

江苏沿海滩涂围垦对近岸波浪场的影响*

范从建¹, 李瑞杰^{1,2}, 戴路¹, 李春辉¹, 梁连松¹

(1. 河海大学 海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学 环境海洋实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 采用当前较先进的第 3 代海浪模式 SWAN, 根据江苏沿海滩涂围垦规划 (2010—2020 年), 分别模拟了围垦前后夏季、冬季及台风期间的波浪场, 并结合 Jason-1 卫星高度计观测的有效波高数据进行验证, 分析江苏沿海滩涂围垦对江苏近岸波浪场的影响。江苏沿海滩涂围垦规划工程实施后, 江苏北部沿海规划围垦区波高及周期变化较小, 而南部规划围垦区海域波高及周期变化较大, 但影响幅度有限, 数量级较小。

关键词: SWAN; 滩涂围垦工程; 波浪场; 数值模拟

中图分类号: TV 142 文献标志码: A 文章编号: 1002-4972(2015)12-0016-07

Effects of tidal flat reclamation on wave's field in Jiangsu coast

FAN Cong-jian¹, LI Rui-jie^{1,2}, DAI Lu¹, LI Chun-hui¹, LIANG Lian-song¹

(1. Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Laboratory of Ocean Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: According to the Coast Reclamation Plan (2010—2020), we adopt the currently advanced third-generation wave model SWAN to simulate the wave fields before and after the reclamation engineering in summer, winter and typhoon period, which are verified by the effective wave data obtained by the Jason-1 altimeter, to analyze the impact of Jiangsu coastal reclamation on the Jiangsu nearshore wave field in province. Results show that the significant wave height and period keep unchanged basically in the northern area after implementation of reclamation, while the significant wave height and period vary greatly in the southern sea area. But the impact is limited and it's magnitude is small.

Keywords: SWAN; tidal flat reclamation; wave field; numerical simulation

江苏沿海辐射沙脊群分布广, 水下地形复杂, 波能作用较强, 直接受到从外海传播进来的波浪袭击^[1]。滩涂围垦规划工程的实施, 将使海岸滩涂格局和自然演变过程发生改变, 使得近岸波浪场发生变化; 此外, 围垦区的建立也将改变该海域风浪等在恶劣天气条件下的响应。因此对江苏沿海滩涂围垦规划工程实施后引起的近岸波浪场改变进行相应的研究十分必要, 目前已有不少学者对江苏近岸波浪场分布进行了探讨。冯卫兵

等^[2]利用南黄海辐射沙洲中部的实测资料, 分析了波高、周期以及波高与周期的联合分布; 陈波等^[3]利用 SWAN 模型对江苏如东附近海域在定常风和“9711”号台风作用下的波浪场进行了模拟; 邱桔斐^[4]根据江苏省沿海各气象站实测的多年资料确定出海区的设计风要素, 利用 SWAN 模型模拟江苏沿海的波浪场特征; 王晴等^[5]采用 MIKE21 SW 模型建立了江苏近岸 50 a 一遇风浪场模型, 对滩涂围垦规划实施前后的风浪场分布进

收稿日期: 2015-05-13
*基金项目: 国家自然科学基金项目 (41276017); 国家海洋局海洋公益性行业科研专项项目 (201205005)
作者简介: 范从建 (1989—), 男, 硕士研究生, 研究方向为河口海岸动力学。

行了数值模拟。但以上研究未探讨围垦前后波浪场对不同天气系统的响应,存在一定的局限性。为进一步深入细致地探讨江苏沿海滩涂围垦引起的近岸波浪场的变化,本文拟利用 SWAN 模型建立江苏近岸波浪场,重点研究夏季、冬季及台风 3 个典型时段围垦前后江苏近岸波浪场的变化,分析不同天气系统下围垦工程对江苏近岸波浪场的影响。

1 SWAN 模型的建立与验证

不少研究者利用 SWAN 对波浪场进行数值模拟,均取得了理想的效果。徐福敏等^[6]应用 SWAN 模型模拟了海安湾的波高及周期分布;胡克林等^[7]利用 SWAN 模型计算了长江口附近海域的台风浪;梁连松等^[8]利用 SWAN 对舟山海域台风浪进行了模拟,构造出不同的合成风场并选取其中的最优组合,提高了台风浪模拟的精度。

1.1 模型控制方程

SWAN 是 Delft 大学提出的考虑地形变化影响下的波浪浅化、破碎、波-波非线性相互作用、风能输入和波浪耗散等效应的波浪模型,能用于近岸海域等浅水区域的波浪计算^[9],模型采用全隐格式,具有无条件稳定的特点。SWAN 模式以二维动谱密度 $N(\sigma, \theta)$ 来描述随机波浪场, $E(\sigma, \theta)$ 与二维能谱密度的关系为:

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

(1)

式中: σ 为频率; θ 为波向。

模型在笛卡尔坐标系下控制方程为:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial (c_x N)}{\partial x} + \frac{\partial (c_y N)}{\partial y} + \frac{\partial (c_\sigma N)}{\partial \sigma} + \frac{\partial (c_\theta N)}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma}$$

(2)

式中: N 为动谱密度; σ 、 θ 分别代表相对频率及波向角; S_{tot} 是源汇项; C_x 、 C_y 、 C_σ 、 C_θ 分别是在 x 、 y 、 σ 、 θ 空间上的群速度。

1.2 计算区域及模型地形

为了确保计算精度,该模型模拟范围为 30.9°N ~ 37.4°N、119.1°E ~ 124.1°E,覆盖整个江苏近海海域,水深地形见图 1。1# ~ 8# 点为分析采样点,其中 1# ~ 6# 点位于南部辐射沙洲海域、

7# ~ 8# 点位于北部海域。模型采用无结构三角形网格,由外海至近岸网格尺寸逐渐加密,外海边界区域网格长度为 5 000 m,近岸辐射沙脊群区域处的网格边长约为 1 000 m。充分反映了江苏近岸辐射沙脊群区域的地形变化(图 2)。围垦后岸线见图 3,由《江苏沿海滩涂围垦开发利用规划纲要》提供,围垦前后网格尺寸基本一致。为全面考虑不同季节及极端天气系统下围垦对波浪场的影响,分别选取夏季波浪的模拟时段为 2006-09-07—2006-09-13;冬季波浪的模拟时段为 2006-12-30—2007-01-14,该时间段江苏受强冷空气影响;台风模拟选取近年对江苏沿海影响较大的典型台风“梅花”。

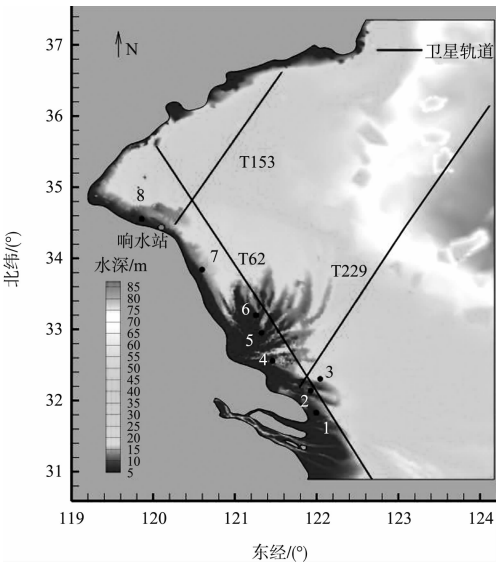


图 1 模拟区域水深地形

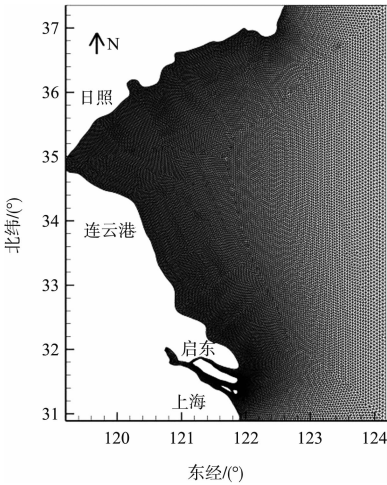


图 2 工程前网格

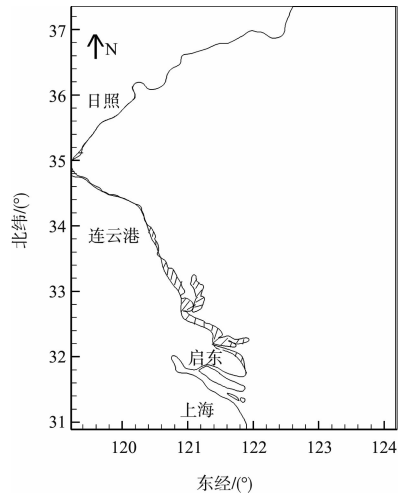


图 3 工程后岸线

1.3 波浪模型设置

围垦规划实施前后模型计算时间步长为 10 min，方向分辨率为 10°，频率区间为 0.05 ~ 1 Hz，频段数为 31，其余采用默认设置。

1.4 风场模型

1.4.1 风场资料来源

模型所使用的背景风场数据来源于 CCMP 卫星遥感海面风场资料，该风场数据采用交叉校正及同化的方法融合了 SSM/I、TMI、AMSR-E 等海洋微波及散射平台的海表面风速资料。其时间跨度为 1987-07-01—2011-12-31；时间分辨率为 3 h；空间范围为 0.125°E ~ 359.875°E、78.375°S ~ 78.375°N；空间分辨率为 0.25° × 0.25°。

1.4.2 风场模型构建

夏季以及强冷空气过境时风浪场的模拟采用 CCMP 再分析风场资料作为驱动风场；而“梅花”期间的驱动风场则由 CCMP 背景风场与 Holland 经验台风风场叠加构建而成。Holland 在 Schloemer 指数型气压分布模型的基础上，引入 Holland B 参数，用梯度风方程得到台风风场模型^[10]：

$$v_c = [AB(p_n - p_c) \exp(-A/r^B) / \rho r^B + r^2 f^2 / 4]^{1/2} - r f / 2$$

(3)

式中： v_c 为梯度风速； p_c 及 p_n 分别是台风中心气压和环境气压； r 是计算点至台风中心的径向距离； ρ 为空气密度； f 为科氏力参数； A 及 B 是 Holland 拟合参数，其中 $B = 1.5 + (980 - p_c) / 120$ ， $A = R^B$ ，

R 为台风最大风速半径。

台风中心附近采用 CCMP 背景风场与 Holland 台风风场以一定的权重系数叠加^[11]构造的风场方式：

$$\boldsymbol{v}_{\text{new}} = e \boldsymbol{v}_{\text{ccmp}} + (1 - e) \boldsymbol{v}_{\text{hol}}$$

(4)

式中： $\boldsymbol{v}_{\text{new}}$ 为构造风场； $\boldsymbol{v}_{\text{ccmp}}$ 为 CCMP 背景风场； $\boldsymbol{v}_{\text{hol}}$ 为 Holland 模型风场； e 为权重系数，模拟中取为 0.8^[8]。

2 波浪模拟数值试验

2.1 资料来源和处理方法

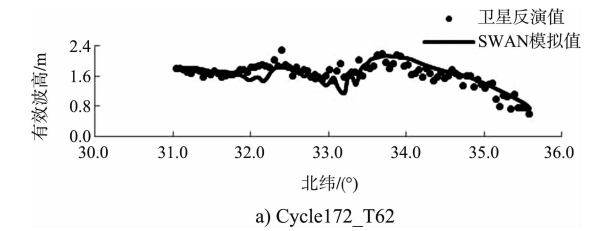
为验证工程前时段 1 和时段 2 波浪模拟效果，将波浪模拟值与 Jason-1 卫星轨道数据进行比较。Jason-1 卫星高度计 ku 波段波高资料来源于美国宇航局 JPL 实验室物理海洋学数据分发存档中心，反演的有效波高精度为 0.5 m，达到了定量观测对测量误差的要求。在模拟时段 1 内，Jason-1 卫星处于其第 172 个运行周期，主要有 T62、T153 轨道经过对应区域，其中 T62 轨道基本平行于岸线，横穿整个辐射沙集群；在模拟时段 2 内，Jason-1 卫星处于其第 183 ~ 184 个运行周期，主要有 T229、T62 轨道经过对应区域；模拟时段 3 的风浪验证资料由图 1 中响水波浪测站（120.10°E，34.44°N）提供。

2.2 工程前模型验证

时段 1 ~ 时段 2 的模拟有效波高与 Jason-1 卫星轨道数据的对比结果见表 1 及图 4。

表 1 时段 1 及时段 2 模拟结果验证

模拟时间	周期及轨道号	平均误差/m	平均相对误差/%
时段 1	Cycle172_T62	0.17	11.0
	Cycle172_T153	0.16	24.1
	Cycle183_T229	0.23	19.8
时段 2	Cycle184_T62	0.30	13.4
	Cycle184_T229	0.18	16.0



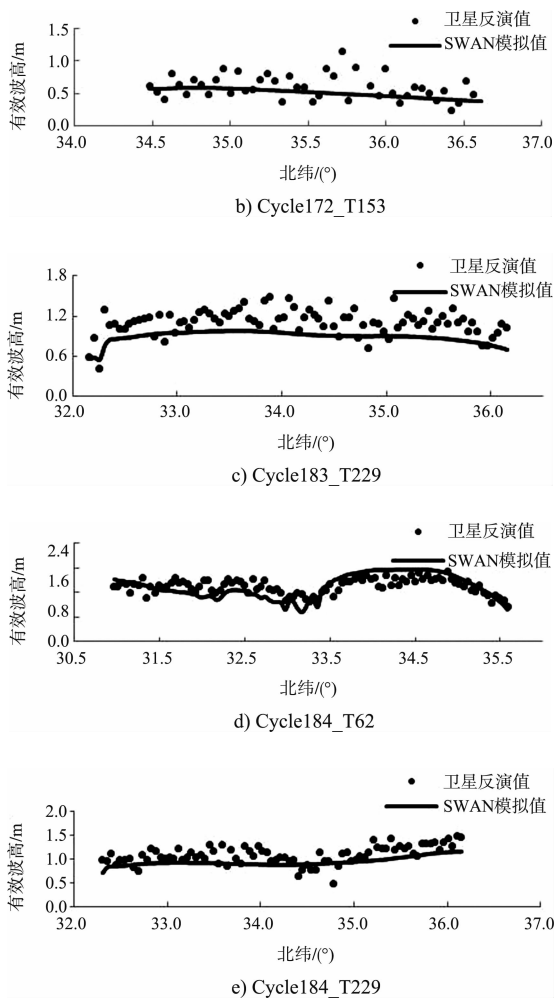
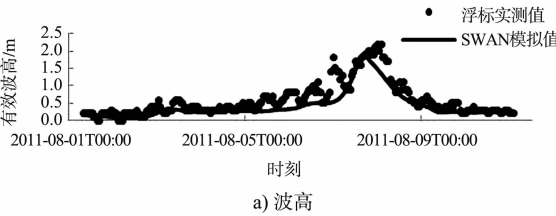


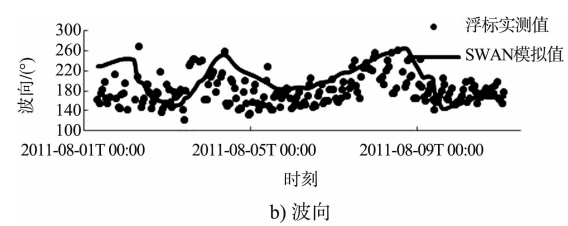
图 4 时段 1 及时段 2 模拟结果与轨道数据验证

由表 1 及图 4 可知, 模拟有效波高与轨道数据的变化趋势基本吻合, 模拟误差均在 0.30 m 以内; 除时段 1 的模拟有效波高与 T153 的卫星轨道数据相差稍大外, 两个时段模拟结果的相对误差均小于 20%, 且近岸模拟的波浪与 T62 轨道数据吻合度最优; 总体而言, 模拟效果均较好。

响水波浪测站位于江苏沿海废黄河口附近, 浮标处水深大约 8 m, 每 1 h 采集一次数据, 该浮标记录了台风“梅花”期间测波点附近的波要素过程。将模拟结果和实测有效波高及波向进行对比分析, 结果见图 5。



a) 波高



b) 波向

图 5 “梅花” 期间波浪模拟结果与响水站实测数据对比

由图 5 可知, 模型较好地刻画了台风期间响水站附近的波高及波向变化过程, 但在 2001-08-06—08-07, 波高模拟值较实测值稍低, 且峰值处波高下降速率较实测值稍快, 这可能是受驱动风场的精度限制所致。

3 工程前模型的模拟结果

相对于台风天气系统而言, 影响江苏的主要灾害性天气为强冷空气以及寒潮, 因此本节对冷空气南下时围垦引起的波浪场分布变化作进一步分析。工程前各采样点波要素时间过程见图 6, 时间段为 2007-01-04T0:00—2007-01-14T2:00。

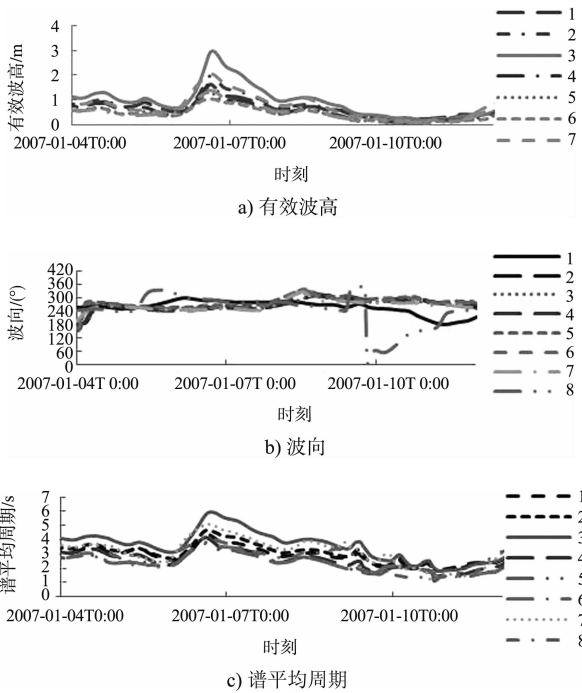


图 6 冬季(时段 2) 采样点波要素变化过程

就波高和周期而言: 各特征点的波高及周期变化趋势较为一致, 各特征点有效波高从 6 日 0 时起增长较快, 在 6 日 17 时达到最大值后随着冷空气

影响的减小逐渐至 1 m 以下，这与 2007 年 1 月初北方的一股较强冷空气南下有关，该冷空气从 5 日开始影响江苏地区。除特征点 3[#]、7[#]有效波高超过 2 m 外，各采样点的有效波高均小于 2 m，其原因为：江苏近岸缺乏群岛阻挡，对于波浪的消减效果不明显，特征点 3[#]及 7[#]处于辐射沙洲外缘且水深较大，特征点 1[#]及 8[#]波高较小是由于该处水深较小且该时段内该处风速较小，而其余采样点处波高较小可能原因为其位于辐射沙洲内部，其复杂的地形导致波浪在向近岸传播过程中发生摩擦、破碎等作用而导致能量损耗较大。就波向而言，采样点 8[#]出现明显差异。南部海域各采样点的变化趋势一致，波向变化基本集中在 NE ~ NW 向。北部海域在 13 日 12 点时，波向开始转为 N 向，采样点 8[#]也基本在 NE ~ NW 向，但从 2007 年 1 月 9 日 10 时起，波向突然转变为 W 向，而后逐渐变为 SW 向后趋于稳定，由该点波向与方向的对比(图 7)可知：该处波向与风向的变化趋于同步。

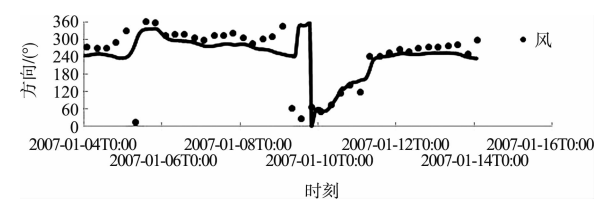


图 7 8[#]采样点风向与波向对比

由图 6a) 可知，选取波高较大的 1 月 6 日 17 时及 1 月 7 日 5 时 2 个典型时刻的波浪场作为分析对象，各时刻波浪场见图 8。

由图 8 可以看出，6 日 17 时左右，冷空气正好过境，冷空气中心处所对应的波高最大，最大波高可达 8 m，各时刻波高峰值与冷空气南下路径吻合，江苏近岸南北海域的波高由近岸向外海逐渐增加，波高等值线分为：北部海域波高等值线几乎与等深线平行，而南部海域波高等值线错综复杂；由于地形地貌复杂，辐射沙洲海域波高等值线分布较为复杂，加之受冷空气影响，外海域波高显著增大且波高等值线随时间变化。在整个过程中，波浪到近岸海域后大量破碎，有效波高均为 3 m 以下且整个过

程中变化不大，其中，如东至川东港外海域有效波高最大。此外，由于模拟时段中整个海域多为西北风，波浪在传播过程中基本为偏 N 向，而传播至近岸时受控于地形波向会发生改变。

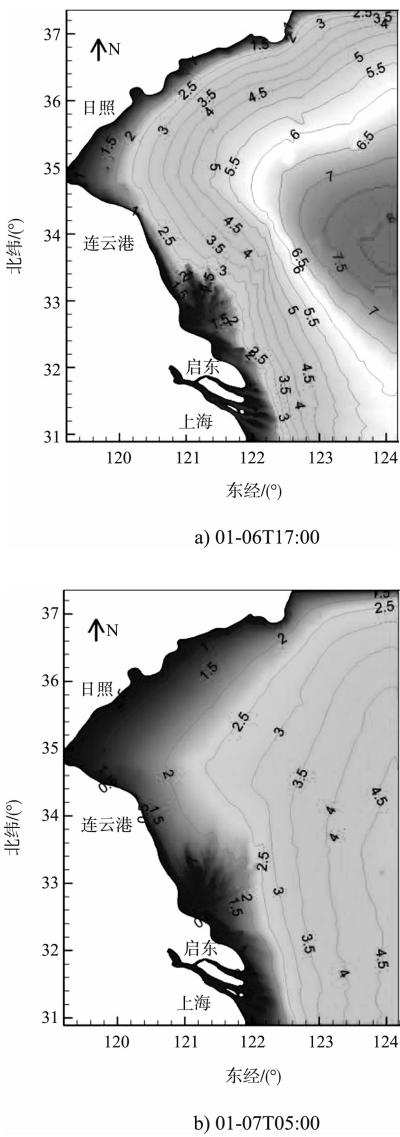


图 8 冬季(时段 2)典型时刻波浪场 (波高单位: m)

4 工程后模型的模拟结果

4.1 波浪场分析

工程实施后冬季期间各时刻的波浪场分布见图 9。对比图 8 与图 9 的波浪场分布可知，从大范围的有效波高等值线来看，围垦工程对江苏近岸海域有效波高影响不大，该水域滩涂围垦规划实施前后同一时刻的有效波高等值线几乎一致，波高最大值仅发生了部分偏移，并且随着岸线推进

近岸处有效波高等值线相应地向外海推进。夏季及台风期间围垦后的模拟结果基本相似, 即围垦工程对江苏近岸海域有效波高影响不大。

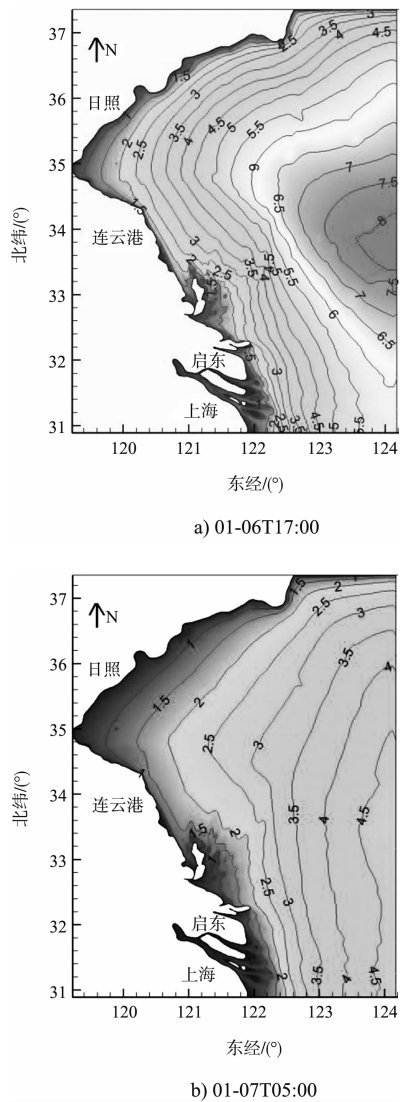


图9 工程后冬季(时段2)典型时刻波浪场(波高单位:m)

4.2 不同时段工程前后各站位波高及波周期变化

4.2.1 波高变化分析

表 2 为不同模拟时段工程前后江苏近岸波高及波周期变化, 其中负值表示工程后波要素减小, 正值表示工程后波要素增加。由表 2 可知, 围垦工程实施后, 在所有模拟时段内, 各采样点相同时刻的有效波高均有一定程度的降低, 最多可降低 0.3 m。此外, 江苏南部规划围垦区海域有效波高变化较大, 而北部沿海规划围垦区有效波高变化较小, 位于江苏北部近岸海域的 7[#]和 8[#]采样点

在各时段有效波高变化过程几乎不变, 波高增加的最大值仅为 0.14 m, 这主要是因为北部海域围垦规划区域较少, 且分布形态多为狭长区域; 而南部海域拟建围垦区较多, 尤其是辐射沙脊群区域处条子泥、高泥、东沙等围垦区的存在, 有效波高受到影响的范围较大。位于辐射沙脊群核心区域的 4[#]、5[#]、6[#]采样点均受到规划围垦区影响, 但该区域水下地形本身较为复杂, 因摩擦、破碎、折射和非线性相互作用致使能量耗散较快, 因此滩涂围垦规划工程实施引起的岸线变化对于辐射沙脊核心区内的波高变化的影响有限, 4[#]和 5[#]采样点在夏、冬季节以及台风的模拟时段内, 有效波高会出现一定的增加, 且增加的幅度在台风影响期间达到最大, 但也仅为 0.176 m; 在 3 个模拟时段内, 岸线形态的变化对 6[#]采样点有效波高影响最大, 其工程前后同一时刻的有效波高最大可增加 0.687 m, 但由于辐射沙洲的影响, 该点在工程后有效波高最大也小于 2 m, 且发生在台风期间。造成该区波高在围垦实施后增大的原因是 4[#]、5[#]采样点均处于围垦规划的核心区, 垦区的实施改变了该区的岸线形态以及海岸滩涂格局, 从而改变了围垦核心区的波能分布, 波浪由于折射以及绕射等作用从而在该区域出现了波能辐聚, 而由于江苏近岸缺乏群岛阻挡, 对于波浪的消减效果不明显, 因此在一般天气系统下地形变化对波高的影响有限, 但台风期间风速较大, 近岸波浪主要受风场的影响, 从表 2 不难发现台风期间各采样点波高的变化幅度相对于其他两个时段均较大, 而东沙围垦区东部的 6[#]采样点位于围垦核心区的外围, 其所处水深较大, 因此所受台风影响更为显著。

4.2.2 波周期变化分析

由表 2 可以看出, 与有效波高变化规律基本相同, 江苏近岸海域各季节谱平均波周期变化幅度较小, 同样的, 6[#]站位谱平均周期增加的幅度最大。并且江苏南部规划围垦区海域谱平均波周期相对于北部海域而言变化稍大。各采样点中, 1[#]、2[#]、3[#]和 7[#]谱平均波周期受到规划围垦区的影

响很小，而受围垦工程影响，谱平均波周期变化较大的是 4[#]、5[#]、6[#]以及 8[#]点，其中，位于东沙围垦区东部的 6[#]点谱平均波周期在 2007 年 1 月增

大值达到 0.826 s，故江苏沿海滩涂围垦规划实施后，江苏近岸谱平均波周期变化最大区域位于辐射沙脊群区域。

表 2 不同模拟时段工程前后江苏近岸波高及波周期变化

采样点	有效波高/m			谱平均周期/s		
	时段 1	时段 2	时段 3	时段 1	时段 2	时段 3
1	-0.006 ~ 0.010	-0.072 ~ 0.008	-0.022 ~ 0.017	-0.037 ~ 0.026	-0.182 ~ 0.304	-0.090 ~ 0.029
2	-0.126 ~ 0.017	-0.301 ~ 0.018	0.034 ~ 0.056	-0.311 ~ 0.015	-0.610 ~ 0.291	-0.446 ~ 0.095
3	-0.014 ~ 0.013	-0.061 ~ 0.031	0.006 ~ 0.047	-0.013 ~ 0.038	-0.076 ~ 0.139	-0.028 ~ 0.059
4	0.007 ~ 0.048	-0.009 ~ 0.043	-0.026 ~ 0.176	-0.013 ~ 0.080	-0.020 ~ 0.367	-0.175 ~ 0.332
5	0.017 ~ 0.080	-0.073 ~ 0.040	-0.034 ~ 0.164	0.047 ~ 0.223	-0.160 ~ 0.759	-0.117 ~ 0.188
6	0.062 ~ 0.348	0.003 ~ 0.431	0.019 ~ 0.687	0.278 ~ 0.409	0.013 ~ 0.826	0.116 ~ 0.665
7	-0.018 ~ 0.008	-0.031 ~ 0.014	-0.021 ~ 0.011	-0.060 ~ 0.154	-0.325 ~ 0.232	-0.057 ~ 0.169
8	-0.013 ~ 0.019	-0.011 ~ 0.006	-0.009 ~ 0.012	-0.191 ~ 0.368	-0.052 ~ 0.419	-0.300 ~ 0.094

5 结 论

基于 SWAN 波浪模型对滩涂围垦规划实施前后江苏近岸典型时段的波浪场进行了数值模拟，模拟时间分别为夏季、冬季及台风“梅花”等典型时段。在模型验证的基础上，探讨了江苏近岸波浪场在各时段的分布特征，分析了滩涂围垦规划工程对近岸各模拟时段波要素的影响。结果表明：滩涂围垦规划工程实施后，海岸滩涂格局发生变化，正常天气状况下，江苏南北海域波浪场分布有所不同，波高主要受江苏近岸地形的影响，北部海域风浪场等值线几乎与等深线平行，而南部海域等值线错综复杂，其分布一定程度反映了水下地形变化；但在台风过境时，由于受到台风强度及路径的影响，波高等值线分布将随时间发生变化。江苏沿海滩涂围垦规划工程实施后，江苏北部沿海规划围垦区波高及周期变化较小，而南部规划围垦区海域波高及周期变化较大，但影响幅度有限，数量级较小。

参考文献：

[1] 李杰,袁建忠. 风浪谱模型在苏北辐射沙洲海域的应用研究[J]. 水利经济, 2012, 30(4): 53-56.

[2] 冯卫兵, 彭向丽, 张少兰. 南黄海近岸海域风浪统计分析[C]//中国海洋工程学会. 第十四届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 北京: 海洋出版社, 2009: 523-528.

[3] 陈波, 蒋昌波, 陈汉宝. 江苏如东附近海域风浪场的数值模拟[J]. 水运工程, 2007(1): 20-24.

[4] 邱桔斐. 江苏沿海风、浪特征研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.

[5] 王晴, 李熙, 黄惠明, 等. 江苏沿海滩涂围垦对近岸风浪场的影响[J]. 江南大学学报: 自然科学版, 2015, 14(1): 90-96.

[6] 徐福敏, 张长宽, 茅丽华, 等. 一种浅水波浪数值模型的应用研究[J]. 水动力学研究与进展, 2000, 15(4): 429-434.

[7] 肖文军, 丁平兴, 胡克林. 潮汐和流影响下长江口波浪场数值计算[J]. 海洋工程, 2008, 26(4): 45-52.

[8] 梁连松, 李瑞杰, 丰青, 等. 舟山海域台风浪数值模拟[J]. 水道港口, 2014, 35(6): 582-588.

[9] 蒋德才, 刘百桥, 韩树宗. 工程环境海洋学[M]. 北京: 海洋出版社, 2005.

[10] Holland G J. An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes [J]. Monthly Weather Review, 1980(8): 1 212-1 218.

[11] 唐建, 史剑, 李训强, 等. 基于台风风场模型的台风浪数值模拟[J]. 海洋湖沼通报, 2013(2): 24-30.

(本文编辑 武亚庆)