

中马友谊桥海域波浪特性数值模拟研究

孙婉静^{1,2,3}, 骆钊^{1,2,3}, 林红星^{1,2,3}

(1. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040; 2. 长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室, 湖北 武汉 430040; 3. 交通运输行业交通基础设施智能制造技术研发中心, 湖北 武汉 430040)

摘要: 中马友谊桥海域波浪以涌浪为主, 但其海浪特性及传播机理尚不明确, 给桥梁防护与运营带来极大困扰。采用波浪模型 Mike21 SW, 以 ERA5 资料作为驱动风场, 对中马友谊桥海域的波浪进行数值模拟获得数据结果, 并对该海域的海浪特性进行溯源分析。结果表明: 受季风洋流驱动的影响, 中马友谊桥海域的波高为 0.45~0.85 m, 7 月和 8 月的波况较差; 波周期多介于 6.0~10.0 s, 其频率占全年的 53.15%, 为显著的中长周期波。马尔代夫海域的涌浪主要来源于印度洋涌浪, 且受其向北传播影响, 因此该海域波向常年呈 E—S 向(东—南向波浪), 桥梁位置受岛屿遮蔽, 常年保持 SE 向。

关键词: 波浪场; 中马友谊桥; 波浪传播; 数值模拟

中图分类号: P731.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2025)02-0030-09

0 引言

“一带一路”倡议致力于通过港口码头等基础设施建设, 打通海上贸易通道, 促进沿线国家的贸易往来和经济合作。中马友谊桥作为该倡议下的重点示范工程, 横跨马累环礁与机场岛之间的加达胡库亚海峡, 是世界上首座在珊瑚礁上建造的大跨径桥梁, 其建设成为“一带一路”的重要支撑和重点考量因素。

中马友谊桥桥址位于南亚, 面临典型的长周期波浪, 海洋环境相对恶劣, 中长周期波对海洋桥梁的防护和安全运营构成严重威胁。Chen 等^[1]利用卫星散射仪和高度计数据源, 开展了通过风速和显著波高观测全球主要涌浪和风浪带的空间和季节模式的可行性研究。Kumar 等^[2]对印度沿岸的波浪进行了统计分析, 总结了波浪要素在北印度洋不同区域随季节变化的规律。高占胜等^[3]利用 WW3 (WAVEWATCH III) 模式对 1957—2002 年南海—北印度洋的海浪资料进行了模拟, 并对当地的有效波

高进行了统计分析。诸多研究表明, 国内外专家学者主要致力于中马友谊桥附近深水海域的波浪特征研究, 对近岸浅海海域的波浪场研究较少。

在研究深远海—近岸海域的波浪传播特性时, 大部分学者选用了数值模拟方法。廖振华等^[4]基于 Mike21 SW 模型对湄洲湾海域进行波浪数值模拟, 获得了工程区的波浪要素及波浪分布特征。齐庆辉等^[5]基于数值模拟复演了台风“达维”作用下连云港海域的风浪生长过程, 为泥沙数学模型提供了准确的波浪动力场。徐福敏等^[6]建立了大西洋几内亚湾沿岸海域的波浪数值模型, 旨在研究该海湾内的海浪特性, 尤其对湾内占主导作用的涌浪要素进行了深入探究。

中马友谊桥海域周边地形多变、岛礁众多、传波机制复杂。由于桥梁附近波浪监测数据时间间隔大、距离远, 因此在工程应用中的误差也相对较大, 所以基于数值模拟进行统计分析是研究波浪特征的有效手段。本文基于 Mike21 SW 模型, 采用欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium-

收稿日期: 2024-01-30。

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFB2603000)。

作者简介: 孙婉静 (1995-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事风暴潮数值模拟、波浪后报及预报相关研究。E-mail: 221248820@qq.com

Range Weather Forecasts)第五代全球气候大气再分析数据集 ERA5 资料作为驱动风场,对中马友谊桥海域的波浪开展数值计算,获得研究区域各桥墩位的逐时波浪数据,开展该海域海浪特性溯源分析,以此掌握该海域波浪分布特性。本研究方法可为其他海域的波浪研究提供合理借鉴。

1 数据与方法

1.1 数据介绍

马尔代夫的中马友谊桥跨越加达胡库亚海峡,路线全长 2.0 km,其中桥梁长度 1.39 km,桥梁结构示意图见图 1。中马友谊桥海域周边珊瑚岛礁纵横分布,地形急剧起伏,加上季风影响,桥位海域呈现水深、流急、波高大、波浪周期长等复杂水文特点,给大桥防护和运营带来较大挑战。

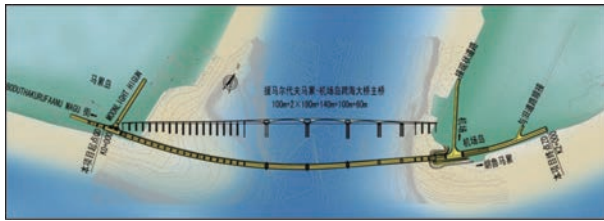


图1 总体布置图

Fig.1 Overall arrangement chart

1.2 方法介绍

本文采用丹麦水力研究所(Danish Hydraulic Institute, DHI)开发的 MIKE21 SW 波浪模型^[7]。该模型采用波作用密度守恒方程,考虑了波浪的折射、绕射、底摩擦、波浪破碎及风能输入等因素对波浪传播的影响,能够很好地开展远海—近岸的波浪数值模拟。模型计算公式为:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}N) = \frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf} \quad (2)$$

式中: t 是时间,单位:s; \vec{v} 是波群在空间的传播速度矢量,单位:m/s; σ 是相对角频率,单位: s^{-1} ; S 是物理现象的源项,单位: $m^2 \cdot s/rad$;式(2)方程右侧的 S_{in} 、 S_{nl} 、 S_{ds} 、 S_{bot} 、 S_{surf} 为产生波浪的各种物理现象。

1.3 模式介绍

针对波浪分布特点,选择模型计算区域时需要

充分考虑原始风场的作用范围,在采用数值模拟方法分析涌浪的产生和传播变形过程中,抛开原始风场而孤立地分析某一地点的波浪特征将会导致计算结果出现较大偏差。当大西洋或南印度洋的涌浪传入北印度洋时,相较于孟加拉湾,阿拉伯海的波浪能受到的影响相对较小^[8]。因此本文在构建北印度洋—中马友谊桥沿岸海域的波浪数值模型时,将研究范围集中在马尔代夫附近海域,在此区域搭建小范围模型,并通过在外围海域添加波浪场的方式驱动模型。本文最终设置的研究范围为 $4.00^{\circ} \sim 4.25^{\circ}N$ 、 $73.40^{\circ} \sim 73.65^{\circ}E$ 。

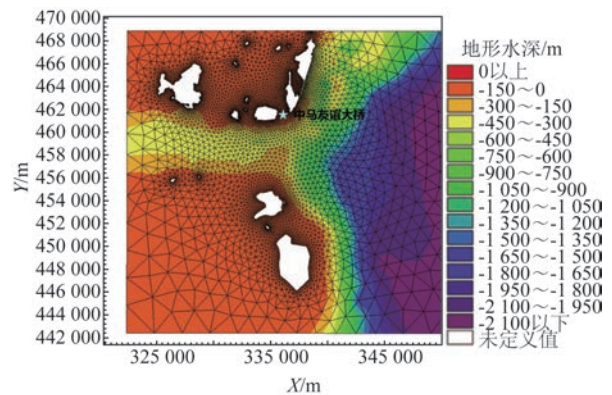


图2 计算区域及局部水深细节图

Fig.2 Detailed view of the calculated area and bathymetry

表1 模型参数设置

Tab.1 Model parameter setting

模型参数	参数设置/数值
波浪方程	全谱公式,非定常公式
谱离散化	频率谱:对数分布,数量 25, $f_{min}=0.055$ 方向谱:360°上升,数量 16
风拖曳力系数	$a=0.8, b=0.065$
白帽耗散	$C_{ds}=4.5, \delta_{ds}=0.5$
波浪破碎	$\Gamma=0.8$
底摩擦	$K_b=0.0004 \text{ m}$

根据逐级加密原则,模型网格在研究区域内分别按照中马友谊桥海域附近 0.08 km、非研究区域的近岸岸边 0.2 km 和外海海域 1.5 km 进行逐层设置,用于细化研究区域并提高模型计算效率。模型计算网格及地形水深见图 2,利用 SMS (Surface Water

Model System)软件生成三角形网格,包含11 152个网格和6 080个节点。水深根据外海(GEBCO 2014)和近岸海域(数字化海图)的数据来源进行插值,采用ERA5风浪场资料驱动模型。风拖曳力系数按Chou等^[9]提出的 $10^3 \times C_d = 0.8 + 0.065 \times U_{10}$ 的关系式设置。此外,在模型外海开边界侧添加波浪场,进一步提高外海风浪对桥梁海域波浪的影响。本文在外海周围均设置了开边界,采用ERA5的历史波浪再分析资料作为边界文件,采用位相平均参数(如有效波高、波峰周期、平均波向以及方向标准偏差 S 等)描述开边界点位的波浪场^[10],其中 S 可利用ERA5再分析资料中的波谱方向宽度 W 转换得到,计算公式见式(3)。其他模型输入与参数设置见表1。

$$W = \frac{\pi}{180} \times S \quad (3)$$

1.4 模型验证

为验证模型的可靠性,首先选用深水海域的波浪数据(ERA5再分析资料)与模型计算出的波浪进行对比,深水验证点位置(4.15°N、73.6°E)见图3所示。从不同波浪要素的验证结果来看(见图4),深水验证点的波浪计算值与ERA5值吻合较好,这是由于该位置水深较大,风场是影响深水海域波浪的关键因素。通过引入平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE)、均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)、相关系数(R),对模型模拟的准确性和合理

性进行定量分析。3种误差参数的计算公式为:

平均绝对误差:

$$E_{MA} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \quad (4)$$

均方根误差:

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (5)$$

相关系数:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

式中: x 、 y 分别为两组变量, \bar{x} 、 \bar{y} 分别为两组变量的平均值; n 为样本数。

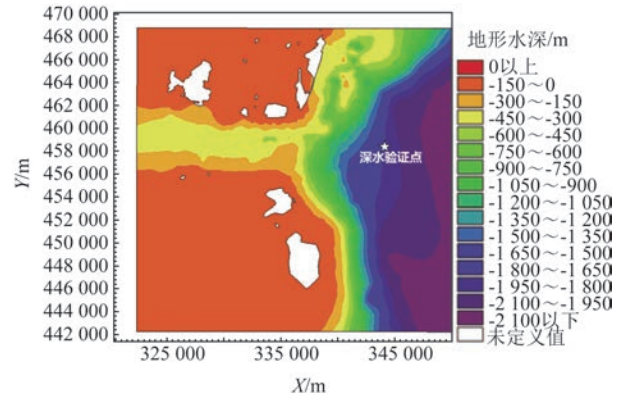


图3 中马友谊大桥海域的深水验证点位置分布

Fig.3 Distribution of deep water validation locations in the China-Malaysia Friendship Bridge sea area

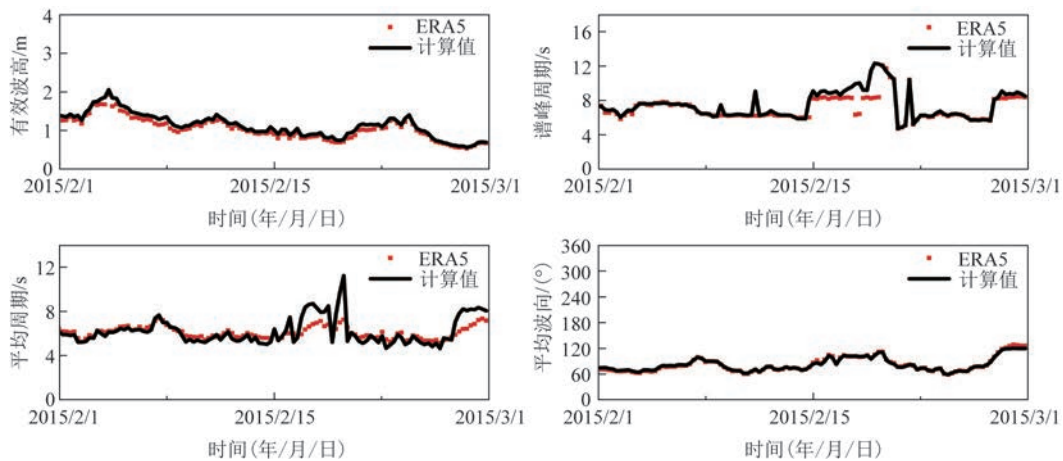


图4 深水海域不同波要素的ERA5数据与后报数据对比

Fig.4 Comparison of the ERA5 data and hindcast data for different wave elements in deep water areas

表2的计算结果显示,搭建的MIKE21 SW波浪模型的模拟结果和ERA5数据的波级和整体变化趋势相同,因此可以认为本模型的验证结果是准确的。

表2 深水海域不同波浪要素的计算值与ERA5数据的对比
Tab.2 Comparison of the calculated values and the ERA5 values for different wave elements in deep water areas

特征	MAE	RMSE	R
有效波高	0.079	0.044	0.993
平均周期	0.085	0.821	0.819
谱峰周期	0.055	0.830	0.862
平均波向	0.021	2.306	0.994

虽然ERA5资料在确定性预测和极端天气预测方面表现优异,但由于其网格点较稀疏,验证点也距离中马友谊桥较远,不能很好地捕捉近岸浅海海域的波浪特性,因此本文利用桥址附近的浮标观测资料与模型计算结果进行对比,进一步验证模型的准确性。浮标位于中马友谊桥21#墩位3 km处,观测数据记录时间为2015年5月、时间间隔为1 h,具体观测点A1(4.17°N、73.53°E)与桥梁位置的分布见图5。基于已搭建的波浪数值模型,计算2015年5—6月中马友谊桥海域的波浪场。

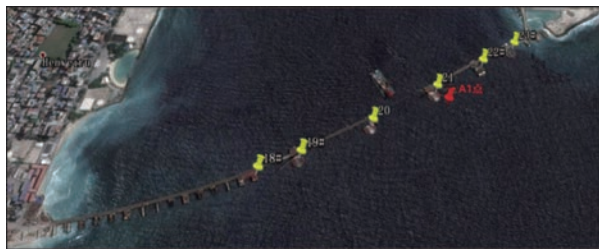
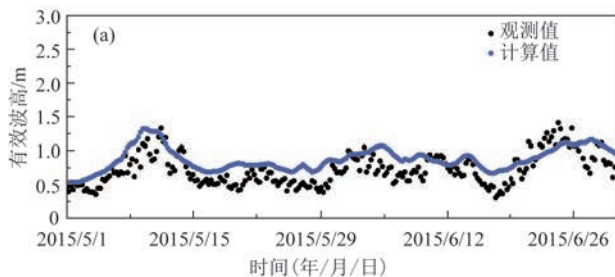


图5 观测点A1和桥梁位置分布图

Fig.5 Distribution of observation point A1 and bridge location



观测数据的有效波高、平均周期与计算结果的对比见表3和图6。经计算可知,2015年5—6月有效波高的月平均绝对误差、均方根误差、相关系数的误差值分别为0.19 m、0.22 m和0.84;平均周期的误差分别为1.15 s、1.41 s和0.61。计算结果与实际监测数据的误差极小,表明构建的波浪数值模型的计算精度很高。总体来说,该模型能够准确模拟马尔代夫及其附近海域的波浪状况,模拟结果可为所在区域提供可靠的数据支撑。

表3 不同波浪要素下观测值与计算结果误差分析

Table 3 Error analyses of observations and calculations for different wave elements

特征	MAE	RMSE	R
有效波高	0.190	0.219	0.844
平均周期	1.151	1.410	0.608

2 波浪特性分析

2.1 波浪特征值分布

基于验证后的波浪模型,对桥梁附近海域2022年的波浪特征进行模拟,并统计该时间段内11个关键墩位的有效波高与平均周期月平均值,结果见图7。

结果显示,15#—18#墩位和24#—26#墩位处的波高显著较大,其中18#墩位的波况最为恶劣,波高约为附近浅水区的1.2倍。这是由于该位置受到地形变化引发的波浪浅水变形和折射影响,工程所在区域的波浪周期大、波长较长,同时海底地形坡度较陡(机场岛一侧坡度约为1:2~1:5),在这种条件下,礁盘边缘处的波浪破碎极限较缓坡大得多,因此在礁盘边缘局部水深较浅的区域(如18#墩位),波高较大。此外,在西侧的主桥桥墩处(如23#、24#

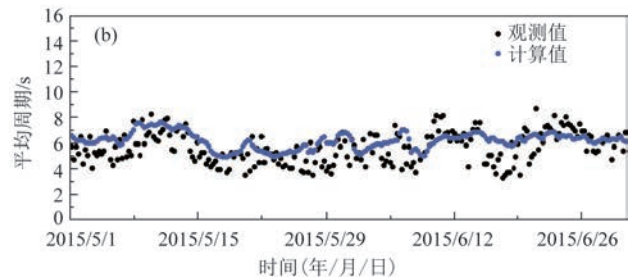


图6 观测数据的有效波高(a)和平均周期(b)与计算结果对比图

Fig.6 Comparison of effective wave height (a) and average period (b) of observation data with the calculation results

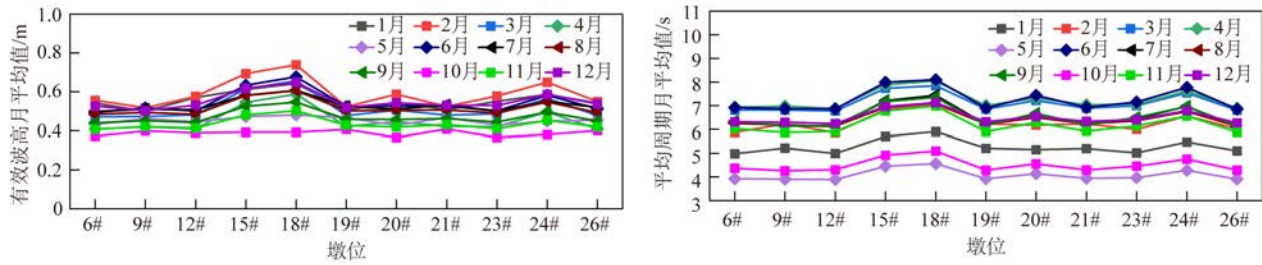


图7 2022年11个墩位的有效波高与平均周期月际分布

Fig.7 Monthly distribution of effective wave height versus mean period at 11 piers in 2022

墩位),由于受到马累岛侧地形反射的影响,波浪也有所增大。

马尔代夫海域的波浪主要受涌浪主导,其具有较规则的外形,波面较平滑,接近于正弦波形状。在传播过程中,涌浪受到空气阻力和海水分子内的摩擦作用较小,能量衰减较慢,规律性较强,因此,周期的月际变化起伏不大。

18#墩位地处海峡入口处的西侧,波浪条件恶劣,具有较好的代表性。因此,本文以中马友谊桥18#主墩为例,统计分析该时间段内的波浪特征值分布。

2.2 波高、周期年内变化特征

对2022年18#墩位附近海域波浪年内变化特征进行统计分析。结果显示(见图8),18#墩位的月平均波高为0.45~0.85 m,月最大波高为0.85~1.22 m,最大值出现在7月,最小值出现在10月。观测期间,波高的最大值多发生在夏秋季。月平均波周期为5.9~8.4 s,月最大波周期为8.9~12.1 s,最大值出现在8月,最小值出现在1月,夏秋季的平均波周期和最大波周期均保持在7 s以上。

总体来看,该地区的波浪月分布具有较为明显的周期性。5—10月,波高和周期均有显著增加,海况相对较差;而11月一次年4月,波高和周期较小,波况相对较好。此外,春冬季的波周期略大于夏秋季。考虑到该区域的洋流受季风影响,印度洋海域在4月和10月为季风转换期(东北季风主要盛行于11月—4月,西南季风则在5—10月),在西南季风期间,降雨较多、风速较大,因此导致该时间段内海况较为恶劣。

2.3 波高与周期联合分布

波高与周期的联合分布研究对海洋工程环境建设与运营具有重要意义。表3和图9展示了18#墩位的波高与周期在各方向上的联合分布。从统计数据来看,马累位于马尔代夫群岛的东南岸,得益于岛链对西南向涌浪的防护,主常浪向为SE向,次常浪向集中在ESE、SSE向,其他方向的波浪出现频率较低,均不超过15%。周期多为6~10 s,占比53.15%,而周期大于10 s的波浪出现频率很少,仅占7.64%。波高均小于1.2 m,波高小于0.9 m的波浪的出现频率占81.95%,其中0.6~0.9 m波高的出

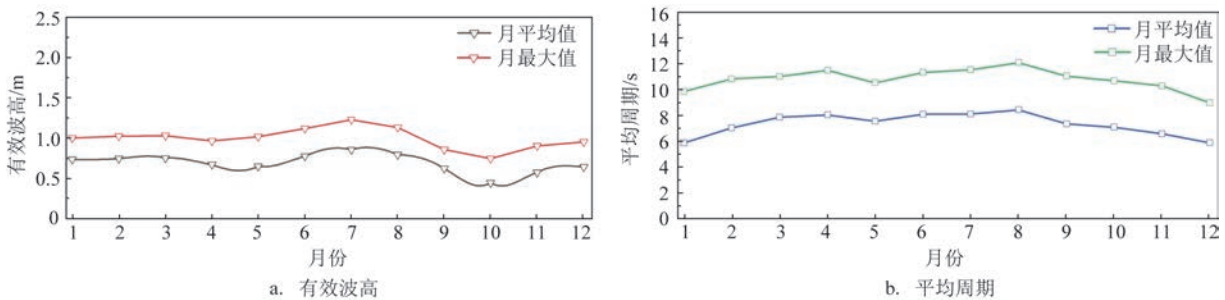


图8 2022年18#主墩波浪年内变化特征

Fig.8 Characteristics of intra-annual variation of waves at main pier 18# in 2022

表3 波高与周期在各方向上的联合分布(单位:%)

Tab. 3 Joint distribution of wave height and period(unit:%)

波高/m	周期/s						总和
	<2	2~4	4~6	6~8	8~10	>10	
0~0.3	—	5.65	1.58	0.58	0.17	0.03	8.01
0.3~0.6	—	12.33	5.10	4.69	3.63	0.52	26.27
0.6~0.9	—	1.40	11.10	8.63	21.99	4.55	47.67
0.9~1.2	—	—	2.05	2.78	10.68	2.54	18.05
>1.2	—	—	—	—	—	—	—
总和	—	19.38	19.83	16.68	36.47	7.62	100

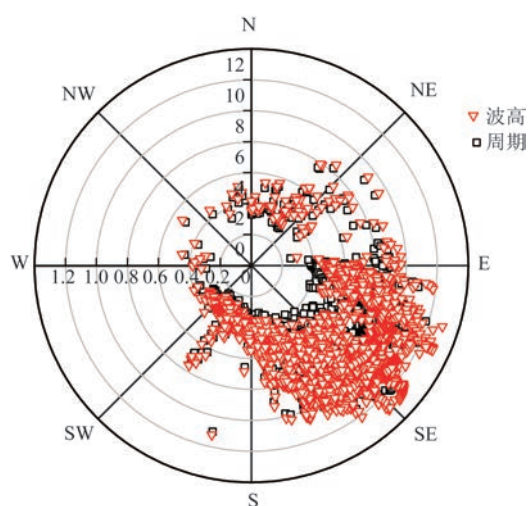


图9 波高与周期联合分布图

Fig.9 Joint distribution of wave heights and periods

现频率最高,其对应的周期基本介于8~10 s。

总体而言,仅有SE方向的波浪能从外海传入近岸区域,并对中马友谊桥海域的波浪产生较大影响,其中,SSE—S方向的波浪是由外海波浪传入后与近岸风浪叠加而形成的,而其他方向的外海波浪对近岸影响较小。

2.4 马尔代夫海域的海浪特征

海浪通常由风浪和涌浪组成,其中在风力直接作用下形成的波浪为“风浪”,当风停止后、或是风速、风向发生剧烈变化时,在影响区域内以及传播至风区以外的波浪,均称为“涌浪”。基于一维和二维海浪谱,可实现风浪、涌浪能量的分离。混合浪、风浪、涌浪波高的关系式为:

$$H_{\text{混合浪}} = \sqrt{H_{\text{风浪}}^2 + H_{\text{涌浪}}^2} \quad (7)$$

式中: $H_{\text{混合浪}}$ 为混合浪波高; $H_{\text{风浪}}$ 为风浪波高; $H_{\text{涌浪}}$ 为涌浪波高。根据式(7)和模型输出的混合浪有效波高、涌浪波高即可算出风浪波高。

经前期分析可知当地波浪主要受季风影响,即夏季盛行西南季风、冬季盛行东北风,因此不同季节下的海浪特性也不同^[11-12]。鉴于此,本文选取2022年最具代表性的两个典型时刻(2022年1月28日00时和2022年7月2日18时,北京时,下同)的海浪作为研究对象,分别对应研究海域风场以及风浪、涌浪和混合浪3类波浪场,旨在深入剖析该海域的海浪特征。

图10的结果显示,2022年1月28日00时,研究海域受东北风场驱动,风浪波高并不显著,仅为0.1 m。这是由于同期南印度洋西风带的涌浪向斯里兰卡海域扩散,分支延伸至马尔代夫附近的阿拉伯海等海域^[13-14]。冬季受东北季风影响,涌浪能量在阿拉伯海向北传播更远、波动更明显。因此,超过90%的波浪受北印度洋东北洋流影响,该海域涌浪的平均波高达0.54 m,波向以NE、E向为主,涌浪占据主导地位。

与东北季风不同,西南风场风速普遍较大。图11的结果显示,2022年7月2日18时,除近岸区域外,马尔代夫海域的风浪波高均在0.4 m以上,且与海面风速分布较为吻合。在风浪和涌浪的“双重叠加”下,马尔代夫海域的混合浪高可超过1 m,近岸区域波高也在0.8 m左右。值得注意的是,马尔代夫海域的海浪依然以涌浪为主。通过对混合浪有效波高最大时刻的涌浪进行溯源分析,发现6月28

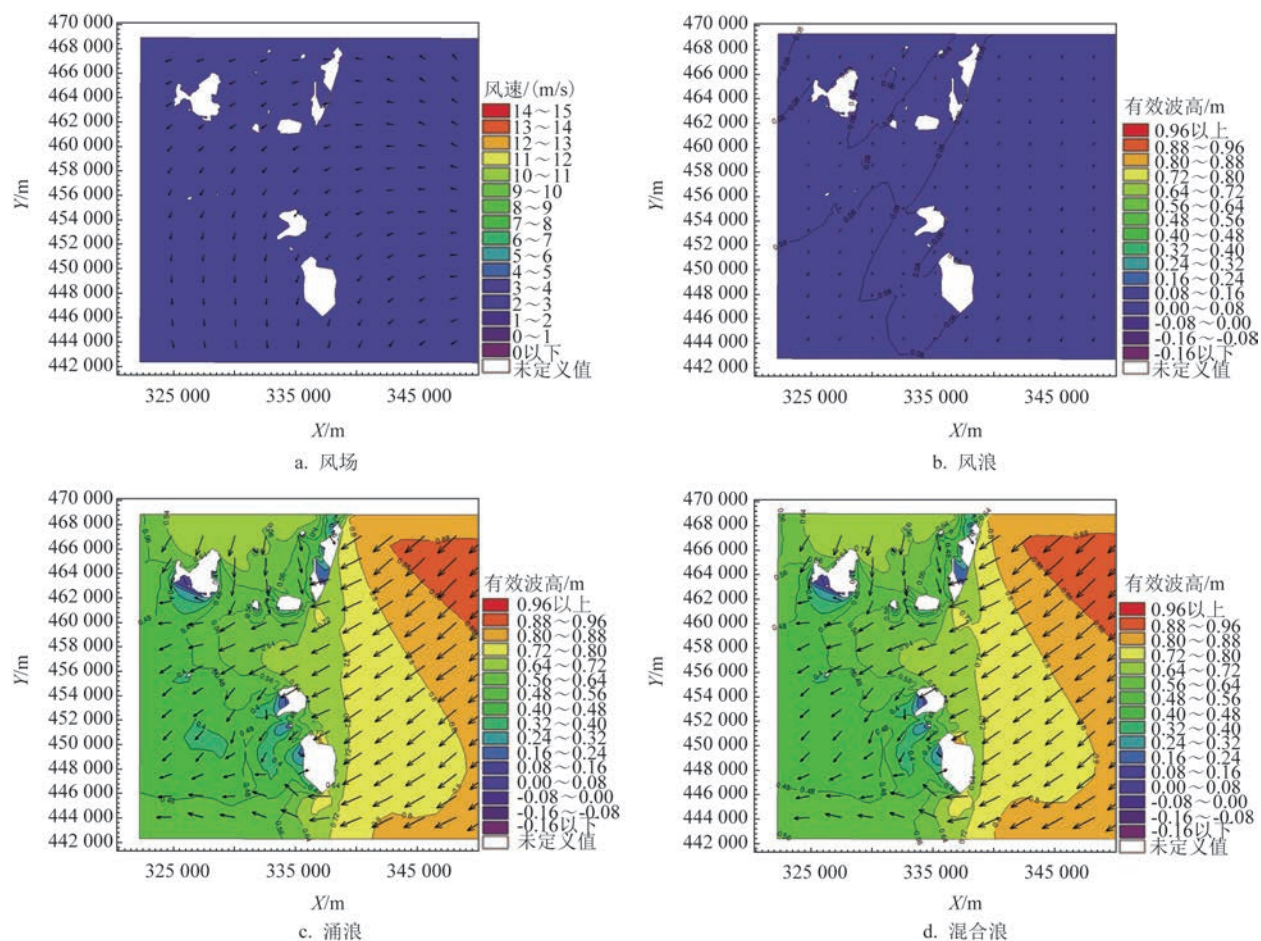


图10 东北季风期研究区域风场与风浪、涌浪和混合浪下的波浪场分布

Fig.10 Distribution of the wind field with wave fields under wind, swell and mixed waves during the north-east monsoon in the research area

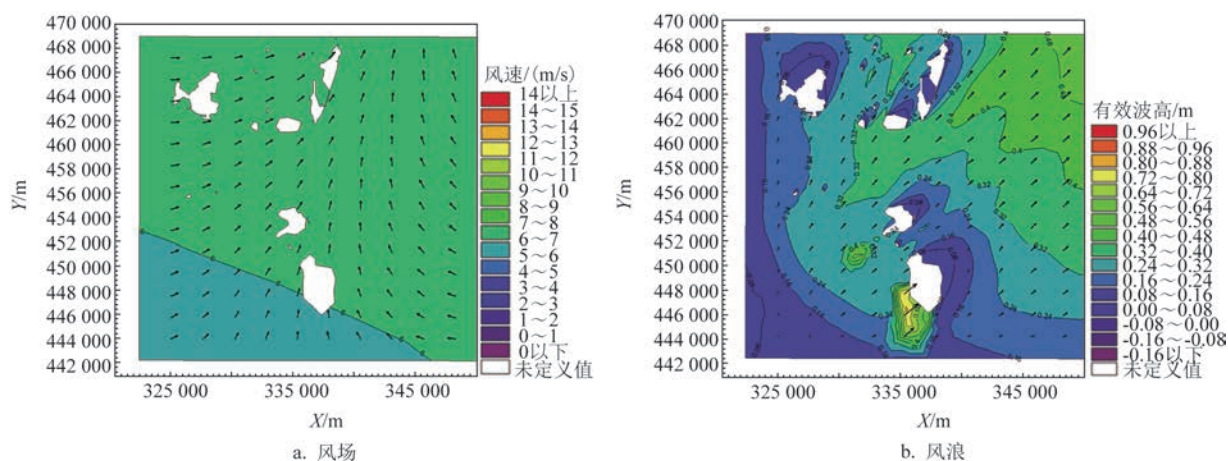


图11 西南季风期马尔代夫风场与风浪、涌浪和混合浪下的波浪场分布

Fig.11 Distribution of the wind field with wave fields under wind, swell and mixed waves during the southwest monsoon in the research area

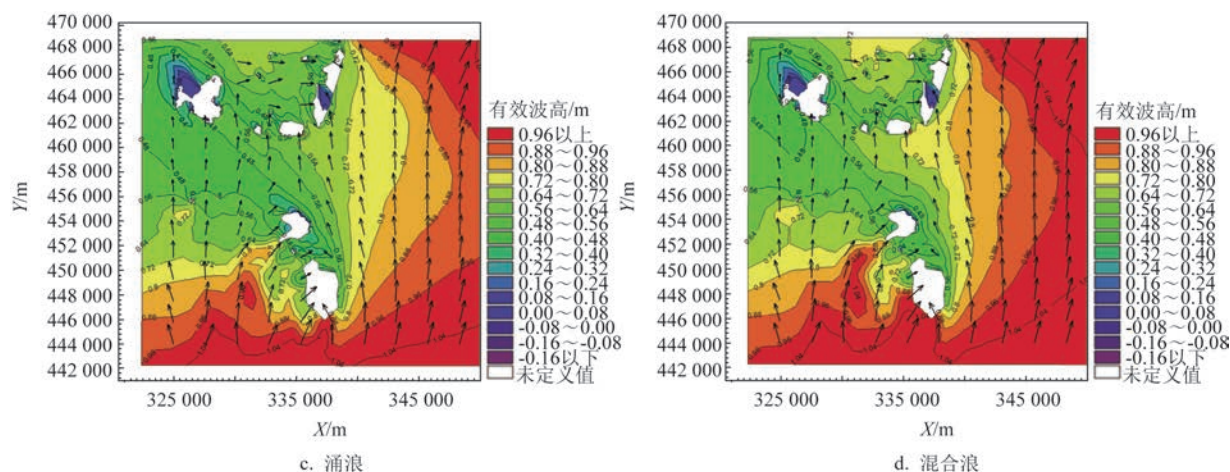


图11 (续)

Fig.11 (Continued)

日18时马尔代夫海域的涌浪波高已达1 m,这是因为在该时刻,来自咆哮西风带的涌浪的波高自南向北逐渐减小,等值线大致呈向北突出的圆弧状^[8],随着印度洋涌浪不断向北传播,该位置处的波高值达到最大。混合浪的形成不仅受到局部风浪的影响,更大程度上还受到海域涌浪的影响,主要波向呈S、SE向。

总体来看,马尔代夫海域的风浪波高分布与海表风速分布在各个季节大体一致;受南印度洋涌浪向北传播的影响,马尔代夫海域的涌浪对混合浪的贡献大于风浪,西南季风盛行时期亦然;印度洋产生的大浪为传播到马尔代夫海域涌浪的主要来源。随着季节更迭,该海域并非始终呈现单一海浪特性,波向也由主E向逐渐转为主S向,而桥梁附近海域由于受岛屿遮蔽,更多保持SE向。

3 结论

本文基于第三代波浪模型 MIKE21 SW 分析中马友谊桥海域的海浪特性。结果表明,受地形变化引起的波浪浅水变形和折射影响,桥梁18#墩位处的波况最为恶劣。因此,本文重点探讨该海域位置的波况。主要结论如下:

①从波高、周期变化特征来看,桥梁附近海域的月平均波高为0.45~0.85 m,月平均波周期为5.9~8.4 s,7月、8月波况较差。这主要由于该区域受季

风洋流驱动影响,东北季风主要发生在11月一次年4月,西南季风主要发生在5—10月。西南季风期间,降雨量大、风速强劲且波向与风向保持一致,导致该时期海况较为恶劣。

②从波高周期的联合分布来看,中马友谊桥海域的波浪受岛链掩护,常浪向为SE向,周期多介于6.0~10.0 s,频率占53.15%,其中出现频率最高的波高(0.6~0.9 m)对应的周期基本介于8~10 s。桥梁附近海域的波周期较大,属于显著的中长周期波。

③从季风特性来看,马尔代夫海域风浪的波高分布与海表风速分布在各个季节大体一致。涌浪对混合浪的贡献普遍大于风浪,西南季风期间也是如此;波向常年呈E—S向,而桥梁附近海域受岛屿遮蔽,常年更多保持SE向,印度洋产生的大浪为传播到马尔代夫海域涌浪的主要来源。

参考文献:

- [1] CHEN G, CHAPRON B, EZRATY R, et al. A global view of swell and wind sea climate in the ocean by satellite altimeter and scatterometer[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2002, 19(11): 1849-1859.
- [2] KUMAR S K, NASEEF M. Performance of ERA-Interim wave data in the nearshore waters around India[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2015, 32(6): 1257-1269.
- [3] 高占胜, 郑崇伟, 李训强, 等. 南海-北印度洋波高的长期变化: II. 趋势的区域性、季节性差异[J]. 海洋预报, 2016, 33(2): 39-44.

GAO Z S, ZHENG C W, LI X Q, et al. Long-term trend of SWH

- from year 1958 to 2001 in the South China Sea and the North Indian Ocean[J]. *Marine Forecasts*, 2016, 33(2): 39-44.
- [4] 廖振华, 刘青明. 湄洲湾海域波浪数值模拟研究[J]. *中国水运*, 2014, 14(9): 125-126.
- LIAO Z H, LIU Q M. Numerical simulation of waves in Meizhou Bay[J]. *China Water Transport*, 2014, 14(9): 125-126.
- [5] 齐庆辉, 朱志夏, 王志国, 等. “达维”台风作用下连云港海域台风浪数值模拟[J]. *水利水运工程学报*, 2015(5): 60-66.
- QI Q H, ZHU Z X, WANG Z G, et al. Numerical simulation of storm surge induced by typhoon Dawei in Lianyungang seas[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2015(5): 60-66.
- [6] 徐福敏, 邢添, 周昕伟, 等. 几内亚湾海浪特性数值模拟研究[J]. *水道港口*, 2022, 43(5): 580-586.
- XU F M, XING T, ZHOU X W, et al. Numerical simulation study on wave properties in the Gulf of Guinea[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2022, 43(5): 580-586.
- [7] 孙晓帆. 海洋风浪模型在我国邻近海域的应用与对比[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- SUN X F. Application and comparison of wave models in the vicinity of China seas area[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.
- [8] SAMIKSHA S V, VETHAMONY P, ABOOBACKER V M, et al. Propagation of Atlantic Ocean swells in the north Indian Ocean: a case study[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2012, 12(12): 3605-3615.
- [9] CHOW J H, SASMAL K, TKALICH P. Numerical forecasting of wind-waves for Singapore region[C]//*Journal of Physics: Conference Series*. Singapore: IOP Publishing, 2022: 012004.
- [10] TOBA Y, IIDA N, KAWAMURA H, et al. Wave dependence of sea-surface wind stress[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1990, 20(5): 705-721.
- [11] 杨振勇, 吕迎雪, 孔丛颖, 等. 海上工程施工期波浪(涌浪)预报系统[J]. *中国港湾建设*, 2017, 37(5): 6-9.
- YANG Z Y, LYU Y X, KONG C Y, et al. A wave (swell) forecasting system for marine works[J]. *China Harbour Engineering*, 2017, 37(5): 6-9.
- [12] 郑崇伟, 李崇银, 李训强. 印度洋的风浪、涌浪和混合浪的时空特征[J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2016, 17(4): 379-385.
- ZHENG C W, LI C Y, LI X Q. Temporal and spatial distribution of windsea, swell and mixed wave in Indian Ocean[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2016, 17(4): 379-385.
- [13] ZHENG C W, LI C Y. Propagation characteristic and intraseasonal oscillation of the swell energy of the Indian Ocean[J]. *Applied Energy*, 2017, 197: 342-353.
- [14] ZHENG C W, LI C Y, PAN J. Propagation route and speed of swell in the Indian Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2018, 123(1): 8-21.

Numerical simulation of wave characteristics in the China-Maldives Friendship Bridge sea area

SUN Wanjing^{1,2,3}, LUO Zhao^{1,2,3}, LIN Hongxing^{1,2,3}

(1. CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhan 430040, China; 2. Key Laboratory of Transport Industry for Large-span Bridge Construction Technology, Wuhan 430040, China; 3. Research and Development Center of Transport Industry for Intelligent Manufacturing Technologies of Transport Infrastructure, Wuhan 430040, China)

Abstract: Waves in the China-Maldives Friendship Bridge sea area are mainly surges, but their characteristics and propagation mechanism are still unclear, which brings big trouble to the protection and operation of the bridge. In this study, the wave model Mike21 SW driven by the ERA5 data is used to simulate the waves in the China-Maldives Friendship Bridge sea area, and the characteristics of the waves in the study area are obtained retrospectively. The results show that: affected by monsoon current, the wave height in the study area ranges from 0.45 m to 0.85 m, and the wave condition is bad in July and August; the wave period mostly ranges from 6.0 s to 10.0 s, and the frequency accounts for 53.15% of the whole year, showing a significant feature of medium-long period waves. Maldives sea swell mainly originates from the Indian Ocean swell, and are influenced by the northward propagation of the Indian Ocean swell, the wave direction of Maldives sea is E—S all year round, and the location of the bridge is sheltered by the island, which keeps SE direction all year round.

Key words: wave field; China-Maldives Friendship Bridge; wave propagation; numerical simulation