



援萨尔瓦多拉利伯塔德码头 损坏成因分析

周 剑¹, 李培良², 谭 凤¹, 胡家顺¹

(1. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007; 2. 浙江大学 海洋学院, 浙江 舟山 316021)

摘要:“巨涌”是萨尔瓦多拉利伯塔德码头损坏的主要原因。采用 NOAA 全球再分析波浪资料, 分析工程海域大浪特征。结果表明, 每年有 2 场超级大浪, 类似“海啸型”巨涌, 来自南太平洋(澳大利亚东侧)、南大洋海域, 沿最大圆路径跨洋传播, 到达萨尔瓦多需要 12~20 d; 大浪传入浅水区后, 因地形折射效应波向转为 S 向, 经过浅水效应, 波高急剧增大直至破碎。根据长周期涌浪传播特性, 可提前进行大浪预警, 进而指导施工作业和码头运营。

关键词:长周期涌浪; 最大圆路径; 巨涌; 波能流密度

中图分类号: U 656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)10-0229-07

Causes of damage at La Libertad Pier in El Salvador

ZHOU Jian¹, LI Pei-liang², TAN Feng¹, HU Jia-shun¹

(1.CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;

2.Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China)

Abstract:“Huge swell” is the main cause of damage to La Libertad Pier in El Salvador. We use the NOAA global reanalysis wave data to analyze the characteristics of high waves in the project sea area. The results show that there are two super high waves every year, similar to “tsunami-like” swell, which come from the South Pacific(east of Australia) and the South Ocean, propagate across the ocean along the great circle path, and reach El Salvador for about 12 to 20 days. When the high wave propagates into the shallow water area, wave directions change to S direction due to the terrain refraction effect and wave heights increase sharply due to the shallow water effect until it is broken. According to the propagation characteristics of long-period swell, the high wave warning can be carried out in advance to guide the construction and wharf operation.

Keywords: long-period swell; great circle path; huge swell; wave power density

1 工程概况

拉利伯塔德码头位于萨尔瓦多拉利伯塔德省南部, 始建于 1968 年, 是当地著名的渔码头和冲浪胜地, 使用频率非常高。因老码头损坏, 应萨方要求新建码头和观景平台, 打造具有特色的标志性建筑和文化旅游圣地。2019 年 12 月中交水运

规划设计院有限公司对本工程进行现场考察及走访, 获得以下关键信息: 1) 老码头所在区域是当地有名的冲浪海域。现场可以看到波浪以“卷破波”为主, 见图 1a)。2) 老码头每年遭受几场大浪影响。波浪似“海啸型”巨涌见图 1b), 近岸壅水严重, 见图 1c)。3) 码头后方为卵石岸滩,

收稿日期: 2021-06-08

作者简介: 周剑(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事海岸动力及港口工程水文研究。

见图2。据了解,卵石为波浪从海底冲刷上来。

4)老码头毁坏过多次,码头面板、吊机及其操作室损坏严重,2015-05-03 大浪后码头损坏情况见图3。



a) 卷破波(常规海况)



b) “海啸型”巨涌(极端海况)



c) 近岸壅水(极端海况)

图1 工程水域典型波浪特征



图2 工程区卵石岸滩



图3 码头损坏现状

2 码头损坏原因分析

根据现场调研情况判断,导致老码头损坏主要有以下原因:1)老码头高程过低,导致大浪直接拍打在面板、吊机等设施上;2)每年遭遇多场大浪“巨涌”。

新码头和观景平台建设须考虑上述2个原因,第1条可以通过工程措施,提高高程,减少上水;但第2条“巨涌”客观存在,很难规避,须了解其传播特性,如“巨涌”形成原因、从哪来、发生频次、是否可以预警(指导渔船作业和施工作业,减少风险)?为指导后续工程建设,有必要针对波浪进行分析,论证波浪传播特性。

3 外海深水波浪分析

3.1 工程外海深水波浪特征

采用美国国家海洋和大气管理局 NOAA 发布的 WAVEWATCH III 后报再分析波浪数据集,选取萨尔瓦多外海(10.5°N,92°W)进行波浪特征分析。数据时间范围为2000年1月—2018年12月,时间间隔3h,波浪参数为有效波高、谱峰周期及波向。

工程外海波浪以长周期涌浪为主,周期主要分布在12~18s,约占全年的82.13%;主波向为SSW~SW,约占全年的76.98%;波高主要分布在1.0~2.5m,约占全年的94.88%,3m以上约占0.86%。波浪特征见表1和2。

表 1 萨尔瓦多外海波高波向联合分布

波向	波高占比/%								合计/%
	≤1.0 m	1.0~1.5 m	1.5~2.0 m	2.0~2.5 m	2.5~3.0 m	3.0~3.5 m	3.5~4.0 m	>4.0 m	
N	0	0.01	0.14	0.17	0.06	0.02	0	0	0.39
NNE	0	0.00	0.15	0.17	0.07	0.02	0	0	0.41
NE	0	0.02	0.26	0.30	0.18	0.07	0.02	0	0.85
ENE	0	0.03	0.44	0.67	0.39	0.11	0.04	0	1.68
E	0	0.20	1.20	1.18	0.30	0.04	0	0	2.92
ESE	0	0.07	0.15	0.02	0.01	0	0	0	0.24
SE	0	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0	0	0.07
SSE	0	0.15	0.16	0	0.00	0	0	0	0.31
S	0.01	0.74	1.65	0.51	0.10	0.00	0	0	3.02
SSW	0.09	12.53	26.20	7.86	1.33	0.23	0.03	0	48.27
SW	0.24	11.18	13.31	3.41	0.50	0.06	0.01	0	28.72
WSW	0.06	1.58	1.48	0.39	0.09	0.01	0.01	0	3.62
W	0.02	0.93	1.06	0.28	0.09	0.03	0.01	0	2.41
WNW	0.05	1.47	2.04	0.63	0.11	0.02	0	0	4.34
NW	0	0.10	0.52	0.51	0.28	0.04	0.01	0.01	1.47
NNW	0	0.02	0.39	0.53	0.27	0.07	0.00	0	1.28
合计	0.47	29.08	49.16	16.64	3.78	0.73	0.12	0.01	100.00

表 2 萨尔瓦多外海波高周期联合分布

周期/s	波高占比/%								合计/%
	≤1 m	1.0~1.5 m	1.5~2.0 m	2.0~2.5 m	2.5~3.0 m	3.0~3.5 m	3.5~4.0 m	>4.0 m	
≤7	0.001 8	0.353 0	1.091 5	0.446 7	0.091 9	0.012 6	0	0	1.997
<7~8	0	0.284 6	1.988 5	1.667 9	0.500 7	0.104 5	0.012 6	0	4.559
<8~9	0	0.077 4	0.670 0	0.949 2	0.556 6	0.160 3	0.048 6	0.005 4	2.468
<9~10	0.010 8	0.131 5	0.351 2	0.592 6	0.228 7	0.057 6	0.014 4	0.003 6	1.390
<10~11	0.014 4	0.261 2	0.273 8	0.203 5	0.270 2	0.061 2	0.005 4	0	1.090
<11~12	0.055 8	1.464 3	1.095 1	0.156 7	0.095 5	0.039 6	0.003 6	0.001 8	2.912
<12~13	0.151 3	4.135 4	3.811 2	0.594 4	0.010 8	0.003 6	0	0.003 6	8.710
<13~14	0.091 9	6.938 0	8.620 3	1.966 9	0.163 9	0.016 2	0	0	17.800
<14~15	0.072 0	6.237 4	11.53 10	3.434 8	0.479 1	0.036 0	0.005 4	0	21.800
<15~16	0.046 8	4.283 1	9.164 3	2.831 4	0.543 9	0.063 0	0.010 8	0	16.940
<16~17	0.014 4	2.674 7	5.774 5	1.912 8	0.371 0	0.082 9	0.007 2	0	10.840
<17~18	0.001 8	1.349 1	3.150 2	1.219 4	0.266 6	0.054 0	0.009 0	0	6.050
<18~19	0.007 2	0.426 9	0.886 2	0.376 4	0.095 5	0.021 6	0.003 6	0	1.817
<19~20	0.005 4	0.295 4	0.457 5	0.180 1	0.057 6	0.010 8	0	0	1.007
<20~21	0	0.133 3	0.216 1	0.082 9	0.037 8	0.001 8	0	0	0.472
<21~22	0	0.030 6	0.059 4	0.027 0	0.014 4	0	0	0	0.131
>22	0	0.007 2	0.014 4	0	0	0	0	0	0.022
合计	0.473 7	29.083 0	49.155 0	16.643 0	3.784 2	0.725 9	0.120 7	0.014 4	100.000

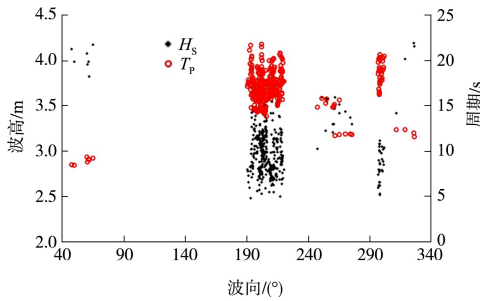
为了更好地评估外海大浪发生的频次和持续时间,采用波能流密度^[1] $P = \frac{\rho g^2}{64\pi} T_p H_s^2$ (其中 T_p 为谱峰周期, H_s 为有效波高) 进行统计分析。2000—2018 年期间共发生 37 场大浪 (波能流密度 $P > 62$ kW/m,

持续时间 12 h 以上), 年均 2 场, 其中主要发生在 5—10 月, 见表 3。图 4 为表 3 大浪对应的波高、周期、波向联合分布, 可以看出大浪来向集中在 SSW—SW, 周期在 14 s 以上, 波高在 2.5 m 以上。

表3 2000—2018年工程外海大浪所发生的月份及数量

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	合计	年均
数量/场	3	1	1	1	5	7	6	4	4	4	0	1	37	2

注：波能流密度 62 kW/m(大浪判断标准)近似等于 $H_s = 3.0\text{ m}$ 、 $T_p = 14\text{ s}$ 的计算结果。



注：大浪判断标准为：波能流密度 $P \geq 62\text{ kW/m}$ ，持续时间 12 h 以上。

图4 波高-波向-周期联合分布

3.2 大浪抵达萨尔瓦多外海时间

工程海域以长周期涌浪为主，从萨尔瓦多的地理位置来看，影响工程位置的涌浪来向为 $170^\circ \sim 290^\circ$ (图5中虚线)， $155^\circ \sim 170^\circ$ (秘鲁—智利) 海域涌浪通过绕射、折射等效应也可能影响工程位置。本文称方位角 $170^\circ \sim 290^\circ$ 为“涌浪窗口”，用于分析影响萨尔瓦多涌浪来向。上文外海主波向 SSW—SW 佐证了该窗口的合理性。而深水涌浪沿着最大圆路径传播^[2]，因此可初步判断影响萨尔瓦多涌浪来自南太平洋 (澳大利亚东侧)、南大洋海域。

为了更好地评估涌浪传到萨尔瓦多的时间，采用一种评估抵达局地波能来源和传播时间的方法 (evaluating the source and travel time of the wave energy reaching a local area, 简称 ESTELA 方法)^[3] 进行计算涌浪传播时间 \bar{T} ，公式如下：

$$\bar{T} = \frac{L}{\sum_{i=1}^N (F_i C_i) / \sum_{i=1}^N F_i} \quad (1)$$

$$F_i = E_i e^{-\mu_i L_i} C_i \quad (2)$$

$$C_i = \frac{g T_i}{4\pi} \quad (3)$$

$$\mu_i = \frac{2\rho_a}{\rho_w g C_i} \left(\frac{2\pi}{T_i} \right)^{5/2} \sqrt{2\vartheta_a} \quad (4)$$

$$E_i = \frac{\rho g H_i^2}{16} \quad (5)$$

式中： L_i 为与目标点的球面距离； ρ_a 为空气密度； ρ_w 为海水密度； E_i 为波能； μ_i 为耗散系数； H_i 为波高； F_i 为考虑能量耗散的净能量； T_i 为周期； C_i 为群速； ϑ_a 为空气黏度； N 为谱分割下的海况个数。本文取涌浪前 5 个序列，即 $N=5$ 进行计算。

ESTELA 方法的计算结果见图 5。可以看出，南大洋传到萨尔瓦多的时间为 12~20 d，澳大利亚东侧海域传至萨尔瓦多时间为 12~18 d。正是由于长周期涌浪长距离传播特性，可对工程水域做出长达近 10 d 的预警，可有效指导新码头的施工作业以及后期运营。

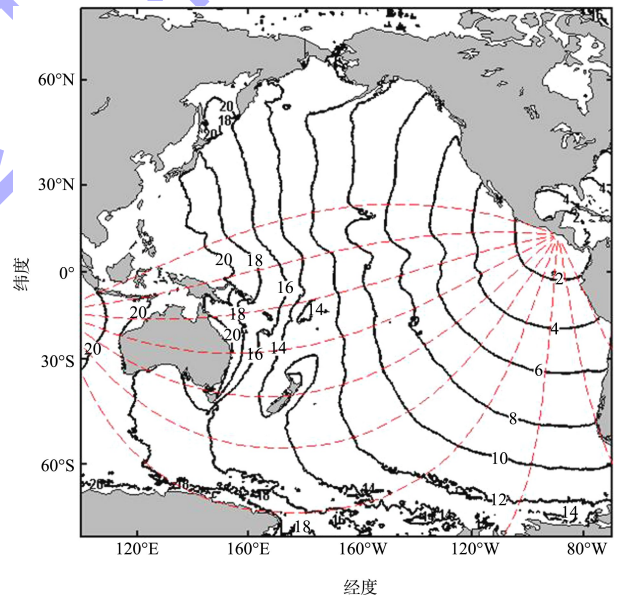


图5 长周期涌浪抵达萨尔瓦多外海传播时间 (单位: d)

3.3 典型大浪示踪分析

选取 2015 年 5 月初大浪对老码头的侵袭进行分析。由图 6 可看出，2015 年 5 月初影响萨尔瓦多外海的大浪的源头生成在澳大利亚西南部南大洋 (印度洋) 海域，并朝东移动，2015-04-24T15:00 在新西兰西南海域有新的风暴生成，并朝东传播，与前期风暴合并形成大的波浪继续东移，并于 2015-04-28 开始北移。图 7 详细地描述了此次大浪的跨洋传播过程，可以看到大浪在 2015-04-22 之

前在南大洋(印度洋)生成, 向东传播, 期间有新的大浪生成, 传播过程不断生消、成长、耗散, 最终脱离风暴形成周期涌浪, 东移先后抵达南美海域, 于 2015-05-03 抵达萨尔瓦多外海。

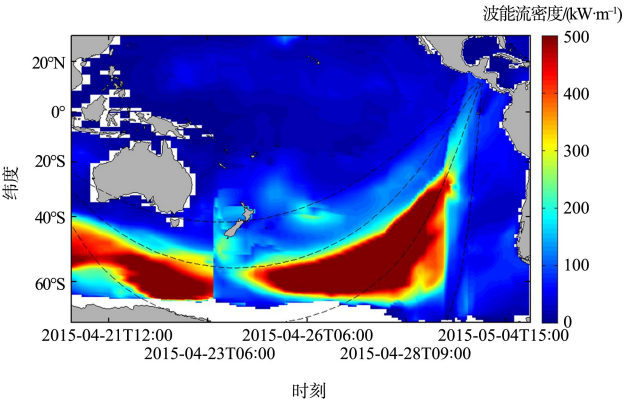
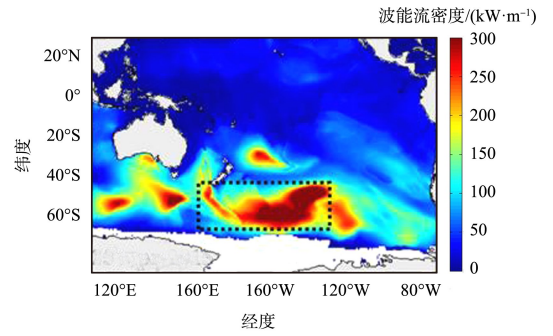
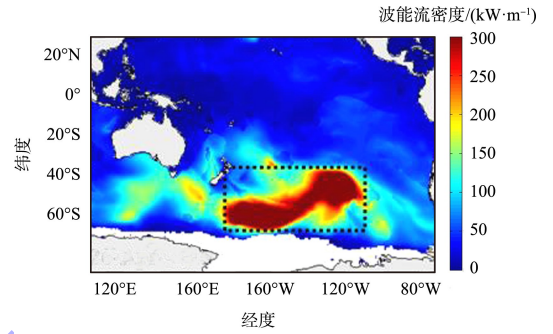


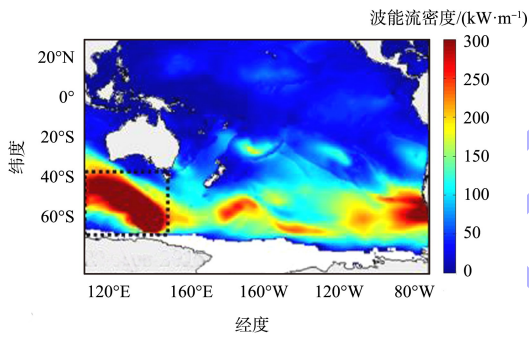
图 6 不同时刻不同位置波能流密度传播



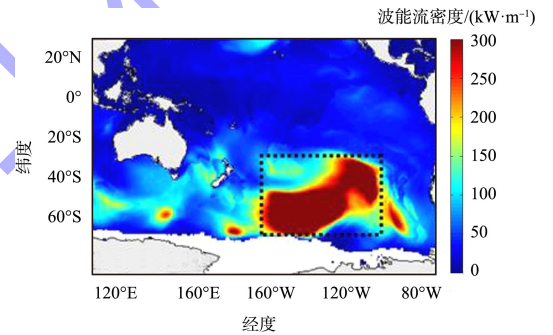
d) 2015-04-25



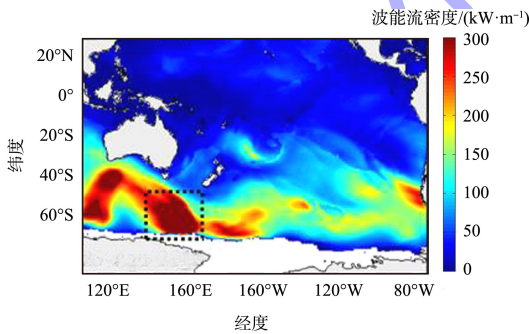
e) 2015-04-26



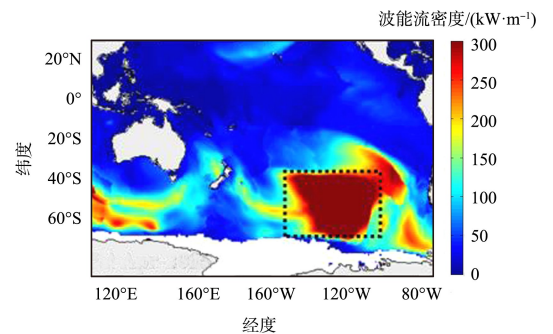
a) 2015-04-22



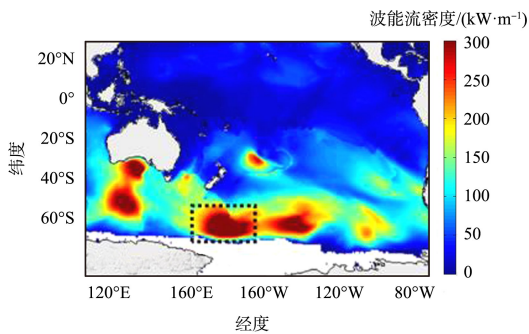
f) 2015-04-27



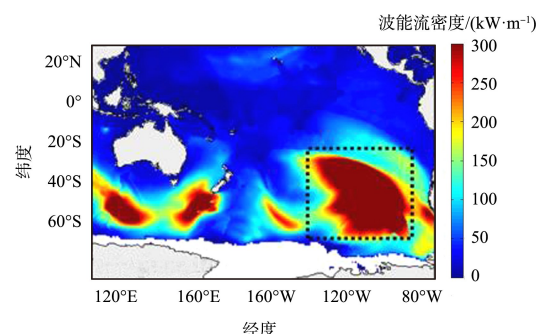
b) 2015-04-23



g) 2015-04-28



c) 2015-04-24



h) 2015-04-29

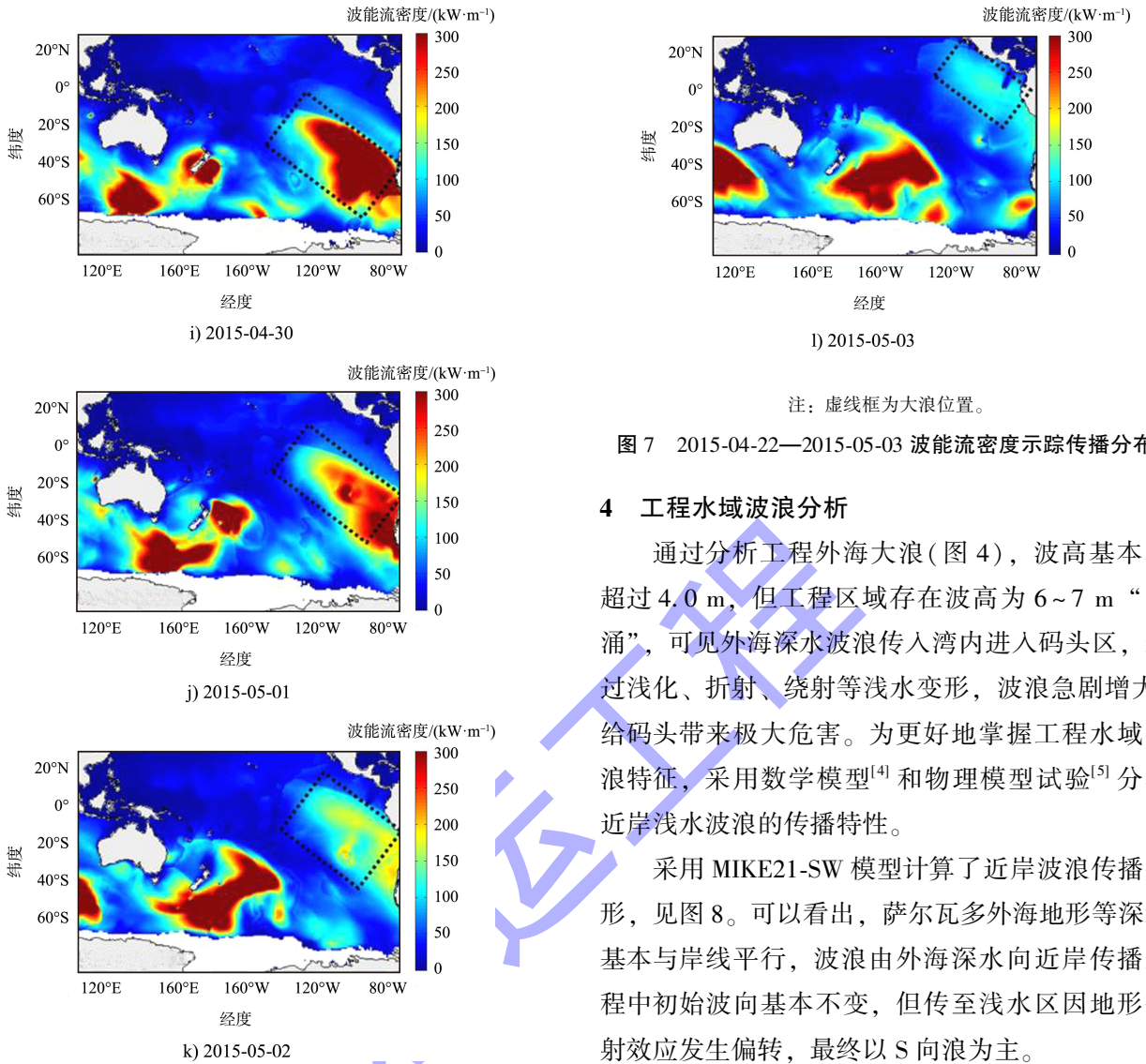


图7 2015-04-22—2015-05-03 波能流密度示踪传播分布

4 工程水域波浪分析

通过分析工程外海大浪(图4)，波高基本不超过4.0 m，但工程区域存在波高为6~7 m“巨涌”，可见外海深水波浪传入湾内进入码头区，经过浅化、折射、绕射等浅水变形，波浪急剧增大，给码头带来极大危害。为更好地掌握工程水域波浪特征，采用数学模型^[4]和物理模型试验^[5]分析近岸浅水波浪的传播特性。

采用 MIKE21-SW 模型计算了近岸波浪传播变形，见图8。可以看出，萨尔瓦多外海地形等深线基本与岸线平行，波浪由外海深水向近岸传播过程中初始波向基本不变，但传至浅水区因地形折射效应发生偏转，最终以S向浪为主。

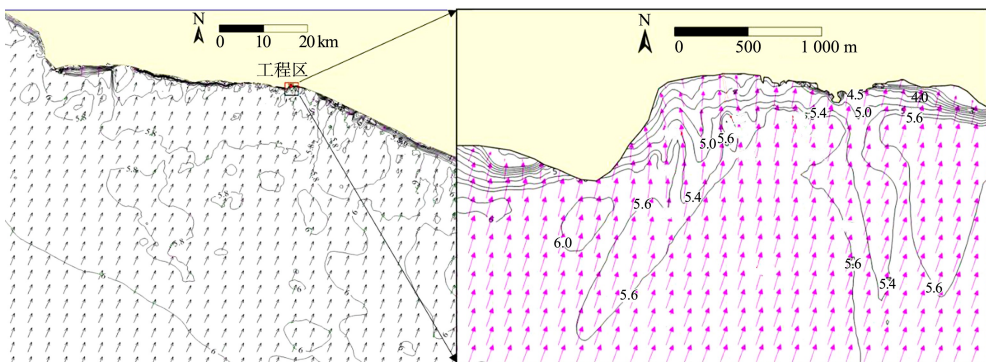
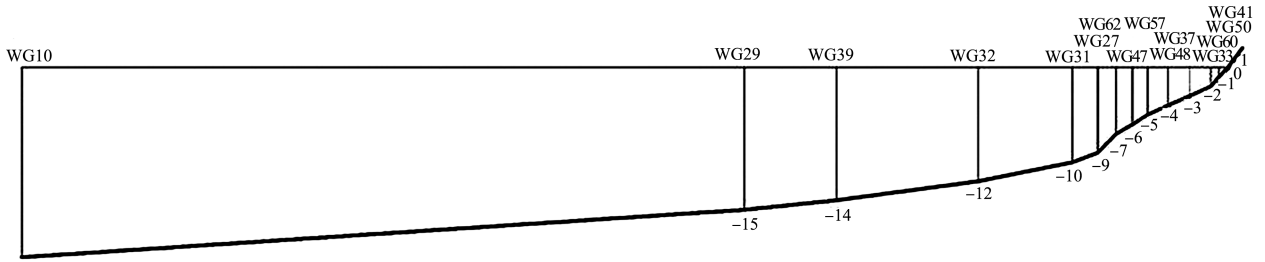


图8 外海SSW向 MIKE21-SW 波浪模拟结果(波高:m)

考虑到工程水域近岸底坡坡度较陡，波浪破碎以卷破为主，工程水域采用波浪断面物理模型试验(图9)确定波浪特征。沿码头轴线的波浪分

布见表4。可以看出，随着水深变浅，波高急剧增大直至破碎，波高最大位于码头前沿附近水域。



注: WG 为浪高仪编号。

图 9 模型试验地形 (单位: m)

表 4 沿程波高值分布

水深/m	$H_{1\%}/m$	$H_{13\%}/m$
-20	6.78	4.66
-15	6.90	4.80
-14	7.56	5.23
-12	7.50	5.15
-10	7.43	5.30
-9	7.59	5.32
-7	8.00	5.90
-6	8.32	6.03
-5	7.65	6.23
-4	7.16	5.44
-3	6.06	4.53
-2	5.81	4.17
-1	4.95	3.26
0	5.17	3.37

注: 以 -15 m 作为率定控制点进行工况模拟(水位 2.65 m、波高 4.63 m、周期 19.16 s); -5 m 水深为码头前沿。

5 结论

1) 老码头损坏的主要原因是长周期涌浪冲击和码头高程过低。

2) 外海大浪“巨涌”来自南大洋、澳新海域, 沿最大圆路径跨洋传播, 到达萨尔瓦多时间为 12~20 d。

3) 外海深水波浪传入浅水区, 因地形折射效应发生偏转, 最终以 S 向浪为主进入湾内。

4) 工程水域经过浅化、折射、绕射等浅水变形, 波浪急剧增大直至破碎。

5) 根据长周期涌浪传播特性, 可提前进行大浪预警, 指导施工作业和码头运营。

参考文献:

[1] PAASCH R, RUEHL K, HOVLAND J, et al. Wave energy: a Pacific perspective [J]. Philosophical transactions of the Royal Society A, 2012, 370: 481-501.

[2] PEREGRINE D H. Swell and its propagation[M]//SCHWARTZ M. Beaches and coastal geology. New York: Springer, 1982: 803.

[3] PÉREZ J, MÉNDEZ F J, MENÉNDEZ M, et al. ESTELA: a method for evaluating the source and travel time of the wave energy reaching a local area[J]. Ocean dynamics, 2014, 64(8): 1181-1191.

[4] 河海大学. 援萨尔瓦多拉利伯塔德码头建设项目波浪数学模型计算研究报告[R]. 南京: 河海大学, 2021.

[5] 河海大学. 援萨尔瓦多拉利伯塔德码头建设项目波浪断面物理模型试验研究报告[R]. 南京: 河海大学, 2021.

(本文编辑 王璁)

(上接第 221 页)

[3] 张娟秀, 叶见曙, 钱培舒, 等. 微弯板的模型试验研究[J]. 公路交通科技, 2006(S1): 37-40.

[4] 陈达, 李莉, 姚鹏飞, 等. 高桩码头拱式纵梁结构[J]. 江南大学学报(自然科学版), 2012, 11(6): 685-689.

[5] 程都. 整浇装配式高桩码头结构设计方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.

[6] 蒋利学, 郑乔文. 竖向荷载作用下整浇梁板的空间效应试验研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(S1): 200-207.

[7] 邓振洲, 周永, 田茂金. 美国 ASCE7-10 规范在高桩码头抗震设计中的应用浅析[J]. 港工技术, 2015, 52(3): 36-41.

(本文编辑 王璁)