

裂流的研究综述

孟凡昌¹, 李本霞^{1,2}

(1. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081; 2. 国家海洋局海洋灾害预报技术研究重点实验室, 北京 100081)

摘要: 详细回顾了各国在裂流方面的研究和成果, 着重介绍了几个比较典型的经验预报方法: LURCS、ECFL LURCS、modified ECFL LURCS、CAP-LURCS 以及两个数值模型 FUNWAVE、XBeach, 期望能对发展我国自己的裂流预报系统具有一定的参考意义。

关键词: 裂流; 预报; 经验预报; 数值模拟

中图分类号: P731.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2017)01-0082-08

1 引言

1.1 裂流的定义

裂流又称离岸流, 是波浪在海岸破碎后, 高于岸边的水体通过破碎带(surfzone)流回海洋的条带状强烈表面流, 具有持续时间短、流速快、尺度小, 流向几乎与海岸垂直的特点, 是海难上常见的自然现象之一。波浪场或者海底地形在沿岸方向的不均一分布是形成裂流的主要原因^[1]。

最典型的裂流类型是海滩-沙坝型^[2](见图1), 其主要形成过程为: 入射波经过破碎带破碎后到达岸边, 导致额外的水体堆积在沙坝和海岸之间从而引起波浪增水(setup), 额外的水体需要通过破浪带再返回海洋, 而水下沙坝断裂处水位相对较低, 所以两侧的海水沿着海岸汇聚于支流处(feeder), 在此形成了一条狭窄的向海的裂流槽(neck), 水流在这里流速很大, 当裂流把额外的水体带到深水区后流速就快速减小形成裂流头(head)。裂流槽的宽度一般为10~30 m, 裂流头距海岸约100 m左右^[3]

1.2 裂流的危害

虽然裂流范围小、持续时间短, 但由于狭窄流

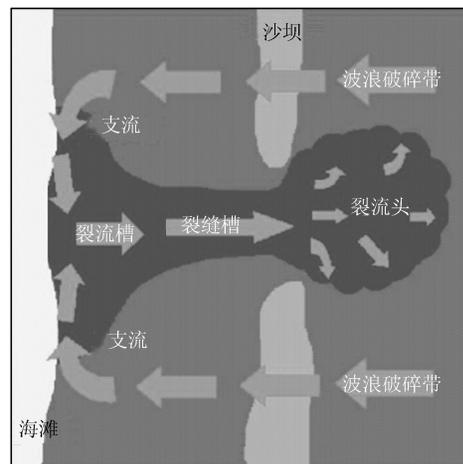


图1 裂流简图(根据文献[2]绘制)

急及不可预见性, 已成为海水浴场的最大危险。近年来随着人们生活水平的提高, 世界各地的海滩迎来的游客数量也在逐年的增加, 但是很多游客根本就没有意识到裂流潜在的危险, 因此, 因裂流而造成的死亡事件也是不断增加。据美国国家海洋大气局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)统计美国平均每年约有100人因裂流而溺亡, 佛罗里达州沿岸平均每年因裂流而造成的死亡人数比飓风、闪电、龙卷风之和还要多, 约为25~30人^[4]; 在英国西南部的海滩大约有2/3的事故

收稿日期: 2016-05-23; 修回日期: 2016-06-29。

基金项目: 国家海洋局海洋公益性行业科研专项(201305031)。

作者简介: 孟凡昌(1992-), 男, 硕士研究生在读, 主要从事裂流及近岸小尺度浪流耦合研究。E-mail: 13590059265@163.com

通讯作者: 李本霞(1972-), 女, 研究员, 博士, 主要从事海洋灾害模拟及预报技术、风险评估技术研究。E-mail: lbx@nmefc.gov.cn

与裂流相关^[5](2006—2011年事故总数是12 521);在印度,过去10 a平均每年因裂流致死的人数为39人^[6];Klein等2003年在巴西南部海滩所做的海洋灾难调查显示,在所有的海滩灾害中裂流因子占了78%,为海滩灾害的首要因子^[7];韩国也是受裂流危害严重的区域,特别是海云台海滩^[8](见图2),仅在2009年8月13号和15号就有106个人被裂流冲走后被营救,2007年夏季约有120人被营救,2008年是150人^[9]。我国也是裂流频发的区域,特别是青岛和厦门,经常有因裂流致游客死亡报道,根据报道推测仅青岛地区每年因裂流而发生的溺亡事故就可达上百人,全国范围内更多。所以,为了在海滩上娱乐消遣的游客的安全,研究以及预报裂流是



图2 海云台浴场出现的裂流^[8]

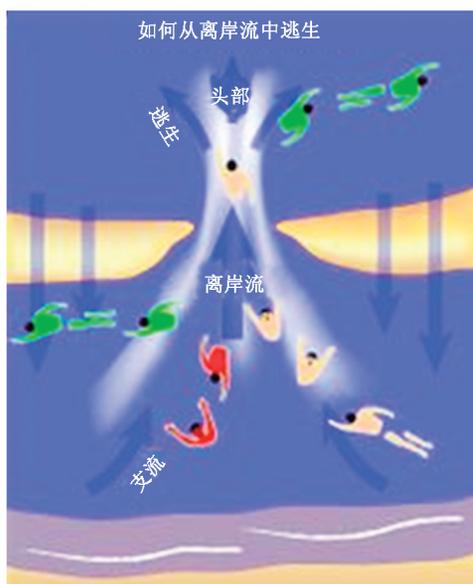


图3 裂流逃生路线(绿色为正确的逃生路线,红色为错误示范,引自:<http://baike.baidu.com>)

很有必要的。

1.3 裂流的防御

Short等在1994年通过大量的试验和观测指出:一般人的游泳速度是0.2~1.5 m/s,而裂流的速度一般为0.5~1.5 m/s,甚至有时超过2 m/s^[10]。由此可知,当在海滩游玩的人一旦陷入裂流之中往往会被水流冲向大海,而人们出于本能会拼命地逆着水流向岸游去,最终导致筋疲力尽而溺亡。所以当人们不小心进入裂流区域后,最好的办法是平行于海岸游出裂流区域后再向岸游去或者顺着裂流向两侧游然后再朝着岸边游去(见图3)。

2 裂流的研究历史

因为裂流对游客具有很大的潜在威胁,所以很早之前就有学者对裂流展开了研究。Shepard等在1941年第一次用科学的方法定性的描述了裂流的行为特征^[11],他发现裂流的强度和延伸的距离与入射波的波高有关,随后又指出裂流是近岸环流系统的一部分^[12]。Longuet-Higgins等在1964年首次引入了辐射应力的概念^[13],辐射应力是由于波浪的存在导致额外的动量通量,这为后来的数值模拟裂流打下了基础。Bowen等在1969年证实水位增加(setup)的大小与波高平方成正比,波高较大的波浪将引起更大的波增水^[1]。因此破碎波高沿岸方向的变化会引起水位沿岸方向的变化,形成沿岸方向的压力梯度支流就会从波高较大的地方流向波高较小的地方,在波高较小处汇聚形成向海方向的裂流。因此在码头、支柱、防波堤等处经常会发现裂流。Komar在1976年的研究表明,裂流的形成与波浪破碎导致的波高变化有关或者和近岸地形的变化有关^[14]。Bascom等在1980年描述了物理海洋中裂流的形成过程^[15]。Aagaard等在1997年观测发现裂流的最大速度出现在低潮时^[16],因为高潮时波浪传播通过沙坝时破碎较少,导致裂流较弱。Dalrymple等在2008年强调了本地条件对于裂流形成的重要作用,并认为所有的经验预报方法都应该进行本地校正^[17]。

近年来人们也运用越来越多的高科技来观测研究裂流,期望通过发现裂流的生成机制和规律来

预报裂流。Austin等2009年用现场阵列传感器观测裂流,发现裂流循环中的流速与潮汐所处的阶段以及最大流速有很大的关联^[18]。Gallop等于2009年用视频图像的方法观测裂流对波浪条件变化的响应^[19],进而验证了一个事实:裂流系数强的不稳定性 and 空间变化的行为与海流方向的强烈变化相关。为了减少裂流的危害,韩国气象委员会制定了一个两年研究计划(2010年6月—2012年5月)^[20],主要包含两个阶段:第一阶段(2010年6月—2011年5月)发展建立一些先进的观测工具比如:GPS浮标系统、实时的CCD图像观测系统等,以观测裂流的形成;第二阶段(2011年6月—2012年5月)基于前期的观测研究建立一套海滩安全的自动警报系统。目前该工作已经取得了一些有意义的进展。NOAA也已开展了裂流的危险性预报。

我国对于裂流的相关研究开展的比较晚,目前处于起步阶段。王彦等^[21]、邹志利等^[22]研究了实验室条件下裂流的特征,并分析了波周期对裂流的影响;李志强^[23]基于地形动力学对华南海滩裂流风险进行了初步评估,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。

3 裂流的预测方法

由于裂流造成的危害以及潜在的危险,许多学者很早就探索如何预测裂流,最先发展起来的是经验预报法。经验预报是依据统计分析建立裂流和某些因素之间的联系,再由这些因素推测裂流的情况。其次是采用数值模拟的方法预测裂流。

3.1 经验预测法

裂流由于其短暂性和复杂性很难被直接观察,也很难形成长期的观测,因此关于裂流活动和强度的数据很少。但是海滩日志及裂流的救援记录提供了裂流活动长期的定量记录(虽然精度较低),很多研究者用此数据来分析研究裂流。

Lushine首先将佛罗里达州东南海滩的溺亡和救援数据与风向、风速、涌浪以及低潮时联系起来,开发了Lushine Rip Current Scale(LURCS)^[24]。1998年Lascody根据观测发现Lushine的方法中风所占

的权重太大不合理,于是修改了LURCS方法,开发出ECFL LURCS^[4]。Engle等2002年在评估ECFL LURCS的准确性时发现入射波的方向与裂流救援数据有很好的关联性,于是改进了ECFL LURCS方法^[25]。2013年Kumar等在印度建立了一套新的经验预报方法CAP-LURCS^[5],其特别之处在于基于FORTRAN语言开发了一个软件实现了自动预报而且是每小时发布裂流预报。现在美国国家气象服务中心已经把预报全美所有海滩的裂流作为冲浪区预报的一部分,其预报分类为:低等危险、中等危险、高等危险^[26]。

(1) LURCS方法

LURCS^[24]是Lushine于1991年提出的一种统计预报裂流危险程度的经验模型。Lushine首先统计了东南佛罗里达州沿岸,尤其是Dade和Broward县在1979—1988年共10a间因裂流而溺亡的人数,然后又统计分析了裂流发生时对应的风速、风向、风浪、潮汐、涌浪等一系列气象和海洋数据,并且一一比对了他们和裂流的关系,得到如下结论:1)当裂流发生时风向100%都是向岸的,90%的风向与海岸的角度在30°以内。而且需要考虑时间的效应,当陆向风开始时不会产生危险的裂流,而随着时间增加风险越大。当风停止或转移时危险也不会立即结束,而是会持续一段时间。2)裂流与潮汐的关系主要存在于高、低潮时,在低潮附近更容易产生危险的裂流;而随着时间增加风险越大。3)裂流和涌浪的关系因为数据少只能粗略的分析,涌浪越大形成的裂流越危险。LURCS具体使用方法见表1。

此方法使用时的注意事项:①使用观测或者预测的风速用最接近的5节使其落入一个分级,风向是最主要的风向;②如果预测区域有涌浪影响增加涌浪项;③当风或涌浪项 ≥ 0.5 时,考虑潮汐项;④如果昨天的LURCS > 0.0 ,则加入时间项;⑤各项的总和去尾到最接近的一级。此外需要注意的是此方法中使用的风是盛行的、大范围的风,风向的定义为:(a)正向岸风:正向岸30°以内的风;(b)斜向岸风:与垂直海岸的方向超过30°,各项总和最大是5。

Lushine给裂流预测的危险程度分为0—5级,0表示没有危险裂流的相关因素,5表示非常危险(裂流危险度划分见表2)。并建议海岸巡逻人员根据不同的危险等级向游客发出警报。

表1 LURCS级别的定义

a 风速/节	风向/级别	
	正向岸风	斜向岸风
<10	0.0	0.0
10	0.5	0.0
11~14	1.0	0.5
15	2.0	1.0
16~19	3.0	2.0
20	4.0	3.0
21~24	4.5	3.5
25~34	5.0	4.5
35~50	5.0	5.0
b 涌浪高/尺	级别	
>2~4	增加2级	
>4~7	增加3级	
>7~10	增加4级	
>10	增加5级	
c 潮汐因素: 在低潮时前2 h到后4 h增加1级		
d 时间因素: 第一天减去0.5级; 若LURCS ≥ 2, 第二天及以后增加1级。		

表2 LURCS的类型

级别	颜色	描述	建议行为
0		无危险	无
1	黄	提醒不会游泳或水性不好的人, 弱的裂流可能出现	水性不好的人呆在浅水区
2	黄	提醒所有人可能会有中等强度的裂流出现	所有游泳者都呆在浅水区
3	红	可能出现对不会游泳或水性不好的人产生危险的裂流	水性不好者不要进入没膝的水域
4	红	可能出现强劲的裂流, 对所有人都有威胁	所有人都不要进入没膝的区域
5	黑	可能出现对所有人都非常危险的裂流	离开水域

在对此方法检验时主要从3个方面: POD(the Probability Of Detection)、FAR(the False Alarm Ratio)、CSI(the Critical Success Index), POD是模式的精确性, FAR是预报裂流发生而实际没有发生所占的百分比, CSI是指模式预测成功的比率。几次的检

验结果表明虽然精度不是很高,但是可以接受,因此美国有些地方早期也用此方法来预测裂流的危险性。

Lushine作为研究预报裂流的开拓者之一,其发展的LURCS指标方法作为最早的预测裂流的方法虽然有很多不足之处,但已经难能可贵了,这也为后来者研究裂流的预报性提供了一个良好的开端并且打下了坚实的基础,后来的经验预报方法基本上都是以此为基础的。

(2) ECFL LURCS方法

ECFL(East Central Florida) LURCS^[4]是Lascody在LURCS方法的基础上开发的。Lascody分析了东佛罗里达州中部大量的裂流溺亡和救援数据以及当时的气象和海洋要素,发现Lushine的方法中风所占的权重太大了不合理,于是就重新评估计算各要素对裂流的贡献开发了ECFL LURCS预报法。其主要的改动为:降低风的比重,增加涌浪的比重,不仅包括涌浪高还考虑了涌浪周期,增加了天文大潮的影响,使其适用于中东部佛罗里达海滩。

经Lascody验证此方法的POD值比较高,表明这个方法的改进是比较合理的,但同时FAR的值也比较高表明仍此方法需要进一步的改进。目前研究人员已经和一些海滩救生站建立了合作关系,他们根据救生员的反馈数据改善此预报方法。在墨尔本以及其他一些沿海城市已经使用此模式预测并发布裂流的危险性报告。

(3) 改进的ECFL LURCS方法

Engle等在2002年分析了佛罗里达州东海岸大量的裂流救援数据和裂流发生时海滩的风、浪等气象和海洋要素,经过细致的研究比对发现在如下条件下裂流事件有明显的增多趋向:1)入射波方向正向岸;2)中、低潮位;3)深水浪高在0.5~1.0之间;4)波周期在8~10 s。因此Engle在此基础上改进了ECFL-LURCS^[25]方法,其主要的做法是引入了两个新的预测参数——潮位、波向,并去除了原有的两个参数——风向、风速,仍然保留了波高和周期。具体使用方法见表3。

美国国家气象局(NWS)通过计算POD和FAR来判断模式的性能,为了验证这个模式的性能Engle额外还设计了一个新的测量AR(Alarm

表3 Modified ECFL LURCS使用方法

波周期		波向/ $^{\circ}$	
周期, T/s	因数	方向, θ	因数
$T < 6$	0	$\theta > 35$ 或 $\theta < -20$	0
$6 \leq T < 9$	0.5	$\theta > 30$ 或 $\theta < -15$	1
$9 \leq T < 11$	1	$\theta > 25$ 或 $\theta < -10$	2
$11 \leq T < 12$	2	$\theta > 15$ 或 $\theta < -5$	3
$12 \leq T$	3	$15 \geq \theta \geq -5$	4
波高		潮汐	
高度, H_o/m	因数	潮高, h/m	因数
$H_o < 1$	0	$h > -0.2$	0
$1 \leq H_o < 2$	0.5	$-0.5 < h \leq 0.2$	1
$2 \leq H_o < 3$	1	$-0.75 < h \leq 0.5$	2
$3 \leq H_o < 5$	2	$H \leq -0.75$	1
$5 \leq H_o < 8$	3		
$8 \leq H_o$	4		

注: 当裂流危险超过5时, 发布裂流危险警报。

波向: 从北方来的波方向为负, 南方来的为正。

Ratio), AR是模式预报裂流出现的天数所占总天数的百分比。如果AR的值太大表示预报裂流几乎天天发生, 这就削弱了模式的作用, 因此应该把预报的阈值设置的大一些。经过多次验证表明改进后的模式和原来的相比AR基本一致, 但是POD增大FAR减小了, 表明模式的性能有明显的提升。

(4) CAP-LURCS方法

Prasad分析了印度东海岸和西海岸2000—2010年间因裂流而溺亡的人数, 发现裂流事故空间分布很不均匀, 大部分集中在印度东南沿海, 而且每年的8月和10月是溺亡人数最多的月份, 并且溺亡人数是逐年增加。因此急需开发一套预测裂流危险性的方法以保护人们的生命安全。Prasad一一统计分析了风速、风向、潮汐、波高、周期、近岸地形和当地溺亡人数之间的关联, 结果表明: 1) 风向风速与裂流相关的溺亡人数之间没有什么关联; 2) 溺亡人数与潮汐有比较大的关联, 多数的溺亡发生在低潮时刻前1h到后3h, 满月附近几天溺亡人数也有明显的增长; 3) 波高在0.5~1.2m时的溺亡人数占了总数的65%, 波周期在5.0~8.0s之间的占了60%。波向和裂流也有很强的相关性, 波向在 -20° 和 -10° 之间的占了70%(0° 和垂直海岸的方向一致); 4) 大部分海滩都可以生成裂流, 因为很少有海滩沿岸是完全一致的。之前的预报方法是发布每天的裂流

预测, 这样意味着溺亡人数在一天中平均分布, 这明显和事实不符, 而且预测用的参数值也都是平均值, 这可能掩盖某一时刻较强的波浪接近海滩, 模式发现不了进而导致误报。此模式采用了每小时发布一次裂流预报, 预测参数值也是小时平均值。因为Prasad主要是在Andhra Pradesh沿岸做的鉴定, 所以他将他的模式命名为Coastal Andhra Pradesh LURCS^[5]。

此模式的POD、FAR、AR分别为76%、23%、67%, 比起之前的方法结果都要好, 表示在印度沿岸采用这种新的预测方法预测裂流是比较适合的。Prasad还用FORTRAN语言开发了一个软件, 可以每小时自动生成预测结果。但是此方法和此前所有的预测方法一样, 只能预测裂流出现的可能性和危险程度, 不能预测裂流发生的位置, 裂流发生的位置需要有经验的救生员去鉴别。

3.2 数值模拟方法

裂流具有很大的变动性、短暂性以及不确定性, 因此现场观测研究比较复杂困难, 现阶段的总体趋势是应用数值模拟方法来研究和预测裂流。当前适宜用于模拟裂流的波浪模型主要可分为两类^[27]: 第一类是波浪的时均模型, 此模型是把流体的运动方程在波浪周期上进行平均, 然后求解出方程就可直接得到时均水流。此类模型的优点是计算速度快用时短, 但是并不能充分考虑近岸波生流的一些特征, 如波浪的非线性影响以及波-流相互作用。第二类模型是波浪时域模型, 此类模型直接在时域内对流场进行计算。这类模型的优点是可以弥补时均模型的不足更充分的考虑更多的因素, 但是由于受波浪尺度的限制, 模型计算量大效率低耗时多, 因此只能用于很小的区域。虽然目前存在很多模式可以模拟裂流, 但是大都处于实验室阶段, 到现在还没有一个模式能够大范围的业务化预报裂流。究其原因无非是模式计算效率高但是精度差或者模拟效果好但是计算量太大, 现在还没有方法将这两者统计结合, 还需要进一步的研究。下面就介绍两个最常见的、应用较多的模拟裂流的模型。

(1) FUNWAVE模型

FUNWAVE^[28]是由特拉华大学(The University

of Delaware)的 James Kirby 等人开发的相位解析、时步法的完全非线性 Boussinesq 方程模型。该模式包含了波浪引起的动量通量和水平湍流混合效应,可以解决相位相互作用和模拟近岸环流等。FUNWAVE 模型的核心方程采用 Wei 等提出的完全非线性频散方程^[29],是由三维欧拉方程在无旋和浅水假设下的深度平均推导而来的。FUNWAVE 是模拟裂流最为先进的模型之一,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。关于 FUNWAVE 模式的验证,在以前很多的研究中都得到了确认,在之前的研究中也有详细的描述(例如 Wei 等^[29],Chen 等^[26,30,31])。但 FUNWAVE 只合适在实验室模拟研究裂流,而不能作业务化的预报,因为它的运算量太大,模拟一小段裂流往往要耗费很长的时间。

(2)XBeach 模型

XBeach^[33]是由代尔夫特理工大学(TU Delft)和代尔夫特三角洲研究中心(Deltares Institute)联合开发的,最初是用来研究飓风对近岸的影响,经过不断的发展,现在已经成为了一个功能相当强大的海岸动力学模型。XBeach 分为好几个模块并行化处理,其主要的模块为水动力模块和地貌动力模块。水动力模块下又包含两个子模块:短波模块、流模块,地貌动力模块下也包含两个子模块:形态模块、泥沙运输模块。这几个模块之间的相互关系见图 4,箭头代表了它们之间的连通关系,箭头指向表示后面的模块稍后要使用前面的输出数据(每一模块中的有色字体为输出的相关参数,正体是每一模块的核心计算方法)。

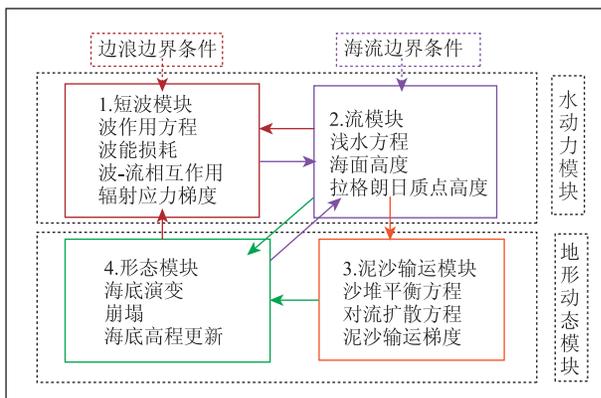


图 4 XBeach 的组成模块(译自文献[33])

经过 Jacobs^[34]、Winter^[2]等人的现场观测检验表明 XBeach 模拟裂流的结果和实际情况相符合,精确度比较高。像这类高度模块化并行化处理的模式不仅大幅度的提高了计算效率,模块间的耦合计算还充分的考虑了各种影响因素,从而提高了模拟精度。这类模型因其特有的优势是现在发展的重点,类似的还有 CoSMoS^[35]、COAWST^[36]等。

4 结语与展望

我国海岸线绵长,有很多优良的海滩,但同时有些地方也是裂流多发的区域,特别是中国青岛第一海水浴场、厦门椰风寨海滨浴场。而大部分游客对裂流毫不知情,这对越来越多的到海滩游玩者造成了很大的潜在威胁。目前我国沿海地区的裂流研究还处于起步阶段,现场观测数据非常缺乏。对裂流的研究也仅限于实验室阶段,关于我国裂流的分布、频率、强度等情况都还不清楚,今后需要加大在这方面的研究投入。

目前,国际上很多国家都已把预报裂流作为日常预报项目之一,如美国国家气象服务中心(NWS)已经把预报全美所有海滩的裂流作为冲浪区预报的一部分,澳大利亚也在一些重要海滩通过广播、电台等向人们发布裂流预报信息以保障游客的安全。我国周边的一些国家也正在积极的开展和裂流预报相关的一些研究,比如韩国自 2010 年起就由韩国气象委员会制定了一个两年研究计划(2010 年 6 月—2012 年 5 月)^[20],目的就是观测、研究、预报裂流,现已取得了显著的成果开发了一套自己的裂流预报系统——KMA operational forecasting system^[37],印度近几年也对裂流也展开了大规模的研究并取得了不错的成果。因此,我国作为一个海洋大国对于裂流的研究任重而道远。

参考文献

[1] Bowen A J. Rip Currents: 1. Theoretical Investigations[J]. Journal of Geophysical Research, 1969, 74(23): 5467-5478.
 [2] Winter G. Rip Current Characteristics at the Dutch Coast: Egmond aan Zee[D]. Delft, The Netherlands: Delft University of Technology, 2011.
 [3] Sonu C J, Field Observation of Nearshore Circulation and

- Meandering Currents[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1972, 77(18): 3232-3247.
- [4] Lascody R. East Central Florida Rip Current Program[J]. *National Weather Digest*, 1998, 22(2): 25-30.
- [5] Kumar S V V A, Prasad K V S R. Rip Current-Related Fatalities in India: A New Predictive Risk Scale for Forecasting Rip Currents[J]. *Natural Hazards*, 2014, 70(1): 313-335.
- [6] Scott T M, Russell E, Masselink G, et al. Rip Current Hazards on Large-Tidal Beaches in the United Kingdom[M]. // Fletemeyer J. *Beach Safety, Physical Oceanography, and Wave Modeling*. New York: CRC Press, 2011: 225-243.
- [7] Klein A H F, Santana G G, Diehl F L, et al. Analysis of Hazards Associated with Sea Bathing: Results of Five Years Work in Oceanic Beaches of Santa Catarina State, Southern Brazil[J]. *Journal of Coastal Research*, 2003, 35(19): 107-116.
- [8] Kim I C, Lee J L, Lee J Y. Verification of Rip Current Simulation Using a Two-Dimensional Predictive Model, HAECUM[J]. *Journal of Coastal Research, Special Issue 65 - International Coastal Symposium Volume 1*, 2011: 726-730, doi:10.2112/SI65-123.1.
- [9] Conley D C, Masselink G, Russell P E, et al. Proceedings 12th International Coastal Symposium (Plymouth, England)[J]. *Journal of Coastal Research*, 2011, 65: 1557-1562.
- [10] Short A D, Hogan C L. Rip currents and Beach Hazards: Their Impact on Public Safety and Implications for Coastal Management [J]. *Coastal Res*, 1994, 12: 197-209.
- [11] Shepard F P, Fond E C L. Rip Currents: A Process of Geological Importance[J]. *The Journal of Geology*, 1941, 49(4): 337-369.
- [12] Shepard F P, Inman D L. Nearshore Water Circulation Related to Bottom Topography and Wave Refraction[J]. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 1950, 31(2): 196-212.
- [13] 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.
- [14] Komar P D. *Beach Processes and Sedimentation*[M]. New Jersey: Prentice-Hall Inc, 1976:343-350.
- [15] Bascom W. *Waves and Beaches*[M]. Garden City, New York: Anchor Press/Doubleday, 1980: 227-230.
- [16] Aagaard T, Greenwood B, Nielsen J. Mean Currents and Sediment Transport in A Rip Channel[J]. *Marine Geology*, 1997, 140(1-2): 25-45.
- [17] Dalrymple R A, Macmahon J H, Reniers A J H M, et al. Rip Currents[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2011, 43(1): 551-581.
- [18] Austin M J, Scott T M, Brown J W, et al. Macrotidal Rip Current Experiment: Circulation and Dynamics[J]. *Journal of Coastal Research*, 2009, 56: 24-28.
- [19] Gallop S L, Bryan K R, Coco G. Video Observations of Rip Currents on An Embayed Beach[J]. *Journal of Coastal Research*, 2009, 56: 49-53.
- [20] Song D S, Bae H. Observation and Forecasting of Rip Current Generation in Haeundae Beach, Korea Plan and Experiment[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 64: 946-950.
- [21] 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): 1123-129.
- [22] 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.
- [23] 李志强. 基于地形动力学的华南海滩裂流风险研究[J]. *海洋水文学*, 2015, 34(1): 8-14.
- [24] Lushine J B. A study of Rip Current Drownings and Related Weather Factors[J]. *National Weather Digest*, 1990, 16: 13-19.
- [25] Engle J, MacMahan J, Thieke RJ, et al. Formulation of a Rip Current Predictive Index Using Rescue Data[C]//Proceedings of National Conference on Beach Preservation Technology. FSBPA, 2002, 2: 23-25.
- [26] Chen Q, Kirby J T, Dalrymple R A, et al. Boussinesq Modeling of Wave Transformation, Breaking, and Runup. II: 2D[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2000, 126(1): 48-56.
- [27] 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.
- [28] Bae J S, Yoon S B, Choi J W. Boussinesq Modelling of a Rip Current at Haeundae Beach in South Korea[J]. *Journal of Coastal Research*, 2011, 65(1): 654-659.
- [29] Wei G, Kirby J, Grilli S T, et al. A Fully Non-Linear Boussinesq Model for Surface Waves: I. Highly NonLinear Unsteady Waves [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1995, 294: 71-92.
- [30] Chen Q, Dalrymple R, Kirby J, et al. Boussinesq Modeling of A Rip Current System[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1999, 104(C9): 20617-20637.
- [31] 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.
- [32] Johnson D, Pattiaratchi C. Boussinesq Modelling of Transient Rip Currents[J]. *Coastal Engineering*, 2006, 53(5-6): 419-439.
- [33] Sasso R. Video-Based Near Shore Bathymetry Estimation for Rip Current Forecasting on a Macrotidal Beach[D]. Delft, The Netherlands: Delft University of Technology 2012: 14-23.
- [34] Jacobs R P M. Non-Hydrostatic Computations of Nearshore Hydrodynamics[D]. Delft, The Netherlands: Delft University of Technology, 2010.
- [35] Van Dongeren A, Van Ormondt M, Sembiring L, et al. Rip Current Predictions Through Model-Data Assimilation on Two Distinct Beaches[C]//Coastal Dynamics 2013: 7th International Conference on Coastal Dynamics. Arcachon, France, 2013: 1775-1786.
- [36] Warner J C, Armstrong B, He R Y, Zambon J B. Development of A Coupled Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport (COAWST) Modeling System[J]. *Ocean Modelling*, 2010, 35(3): 230-

244.
[37] Eom H, Yun J H, Jeong C K., et al. Introduction to KMA

Operational Forecasting System for Rip Current[J]. Journal of Coastal Research, 2014, 72: 63-68.

Review on the study of the rip current

MENG Fan-chang¹, LI Ben-xia^{1,2}

(1. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081 China; 2. Key Laboratory of Research on Marine Hazards Forecasting, National Marine Environmental Forecasting Center, State Oceanic Administration, Beijing 100081 China)

Abstract: In this paper, previous study on the rip current is reviewed. The pop statistical methods and numerical models, including LURCS, ECFL LURCS, modified ECFL LURCS, CAP-LURCS, FUNWAVE, XBeach, as well as their features, are given. The study will provide some valuable reference to develop our own forecast system of the rip current.

Key words: rip current; forecasting; experimental methods; numerical simulation