; 2. College of Harbour Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Oceanography, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Rip current comprehensive risk index method is used to assess the risk of rip currents at 66 key bathing beaches along Hainan Island by multiple means, such as morphodynamic beach classification, remote sensing image interpretation, on-site drone observation, dye tracing and visiting and questioning. Totally 20 high-risk bathing beaches are identified, which mainly distributed in the southeastern coastal areas, such as Qionghai, Wanning, Lingshui and Sanya. Most of them are the Barred Beaches with alternating transverse bars and rips all year-round detected from remote sensing imagery, which are related to the strong wave conditions in the southeastern part of Hainan Island. In the northwestern part of the island, the tides are strong, the waves are weak, and the beaches are mostly tide-controlled flat dissipative beaches with relatively low risk of rip currents.

Key words: Hainan Island; rip currents; morphodynamic beach classification; remote sensing interpretation; field investigations; risk assessment