



# 江苏海域波浪分布特征研究\*

宫英龙<sup>1</sup>, 张亮亮<sup>1</sup>, 范飞<sup>2</sup>

(1. 中交天津航道局有限公司, 天津 300461; 2. 江苏省交通规划设计院水运工程技术研究中心, 江苏 南京 210014)

**摘要:** 以1991—2011年风场数据为驱动, 运用第3代波浪模型SWAN对江苏海域的波浪分布特征进行了模拟研究。首先运用基于浅水方程的Delft3D-flow模块对江苏海域的潮波进行模拟, 给波浪模型提供一个准确的边界条件; 其次运用SWAN模型对江苏海域的波浪进行模拟并与观测值进行比较; 最后对江苏海域的波浪分布特征进行研究。结果表明: 江苏海域年平均波高由南往北依次递减, 年平均最大值为1.5 m左右, 强浪向为NE向, 四季中冬季的平均波浪最大, 春秋次之, 夏季最小。

**关键词:** 江苏海域; 波浪模拟; 分布特征

中图分类号: P 71

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)08-0033-08

## On distribution characteristics of wave climate in Jiangsu sea

GONG Ying-long<sup>1</sup>, ZHANG Liang-liang<sup>1</sup>, FAN Fei<sup>2</sup>

(1. CCCC Tianjin Dredging Co., Ltd., Tianjin 300461, China; 2. Water Transport Engineering Technology Research Centre, Jiangsu Provincial Communications Planning and Design Institute Co., Ltd., Nanjing 210014, China)

**Abstract:** This paper studies the wave distribution of Jiangsu sea with SWAN wave model, which was driven by the wind filed from 1991 to 2011. Firstly, the tidal level is simulated by Delft 3D flow model. Then, the wave parameters of Jiangsu sea are computed. Lastly, the wave condition of Jiangsu sea area is analyzed. The result shows that: the annual average wave height becomes smaller from southeast to northwest. The largest annually average wave height is around 1.5 m. Most waves come from direction NE and SE, and the strong wave direction is NE. The wave height in winter is larger than that in other seasons.

**Key words:** Jiangsu sea; wave simulation; distribution characteristics

江苏是中国的经济大省, 其位于南黄海的西侧, 北临山东, 南临上海, 是上海重要的经济腹地之一。江苏经济的发展与沿海港口码头的开发利用有着密切的关系。在港口码头的建设和设计中, 波浪是必须要考虑的水动力因素之一。波浪计算的准确性对工程的安全性以及可靠性有着重要的影响。对于江苏海域波浪分布特征的研究, 虽有一些学者进行了研究<sup>[1-3]</sup>, 但在计算过程中未考虑潮位的影响, 且风场主要是从NECP网站下载的, 时间步长以及空间步长较大, 因此模拟结

果的可靠性有待提高。为了研究江苏海域高分辨率波浪分布情况, 本文运用基于WRF模型计算出来的高分辨率风场对江苏海域波浪进行模拟研究, 并在计算过程中考虑了潮位的作用。

## 1 模型理论及参数设置

### 1.1 水流模型理论

为了模拟江苏海域的潮位情况, 基于浅水方程的Delft3D-flow模型被运用, 其控制方程为<sup>[4]</sup>:  
连续方程:

收稿日期: 2013-12-17

\*基金项目: 国家自然科学基金(51179178); 复杂条件下建港关键技术集成研究(2011Y01)

作者简介: 宫英龙(1971—), 男, 工程师, 主要从事疏浚吹填及水工建筑工程施工及研究。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$x$  方向动量方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\tau_x^b}{\rho H} + \varepsilon_t \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$y$  方向动量方程:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - fu = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{\tau_y^b}{\rho H} + \varepsilon_t \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

式中:  $\eta$  为静水面上水面的位置;  $t$  为时间;  $u, v$  分别为垂向平均流速在  $x, y$  方向上的分量;  $h$  为静水深;  $H$  为总水深;  $f$  为科氏参量,  $f = 2\omega \sin\theta$ ;  $\omega$  为地球自转角速度;  $\theta$  为计算区域的纬度;  $\varepsilon_t$  为紊动黏性系数;  $g$  为重力加速度;  $\rho$  为海水密度;  $\tau_x^b, \tau_y^b$  分别为底部剪切应力在  $x, y$  方向上的分力。

### 1.2 波浪模型理论

第3代波浪模型 SWAN 是基于能量平衡的谱方程模型, 在直角坐标系下其表达式可表示为<sup>[5-7]</sup>:

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} (c_x N) + \frac{\partial}{\partial y} (c_y N) + \frac{\partial}{\partial \sigma} (c_\sigma N) + \frac{\partial}{\partial \theta} (c_\theta N) = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (4)$$

式中:  $N$  为波浪作用谱密度 (action density);  $c_x, c_y$  分别为波浪在  $x, y$  方向上的传播速度的分量;  $c_\sigma, c_\theta$  分别是速度  $\sigma, \theta$  向的分量。

### 1.3 模型参数设置

#### 1.3.1 潮流模型参数设置

潮位对于波浪有着重要的影响, 尤其是在近岸区域, 这种影响远比深水的影响要大得多。为了给波浪提供潮位信息, 本文运用 Delft3D 模型的 Flow 模块对江苏海域的潮波系统进行模拟。为了提高模拟结果的精确度, 在模拟过程中采用了嵌套结构: 首先以日本 NAO 潮波模型的 16 个分潮为边界条件对东中国海的潮波系统进行模拟, 然后再根据东中国海模型提供的边界条件对江苏海域的潮波系统进行模拟。模拟的水深数据主要来自海图, 部分数据来自实测数据。图 1 显示了潮波模拟的计算区域, 图中共有 2 张图片, 其中

较大的图片是东中国海的水深地形图, 图中 \* 1、\* 2、\* 3、\* 4 分别代表吕四、大丰、滨海和连云港这 4 个潮位测站的位置, #1、#2、#3、#4 分别代表上海南槽、洋口港、徐圩、连云港这 4 个波浪观测站的位置。小图是江苏海域的水深地形分布情况。在对潮波进行模拟时, 底部摩擦采用的是曼宁系数, 其值随水深的变化而变化, 大范围计算时间步长为 20 s, 小范围计算时间步长为 5 s, 并考虑了地球自转对潮波的影响。

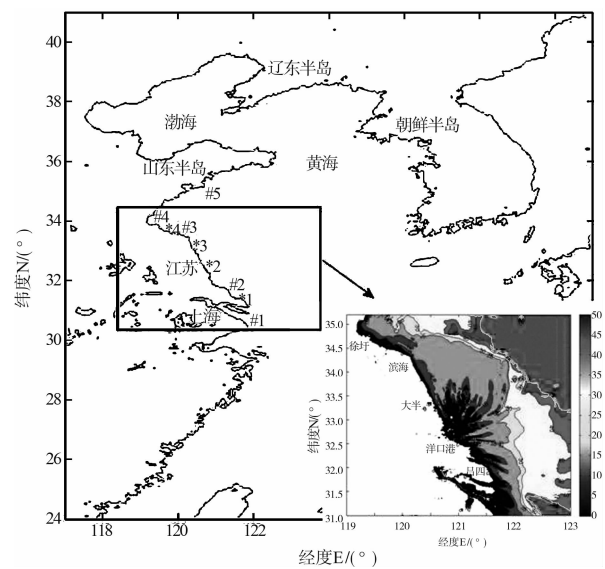


图 1 东中国海和江苏海域位置

#### 1.3.2 波浪模型参数设置

本次波浪模拟所采用的风场数据是基于中尺度气象模型——WRF 模型计算出来的, 其空间步长是  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ , 空间范围是  $117^\circ\text{E} \sim 143^\circ\text{E}$ ,  $20^\circ\text{N} \sim 52^\circ\text{N}$ , 时间步长为 3 h, 时间跨度为 1990-01-01—2011-12-31。由于精度的要求, 本文在波浪计算时采用了嵌套结构: 大范围 (东中国海) 计算范围为  $117^\circ\text{E} \sim 131^\circ\text{E}$ ,  $24^\circ\text{N} \sim 42.6^\circ\text{N}$ , 计算空间步长为  $0.05^\circ \times 0.06^\circ$ ,  $x$  方向网格数为 280,  $y$  方向网格数为 310, 计算时间步长为 0.5 h; 江苏计算范围为  $119^\circ\text{E} \sim 123.5^\circ\text{E}$ ,  $31^\circ\text{N} \sim 35.6^\circ\text{N}$ , 计算空间步长为  $0.015^\circ \times 0.016^\circ$ , 计算时间步长为 1 h, 谱型采用的是 Jonswap 谱, 计算过程中考虑了白帽损失、四波非线性相互作用、底部摩擦引起的波能损失以及波浪破碎。

## 2 模型验证

### 2.1 潮位验证

江苏海域的潮波系统比较复杂, 尤其在辐射沙洲地区, 南侧的前进潮波与北侧的旋转潮波在此处相遇, 因此该地区的潮差相差较大。为了验证江苏潮波模型的准确性, 本文选取了潮汐表上

的 4 个测站来对该地区潮位进行对比。图 2 分别是吕四、大丰、滨海和连云港 4 个测站的潮位模拟值与观测值的比较。从图中可以看出, 这 4 个测站的潮位验证良好, 相位差和潮位误差都能满足精度要求。潮位的准确模拟为波浪的精确模拟提供了可靠保证。

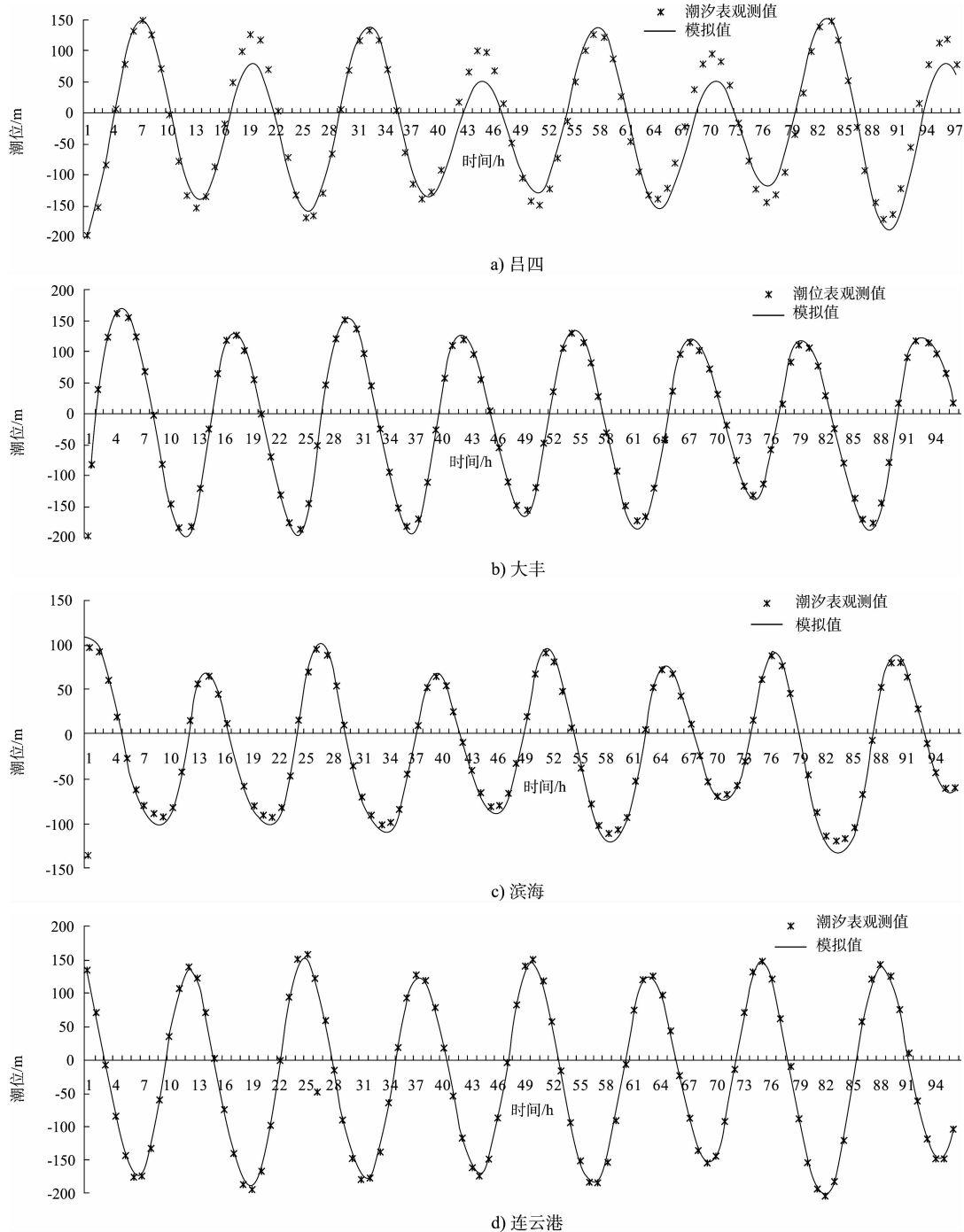


图 2 测站潮位模拟值与观测值的比较

### 2.2 波浪验证

为了验证波浪模型的准确性, 选取了上海牛

皮礁、洋口港、徐圩、连云港这 4 个测站对模拟的波浪进行验证, 图 3 和 4 分别是这 4 个测站的

观测值与模拟值比较。从图中可以看出，波高的模拟值与观测值，不仅变化趋势相一致，而且较

大值也相近。但是，也存在着一定的误差，这主要是由于受到地形和风场精度的影响。

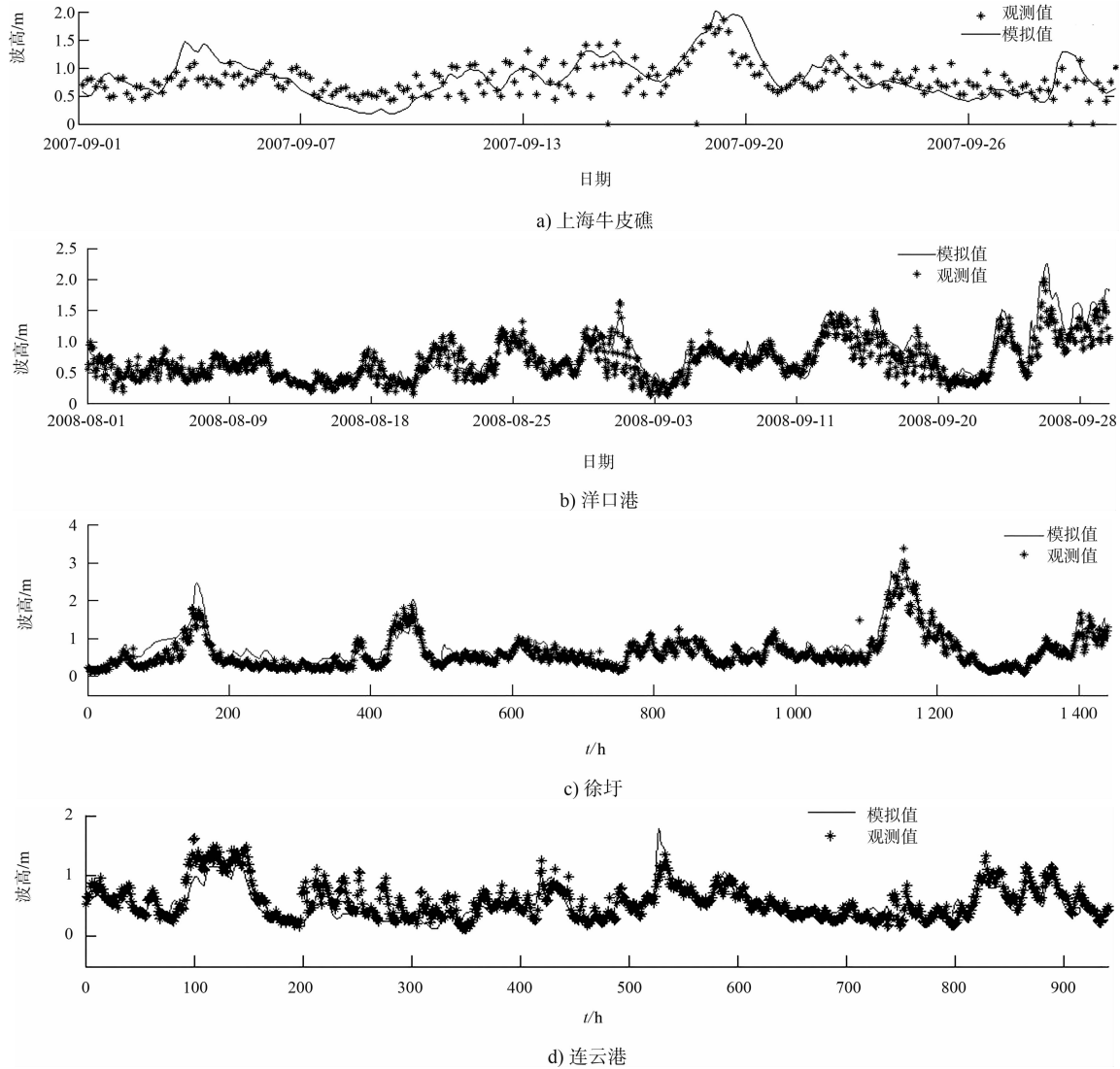
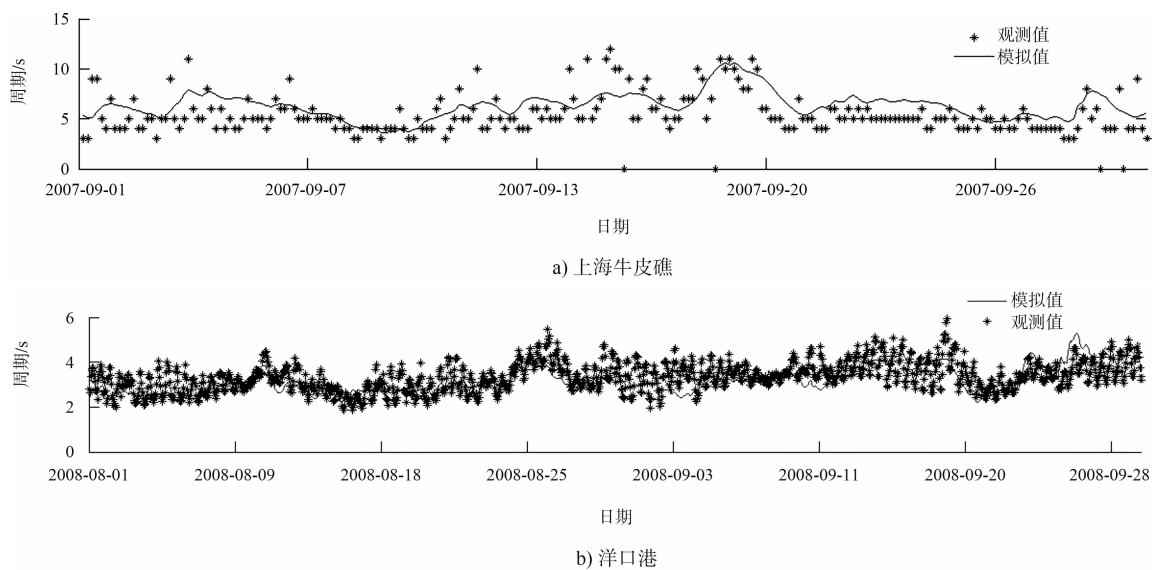


图3 测站波高模拟值与观测值比较



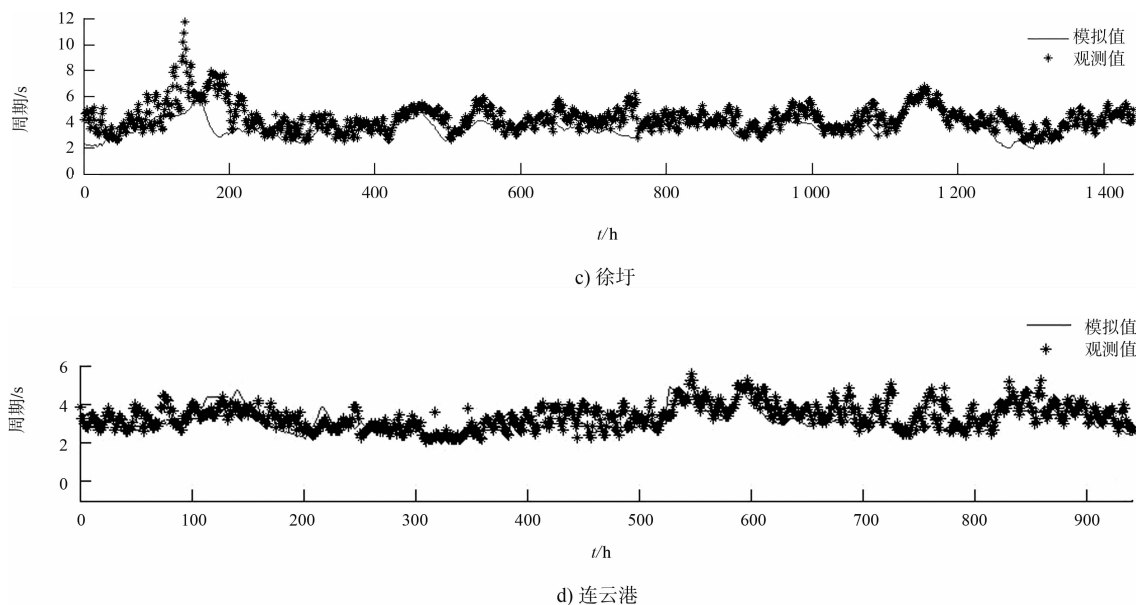


图 4 测站周期模拟值与观测值比较

### 3 结果分析

为了了解江苏海域波浪分布特征情况, 对江苏海域年平均有效波高和周期进行统计 (图 5)。从图 5 中可以看出, 江苏海域年平均波高分布趋势为由东南往西北依次递减, 其最大值为 1.5 m 左右。对于波周期而言, 年平均周期的分布趋势与波高分布趋势相同, 最大值为 4.5 s 左右。

由于波浪具有地域性和季节性等特点, 为了了解春、夏、秋、冬四季江苏海域的波浪分布情况, 本文对江苏海域的 4 个季节的平均波高进行了统计, 其具体分布情况见图 6。从图 6 可以看出, 4 个季节的平均有效波高分布趋势相近, 但最大值存在着一定的差异, 4 个季节中, 最大的是冬季, 平均波高最大值达到 1.7 m, 其次是春季和秋季, 夏季最小, 平均波高的最大值只有 1.3 m 左右。图 7 显示了江苏海域春、夏、秋、冬四季的平均周期分布情况, 从图 7 可以看出这 4 个季节的波周期分布趋势基本相同也是呈现由南往北依次递减的趋势。就周期而言, 最大周期值相差不多, 冬季周期最大为 4.9 s, 其次是秋季, 最大值为 4.8 s, 而春季和夏季周期较小, 其最大值为 4.6 s 左右。为了研究波高在各个月份的分布情况, 选取了连云港、滨海、大丰和洋口港 10 m 水深处的月平均波高进行了统计 (图 8)。从图 8 可

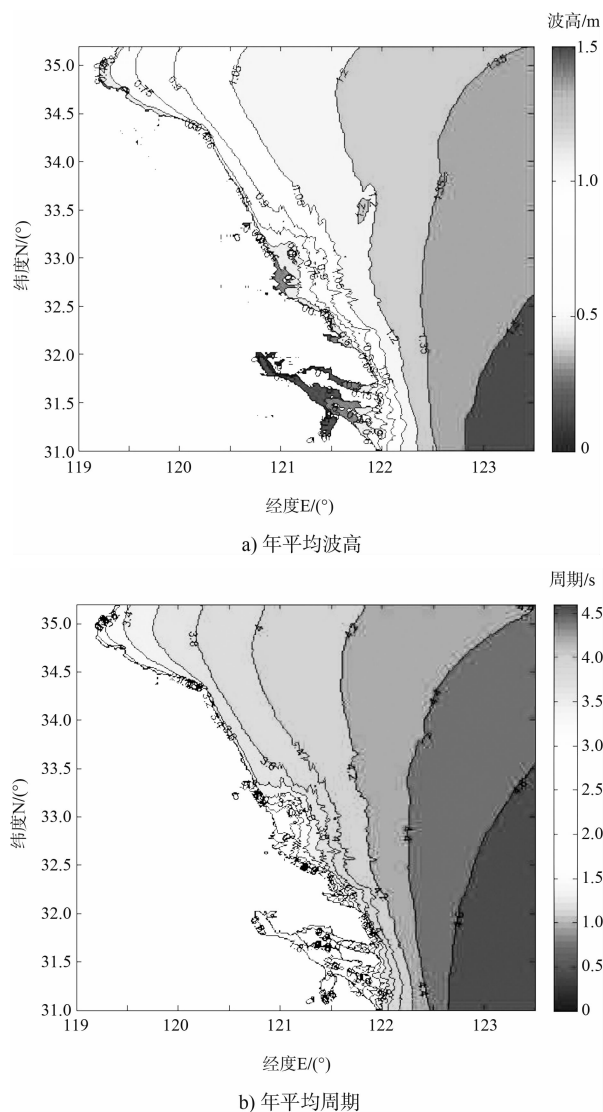


图 5 江苏海域年平均波高和周期分布

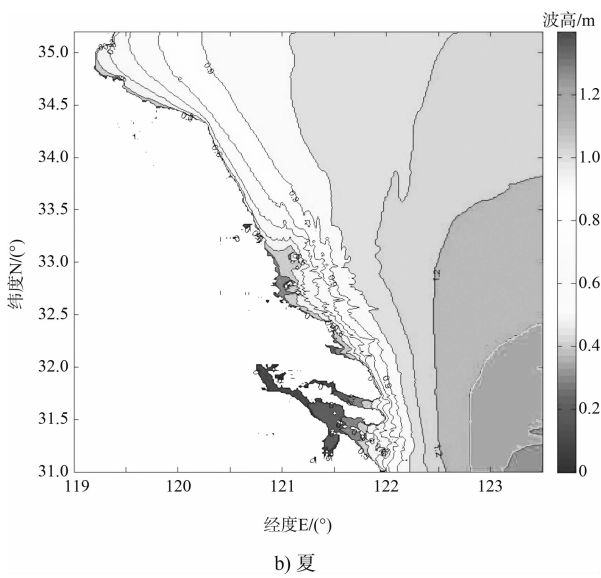
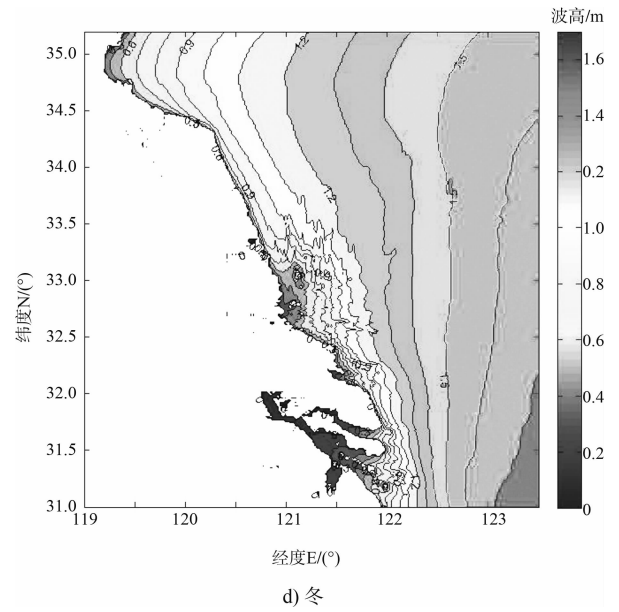
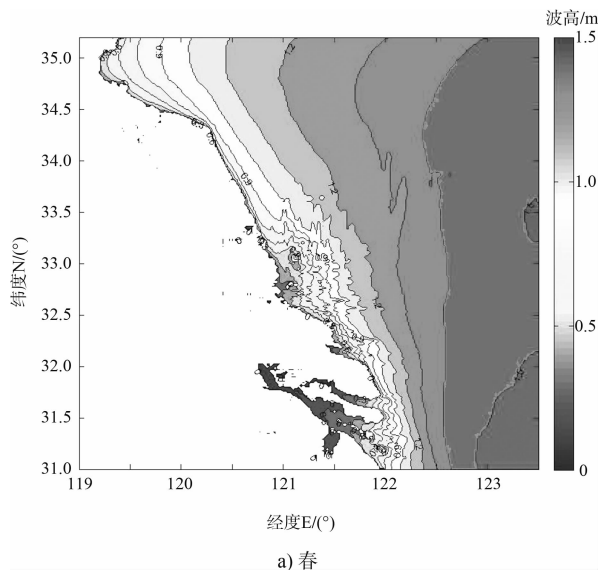
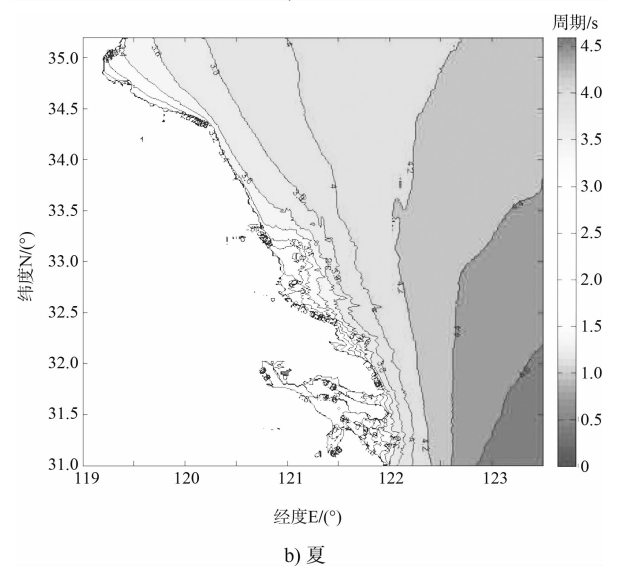
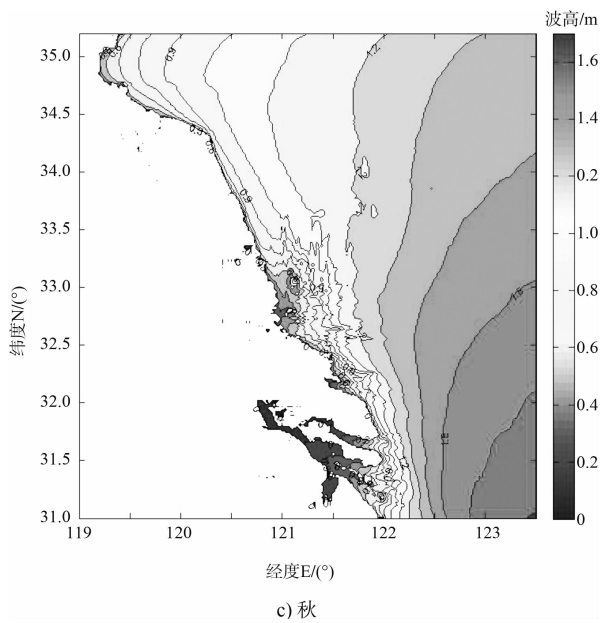
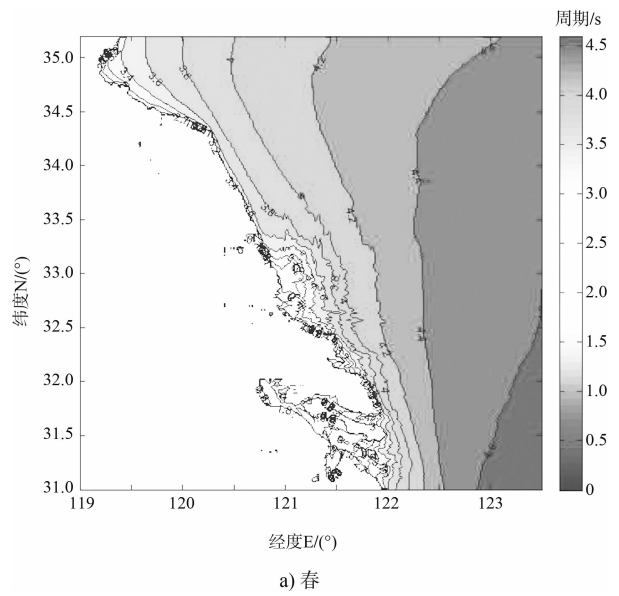


图6 江苏海域四季平均波高分布



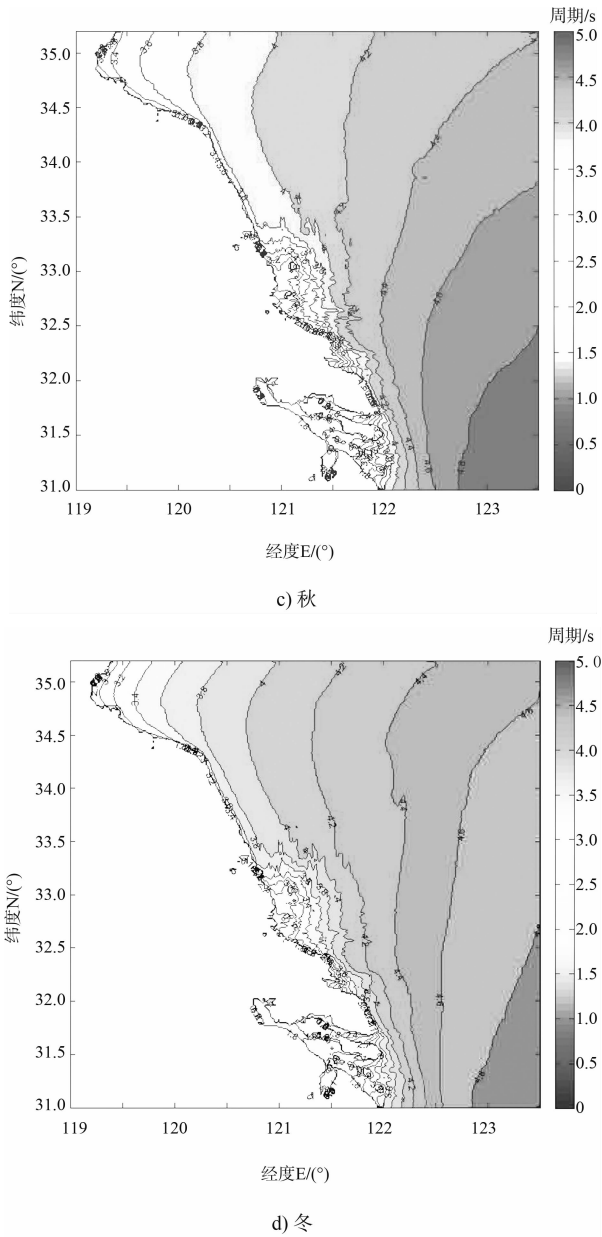


图 7 江苏海域四季平均周期分布

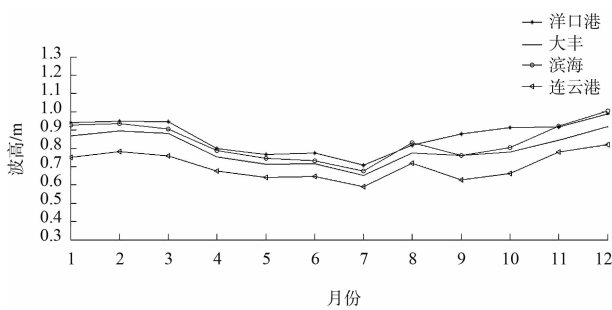
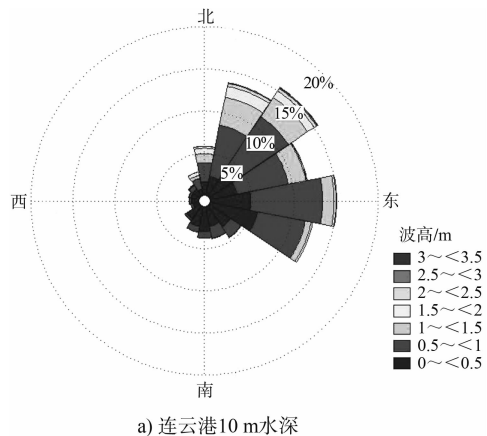


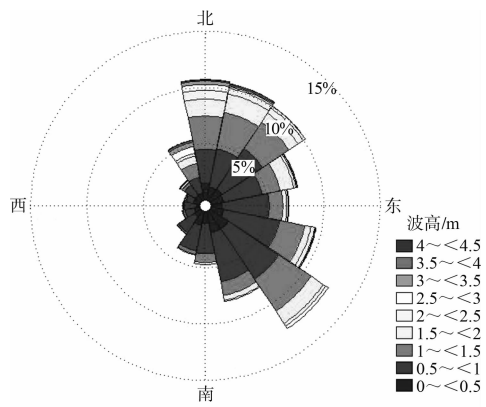
图 8 连云港、大丰和洋口港 10 m 水深处月平均有效波高分布情况

可以看出这 4 个区域的月平均波高变化趋势一致, 其较大值都出现在 3 月、8 月、11 月和 12 月份,

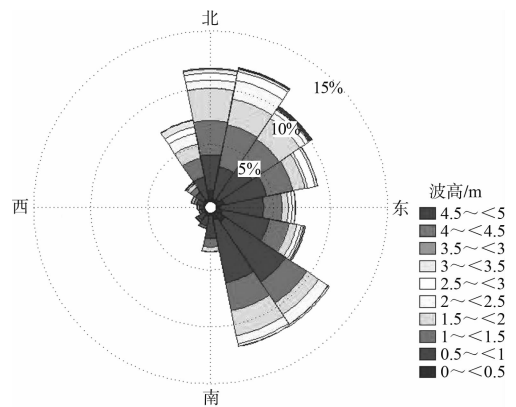
其平均波高最大能达到 1.0 m 左右, 周期最大值能达到 4 s 左右。整体而言, 以 4—7 月为主的夏季, 其平均有效波高和周期都相对其它季节较小, 这主要是由于夏季浪以 S 向浪入射为主, 受到地形作用的影响, 故这几个月份波高和周期都相对较小。总体而言, 冬季的平均有效波高和周期最大, 这主要由于冬季寒潮作用时间相对较长, 且频次较多, 除了徐圩和连云港地区外, 其他地方受到的北边岸线掩护作用的影响相对较小, 风浪也能充分成长, 故波浪相对较大。夏季虽然受到台风的影响, 但由于江苏岸线整体的趋势为向西北方向倾斜, 故夏季 S 向来浪由于受到辐射沙脊以及地形的掩护作用, 故波浪相对较小。图 9 分别是连云港、大丰和洋口港这 3 个地区 10 m 和 25 m 水深处的波浪玫瑰图。从图 9 可以看出, 10 m 水深处, 由于受到水深地形的影响, 地域性比较明显, 但波浪在各个方向上的分量大体相近, 这 3 个地区的常浪向都为 NE ~ NNE 向, 对于次常浪向, 连云港为 E 向, 大丰和洋口港为 SE 方向, 该 3 处强浪向都为 NE 向。水深 25 m 时, 这 3 个地区常浪向为 SE 和 NE 向, 这主要是由于江苏海域常年的作用风向为 SE 和 NE 向。连云港、大丰地区 25 m 水深处年最大波高为 4.5 m 左右, 洋口港为 5 m 左右。整体而言, 江苏海域夏天以 SE 方向入射浪为主, 这主要是由于江苏海域在夏季受到以 SE 方向为主导的季风作用, 冬季以 NE 方向为主的风占主要作用地位, 故冬季的浪以 NE 和 NNE 方向为主, 春秋两季由于属于两种风向的交替季节, 故主导方向还是 SE 和 NE 方向。



a) 连云港 10 m 水深

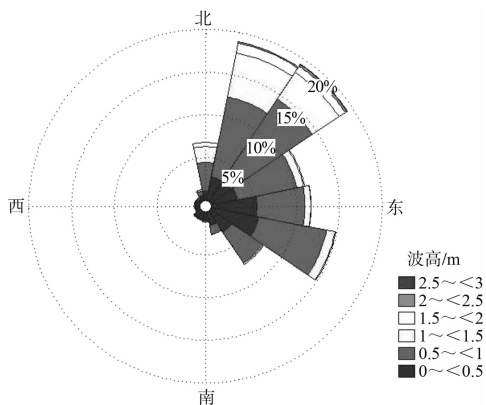


b) 连云港25 m水深

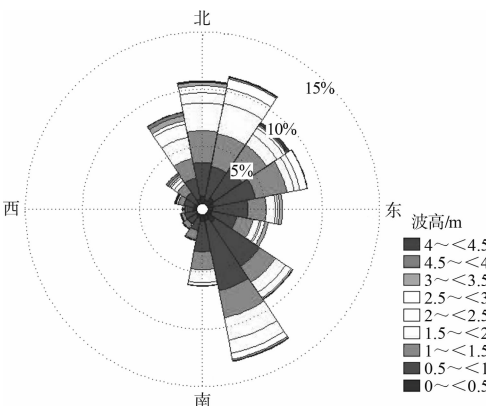


f) 洋口港25 m水深

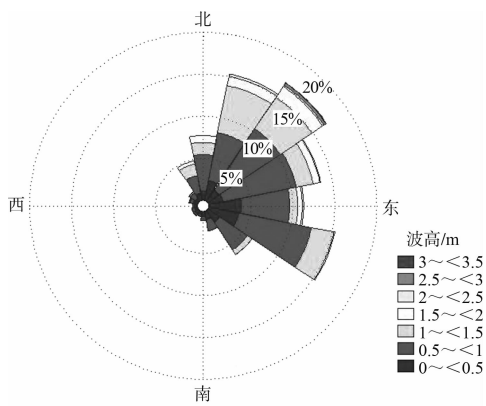
图9 波高玫瑰图



c) 大丰10 m水深



d) 大丰25 m水深



e) 洋口港10 m水深

### 4 结论

通过以上的研究，可以发现江苏海域的波浪分布特征为年平均有效波高由南往北呈依次递减的趋势，其最大年平均有效波高达到 1.5 m 左右，周期为 4.5 s 左右。该海域常浪向为 SE 和 NE 方向，强浪向为 NE-NNE 方向，月平均有效波高最大月份为 9 月份，最小为 4 月份，四季中冬季浪最大，夏季浪最小。

### 参考文献:

- [1] 谢冬梅, 陈永平, 张长宽. 江苏外海深水波要素推算[J]. 海洋工程, 2013(2): 94-99.
- [2] 谢冬梅, 陈永平, 张长宽. 东中国海波浪分布特征研究[J]. 水运工程, 2012(11): 14-21.
- [3] 邱桔斐. 江苏沿海风、浪特征研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [4] 李孟国. 海岸河口水动力数值模拟研究以及对泥沙运动研究的应用[D]. 青岛: 青岛海洋大学, 2002.
- [5] Ris R C, Booij N, Holthuijsen L H. A third-generation wave model for coastal regions[J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(4): 7 667-7 684.
- [6] Radder A C. On the parabolic equation method for water-wave propagation[J]. J Fluid Mech, 1979, 95: 159-176.
- [7] Kim G, Jeong W M, Lee K S. Offshore and nearshore wave energy assessment around the Korean peninsula [J]. Energy, 2011, 36(3): 1 460-1 469.

(本文编辑 武亚庆)