

国内裂流研究进展

董碧璇^{1,2}, 冯卫兵^{1,2}, 冯曦^{1,2}

(1. 海岸灾害及防护教育部重点实验室(河海大学), 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 裂流是我国华南沿海地区较为频发的一种自然灾害。本文从国内裂流发生概况、裂流的研究历史以及研究进展等方面对裂流作出阐述, 并与国外研究裂流的方法进行了对比。介绍了国外在现场观测运用的方法和设备、国内自研究裂流以来开展的物理模型试验、数值模型以及评价裂流风险的方法。展望了未来国内裂流的研究趋势。

关键词: 裂流; 现场观测; 物理模型试验; 数值模拟; 风险评价

中图分类号: P731.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2020)01-0165-10

DOI: 10.11759/hyxx20190529002

波浪传播到近岸发生破碎后, 由于辐射应力的作用, 壅高于岸边的水体会通过破波带流回海洋, 这种条带状的强烈表面流被称之为离岸流, 又叫做裂流^[1]。裂流头、裂流颈、沿岸流、裂流补偿流构成了整个裂流系统。持续时间短、流速快、流向几乎与海岸垂直是裂流最为显著的特点^[2]。波高、波浪周期、波向角、波浪破碎点、潮汐、风以及海滩长度、岸线形状、近岸的建筑物等都会对裂流的产生、规模、强度、位置造成影响^[3]。20世纪40年代开始, 研究人员采用理论与现场观测相结合的方法, 对裂流的形成机理、影响因素进行了研究。物理模型试验和数值模拟被广泛地应用到裂流的研究之中。统计调查显示, 澳洲、美洲的一些国家裂流分布广泛, 经常会出现由于裂流而引发的安全事故, 仅在美国, 每年就有上百余人因裂流而丧命。我国海南省和广东省也经常有由于裂流导致溺水事故的新闻报道。研究裂流的产生机理、影响因素, 探索预报裂流的方法, 从而精确地预报裂流的发生, 能够有效地降低在海滩上的人员伤亡。

1 裂流的分类及国内发生概况

1.1 裂流的分类

研究人员根据引发裂流原因, 将裂流分为两类: (1)由地形控制的裂流; (2)由水动力控制的裂流^[3]。在此基础上, Castelle 等将裂流划分为三大类型, 在三大裂流类型的基础上, 又将裂流分为六种不同的类型, 分别是: 水动力控制的裂流: (1)剪切不稳定裂流 (shear instability rips); (2)瞬变裂流 (flash rips), 这两

类裂流一般发生在均匀的海滩和近岸, 持续时间短, 产生的位置不固定。地形控制的裂流: (1)沟槽裂流 (channel rips); (2)聚焦型裂流 (focused rips), 这两类裂流发生在相对固定的位置, 是由海浪带和内陆架带的自然沿岸形态变化所产生的水动力过程驱动的。边界控制的裂流: (1)偏斜裂流 (deflection rips); (2)阴影区裂流 (shadow rips), 这两类裂流在刚性横向边界发生流动, 如天然海头, 人为结构 (防波堤, 码头等)^[4]。沟槽裂流 (channel rips) 因其易观测性和分布的广泛性而受到世界上众多研究人员的关注, 并对沟槽裂流的形成机理、驱动机制、影响沟槽裂流的因素开展了大量的研究。水动力控制的裂流由于其主要驱动机制较为复杂, 因此与其他裂流相比研究的不多。图 1 是世界上裂流频发的地区以及针对裂流做出过相关研究的地区分布。

图中红色虚线矩形为世界上裂流频发地区, 包括美国佛罗里达州、墨西哥、英国西南部、印度、巴西南部、澳大利亚东南部沿海地区、韩国釜山、中国海南、厦门及青岛地区; 蓝色实线圆形为针对裂流灾害已经开展相关研究和应对措施的国家 and 地区,

收稿日期: 2019-05-29; 修回日期: 2019-07-29

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51709091); 江苏省自然科学基金青年基金(BK20170874); 中央高校基金(2017B00514)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 51709091; Jiangsu Natural Science Foundation of China, No. BK20170874; Fundamental Research Funds for the Central Universities, No. 2017B00514]

作者简介: 董碧璇(1995-), 女, 江苏沛县人, 硕士研究生, 主要从事裂流及近岸小尺度波流耦合的研究, 电话: 18751893768, E-mail: bxdong@hhu.edu.cn; 通信作者: 冯曦, E-mail: xifeng@hhu.edu.cn

包括美国、荷兰、澳大利亚、英国、韩国及中国。由图可见虽然在中国中部沿海地区, 裂流灾害或潜

在的裂流灾害分布广泛, 但我国的裂流的预警系统尚未健全, 对裂流研究较少。

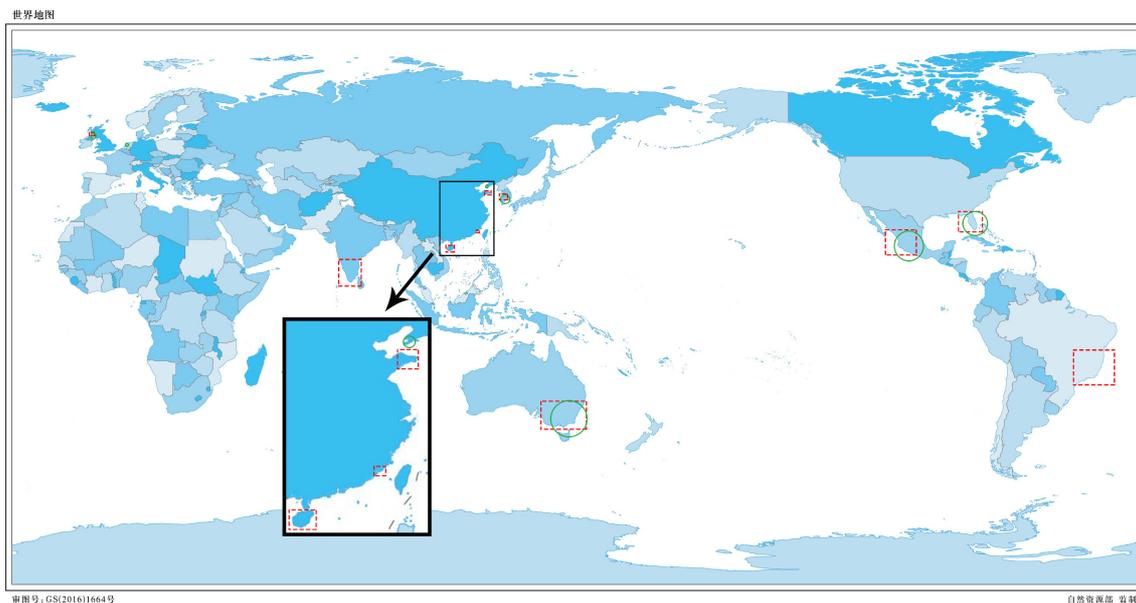


图1 世界上裂流频发的地区以及针对裂流做出过相关研究的地区分布[审图号: GS(2016)1664 号]

Fig. 1 The regions that have many rip currents and those where the rip currents have been investigated [Map number: GS(2016)1664]

1.2 国内裂流发生概况

我国的裂流灾害严重且具有典型性, 在每年的7、8、9三个月份频繁发生。Shepard^[5]等指出, 在岸线较长的砂质海滩上更容易观测到裂流。根据水文学和地质学的观点, 位于热带地区的基岩质海岸发生裂流的可能性更高^[6], 我国沿海地区除江苏段岸线, 其余岸线都分布有基岩海岸。图2为我国基岩海岸的分布(发生裂流几率较高的区域)及裂流高发区示意图。裂流现象最严重的地区是海南三亚、陵水地区, 裂流区长度可超过100 m, 山东青岛地区次之, 裂流区长度约30~60 m。沿江苏段海岸线, 从最北端的连云港市至最南端的南通市, 近岸地区几乎全是滩涂, 属于淤泥质海岸, 不具备裂流的产生条件, 因此, 江苏地区裂流出现的可能性很低。

2 研究历史

自20世纪40年代始, 国外的研究人员对裂流的机理、形态特征、危险性评价等方面进行了研究, 在观测、试验、模拟方面的获取了大量成果。1936年Shepard^[7]首次定义了裂流, 并将其与逆流(undertow)和激流(riptide)进行了明确地区分; 1941年, Shepard等^[5]在美国加利福尼亚州的La Jolla海滩首先对裂流

进行了科学地观测, 他认为长度长的海滩上更容易观测到裂流的存在, 并第一次定性地对裂流的特征进行了科学的描述; 1964年, Longuet-Higgins等^[8]将辐射应力这一概念引入到裂流的研究中, 奠定了以数值模拟的方法进行裂流研究的理论基础; 1969年, Bowen等^[1]首次提出了辐射应力在近岸地区环流系统中所起的作用。图3为根据Shepard对裂流的基本描述绘制的裂流的示意图。我国针对裂流的研究起步很晚, 由于我国裂流灾害严重且具有典型性, 对于我国滨海旅游区, 国家海洋局海洋减灾中心在最近几年已经逐渐展开了裂流危险特征评估、公众科普、安全警示等工作, 对于其中的重点滨海旅游地区(海南、山东等), 技术评估和设立公众警示标识的工作也相继开展^[6]。图4为中国国家海洋局海洋减灾中心在国内的一些重点滨海旅游区设立的裂流警示标识。国内的研究人员也围绕物理模型试验和数值模拟开展了针对裂流流场特性、影响因素等的相关研究。2007年, 白志刚等^[9]采用了SHORECIRC准三维的近岸流模型耦合了REF/DIF1波浪模型模拟裂流; 2011年, 房克照等^[10]在二阶完全非线性Boussinesq水波方程的基础上建立了二维波浪破碎数值模型; 2013年, 房克照等^[11]在Haller实验地形的基础上进

行了单沟槽沙坝海岸的裂流试验研究; 2015 年, 王彦等^[12-13]研究了平直沙坝海岸叠加波浪的裂流特性和缓坡开槽沙坝海岸裂流特性; 李志强等^[14-16]基于海滩地形动力状态分类模型, 建立了裂流风险评价

方法, 在 2015、2016 年分别对华南海滩裂流、三亚大东海、湛江东海岛裂流进行了风险评价; 2018 年, 汪鸿等^[17]利用 FUNWAVE 模型对弧形海岸上裂流的性质进行了研究。

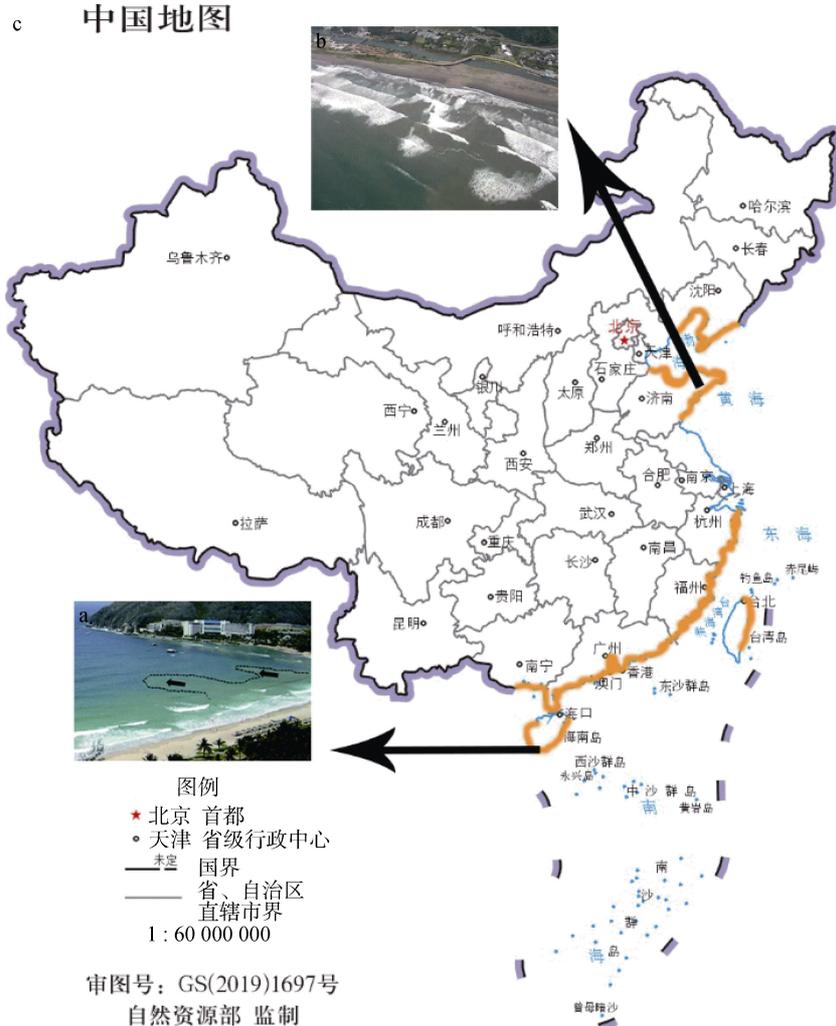


图 2 中国裂流可能发生区域及裂流高发地区示意图[审图号: GS(2019)1697 号]

Fig. 2 Areas where rip currents may possibly occur and those where rip currents appear frequently in China [Map number: GS(2019)1697]

注: (a)为海南三亚大东海裂流现场图片(修改自文献[18]); (b)为青岛某海滩裂流现场图片(图片来自网络); (c)加粗的海岸线为基岩海岸在我国的分布亦即中国裂流发生可能性较高的区域

3 国内外研究现状

3.1 研究方法

现场观测、物理模型试验和数值模拟是目前研究裂流的三种最基本的方法。20 世纪 40 年代至 20 世纪末, 研究人员侧重于对裂流形成机制等理论方面的研究, 并以理论研究和实际观测相结合的方式, 从理想化条件下研究裂流的形成机制; 21 世纪以来,

随着计算机模拟技术的进步和大型物理模型试验设施的完善, 对裂流的研究更多地结合了实际情况下复杂的边界条件和地理、海洋环境等综合因素, 并将更多的关注点投向了裂流预警预报系统的建设之中。

3.1.1 现场观测

现场观测可以直接观测到裂流的形态, 避免了物理模型试验中的尺度效应, 获得精确的实测数据。现场观测的方法有两种: 一是定点测量, 二是浮子

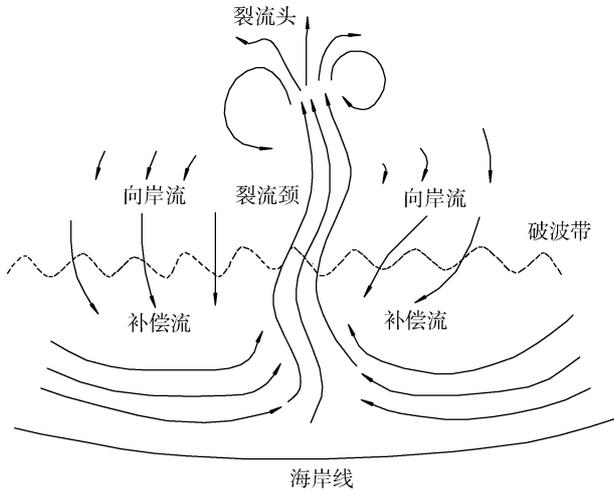


图3 裂流示意图(图片修改自文献[18])
Fig. 3 Rip currents diagram

示踪。定点测量通过固定的流速仪采集流场中固定点的数据,但不能遍布整个流场,在测量流场的平面流动结构形态方面较为欠缺。浮子示踪弥补了定

点测量的不足,通过分析浮子的轨迹能够得到整个流场的速度分布以及详细的平面流动结构形态。表1列出了国外现场观测手段的发展概况。



图4 中国国家海洋局海洋减灾中心在重点滨海旅游区设立的裂流警示标识(图片来自网络)

Fig. 4 A sample warning sign indicating the possibility of rip currents set up by the National Marine Hazard Mitigation Service in some key coastal recreational areas in China

表1 国外现场观测手段发展概况

Tab. 1 The development of field observation methods abroad

观测者	年份	地点	观测手段	结果
Shepard 等 ^[7]	1941	美国 La Jolla	肉眼观测、浮球示踪	裂流与波浪、潮位、风、海滩地形等的关系
Shepard 等 ^[19]	1950	美国 Scripps 海滩	染料、浮球示踪	波浪敛散及海底地形对裂流的影响
Sonu ^[20]	1972	美国 Sea Grove	中性浮力浮球,双向导管流速仪,带照相机的气球和染料	裂流的流动特性、垂直流动结构、讨论潮汐对裂流的影响
Bowman 等 ^[21]	1988	以色列 Herzliya 海滩	近岸调查、染料示踪、9个流速仪、5个压力传感器	对裂流方向、脉动和沉积物模式的观察
Smith 等 ^[22]	1995	美国 La Jolla	相位多普勒测量仪、洋底测站	对破波带外的不稳定脉动和涡旋运动的定量测量
Aagaard 等 ^[23]	1997	丹麦 Skallingen	6个双向流速仪,9个光学反向散射传感器,1个压力传感器	沉积物通量预测、潮汐调制、大规模物质运输概念模型
Brander ^[24]	1999	澳大利亚 Palm 海滩	5个共同定位的导管流速仪和压力传感器,染料	潮汐模拟、动态地貌描述、沉积物通量、波浪参数和大规模物质运输概念模型
Brander 等 ^[25]	2000	新西兰 Muriwai 海滩	3个共同定位的导管流速仪和压力传感器	潮汐调制和动态地貌观测
Vagle 等 ^[26]	2001	美国 La Jolla	横向多普勒声纳	裂流系统中气泡的分布和水平对流
Schmidt ^[27]	2003	美国 La Jolla	GPS 浮标	对受海洋深度影响的裂流旋涡的观测

从表1可以看出,早期的现场观测一般利用肉眼观测或是使用染料、浮子示踪的方法,辅以摄像机拍摄浮子的运动轨迹以分析裂流的运动特性,以及

少量的测站测量流速和压强。后来逐渐采用多普勒测量仪及多普勒声纳等对裂流的流速、脉动机制造进行测量。GPS技术的发展为裂流的现场观测提供了

更为简便精确的方法，研究人员通常在观测区域大范围地放置浮子，利用 GPS 定位技术记录出浮子的运动轨迹，进而分析裂流的流场特性等。从上表可以看出，现场观测手段从一些零散的仪器，逐渐发展成了全面的裂流测量系统。

国内对裂流的研究都是围绕物理模型试验和数值模拟展开的，缺乏现场观测的设备和手段。现场观测数据的匮乏对于后续裂流的精确数值模拟和风险评估都会造成一定的影响。

3.1.2 物理模型试验

很多学者在实验室开展了裂流的物理模型试验研究。物理模型试验与现场观测相比，需要的资金更少，可控性更好，数据更容易采集。尽管现阶段对裂流形成机制的研究还不够全面，但很多学者对波浪正向入射条件下沟槽裂流的产生机理达成了一致认识^[3]：近岸海底的地形不均匀或是有向海突出的结构物、礁石等造成波浪破碎点不均匀，从而导致波浪增减水沿岸分布不均匀。波浪增减水沿岸分布的不均匀性又会进一步产生压力差，压力差驱动生成沿岸流，在低增水区汇聚成离岸流即裂流。沙坝和沟槽的存在使得近岸海底地形不均匀^[28]，因此，大多数物理模型试验都是通过改变沙坝地形来产生，最具代表性的裂流地形模型有：Haller 实验地形、Drønen 实验地形。

Haller^[29]建立了一个带有双沟槽的沙坝地形进行了裂流的物理模型实验。Haller 地形因其代表性和开创性，被广泛地应用于数值模拟研究的验证工作。地形图如图 5 所示。该实验采用正向入射的规则波，对流场的流速、波高和平均水位进行了测量，实验观测到了裂流的不稳定现象。

Drønen^[30]实验在一个 4 m 宽，30 m 长的水槽中进行。该实验地形与 Haller 实验地形不同之处在于该模型只有一个裂流槽，与 Haller 地形采用的双沟

槽沙坝地形相比，能够很好地消除实验过程中裂流的不稳定性。该模型可以理解为与海岸线平行的沙坝被垂直于海岸线的沟槽均匀地截断。

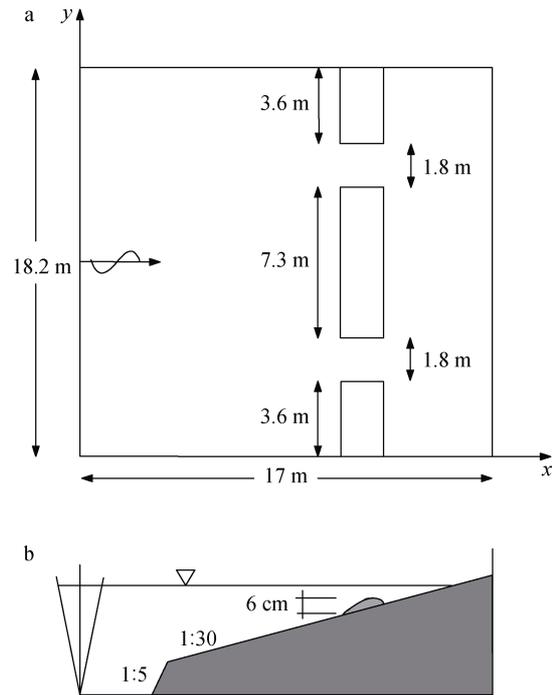


图 5 Haller^[30]实验地形

Fig. 5 Examples of the Haller experimental terrain

我国的研究人员在裂流的物理模型试验方面做了许多工作。表 2 列举了我国在物理模型试验方面所做的贡献。

房克照等^[11]进行了单沟槽沙坝海岸的裂流试验研究，分析了不同波高对于裂流强度及整个流场形态的影响。王彦等^[12]进行了平直沙坝海岸叠加波浪的裂流实验，分析了叠加波浪场的裂流特性。由于目前在实验室进行的裂流物理模型试验大多是在陡坡地形下进行的，针对缓坡地形下裂流特性的研究还

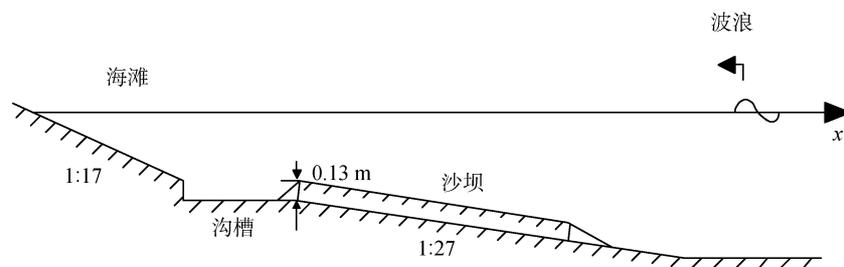


图 6 Drønen^[31]实验地形

Fig. 6 Drønen experimental terrain

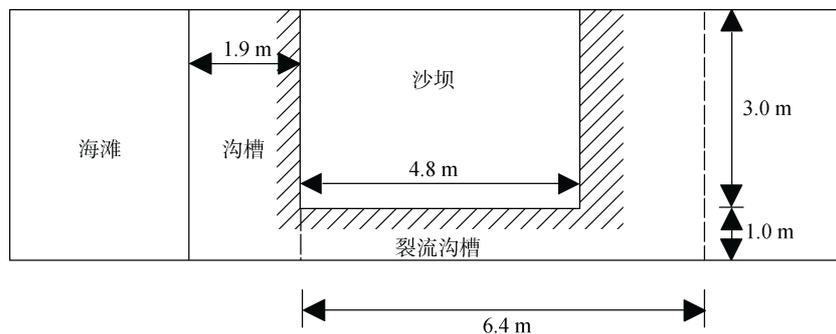


图 7 Dronen^[31]实验地形
Fig. 7 Dronen experimental terrain

表 2 国内物理模型实验

Tab. 2 Experiment research conducted in China

实验名称	单沟槽沙坝海岸的裂流实验研究 ^[11]	平直沙坝海岸叠加波浪的裂流试验 ^[12]	缓坡开槽沙坝海岸裂流特性分析 ^[13]
实验场地及尺寸	水槽 50×3×1	港池 55×34×0.7	港池 55×34×0.7
波浪	规则波	叠加波浪(规则波)	叠加波浪(不规则波)
沙坝剖面	高斯型沙坝	高斯型沙坝	高斯型沙坝
仪器	流速仪、波高仪	浪高仪、ADV	浪高仪、ADV
实验地形	陡坡地形	陡坡地形	缓坡地形
数据	全场波高、平均水面、流速分布	全场波高、流速分布	全场波高、平均水面、流速分布

有所缺乏,因此,王彦等^[31]进行了叠加波浪有槽缓坡沙坝地形裂流试验。浮子示踪的方法也被广泛地应用到了物理模型试验当中,彭石等^[32]利用浮子示踪的方法测量了由波浪破碎引起的裂流。其中,王彦^[31]、彭石^[32]开展的实验采用的是直立反射墙产生的反射波和入射波交叉产生的叠加波浪作为入射波浪,在国际上属首次使用。但是,上述实验的入射波浪都是采用正向入射的波浪,对于斜向入射的波浪以及不规则波和波群作用下裂流流场的特性的探究还不多。此外,这些试验的地形都是使用水泥砌筑的定床试验,与实际的海滩地形有差异。

3.1.3 数值模拟

与现场观测和物理模型试验相比,数值模拟的成本最小,而且可以避免物理模型试验中要考虑的比尺效应问题。此外,数值模拟还可以处理一些在空间范围上属于大尺度的问题。

当前适合用作模拟裂流的波浪模型分为两类:第一类是以 SWAN 模型等为代表的波浪时均模型,计算速度快,但对近岸波生流场的波浪非线性影响、波流相互作用等显著特征的考虑方面有所欠缺。第二类模型是以 FUNWAVE、SWASH 等模型为代表的波浪时域模型,这类模型可以直接在时域内对流场

进行计算,弥补了波浪时均模型的缺点;不足之处在于相对于波浪时均模型,这类模型计算量大,计算效率不高且耗时较多。还有一些海洋模型或模拟系统如 ROMS、SHORECIRC、COAWST、Delft 3D、Mike 21 等也可以用作全流域的裂流的数值模拟,模拟系统优势在于可以综合考虑波浪交互作用、泥沙运动等条件。较为常用的波浪模型列于表 3。

除了利用上述波浪模型对裂流进行模拟之外,国外的一些学者也采用直接求解 Boussinesq 方程的方法^[37-38],对裂流进行数值模拟的研究。

我国在数值模拟方面针对裂流开展的研究并不多,仅有的成果是白志刚等^[9]采用的 SHORECIRC 准三维的近岸流模型耦合 REF/DIF1 波浪模型模拟裂流,并将模拟结果与 Borthwick 等人的试验结果进行了对比,验证该数学模型对研究近岸流的适用性;房克照等^[10]在二阶完全非线性 Boussinesq 水波方程的基础上建立了二维波浪破碎数值模型,模拟了沙坝海岸上产生的裂流;张尧等^[39]利用 Boussinesq-Green-Naghdi 模型对 Haller 地形下产生的裂流进行了数值模拟;汪鸿等^[17]利用 Haller 试验的数据对 FUNWAVE 模型模拟裂流进行了验证,并利用该模型对多种弧形海岸条件进行了裂流数值模拟。

表 3 模拟裂流的波浪模型

Tab. 3 Wave models used in simulating the rip currents

名称	国家	开发机构	核心方程	优点	可用性	国内是否运用
Xbeach ^[33]	荷兰	代尔夫特理工大学、代尔夫特三角洲研究中心	沿水深平均的非线性浅水波方程	模拟裂流结果的精确度比较高	开源	否
FUNWAVE ^[34]	美国	特拉华大学	完全非线性频散方程	在随机波与波相相互作用的情况下能够模拟快速变化的裂流	开源	是
SWASH ^[35]	荷兰	代尔夫特理工大学	考虑非静压的非线性浅水方程	能够模拟从近海至海岸表面的波浪传播变形;对复杂环境下的浅水流和表面波也能够进行有效地模拟	开源	否
SWAN ^[36]	荷兰	代尔夫特理工大学	欧拉近似的动谱平衡方程	对不同水深和边界条件的适应性;考虑的物理作用比较全面;模拟结果更接近真实海浪	开源	否

3.2 裂流风险评价

我国多数重点滨海旅游区的海滩存在裂流现象及大量溺水事故记录。在海滩溺水问题中约 80%~90%的事故由裂流造成。因此,对海滩进行裂流风险评价并在裂流高发区域设立警示标志,加大海滩安全性建设尤为重要。欧洲、北美洲的一些发达国家诸如英国、美国等已经建立了包括裂流的观测、排查、警示、科普、预警报在内的公共服务体系,提出了多种裂流风险评价的方法。我国在裂流风险评价、风险管理方面处于起步阶段,基于国外裂流风险评价研究进展,初步建立了地形动力学裂流风险评价指标和水力学裂流风险评价指标,但在评估裂流灾害造成的人员伤亡及财产损失方面尚属空白。

3.2.1 基于地形动力学指标的裂流风险等级评价

澳大利亚学者 Wright 等^[40]提出了无量纲沉降速率参数(Ω)模型,该模型将海滩状态分为三种:消散型海滩、过渡型海滩和反射型海滩。Masselink 等^[41]在 Wright 提出的模型的基础上引入了相对潮差的概念,建立了更加系统全面的模型,这个模型不仅考虑海滩状态与波浪要素之间的关系,也考虑了波浪与潮差的相互作用。表 4 为 Masselink 提出的分类模型。

Masselink 模型是国外目前广泛使用的基于地形动力学指标分析滨海旅游海滩裂流风险等级的模型,对各类海滩是否存在裂流作了较好的划分。但国外并没有专门用于评价裂流危险程度的风险评价模型。而且无量纲沉降速率参数(Ω)模型的一个不足之处在于过渡型的海滩类型的区分需要研究人员根据

现场观测进行主观地判断。由于裂流的形成和发育与近岸地形有着密切的关系,李志强等人在无量纲沉降速率参数(Ω)模型和相对潮差模型的基础上,建立了一种裂流危险性评价方法,该方法操作简便,能定量区分裂流出现可能性的特征。

表 4 Masselink 分类模型

Tab. 4 Masselink classification model

Ω	RTR (相对潮差)	分类
$\Omega < 2$ (反射组)	$RTR < 3$	R 类(完全反射型海滩)
	$3 \leq RTR \leq 7$	LTTR 类(有裂流的低潮台地海滩)
	$RTR > 7$	LTT 类(无裂流的低潮台地海滩)
$2 < \Omega < 5$ (中间状态组)	$RTR < 3$	B 类(沙坝海滩)
	$3 \leq RTR \leq 7$	LTBR 类(低潮沙坝/裂流海滩)
$\Omega > 5$ (消散组)	$RTR < 3$	BD 类(沙坝消散型海滩)
	$RTR > 3$	NDB 类(无沙坝的消散海滩)
$\Omega > 2$ (超消散组)	$RTR > 7$	UD 类(超消散海滩)

注:表格根据文献[14]总结得到。

如图所示,R 类、LTT 类、NBD 类、UD 类海滩,这些海滩没有沙坝发育,因此产生裂流现象的可能性很小,所以这几类海滩属于安全性较高的海滩;LTBR 类、B 类海滩属于中间状态组,出现裂流的可能性是最高的;BD 类、LTTR 类海滩出现裂流的风险中等。基于上述方法,李志强等^[14-16]对华南海滩裂流、三亚大东海、湛江东海岛裂流进行了风险评价,

为海滩浴场的选址和管理提供参考。

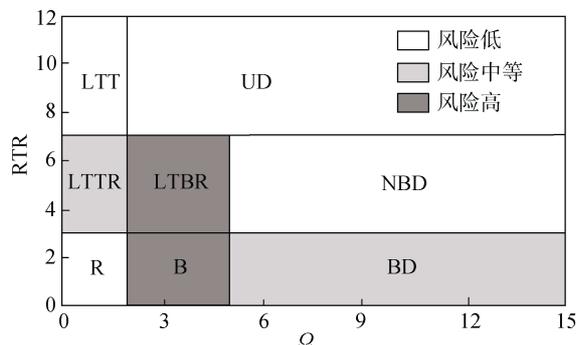


图 8 裂流风险评价模型^[14]

Fig. 8 Risk assessment model of rip currents

3.2.2 基于水动力指标的裂流风险等级评价

国家海洋局发布的《滨海旅游区裂流灾害风险评估技术规程》(征求意见稿)提出,水动力指标也是对裂流进行风险评估的指标之一。应用浪-流耦合模型(SWAN-ROMS、SWAN-ADCIRC、SWAN-POM等)、相位解析、非静压等中小尺度的近岸水动力数值模型,基于滨海旅游地段的实测水深地形,精细化模拟推衍区域内裂流、波流相互作用等复杂水动力环境的时空变化规律。在至少满足表 5 两项指标的前提下,初步判定得到裂流风险等级。

表 5 基于水动力指标的滨海旅游海滩裂流风险等级表
Tab. 5 Risk level table for coastal tourism beaches based on hydrodynamic indexes

裂流最大流速 U	裂流长度 L	裂流宽度 W	裂流风险等级
$U < 0.5 \text{ m/s}$	$L < 20 \text{ m}$	$W < 6 \text{ m}$	低
$0.5 \text{ m/s} \leq U \leq 1 \text{ m/s}$	$20 \text{ m} \leq L \leq 60 \text{ m}$	$6 \text{ m} \leq W \leq 20 \text{ m}$	中
$U > 1 \text{ m/s}$	$L > 60 \text{ m}$	$W > 20 \text{ m}$	高

国内在裂流风险评价方面与国外相比还有欠缺,不足之处在于国内的裂流风险评价模型局限于裂流本身危害性的评估,对于由裂流引起的人员伤亡、财产损失等的评估还很缺乏。此外,由于观测技术、观测设备的局限性,国内缺乏现场观测的资料,如需要更加精确的裂流风险评价,还需要大量的长期现场观测。

4 结论与展望

我国拥有近 300 万平方公里的海域和 18 000 公里长的大陆海岸线,在绵长的海岸线上遍布着众多

优良的沙滩,吸引着众多的游客。然而在这些沙滩上,随时会有出现裂流的可能,对游客的人身安全造成很大的潜在威胁。世界上很多国家都已经把预报裂流作为日常预报的项目之一,对裂流展开一系列深入而全面的研究很有必要。目前,我国对裂流的研究仅停留在实验室的物理模型试验方面(如针对裂流的成因、影响因素等的物理模型试验),采用现场观测和数值模拟的方法对裂流进行的研究较少。在裂流现场勘测排查、裂流风险评价、风险管理等方面的工作都极为缺乏。总体上我国对于裂流的研究还处于起步阶段。

(1) 由于现场观测资料的缺乏,今后现场观测需要对新的观测设备和观测技术开展研究,以获得更为精细的现场观测数据,从而对海滩裂流安全性和风险进行更为精细的评价,对具体的海滩的评估也需要大量的现场观测数据;

(2) 目前国内物理模型试验都是定床试验,今后的物模试验可以更多的关注动床试验,探究裂流对海底泥沙运动的影响以及裂流与海底地形之间的相互作用。此外,国内的一些学者进行的物理模型试验都是采用正向规则波入射,对于不规则波、波群及斜向波浪入射作用下的流场特性等探讨不多,这也是值得关注的一个方面;

(3) 数值模拟需要建立高精度的数学模型和预报裂流的数学模型,以对裂流进行更为精确地预测。采用数值模拟的方法对裂流进行实时预报是今后研究裂流的发展趋势;

(4) 我国的一些学者已经对国内的部分海滩做了裂流的风险评价,但由于缺乏现场观测数据,更加精细的风险评价无法继续。针对由裂流引起的人员伤亡、财产损失等的评估尚属空白,可以借鉴国外用于评估裂流灾害引起的人员伤亡、财产损失等模型,建立一套适用于中国海域的完整的评估模型,对海滩裂流安全性和风险进行更精细的评价也是今后的发展趋势之一。

参考文献:

[1] Bowen A J. Rip currents: 1. theoretical investigations[J]. Journal of Geophysical Research, 1969, 74(23): 5467-5478.
[2] 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.

- [3] Dalrymple R A, Macmahan J H, Reniers A J H M, et al. Rip Currents[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2011, 43(1): 551-581.
- [4] Castelle B, Scott T, Brander R W, et al. Rip current types, circulation and hazard[J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 163: 1-21.
- [5] Shepard F P, Emery K O, Fond E C L. Rip Currents: A process of geological importance[J]. *The Journal of Geology*, 1941, 49(4): 337-369.
- [6] 张尧, 刘旭楠, 董肇伟, 等. 我国典型滨海旅游区裂流灾害评估调查及风险管理动态[J]. *海洋开发与管理*, 2018, 35(7): 16-25.
Zhang Yao, Liu Xunan, Dong Zhaowei, et al. Technical assessment and public warning of the rip current for China's typical coastal tourism[J]. *Ocean Development and Management*, 2018, 35(7): 16-25.
- [7] Shepard F P. Undertow, rip tide or "rip current"[J]. *Science*, 1936, 84(2173): 181-182.
- [8] Longuet-Higgins M S, Stewart R W. Radiation stresses in water waves; a physical discussion, with applications[J]. *Deep-Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 1964, 11(4): 529-562.
- [9] 白志刚, 张志显, 陈志春. 准三维波生近岸流数学模型在裂流研究中的应用[J]. *水运工程*, 2007, (3): 12-17.
Bai Zhigang, Zhang Zhixian, Chen Zhichun. A Quasi-3D Nearshore Circulation Model Applied in Rip Current Research[J]. *Port and Waterway Engineering*, 2007, (3): 12-17.
- [10] 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 A 辑*, 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.
- [11] 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 A 辑*, 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.
- [12] 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.
- [13] 王彦, 邹志利. 缓坡开槽沙坝海岸裂流特性分析[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2015, 47(2): 15-20.
Wang Yan, Zou Zhili. Rip Currents Characteristic on Mild-slope Barred Beach with Rip Channel[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2015, 47(2): 15-20.
- [14] 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 Zhiqiang. Study on the rip current hazard of South China beaches based on beach morphodynamics[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2015, 34(1): 8-14.
- [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 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.
- [16] 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 Zhiqiang, Chen Xingwen. Rip Current risk at the beach of Donghai Island, Zhanjiang, China[J]. *Ocean Development and Management*, 2016, 33(S2): 73-78.
- [17] Wang Hong, Zhu Shouxian, Li Xunqiang, et al. Numerical simulations of rip currents off arc-shaped coastlines[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2018, 37(3): 21-30.
- [18] MacMahan J H, Thornton Ed B, Reniers Ad J H M. Rip current review[J]. *Coastal Engineering*, 2005, 53(2): 191-208.
- [19] Shepard F P, Inman D L. Nearshore water circulation related to bottom topography and wave refraction[J]. *Transactions, American Geophysical Union*, 1950, 31(2): 196-212.
- [20] Sonu, Choule J. Field observation of nearshore circulation and meandering currents[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1972, 77(18): 3232-3247.
- [21] Bowman D, Arad D, Rosen D S, et al. Flow characteristics along the rip current system under low-energy conditions[J]. *Marine Geology*, 1988, 82(3-4): 149-167.
- [22] Smith J A, Largier J L. Observations of nearshore circulation: Rip currents[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1995, 100(C6): 10967-10975.
- [23] Aagaard T, Greenwood B, Nielsen J. Mean currents and sediment transport in a rip channel[J]. *Marine Geology*, 1997, 140(1): 25-45.
- [24] Brander R W. Field observations on the morphodynamic evolution of a low-energy rip current system[J]. *Marine Geology*, 1999, 157(3): 199-217.
- [25] Brander R W, Short A D. Morphodynamics of a large-scale rip current system at Muriwai Beach, New Zealand[J]. *Marine Geology*, 2000, 165(1): 27-39.
- [26] Vagle S, Farmer D M, Deane G B. Bubble transport in rip currents[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(C6): 11677-11689.

- [27] 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.
- [28] 尹继伟. 沙坝沟槽地形上裂流实验和数值模型研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
Yin Jiwei. The laboratory experiments of rip currents generated on barred beach and numerical prediction model[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [29] Haller M C. Rip current dynamics and nearshore circulation[D]. Newark: University of Delaware, 1999.
- [30] Drønen N. An experimental study of rip channel flow[J]. *Coastal Engineering*, 2002, 45(3): 223-238.
- [31] 王彦, 邹志利. 叠加波浪有槽缓坡沙坝地形裂流试验[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2015, 23(6): 1166-1173.
Wang Yan, Zou Zhili. Experimental study of rip currents by intersecting wave on barred beach of mild slopes with rip channel[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2015, 23(6): 1166-1173.
- [32] 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*, 2011, 26(6): 645-651.
Peng Shi, Zou Zhili. Experimental measurement of rip currents with video-tracked drifters[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2011, 26(6): 645-651.
- [33] Roelvink D, Reniers A, Van Dongeren A, et al. XBeach model description and manual[R]. Unesco-IHE Institute for Water Education, Deltares and Delft University of Technology, 2010.
- [34] Kirby J T, Wei G, Chen Q, et al. FUNWAVE 1.0. Fully nonlinear Boussinesq wave model. Documentation and user's manual[R]. Center for Applied Coastal Research, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Delaware, 1998.
- [35] 白志刚, 魏茂兴. 时域模型 FUNWAVE 与 SWASH 的对比研究[J]. *港工技术*, 2013, 50(6): 4-6.
Bai Zhigang, Wei Maoxing. Comparison between time domain wave models FUNWAVE and SWASH[J]. *Port Engineering Technology*, 2013, 50(6): 4-6.
- [36] Allard R, Rogers E, Carroll S N. User's Manual for the Simulating Waves Nearshore Model (SWAN)[M]. Delft University of Technology, 2002.
- [37] Chen Q, Kirby J T, Dalrymple R A, et al. Boussinesq modeling of longshore currents[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2003, 108(C11): 3362.
- [38] Choi J, Shin C H, Yoon S B. Numerical study on sea state parameters affecting rip current at Haeundae Beach: Wave period, height, direction and tidal elevation[J]. *Journal of Korea Water Resources Association*, 2013, 46(2): 205-218.
- [39] Zhang Y, Kennedy A B, Tomiczek T, et al. Validation of Boussinesq-Green-Naghdi modeling for surf zone hydrodynamics[J]. *Ocean Engineering*, 2016, 111: 299-309.
- [40] 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.
- [41] 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.

Progress of rip current research in China

DONG Bi-xuan^{1, 2}, FENG Wei-bing^{1, 2}, FENG Xi^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence (Hohai University), Ministry of Education, Jiangsu, Nanjing, 210098; 2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Received: May 29, 2019

Key words: rip currents; field observation; physical modelling experiments; numerical simulation; risk assessment

Abstract: Rip currents are natural disasters that frequently occur in the coastal areas of South China. In this paper, the general situation, research histories, and research progress of rip currents in China were described in detail, and they were compared with the method of studies abroad. Furthermore, the physical modelling experiments, numerical simulation models, and risk assessment methods of rip currents were introduced. The future research trend of rip currents was also presented. With its findings, this paper aims to provide some references for the further researches on rip current in China.

(本文编辑: 丛培秀)