

# 随机波浪丁坝反射叠加形成的裂流实验

王彦<sup>1</sup>, 邹志利<sup>2</sup>, 张振伟<sup>3</sup>, 刘忠波<sup>1</sup>, 房克照<sup>2</sup>

(1. 大连海事大学 交通运输工程学院, 辽宁 大连 116026; 2. 大连理工大学 海岸及近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

3. 厦门理工学院 土木工程与建筑学院, 福建 厦门 361024)

**摘要:** 为研究随机波浪遇丁坝反射形成的裂流的特征, 进行了沙坝地形丁坝反射所形成的叠加波浪生成裂流的实验。研究表明, 沿岸一致的沙坝地形使得所形成的裂流主要受控于沿岸周期性变化叠加波浪。裂流的驱动力主要取决于节腹点之间的平均水面沿岸压力梯度, 而节腹点波高差异形成的沿岸辐射应力贡献很小, 驱动力的量值与范围受到波浪周期的影响。裂流的位置和宽度完全受控于波浪节点, 叠加波浪场在叠加区沿岸方向上形成交替出现的环流系统和大尺度涡, 此环流系统由围绕波浪节点的离岸裂流、围绕波浪腹点的向岸流和由波腹点向波节点汇聚的沿岸方向的补偿流组成。

**关键词:** 裂流; 交叉波浪; 随机波浪; 环流特征; 波浪节点

**中图分类号:** P73

**文献标志码:** A

## Experimental Study of Rip Currents of Intersecting Irregular Waves

WANG Yan<sup>1</sup>, ZOU Zhili<sup>2</sup>, ZHANG Zhenwei<sup>3</sup>,  
LIU Zhongbo<sup>1</sup>, FANG Kezhao<sup>2</sup>

(1. College of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China; 2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China)

**Abstract:** To better understand the characteristics of rip current caused by crossing irregular waves, an experimental study of rip current caused by intersecting irregular waves over barred beaches was conducted. The barred beach without rip channel was adopted to eliminate the inconsistency of coastal topography caused by the rip channel, so that the rip currents was mainly controlled by the node points of waves. The driving force

of the rip current is mainly the mean water surface pressure gradient pointing to the node, while the radiation stress caused by wave height contributes little due to the change of wave height along the break zone. The magnitude and range of the driving force are affected by the period. The location and width of rip currents are controlled by the wave node points. The cross-wave field forms an alternate circulation system and large-scale vortex in the alongshore direction. The circulation system includes the rip currents around the wave node points, the onshore current around the wave anti-node points, and the longshore feeder currents from the anti-node to the wave node points.

**Key words:** rip currents; intersecting wave; irregular wave; circulation characteristics; nodes

裂流是由近岸海岸波浪破碎形成的强而窄的离岸水流<sup>[1-2]</sup>, 它对近岸水体交换、泥沙运输、浮游生物迁移以及海岸安全都有重要影响<sup>[3-4]</sup>。根据裂流形成的主导控制因素分为地形控制裂流和水动力控制裂流<sup>[5]</sup>。开展随机波浪交叉波浪作用下的裂流实验, 对于研究海岸裂流的致灾机理及风险评估具有重要意义<sup>[6]</sup>。

由于受海底沿岸地形不均匀<sup>[7]</sup>、海岸构筑物反射<sup>[8-10]</sup>和短峰波<sup>[11]</sup>等的影响, 近岸波浪在沿岸方向出现流体质量汇聚, 从而使波高和波浪增减水在沿岸方向不均匀分布<sup>[12]</sup>, 这是产生裂流的主要原因。目前针对裂流的研究主要集中在开槽沙坝地形。Haller等<sup>[7]</sup>开展了双沟槽沙坝地形的实验室研究, 明晰了裂流槽和近岸处存在两个环流系统及其驱动力。Drønen等<sup>[13]</sup>和房克照等<sup>[14]</sup>对单沟槽沙坝海岸

收稿日期: 2020-10-30

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC1407700); 国家自然科学基金(51779022); 中央高校基本科研业务费专项资金(3132019024)

第一作者: 王彦(1982—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为海岸水动力学。E-mail: ywang0412@163.com

通信作者: 房克照(1980—), 男, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为海岸水动力学。

E-mail: kfang@dlut.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

上波生裂流进行了实验研究,分别比较不同波高对于裂流强度及整个流场形态的影响,并对最大离岸流速与波高的关系进行了分析。但针对波浪场沿岸不一致所形成的裂流研究较少。Dalrymple<sup>[9]</sup>进行1:5陡坡平直海岸模型丁坝反射波生成裂流实验,发现等波幅和等频率但入射角相反的两波列叠加在沿岸方向上产生驻波,表明交叉波浪会引起沿岸方向波高变化从而产生裂流,但并没有进行定量的速度测量。Shin等<sup>[15]</sup>在韩国Haeundae海滩利用闭路电视监控系统图像技术观测到交叉叠加波浪场。Hur等<sup>[16]</sup>进行了有排水渠和有沟槽防波堤时的裂流实验和数值模拟研究。王彦等<sup>[10,17]</sup>实验研究了1:40坡有槽沙坝和平直沙坝海岸规则波叠加波浪形成的平均裂流特征。

现有的裂流实验研究主要关注规则波和有槽沙坝情况,而缺乏对随机波浪情况下裂流特征的研究。本文研究了斜向入射的随机波浪在丁坝反射叠加产生的交叉波浪作用情况下的裂流特征,实验地形为1:40坡度沙坝海岸,通过对叠加波浪节腹点位置浪高测量、沿岸布置的声学多普勒流速仪(ADV)定点

测量和浮子示踪测量结果来分析波浪特征和裂流分布。

## 1 实验布置

### 1.1 实验地形

实验在大连理工大学海岸及近海工程国家重点实验室多功能水池中进行,水池长55.0 m,宽34.0 m,深0.7 m,其中一端为推板式多向不规则波造波机。1:40坡度沙坝模型与造波机成30°角。沙坝剖面采用高斯型,其中心距离静水线5.0 m,宽2.0 m,坝顶水深0.045 m。在距离上游海岸模型边缘16.0 m的垂直岸线处砌筑一道丁坝。因为实验中的波浪场和速度场测量都是以丁坝为参照物,故本文坐标原点取丁坝与静水线交点,离岸方向为 $x$ 正向,丁坝指向上游方向为 $y$ 正向。入射波和丁坝反射形成的反射波叠加所形成叠加波浪区域如图1a中阴影区所示,叠加后的波浪为垂直向岸传播的驻波,其在沿岸方向形成若干个腹点与节点,节腹点位置如表1所示。

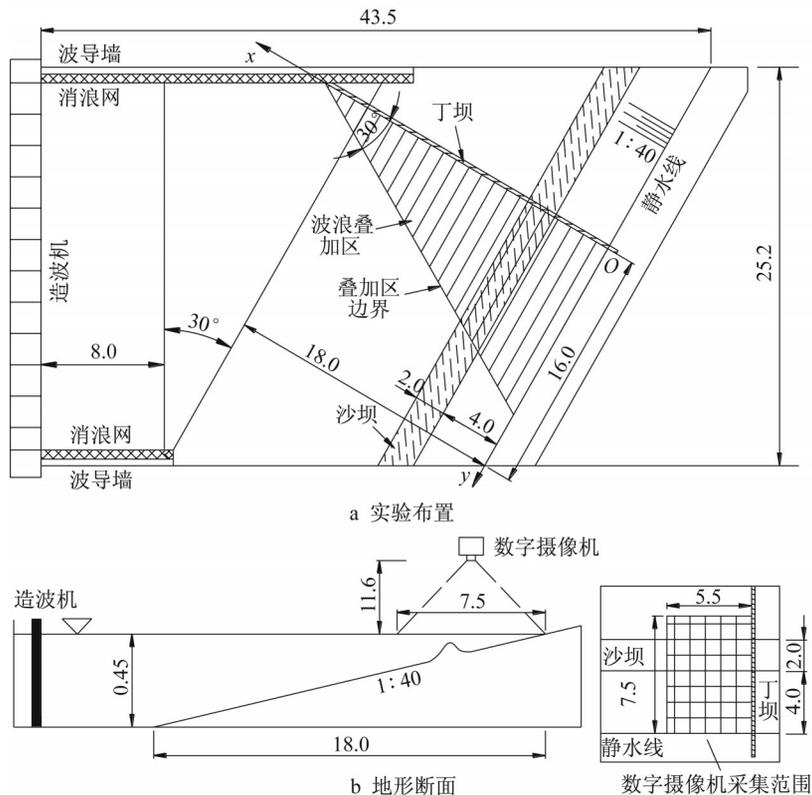


图1 裂流实验布置和地形断面图(单位:m)

Fig. 1 Experimental set up (unit:m)

### 1.2 测量方法

本文研究对象为随机波浪,采用JONSWAP谱

(谱峰因子取3.3)。实验中波浪场布置3列垂直岸线浪高仪,第1列固定放置在距离丁坝9.0 m处,其

表1 实验波况  
Tab. 1 Test conditions

波况	波高/cm	周期/s	节点位置/m			腹点位置/m	
			1	2	3	2	3
1	3.97	1.0	0.75	2.25	3.74	1.50	2.98
2	2.48	1.5	1.41	4.14	6.87	2.73	5.46
3	4.17	1.5	1.41	4.14	6.87	2.73	5.46
4	5.91	1.5	1.41	4.14	6.87	2.73	5.46
5	9.02	1.5	1.41	4.14	6.87	2.73	5.46
6	3.75	2.0	1.94	5.82	9.70	3.88	7.76

注:表中波高为波浪叠加区外深水波高,取均方根值;节点、腹点位置为距丁坝距离。

余2列根据不同波况对应周期分别布置在表1给出的节腹点位置(按照平底处水深迭代计算所得的节腹点位置),如图2所示。从图2可以看出,y=9.0 m剖面在沙坝外侧区域没有发生波浪叠加,可作为反射区波浪叠加效果的参考。流场测量采用声学多普

勒流速仪(ADV)和浮子示踪两种测量方法。29个ADV的数据采集采用无线连接方式,流速仪测量点位置在水深1/3处,用来测量流速沿水深的平均值。由于ADV的数量有限,需重复多次测量才能更好地获得速度场情况。浮子示踪技术是通过在流场表面投放能够随水流浮动的浮子来显示流速分布,并通过数字摄像机(CCD)采集指定区域内流场表面的粒子随水流的运动情况。CCD测量范围为7.5 m×5.5 m,对应的坐标采集范围是0~7.5 m,0~5.5 m。浮子测量方法可以得到大范围流场的详细平面流动,结合仪器定点测量方法可以更好地分析环流特征。因为节腹点位置与周期有关,仅仅对表1中波况1、3和6进行了浮子示踪测量,采集频率为10帧·s<sup>-1</sup>,采集帧数为9 000帧。

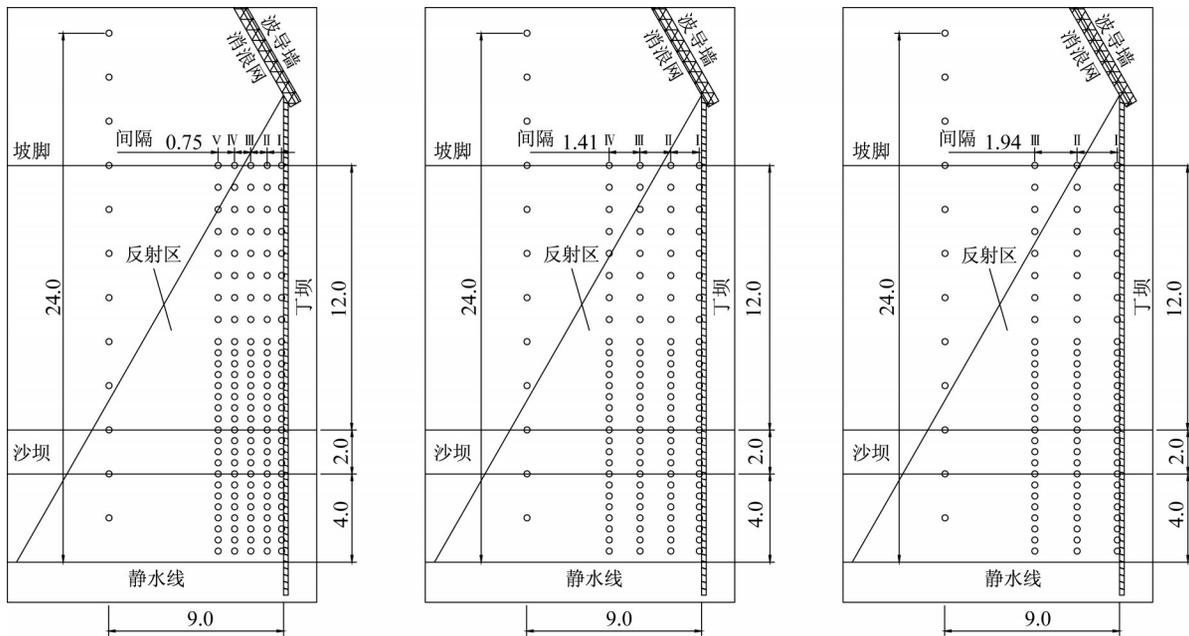


图2 浪高仪布置图(单位:m)  
Fig. 2 Layout of wave gauge (unit:m)

## 2 波浪场特征和驱动力

### 2.1 波浪场特征

本文研究了沙坝地形在实验波浪场环境下所形成的流动系统的特征。因为这一特征是由入射波浪遇丁坝反射所形成的叠加波浪场形成,所以这一流动受叠加波浪场的波高分布影响。其特征是在沿岸方向形成驻波,驻波在沿岸方向有等间距的节腹点分布,从而使沿岸方向波高呈周期性变化。由图3a、3c、3e给出的3个不同周期波况(波况1、3和6)的沙

坝外侧的波高分布可以看出波高与节腹点的对应关系,即在腹点位置波高大,在节点位置波高小。因为波浪增减水依赖于波高,波高越大增减水绝对值越大,所以在沿岸方向波高的周期性变化也使得波浪增减水周期性变化,即在腹点位置波浪减水大,在节点位置波浪减水小。

本文选用沿岸一致沙坝海岸来讨论地形沿岸均匀情况下的沙坝对叠加波浪场的影响。波浪在沙坝离岸区域开始发生破碎,直至沙坝峰附近发生强烈破碎,这可由图3a沙坝峰附近和沙坝离岸侧波高衰

减斜率体现。以波况1腹点2为例,沙坝位置(5.0~6.0 m)衰减斜率为0.043,破碎点位置(7.0~8.0 m)衰减斜率为0.012。这是由于沙坝顶水深足够小(4.5 cm)使得节腹点处的波浪发生强烈破碎,破碎波高主要受沙坝峰附近小水深控制(破碎波高 $H_b = \text{破碎指标} \gamma_b \times \text{破碎点水深} h_b$ )。由于节腹点波高不同,破碎位置不同,腹点处大部分波浪在沙坝外侧( $x = 6.0$  m)破碎,节点处波浪在沙坝顶( $x = 5.0$  m)破碎,这表明整个波浪场的波浪破碎主要集中在沙坝附近。这也使得波浪增减水出现增水的位置不同:腹点处先于节点出现增水。从图3可以看出,在 $x \leq 5.0$  m区域腹点位置的波高和波浪增减水都高

于节点位置,这可能是由波流相互作用使得波浪提前破碎引起的。从图3的波高和波浪增减水分布可以看出,在 $x \leq 5.0$  m区域,由腹点指向节点的波高和波浪增减水沿岸降低。图3还表明,对于离岸破碎带外的各节腹点波高存在较大差别,而对于沙坝向岸侧的波高则相差不大,如图3a、3c、3e所示,在沙坝顶处( $x = 5.0$  m)节腹点的波高相近。这是由于沙坝在各节腹点具有相同的水深,迫使具有较大波高的腹点位置波浪产生更大的能量耗散。沙坝向岸侧的波能与节点位置处相差不大,也表明近岸沙坝具有调解近岸波浪场的作用。

为了说明随机波浪叠加波浪场与规则波情况的

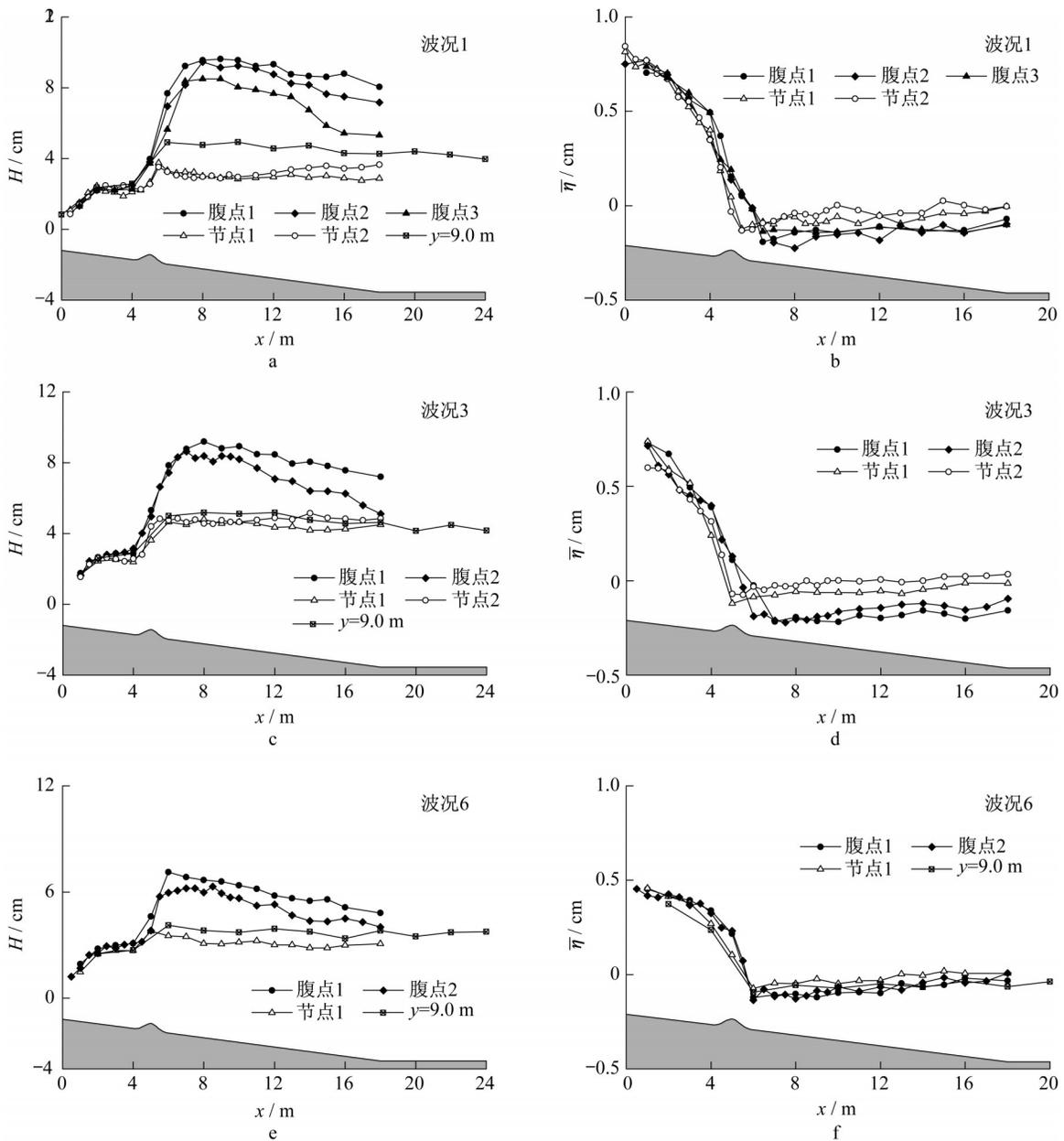


图3 节腹点波高 $H$ 和增减水 $\bar{\eta}$ 分布图

Fig. 3 Wave heights and set up for nodes and antinodes

差别,图4给出了波况3和与其相同周期、相近波高的规则波(波高3.9 cm,周期1.5 s)情况下波浪场的图片对比。从图4可以看出,两种波浪类型的叠加波浪场都由许多个菱形组成,菱形的顶点是沿岸驻波的腹点,菱形边的中点是驻波的节点。由于规则波情况下入射波浪波高不发生实时变化,入射波和反射波叠加波高都保持一致,从而叠加波浪场形成稳定的菱形形态,节腹点清晰易见。不规则波入射波高是实时变化的,同一节腹点位置处叠加的入射波与反射波的波高并不一致,这就就会出现节腹点位置的波高是变化的,因此叠加波浪场的菱形形态不如规则波情况明显,菱形边线也不规则。叠加波浪场的节腹点位置只依赖于波浪周期,不规则波的节腹点位置与规则波情况一致。

2.2 驱动力

波高和波面沿岸周期性变化将在相邻节腹点间产生沿岸静压力差和沿岸辐射应力差。由沿岸方向动量方程可知,沿岸补偿流的驱动力 $F_y$ 是波面静压力差 $F_y^{(1)}$ 和辐射应力差 $F_y^{(2)}$ 之和,即

$$F_y = F_y^{(1)} + F_y^{(2)} = \rho g (h + \bar{\eta}) \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial y} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} = \rho g (h + \bar{\eta}) \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial y} + \frac{1}{4} \rho g H \frac{kh}{\sinh(2kh)} \frac{\partial H}{\partial y} \quad (1)$$

式中: $\rho$ 为海水密度; $g$ 为重力加速度; $h$ 为静水水深; $\bar{\eta}$ 为增减水; $H$ 为波高; $S_{yy}$ 为辐射应力; $k$ 为波数。

为了给出式(1)沿岸补偿流驱动力的实验结果,图5分别给出了波况2(周期1.0 s)和波况3(周期1.5 s)沿岸方向波面静压力梯度 $\rho g (h + \bar{\eta}) \partial \bar{\eta} / \partial y$ (用 $F_y^{(1)}$ 表示)、辐射应力梯度 $\partial S_{yy} / \partial y$ (用 $F_y^{(2)}$ 表示)及其二者之和沿岸方向的变化。图5给出 $x=4.0$ 、 $5.0$ 、 $6.0$  m 3个沿岸断面的波浪驱动力的沿岸梯度。计

算过程是先将各断面波高和波面的沿岸方向实验数据进行三次样条拟合得到沿岸的连续数据,再对数据进行沿岸梯度运算。从图5可以看出,静压力梯度(图5中虚线)和辐射应力梯度(图5中点划线)曲线沿着峰值垂线都存在不对称性,与文献[17]对比,后者不对称性更明显。这是因为随机波浪波况包含入射波幅较多,入射波和反射波的波高不一致,使得波高变化呈现不对称性。在破碎带内,沙坝凹槽处( $x=4.0$  m)和沙坝顶( $x=5.0$  m)的波面沿岸静压力梯度 $F_y^{(1)}$ 和辐射应力梯度 $F_y^{(2)}$ 方向是一致的,都产生由高波高腹点区域指向低波高节点区域的驱动力,是形成离岸裂流的主要动力来源。其波面沿岸压力梯度明显大于波高引起的辐射应力沿岸梯度,在沙坝凹槽处( $x=4.0$  m)总驱动力与波面静压力梯度接近(二者最大比值可达9);沙坝顶仍是波面静压力梯度占主导,只是占比略有降低。沿岸总驱动力的数值与周期相关,大周期1.5 s(波况3)的沿岸驱动力是周期1.0 s(波况1)的3倍,因此大周期波况的裂流沿岸宽度更大,见图6。大周期1.5 s(波况3)在沙坝凹槽处的驱动力与沙坝顶处相差不大,而周期1.0 s(波况1)凹槽处的沿岸驱动力约为沙坝顶处的1/2,这表明大周期波况向岸侧驱动力范围更广,这使得大周期波况形成的裂流垂向尺度更大。而在破碎带外沙坝边缘处( $x=6.0$  m)波面沿岸静压力差和辐射应力沿岸梯度方向则是相反的,二者之和可部分相互抵消,总驱动力的数值与沙坝凹槽处接近。综上所述,单纯叠加波浪场生成的裂流主要受波浪沿岸不均匀的影响,产生裂流的驱动力主要是波面沿岸静压力梯度 $F_y^{(1)}$ ,沿岸辐射应力 $S_{yy}$ 产生的压力梯度量值相对较小,处于次要地位,其沿岸变化可能是由于波流相互作用导致的沿岸波高微小变化所引起

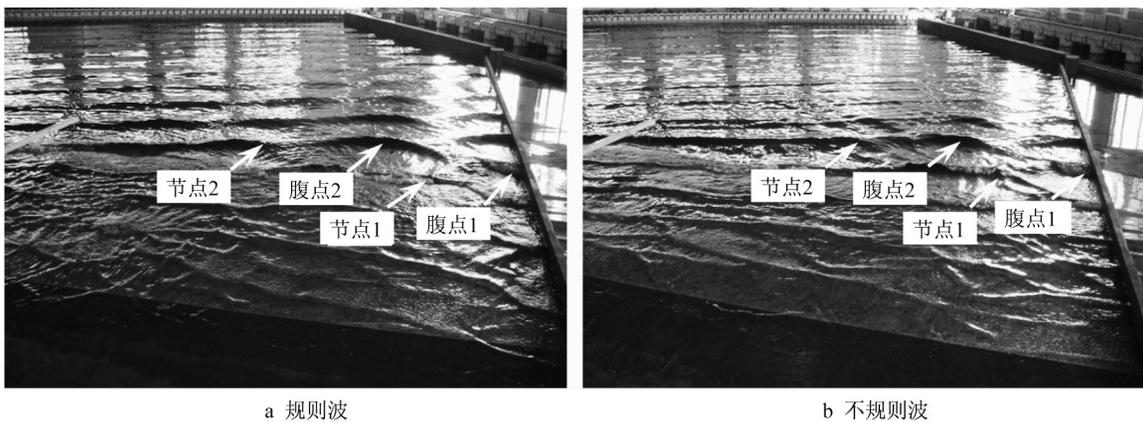


图4 规则波和不规则波波浪场对比  
Fig. 4 Comparison of wave fields

(地形沿岸变化均匀,不引起波高沿岸变化)。大周期波况可形成更大的裂流宽度(沿岸方向)和裂流长度(垂直岸方向)。

### 3 裂流流场特征

裂流流场特征是通过分析不同波高和周期波况的流速分布得到的。图6给出了垂直岸线3个测量断面( $x=4.0, 5.0, 6.0$  m)上布置的声学多普勒流速仪(ADV)测得的垂直岸线流速 $u$ 沿岸方向的速度剖面,图6a是相同周期不同波高情况的对比,图6b是

相近波高不同周期情况的对比。

裂流位置完全受叠加波浪节点位置控制,当波浪周期变化导致节点变化时裂流位置也发生改变,这与裂流沟槽存在时裂流还受裂流位置控制不同。从图6a可以看出,周期为1.5 s不同波高波况在节点1附近都有裂流出现,沙坝顶( $x=5.0$  m)裂流出现中心位置完全受叠加波浪节点位置控制,而在上下游( $x=4.0, 6.0$  m)裂流中心位置会出现左右摆动现象,这说明沙坝顶( $x=5.0$  m)位于裂流颈,下游( $x=6.0$  m)位于裂流颈和裂流头之间,裂流中心向左偏离节点位置。沿岸方向的裂流宽度、沙坝顶

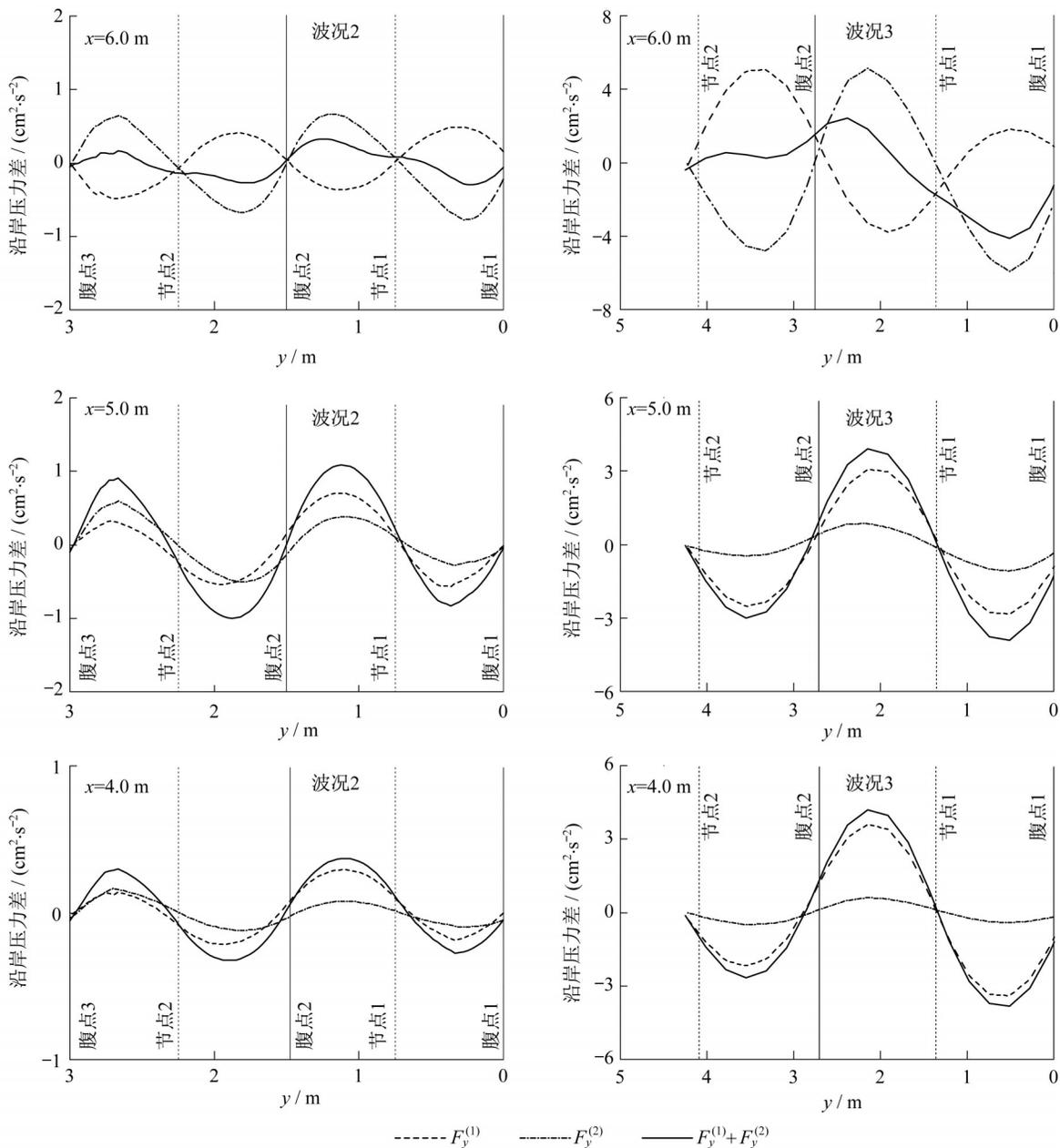


图5 沿岸压力梯度

Fig. 5 Comparison of longshore pressure gradients

( $x=5.0\text{ m}$ )位置节点1处沙坝顶裂流归一化宽度(裂流宽度/沿岸驻波波长)分别为0.56、0.58、0.63和0.54,随机波浪情况下裂流宽度大于规则波情况,这是因为随机波浪入射波和反射波实时变化,使得裂流剖面扁平,宽度略大。随着波高增大,在下游( $x=6.0\text{ m}$ )裂流宽度略有变大,这是由不规则波大波高波况包含入射波幅较多致使破碎位置差异较大造成的。节点1和节点2处产生的离岸裂流流速 $u$ 的速度峰值位置变化很小,而裂流的最大值变大,节点1处沙坝顶的裂流归一化最大值( $V_{\max}/\sqrt{gD_c}$ ,  $V_{\max}$ 为裂流最大值,  $D_c$ 为沙坝顶水深)分别为0.13、0.27、0.32和0.39。综上可知,裂流颈的裂流宽度大致等于相邻节腹点之间的距离,但随着波高不同该距离有所偏离。裂流最大值位于沙坝峰处,因为该处水深最小。

不同周期情况如图6b所示,沙坝顶裂流最大值位置分别为0.73、1.21和1.78 m,裂流归一化最大值分别为0.23、0.27和0.23,归一化宽度分别为0.55、0.46和0.47。由此可以看出,裂流的位置受

波浪节腹点控制,而叠加波浪的节腹点位置是受波浪周期影响。随着周期的增大,沿岸方向的驻波波长增大,节腹点距丁坝的距离也变大,相应的离岸裂流最大值位置距丁坝位置也随之增大,裂流的宽度也随周期的增大而变大,裂流强度变化不大。离岸的其他流速剖面( $x=4.0、6.0\text{ m}$ )存在相同规律。

### 4 环流特征

裂流的环流特征主要通过浮子示踪测量结果给出,其速度场为水体表面流速,在沿岸沙坝附近的裂流区域大致体现为环流系统。图7给出浮子轨迹线和流速涡量图,图7中竖向虚线、实线分别表示理论节、腹点线。

在沙坝附近区域( $x>3.0\text{ m}$ ),由于叠加波浪场在沿岸方向上周期变化会形成向岸流和离岸流的周期性变化,从而在沿岸方向形成交替的环流系统,该交替环流系统对应于交替出现的波腹点和波节点对。环流系统包括围绕波节点的离岸裂流、围绕波腹点的向岸流和由波腹点向波节点汇聚的沿岸方向

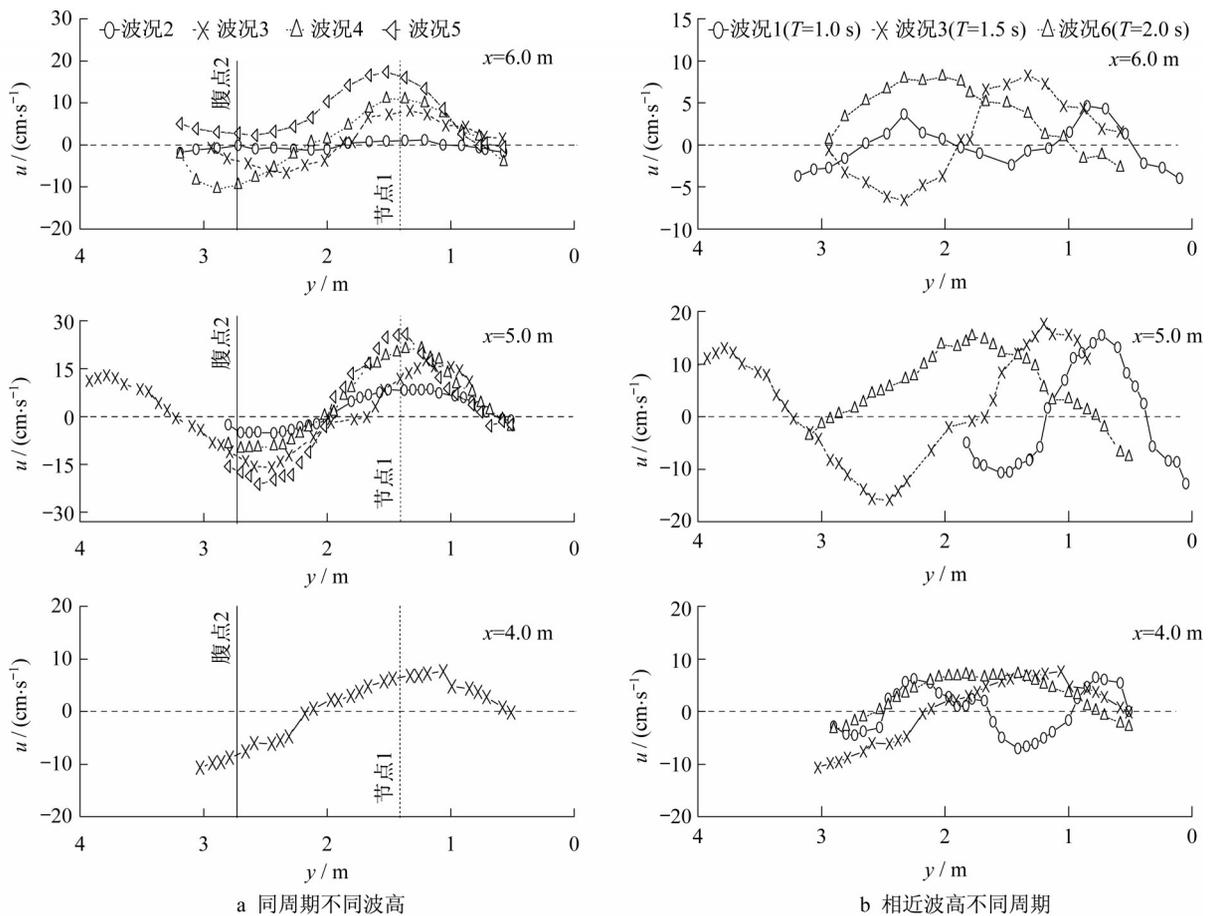


图6 垂直岸线流速 $u$ 速度剖面分布

Fig. 6 Velocity distribution for different wave heights and different wave periods

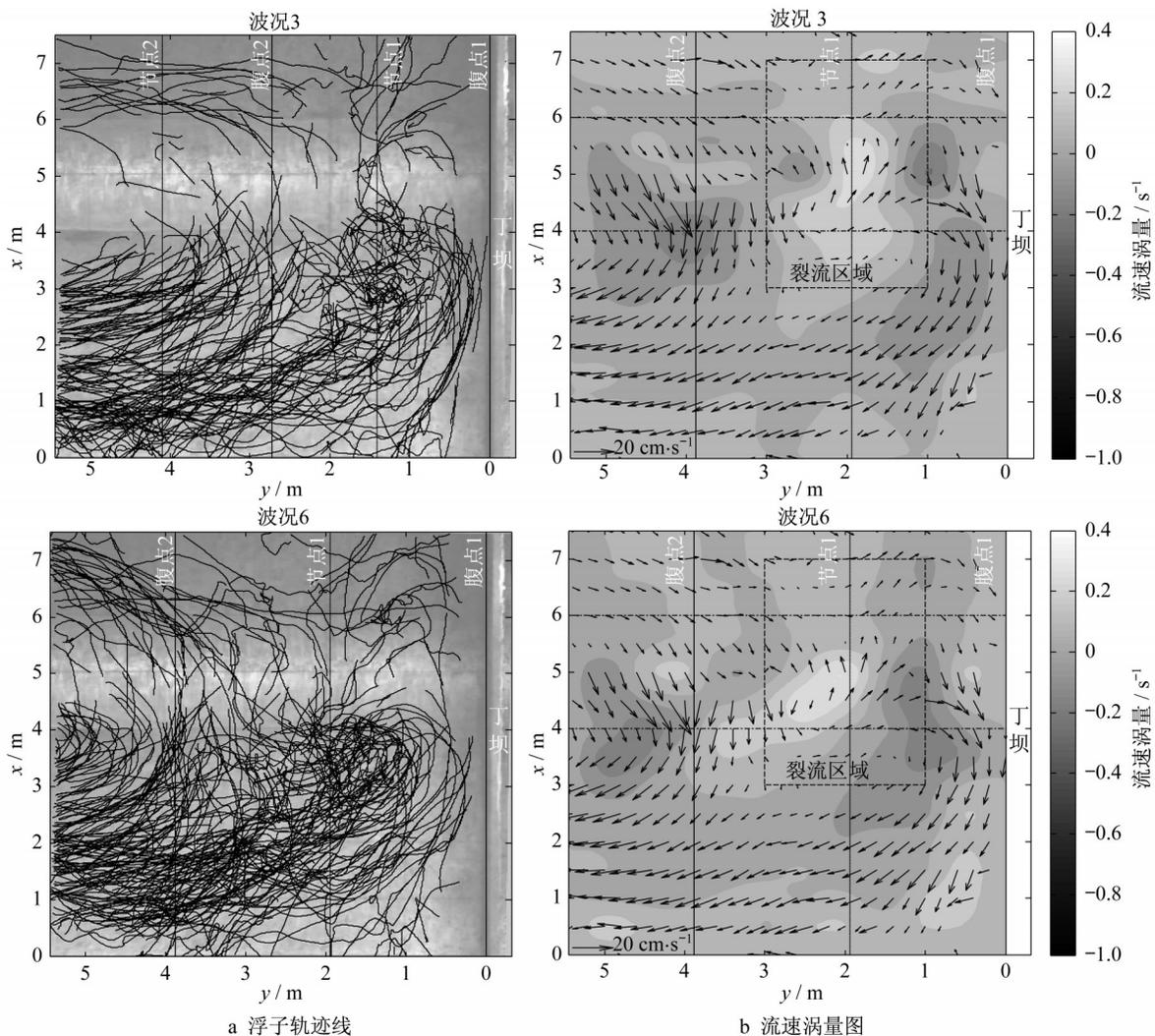


图7 浮子轨迹线和流速涡量图

Fig. 7 Drifter tracks and vortex intensity

的补偿流。伴随裂流出现了位于裂流颈两侧的一对反向大尺度涡,涡中心位置接近沙坝峰,沿岸方向位于节腹点之间并稍偏向于节点。从图7a的浮子轨迹线可以看出,在节点处穿越沙坝的浮子数量并不多,这是因为节点处沙坝顶水深较浅,离岸运动的浮子受到波浪破碎产生的水滚影响而不容易跨越沙坝离岸运动。在腹点处同时产生集中的向岸质量输移流。在向岸区域( $x < 3.0$  m),表面流速以向岸为主,这是因为沿岸节腹点波高相差不大(相当于沿岸一致波浪正向入射),垂直岸线方向的速度分量表现为海底回流(undertow),水体表面主要是向岸的斯托克斯质量输移流。

从图7可以看出,两波况都形成了跨越沙坝的环流系统和涡。波浪破碎点位置决定了环流中心位置,不同周期情况下节腹点处的波浪都在沙坝顶强烈破碎,从而使得海岸环流都集中在沙坝上,流速最

大值都发生在裂流最大值位置(沙坝顶)附近。而环流系统在沿岸方向的中心位置距丁坝的距离随周期增大而增大,从而增加了环流系统沿岸方向的宽度,所形成的涡在沿岸方向尺度也变大。这是因为向岸输移流和裂流的位置受节腹点控制,而叠加波浪的节腹点位置是受波浪周期控制。

## 5 结论

实验研究了随机波浪丁坝反射波产生的裂流特征。通过考虑沿岸均匀一致的沙坝海岸从而排除了沿岸地形不一致的影响,裂流主要受波浪沿岸变化不均匀的影响。叠加波浪场产生的流场具有以下特征:

(1) 裂流的驱动力是沿岸静压力差和沿岸辐射应力差的合力。叠加波浪场生成裂流的主要驱动力

是平均水面沿岸静压力梯度,而沿岸辐射应力产生的压力梯度处于次要地位,仅为前者的1/9左右。大周期情况更容易形成较大的沿岸驱动力,从而形成较大的裂流区域。

(2)与规则波相比,随机波浪叠加生成裂流的速度剖面较为扁平,裂流宽度略大于相邻节腹点之间的距离,但随波高不同该距离有所偏离。裂流长度小于规则波情况,且随着周期增大,长度也有所增大。裂流的沿岸位置完全受波浪节点控制,当波浪周期变化导致节点变化时裂流位置也发生改变。垂直岸方向裂流最大值位于沙坝顶。

(3)叠加波浪场形成了交替出现的环流系统,该交替环流系统对应于交替出现的波腹点和波节点对。环流系统包括围绕波节点的离岸裂流、围绕波腹点的向岸流和由波腹点向波节点汇聚的沿岸方向的补偿流。伴随裂流出现了位于裂流颈两侧的一对反向大尺度涡,涡中心位置接近沙坝峰,沿岸方向位于节腹点之间并稍偏向于节点。

#### 作者贡献说明:

王彦:负责论文技术路线、逻辑结构、数据分析与解释,对论文进行了重要的修改。

邹志利:负责实验方案的提出和总体把控。

张振伟:负责实验过程的数据采集。

刘忠波:负责论文思路的把控和核准,对论文进行了重要的修改。

房克照:负责论文思路的把控和核准,对论文进行了重要的修改。

#### 参考文献:

- [1] 张尧,刘强,刘旭楠,等.韵律沙坝触发的裂流动态性研究[J].浙江大学学报(工学版),2020,54(9):1849.  
ZHANG Yao, LIU Qiang, LIU Xunan, *et al.* Variability of rip currents induced by rhythmic sandbars[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2020, 54(9): 1849.
- [2] WANG Yan, ZOU Zhili. An experimental and numerical study of bimodal velocity profile of longshore currents over mild-slope barred beaches[J]. Ocean Engineering, 2015, 106: 415.
- [3] 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.  
WANG Yan, ZOU Zhili. Progress and prospect of rip currents[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 36(5): 170.
- [4] FUJIMURA A G, RENIERS A J H M, PARIS C B, *et al.* Mechanisms of cross-shore transport and spatial variability of phytoplankton on a rip-channeled beach[J]. Frontiers in Marine Science, 2018, 5: 183.
- [5] CASTELLE B, SCOTT T, BRANDER R W, *et al.* Rip current types, circulation and hazard [J]. Earth-Science Reviews, 2016, 163: 1.
- [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.  
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.
- [7] HALLER M C, DALRYMPLE R A, SVENDSEN I A. Experimental study of nearshore dynamics on a barred beach with rip channels[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2002, 107(C6), 14-1.
- [8] SCOTT T, AUSTIN M, MASSELINK G, *et al.* Dynamics of rip currents associated with groynes field measurements, modelling and implications for beach safety [J]. Coastal Engineering, 2016, 107: 53.
- [9] DALRYMPLE R A. A Mechanism for rip current generation on an open coast[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans and Atmospheres. 1975, 80(24): 3485.
- [10] 王彦,张振伟,邹志利,等.有槽沙坝海岸交叉波浪作用下裂流特征[J].水科学进展,2019,30(5):760.  
WANG Yan, ZHANG Zhenwei, ZOU Zhili, *et al.* Rip currents by intersecting wave on barred beach with rip channel [J]. Advances in Water Science, 2019, 30(5): 760.
- [11] MOULTON M, ELGAR S, RAUBENHEIMER B, *et al.* Rip currents and alongshore flows in single channels dredged in the surf zone [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2017, 122(5), 3799.
- [12] KIRBY J T, DERAKHTI M. Short-crested wave breaking[J]. European Journal of Mechanics-B/Fluids, 2019, 73: 100.
- [13] DRØNEN N, KARUNARATHNA H, FREDSOE J, *et al.* An experimental study of rip channel flow [J]. Coastal Engineering, 2002, 45(3/4): 223.
- [14] 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):127.  
FANG Kezhao, YIN Jiwei, ZOU Zhili. Experiment study on rip current on barred beach with a single channel [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics A, 2013, 28(3): 127.
- [15] SHIN C H, NOH H K, YOON S B, *et al.* Understanding of rip current generation mechanism at Haeundae Beach of Korea: honeycomb waves [J]. Journal of Coastal Research, 2014, 72 (SI): 11.
- [16] HUR D S, LEE W D, CHO W C, *et al.* Rip current reduction at the open inlet between double submerged breakwaters by installing a drainage channel [J]. Ocean Engineering, 2019, 193: 106580.
- [17] 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.  
WANG Yan, ZOU Zouli. Experimental study of rip currents by intersecting wave on barred beach [J]. Advances in Water Science, 2015, 26(1): 123.