



基于 WRF 与 MIKE-SW 模式的 连云港海域台风浪数值模拟*

齐庆辉¹, 刘丽丽², 朱志夏¹, 张海文³, 陈允才³, 庞亮³

(1. 江苏省交通规划设计院股份有限公司 江苏省水运工程技术研究中心, 江苏 南京 210014;

2. 天津市气象科学研究所, 天津 300074; 3. 连云港港 30 万吨级航道建设指挥部, 江苏 连云港 222042)

摘要: 为准确模拟台风过境期间连云港海域波浪场分布, 将大气模式 WRF 模拟的海面 10 m 风速作为波浪模式 MIKE-SW 的驱动风场, 再现 0713 号台风过境期间波浪变化过程。数模与实测资料验证结果表明 WRF 模式成功复演了韦帕台风移动、风速变化过程, 考虑风暴潮增水效应的 MIKE-SW 台风浪模型能够较好地反映台风过境期间海浪成长过程。

关键词: WRF 大气模型; MIKE-SW 波浪模型; 韦帕台风; 波浪场

中图分类号: U 617.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)07-0036-05

Numerical simulation on typhoon waves in Lianyungang sea area by WRF and MIKE-SW

QI Qing-hui¹, LIU Li-li², ZHU Zhi-xia¹, ZHANG Hai-wen³, CHEN Yun-cai³, PANG Liang³

(1. Jiangsu Technology Research Center for Water Transport Engineering, Jiangsu Provincial Communications Planning and Design Institute Co., Ltd., Nanjing 210014, China; 2. Tianjin Institute of Meteorological Sciences, Tianjin 300074, China;

3. Lianyungang Port 300 000 tons Waterway Construction Headquarters, Lianyungang 222042, China)

Abstract: To accurately simulate the wave field distribution of Lianyungang sea area during typhoon transit period, we use the atmospheric model WRF to simulate the 10 meters wind speed above the sea level. The wave mode MIKE-SW driven by the wind field is used to simulate the 0713 typhoon waves growing process. The comparisons between the simulated and measured values show that the WRF model successfully simulates the typhoon Wipha's moving and changing process. Considering the effect of storm surge water's increase, the MIKE-SW model can reflect typhoon wave's growing process during the typhoon transit in Lianyungang sea area.

Keywords: WRF atmosphere model; MIKE-SW wave model; typhoon Wipha; wave field

连云港海域海岸类型属于淤泥质海岸, 泥沙颗粒较细, 一旦遭遇风暴潮、台风浪袭击, 河床底部泥沙起动可能较大, 风暴潮台风浪天气下泥沙骤淤量可能达到正常天气下的几倍甚至几十倍, 成为连云港港 30 万吨级航道工程建设需要重点考虑的技术难题。防波堤、导堤、码头等港工建筑物在风暴潮、台风浪作用下容易遭到巨大破坏,

同时台风天带来的风暴增水是近海工程安全的一大隐患。因此, 本文建立考虑风暴潮增水效应的台风浪数学模型, 深化研究台风天气作用下该海域的波浪特征。该研究具有重要的意义。国内外学者对风暴潮台风浪进行了系列的研究, 美国 University of Hawaii^[1]建立了台风极端天气下海水入侵预报系统, 采用第 3 代深海波浪数学模型

收稿日期: 2014-11-09

*基金项目: 国家 863 计划项目 (2012AA112509); 江苏交通运输科研项目 (2011Y01)

作者简介: 齐庆辉 (1985—), 男, 硕士, 工程师, 从事港口、海岸及近海工程数值模拟研究。

(WAVEWATCH III) 进行深海海域台风极端天气下波浪的后报与预报。Sheng Y Peter^[2]建立了风暴潮及海岸海水入侵预报系统 (CH3D-SSMS), 应用国际上著名的第 3 代近岸波浪模型 (SWAN) 进行近海、浅海台风浪数值模拟研究, 取得较好的研究成果。尹宝树等^[3]基于波作用平衡方程, 考虑了浅水破碎引起的能量耗散过程, 提出了第 3 代浅水波浪模式 YWE-WAN, 在中国渤海海域、黄河三角洲沿岸台风浪的模拟研究中得到成功的应用。朱志夏等^[4]基于考虑波流共同影响的缓坡方程, 运用波动叠加原理, 导出了不恒定非均匀流场中随机波折绕射联合的数值模式, 在渤海湾西部海域随机波传播的折绕射计算中取得了可信的研究结果。赵红波等^[5]采用 MIKE21 水动力模拟软件, 对连云港海域波浪特征进行了模拟分析, 能够为泥沙模型提供准确的波浪动力场。

本文采用先进的 WRF 模式模拟韦帕台风移动、风速变化过程, 采用 MIKE-SW 模式建立考虑风暴潮增水效应的台风浪模型, 研究台风过境期间海浪成长过程及工程海域波浪场分布情况, 为大风天骤淤模型提供准确的波浪动力场。

1 数学模型基本理论介绍

1.1 大气模型 WRF 介绍

WRF (Weather Research Forecast) 中尺度大气模式是由美国研究机构及大学的科学家共同开发的新一代预报模式与同化系统。WRF 大气模式具有可移植、易维护、可扩充、高效率等诸多特性, 可用于数值天气预报的研究与业务化、数据同化、小规模的气候模拟, 并且成功应用于大气-海洋模式的耦合数值模拟研究, 为大风天波浪数值模拟提供准确的风动力场。WRF 网格布置形式与 MM5 的 Arakawa B 格点不同, 采用 Arakawa C 格点, 在高分辨率风应力模拟中具有较好的准确性。

1.2 波浪数学模型

本研究采用国际上著名的 MIKE-SW 波浪数值模式, 基于波作用守恒方程, 采用波作用密度谱

$N(\sigma, \theta)$ 来描述波浪成长过程。公式中自变量为相对波频 σ 和波向 θ 。波作用密度与波能谱密度 $E(\sigma, \theta)$ 的关系可以表述为:

$$N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma \quad (1)$$

在笛卡尔坐标系下, Mike21 SW 的控制方程为:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla(\mathbf{v}N) = \frac{S}{\sigma} \quad (2)$$

式中: 波群速度 $\mathbf{v} = (c_\sigma, c_\theta, c_x, c_y)$; c_x 、 c_y 分别为波作用在地理空间 (x, y) 中传播时的变化; c_σ 为由于水深和水流变化造成的相对频率的变化; c_θ 为水深和水流引起的折射; S 为能量平衡方程中以谱密度表示的源函数。传播速度采用线性波理论计算:

$$\begin{cases} c_x = \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right] \frac{\sigma k_x}{k^2} + U_x \\ c_y = \frac{dy}{dt} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right] \frac{\sigma k_y}{k^2} + U_y \\ c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left[\frac{\partial d}{\partial t} + U \cdot \nabla d \right] - c_g k \cdot \frac{\partial U}{\partial s} \\ c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{k} \left[\frac{\partial \sigma}{\partial d} \cdot \frac{\partial d}{\partial m} + k \cdot \frac{\partial U}{\partial m} \right] \end{cases} \quad (3)$$

式中: d 为水深; U 为流速, $U = (U_x, U_y)$; $k = (k_x, k_y)$ 为波数; s 为沿 θ 方向空间坐标; m 为垂直于 s 的坐标。

2 WRF 大气模型建立与验证

2.1 WRF 大气模型建立

采用 WRF 中尺度预报模式模拟 2007 年 9 月天气状态, 再现韦帕台风中心移动、海域表面风场变化及过境过程。利用美国环境预报中心 NCEP 历史再分析数据 FNL (27 个气压层与地面层, 逐日 4 个时次 00:00、06:00、12:00、18:00, 分辨率为 $1.0^\circ \times 1.0^\circ$), 为 WRF 大气模式提供整个三维的大气初始条件与随时间变化的边界条件。为准确模拟连云港海域台风浪形成过程, 计算采用三重网格嵌套技术。嵌套区域 D01、D02、D03 (图 1)

的空间分辨率分别为 9、3、1 km，网格的精度较高，为准确模拟连云港海域风动力场奠定了基础。

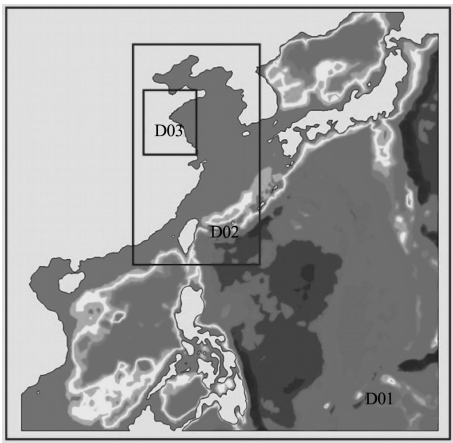


图 1 WRF 大气模式计算范围

2.2 WRF 大气模型验证

由模拟验证图（图 2、3）可以看出，WRF 台风模型模拟路径与上海台风所、日本气象厅公布台风运动过程较为一致，较好地再现了韦帕台风 2007 年 9 月在浙江省苍南县霞关镇登陆、并且台风中心 9 月 20 日到达江苏省灌南县重新返回黄海海域的移动过程。

台风期间徐圩海洋站进行了风速、风向定点观测，利用这一宝贵数据资料对 WRF 台风模拟结果进行验证，由图 2、3 可知，验证曲线吻合较好，台风最大值及出现时刻与实测数据基本相符，研究表明 WRF 大气模式能够较好地复演韦帕台风中心移动、海域风速变化过程，为进一步准确模拟台风浪过程提供了风动力条件。

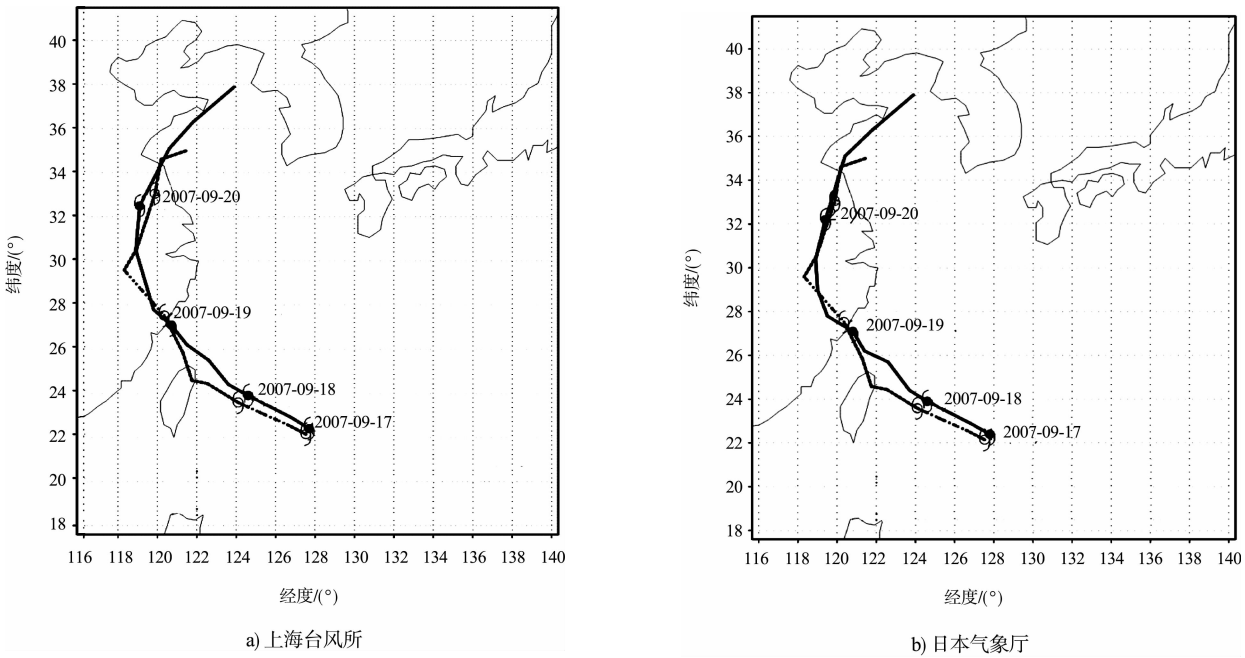
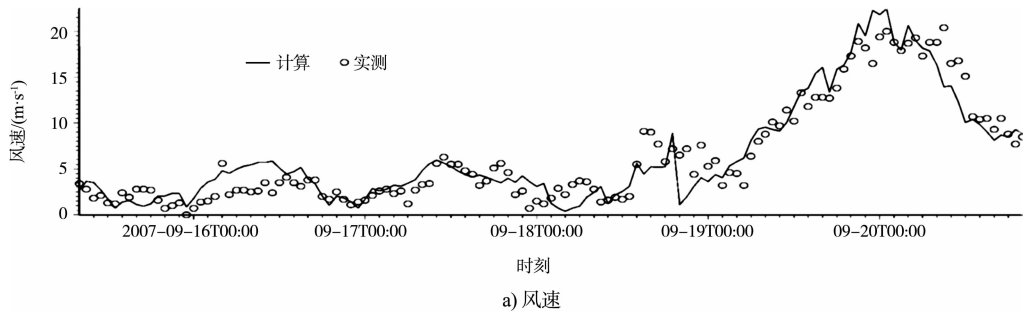


图 2 台风路径对比



a) 风速

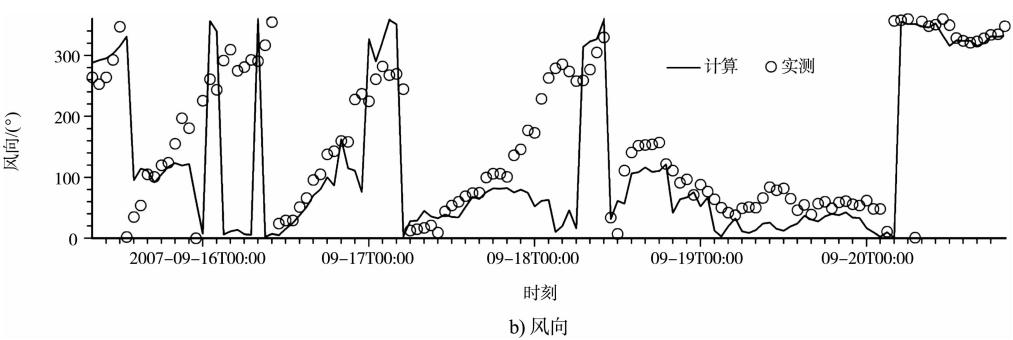


图 3 韦帕台风期间风速、风向验证

3 MIKE-SW 模型建立及验证

3.1 MIKE-SW 模型建立

本文采用国际上著名的 MIKE-SW 波浪数学模式, 考虑大风及风暴潮实时潮位过程, 建立连云港海域台风浪数学模型。波浪模型采用三重嵌套网格技术, 大范围、中范围波浪模型研究范围与 D01、D02 完全一致, 小范围波浪数学模型研究范围见图 4, 具体区域为: 北起日照 35.5°N 附近, 南至废黄河口 34.3°N 附近, 西起自由岸线, 东至 120.3°E, 模型东西宽约 130 km, 南北长约 126 km。依据 2007—2012 年海州湾及连云港航道水深图等确定水下地形, 采用非结构化网格, 在工程区附近进行局部加密, 外海海域对网格进行适当放大以减小计算工作量; 网格空间步长最大为 3 000 m, 最小为 30 m。

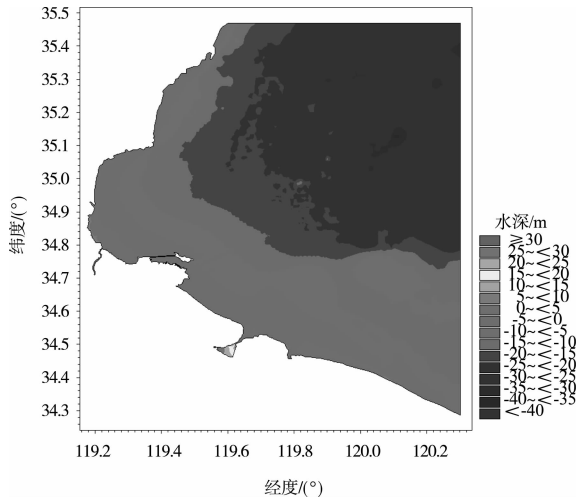


图 4 连云港海域波浪数学模型计算范围

台风期间风暴增水现象明显, 一个较为准确的的风潮潮位过程在台风浪数值中起着重要的作

用。以往研究中由于计算条件的限制, 采用平均潮位替代风暴潮过程曲线, 影响台风浪模拟计算精度。韦帕台风过境期间风强度较大, 连云港海域最大风暴增水为 0.6 m 作用, 风吹流作用显著。本文建立与大、中、小波浪模型同步的潮流数学模型, 为台风浪数学模型提供准确的实时潮位过程, 台风过境期间潮位验证见图 5, 潮位验证良好, 能够为台风浪模型提供较为准确的实时潮位场。

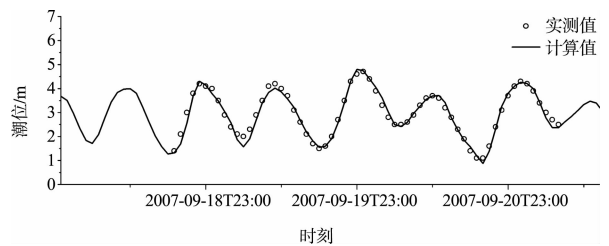


图 5 韦帕台风期间潮位验证

3.2 MIKE-SW 模型验证及计算结果

受业主委托, 天津水运工程科学研究院在台风期间进行了一个天气过程的波浪、水流、含沙量观测, 是目前连云港海域仅有的台风过程中现场实测资料, 为研究台风期间工程海域波浪场分布及风暴潮、台风浪对航道回淤影响提供了数据依托。台风期间在连云港港口南侧海域 - 3、- 5 m 水深处设有两个波浪临时测站 (图 6)。

图 7 为韦帕台风期间连云港海域有效波高分布 (2007-09-20T00:00)。由模型计算结果及实测数据资料分析可以看出, 在 - 3 m 水深测点 $H_{1/3}$ 波高最大值出现在 2007-09-20T00:00, $H_{1/3} = 2.7$ m; H_{max} 波高出现在 2007-09-20T00:30, $H_{max} = 4.5$ m。

在 - 5 m 水深测点, $H_{1/3}$ 最大波高值出现在 2007-09-19T23:00, $H_{1/3} = 3.0$ m, H_{max} 波高出现在 2007-09-20T01:00, $H_{max} = 4.4$ m。 - 5 m 水深处波高相对较大, 与 - 3 m 等深线相比, $H_{1/3}$ 平均差值为 0.3 m, H_{max} 平均差值为 0.52。两个测点水平距离约为 2.9 km, $H_{1/3}$ 波高平均衰减率为 0.1 m/km, 赵群等^[6] 在黄骅港研究发现粉砂质海岸平均衰减 0.03 m, 这也从另一个方面说明了连云港海岸类型为淤泥质海岸。

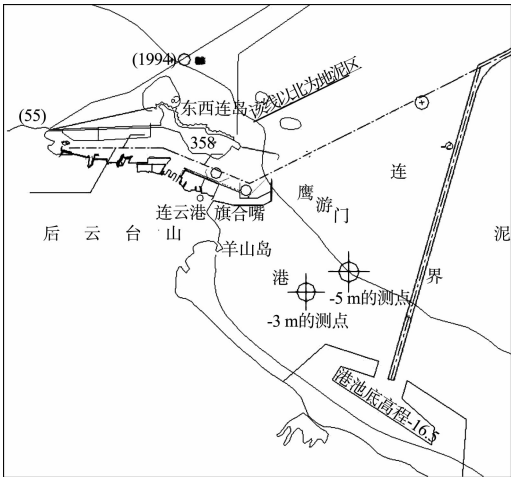


图 6 连续观测站位平面布置

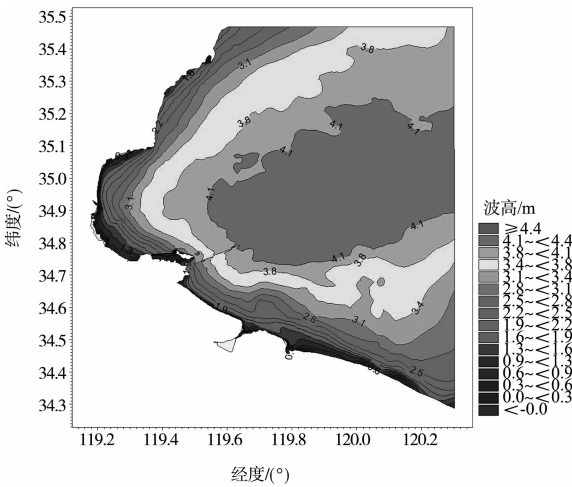


图 7 2007 年 9 月 20 日 0 时连云港海域波高分布

图 8 为 MIKE-SW 模型计算结果与实测数据对比验证。从 - 3、- 5 m 两个测点波高的验证图来看, 韦帕台风期间波高变化曲线与实际过程相符, 波高最大值误差小于 0.1 m, 时间相位差在 1 h 之内, 可见该模型较好地模拟连云港海域波浪场的分布及波浪在台风中的演变过程, 同时进一步说明前期 WRF 计算风场准确性及 MIKE 波浪模型相关参数设置的合理性, 该模型可以进一步为泥沙数学模型提供合理的波浪动力场。

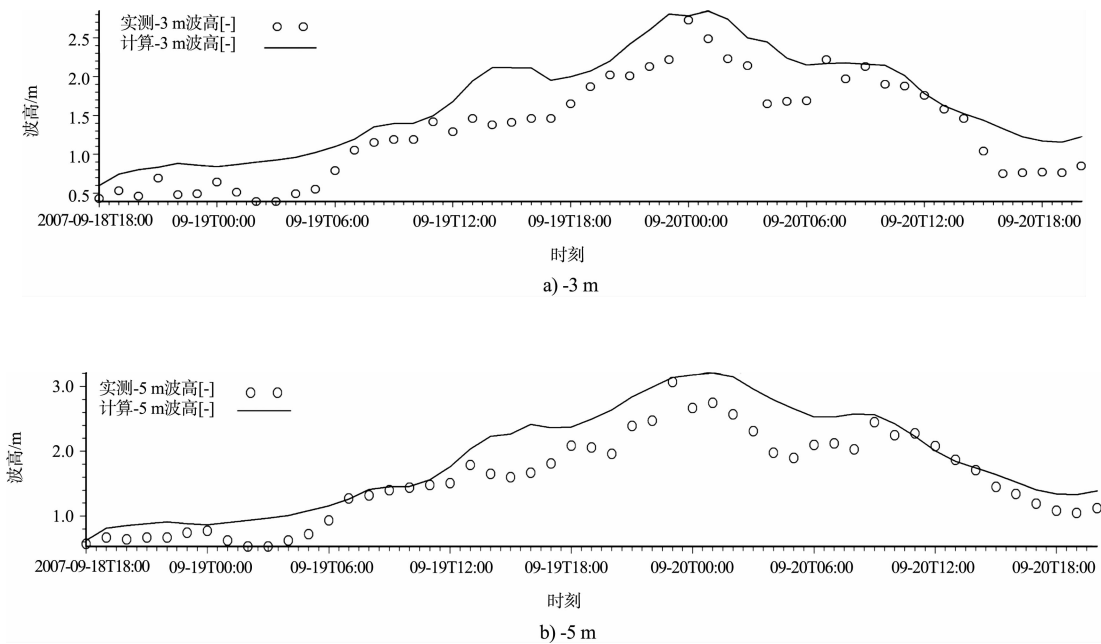


图 8 2007 年 9 月 18—21 日 WIPHA 台风波高验证