

长江口海域浅水波浪数值模拟的探讨

隋洪波¹, 车助美²

(1. 上海海洋环境预报台, 上海 200081; 2. 浙江省海洋监测预报中心, 浙江 杭州 310012)

摘 要: 本文应用中国海洋大学研制开发的“二维浅水海浪谱数值模式”, 选择东向入射波进行了口门及航道内较具代表性的 5 个点的模拟。初步分析了该数值模式在复杂地形、径流等环境条件下的表述性和敏感性, 为“二维海浪谱数值模式”在长江口海域的应用做一些探讨性工作。

关键词: 长江口; 波浪; 数值模式

中图分类号: P731 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003 - 0239 (2004) 02 - 0014 - 07

1 引言

实际波浪观测中几乎不可能获得高时空分辨率的观测资料。特别在长江口海域, 由于冲淤演变、海陆相互作用、海岸及航道工程等诸多因素的影响, 往往导致波浪场本底环境的变化^[1]。故波浪的分布亦具有局地性较强的特征。如依靠多布点的现场观测不仅在经济效益上不可取, 而且实际操作很难实行。因此, 进行数值模拟配以少数实测点的验证, 以求得大面积高时空分辨率的波浪场分布则是现行的有效途径之一。

本文利用长江口海域长期连续观测站和临时观测站资料以及历史天气图, 应用中国海洋大学研制开发的“二维海浪谱数值模式”^[2], 考虑在自然水底地形下局地风场、流场、水位和水底摩擦的影响, 探讨波浪从长江口外向长江口内传输过程中的一些变化。为工程设计、航运管理、环境保护等工作提供基础的波浪要素数据。

2 概况

依据长江口海区 4 个长期测站 1985~1999 年的资料分析。

海区受亚热带季风气候控制, 全年常风向为 NNE, 最少风向为 W-WSW (见图 1)。风的季节变化明显, 冬季盛行偏北风, NW-NE 向风的频率达 50% 左右; 夏季盛行偏南风, S-SE 向风的频率达 40% 左右; 春秋为过渡期, 偏北风和偏南风出现的比例比较接近 (见图 2)。

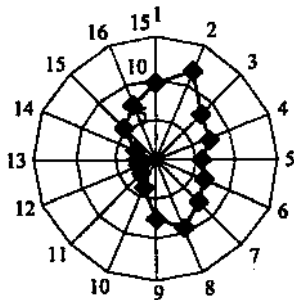


图 1 全年累年风向频率

收稿日期: 2003-12-05; 修订日期: 2004-03-15.

作者简介: 隋洪波 (1961-), 男, 高工, 硕士研究生。长期从事海洋预报和海洋工程环境影响评价工作。

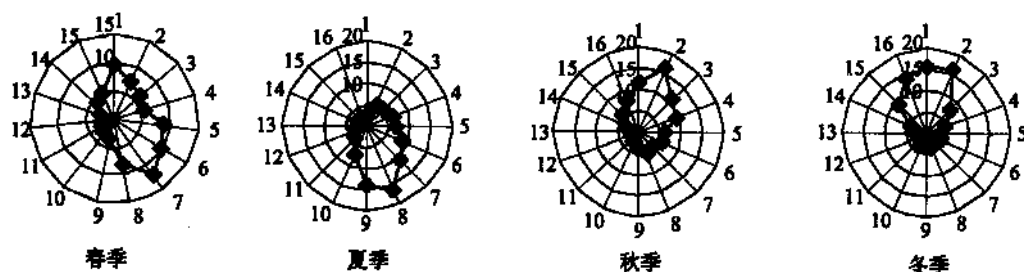


图2 各季累年风向频率

年平均风速在 $5.4 \sim 6.7 \text{ m/s}$ 之间, 平均约 6.1 m/s 。各月的平均风速比较接近, 但在各方向上长江口海区平均风速的差异则较明显, 以 NW-NNW 向的平均风速为最大, 风速在 $7 \sim 8 \text{ m/s}$ 左右, SW-WSW 向的平均风速最小, 在 4 m/s 左右 (见图3)。长江口海区经常遭受热带气旋、寒潮大风、温带气旋等的侵袭, 其年极值风速往往由台风造成, 年极值风速可达 30 m/s 左右。

其水文特征因受到长江口河口特征的影响, 为正规半日潮向非正规半日潮的过渡区, 潮汐潮流一定程度上存在非对称性的日不等现象。其中涨落潮流呈明显的往复流特征, 涨、落潮流的变化对波浪有明显的影响。

长江口内的累年平均波高为 0.7 m , 略小于长江外 (见图4), 口内各站各月平均波高有明显差异, 大戢山月平均波高最大值和最小值, 可差 0.5 m , 而引水船站差 0.1 m , 各站最大波高的最大值也不同, 大戢山为 8.0 m , 引水船缺少大浪资料, 位于杭州湾的滩浒站仅为 4.0 m , 可见各站波浪特征的差异是十分明显的。

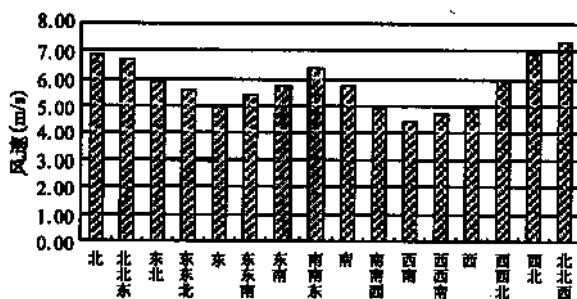


图3 全年各向风速平均

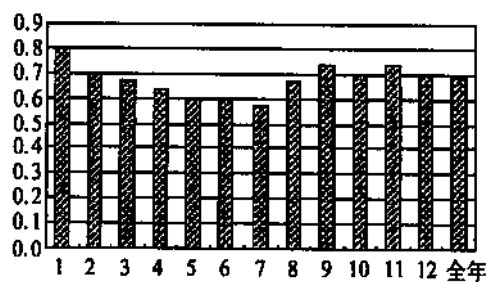


图4 各月平均波高

长江口海域沙滩众多, 水动力环境较为复杂, 再加上局地风等因素的影响, 使得长江口外的波浪在向口内传播过程中, 波要素的变化相当复杂, 加上各测站地形、测波点朝向和测站所在水域的水深、地形不同, 测得的波要素也存在明显的差异。其波浪分布冬季以偏北向为主, 夏季以偏南向为主。常年都有风浪存在, 其中风浪及以风浪为主的混合浪出现频率在七成以上。

因长江口海区基本上是一个半封闭的水域, 在这种水域里可以形成多种周期的振动, 如周期为几秒到十几、二十几秒的风浪和涌浪, 十几秒到几十秒的波群、拍、内振和共

振,以及几分钟到几十分钟的假潮等等。理论上,风浪、涌浪的周期范围可以从0秒一直到二十几秒,从相关的统计结果来看,长江口海域周期的变化较为规律。绝大部分的周期都在9.0s以下,出现频率在99%以上,周期大于9s的波浪是存在的,但出现机率很小(见图5)。

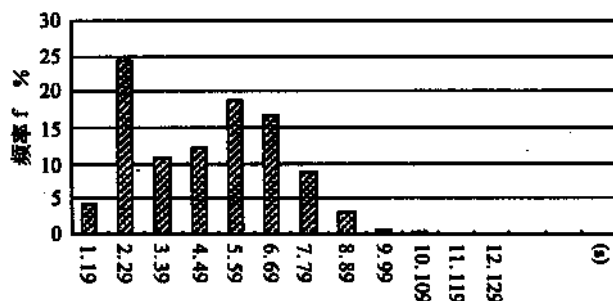


图5 波周期频率分布

3 数值模拟

对于长江口海区此类地形、地貌复杂,浅滩众多径流影响显著的区域,利用海浪数值模式进行大面积的波浪计算得出其分布,用原有的测点和个别临时测点来验证。并通过对数值模式输出进行适当订正,是一种相当经济适用和科学的方法。

本文采用由青岛海洋大学文圣常等在国家“七五”攻关中研制的“新型混合型海浪数值模式”进行长江口外水深大于20m处的准深水海浪的数值后报结果^[3]。利用海区内测站的风、浪观测资料,将入射波的方向做适当的微调,作为由“准深水区”向长江口区推算波浪演变的初始值。

3.1 二维浅水海浪谱数值模式

简述黄河口应用效果理想的“二维浅水海浪谱数值模式”^[2-3]。

考虑流的作用的二维海浪谱模式的控制方程为:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot [(\vec{C}_g + \vec{v})N] + \frac{\partial}{\partial \theta}(C_\theta N) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(C_\sigma N) = \frac{G}{\sigma}$$

其中 N 为波作用量密度,与海浪谱 $F(\sigma, \theta)$ 的关系为 $N = \frac{F}{\sigma}$; \vec{C}_g 为群速度; \vec{v} 为流速; \vec{C}_θ 为方向空间中的群速度,代表深度变化及流场变化产生的折射作用; C_σ 为频率空间的群速度,代表非定常水深和流场的变化导致海浪能量在频率空间的再分配; G 为源函数,代表风的作用、波-波相互作用、波浪破碎和底摩擦的作用。所有考虑流的作用的二维海浪谱模式的控制方程都为上述方程的形式,所不同的是对源函数 G 的处理方式不同。在本文采用的模式中,风浪源函数是由可靠的海浪方向谱和浅水风浪成长关系来确定的,它代表了风的能量输入、波-波相互作用、波浪破碎和底摩擦的综合作用。涌浪源函数则考虑了底摩擦和涡动粘性引起的能量消耗,其中在浅水以底摩擦的作用为主,在深水以涡动粘性为主。由于上述方程所代表的二维海浪谱模式不包含绕射效应和反射作用对浪场的影响,这是该方程用于描述近岸地形复杂区域的海浪所固有的不足之处。

计算中的有关参数为:频段为24个;方向划为24个方位;计算空间点为121×71;时间步长为 $\Delta t = 15s$;积分时间为4hC1,计算结果达到定常;底摩擦系数 C_b 取为:

0.038m2s-3。计算输出结果为每个格点上的有效波高 H_s 和平均周期 $\overline{T} = 2\pi(\frac{m_0}{m_2})^{\frac{1}{2}}$ ，其中 m_0 和 m_2 分别为海浪谱的零阶矩和二阶矩，经插值得到各计算点处的有效波高和平均周期。

3.2 波浪传播数值实验

长江口水域范围达数十里，局地风场的作用不可忽略，基于能量平衡的谱传输方程能够描述在一定风场下浪场的时空演变过程。应用中国海洋大学研制开发的考虑了风的作用，波 - 波相互作用，底摩擦，波浪破碎，流场作用和折射效应对浪场影响的“二维海浪谱数值模式”做波浪传播数值实验。依据初始波高和对应的周期结果，考察在自然水底地形下局地风场、流场、水位和水底摩擦在长江口外波浪向口内传播过程中对浪场的影响，并给出牛皮礁站及附近数个点的波浪推算要素。

计算区域为 122° ~ 122°30 E, 31°03 ~ 31°20 30 N。图 6 为计算区域示意图，图中标明了 2、5、10、20m 海图水深等深线。计算网格距为 $\Delta x=0.25'$ ， $\Delta y=0.25'$ 。计算区域内的选点共计 5 个，其地理坐标见表 1。

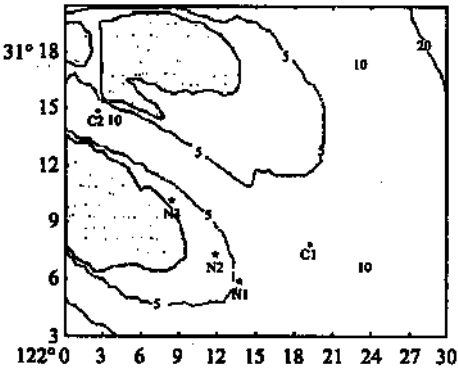


图 6 计算区域示意图

表 1 选点地理坐标

选点编号	经度	纬度
C1	122°18 54.0 E	31°10 30.5 N
N1	122°07 34.2 E	31°09 46.6 N
N2	122°11 32.5 E	31°07 11.7 N
N3	122°13 30.0 E	31°05 54.0 N
C2	122°02 18.7 E	31°14 51.9 N

4 模拟结果分析

本文选出较具代表性的 E 向入射波在无风无流；有风无流；无风有流枯季小潮全涨潮、全落潮；无风有流洪季大潮全落潮、全涨潮；有风有流洪季大潮全落潮、全涨潮^[4~5]等情形的分析。

由表 2 知，无风无流时，C1 点在高水位时的波高比低水位时的波高相差在 2m 左右，而其周期在低水位、小波高时反而偏大。N3、N2 点高水位时的波高差异更大，最大 3m 多，而周期同 C1 点完全相似。

由表 3 知，有风无流时，C1 点高水位和低水位的波高差值小于无风无流时，而周期随着波高的减小也随着减小。

表 2 无风无流

选 点	校核高水位		设计高水位		设计低水位		校核低水位	
	$Hs(m)$	$\bar{T}(s)$	$Hs(m)$	$\bar{T}(s)$	$Hs(m)$	$\bar{T}(s)$	$Hs(m)$	$\bar{T}(s)$
C1	6.68	9.90	6.56	9.90	4.94	10.00	4.44	10.00
N1	3.87	9.90	3.23	9.90	0.98	9.54	0.51	7.94
N2	5.00	9.90	4.62	9.90	2.42	10.00	1.92	10.00
N3	5.30	9.90	5.10	9.90	3.30	10.00	2.80	10.00
C2	1.86	9.58	1.31	9.26	0.60	4.25	0.56	4.14

表 3 有风无流

选 点	校核高水位		设计高水位		设计低水位		校核低水位	
	$Hs(m)$	$\bar{T}(s)$	$Hs(m)$	$\bar{T}(s)$	$Hs(m)$	$\bar{T}(s)$	$Hs(m)$	$\bar{T}(s)$
C1	5.80	8.90	5.70	8.82	5.06	8.78	4.56	8.68
N1	3.61	8.09	3.10	7.78	0.97	6.04	0.49	7.26
N2	4.70	8.59	4.40	8.49	2.42	7.82	1.92	7.53
N3	5.20	8.70	5.00	8.70	3.30	8.20	2.80	8.00
C2	2.26	6.08	2.10	5.82	1.61	5.14	1.57	4.96

由以上的分析可知，在无流时，同一水位情况下，有风时的推算波高，而其相应的波周期有风小于无风。此点可由有风时为混合浪，无风时为涌浪，作为合理解释，由此证明在 C1、N3、N2 三点的模式计算值合理。

无风无流情形，C1、N3、N2 三点的低水位时的小波高周期大于高水位时的大波高周期，而有风无流则高水位大波高大周期，低水位小波高小周期。此点差异可由此三点的的海底地形作出合理解释。由于东向波与此三点的等深线近于垂直，其所处地形变化平缓，底质为沉积泥沙。波浪在此地形地质条件下的爬波一般不易破碎，只有在干湿边界或水工建筑物附近才有破碎出现。因此，在低水位时波浪在浅水缓坡中的传播所产生的爬波效应要大于高水位。由此出现低水位波周期大于高水位的波周期，由此点证明模式的敏感合理性。

由图 5 知，C2 点位于航道内，由于航道的约束，且航道的轴向和东向浪近乎平行，波浪的折射率影响小，一般只考虑底摩擦的原因。由表 2 知，虽然波高的衰减在 70% 左右，周期减小 50% 左右，但其波高、周期的分布合理，模式对航道内部的计算点在所选条件下计算可信。

由表 4、5 知，枯季小潮无风有流全涨全落时，C1、N1、N2 三点落潮时(逆流)的波高大于涨潮(顺流)的波高，可知流对波高有影响，但并不显著。同无风无流情形，C1、N3、N2 三点低水位时的小波高周期大于高水位时的大波高周期，枯季小潮无风有流全涨全落也有此现象。N1、C2 点与 4.1 的情形相同。

表 4 无风有流枯季小潮全涨潮

选 点	校核高水位		设计高水位		设计低水位		校核低水位	
	$Hs(m)$	$\bar{T}(s)$	$Hs(m)$	$\bar{T}(s)$	$Hs(m)$	$\bar{T}(s)$	$Hs(m)$	$\bar{T}(s)$
C1	6.40	9.90	6.28	9.88	4.66	10.00	4.22	10.00
N1	3.57	10.00	3.07	10.00	0.97	9.45	0.51	7.72
N2	4.99	9.90	4.62	9.90	2.42	10.00	1.92	10.00
N3	5.50	9.80	5.30	9.80	3.30	10.00	2.80	10.00
C2	1.80	9.74	1.24	9.41	0.59	4.25	0.56	4.08

表 5 无风有流枯季小潮全落潮

选 点	校核高水位		设计高水位		设计低水位		校核低水位	
	$Hs(m)$	$\bar{T}(s)$	$Hs(m)$	$\bar{T}(s)$	$Hs(m)$	$\bar{T}(s)$	$Hs(m)$	$\bar{T}(s)$
C1	6.82	9.90	6.72	9.90	5.10	10.00	4.60	10.00
N1	3.87	10.00	3.22	9.97	0.97	9.45	0.51	7.77
N2	5.01	9.99	4.62	9.99	2.42	10.00	1.92	10.00
N3	5.00	9.90	4.80	9.90	3.20	10.00	2.70	10.00
C2	1.76	9.58	1.24	9.26	0.61	4.11	0.58	3.95

由表 6、7 知，枯季大潮无风有流全涨全落时，虽然是大潮，但由于是大潮，流对波高的影响明显大于小潮。由涨落潮时的波高差可知，流的影响非常明显。如 N3 点的波高差为 1m，在 25%左右。而周期的变化主要还是取决于地形、底质，流的影响尚没看出。

表 6 无风有流枯季大潮全落潮

选 点	校核高水位		设计高水位		设计低水位		校核低水位	
	$Hs(m)$	$\bar{T}(s)$	$Hs(m)$	$\bar{T}(s)$	$Hs(m)$	$\bar{T}(s)$	$Hs(m)$	$\bar{T}(s)$
C1	6.74	9.92	6.66	9.90	5.10	10.00	4.58	10.00
N1	3.80	10.00	3.23	10.00	0.98	9.23	0.51	7.38
N2	4.62	10.00	4.33	10.00	2.42	10.00	1.92	10.00
N3	4.90	10.00	4.80	9.90	3.20	10.00	2.70	10.00
C2	1.68	9.61	1.28	9.34	0.65	3.85	0.61	3.75

表 7 无风有流枯季大潮全涨潮

选 点	校核高水位		设计高水位		设计低水位		校核低水位	
	$Hs(m)$	$\bar{T}(s)$	$Hs(m)$	$\bar{T}(s)$	$Hs(m)$	$\bar{T}(s)$	$Hs(m)$	$\bar{T}(s)$
C1	6.43	9.92	6.33	9.92	4.74	10.00	4.25	10.00
N1	3.78	10.00	3.20	10.00	0.97	9.25	0.51	7.47
N2	4.59	9.89	4.28	9.89	2.42	10.00	1.92	9.99
N3	3.90	9.90	3.80	10.00	2.60	10.00	2.20	10.00
C2	2.00	9.58	1.45	9.38	0.63	4.19	0.58	3.99

由表 8、9 知，洪季大潮有风有流全涨全落时，涨、落潮时的波高、周期没有大的变化，洪季大潮所产生的强流并没有使波高、周期要素有相对大的变化。

表 8 有风有流洪季大潮全落潮

选点	校核高水位		设计高水位		设计低水位		校核低水位	
	$Hs(m)$	$\bar{T}(s)$	$Hs(m)$	$\bar{T}(s)$	$Hs(m)$	$\bar{T}(s)$	$Hs(m)$	$\bar{T}(s)$
C1	5.64	8.86	5.54	8.78	4.86	8.68	4.43	8.57
N1	3.20	7.13	2.71	6.81	0.97	4.95	0.50	5.17
N2	3.81	7.62	3.59	7.52	2.40	7.02	1.92	6.74
N3	4.70	8.20	4.50	8.10	3.30	7.70	2.80	7.50
C2	2.44	5.91	2.28	5.66	1.81	5.10	1.72	4.94

表 9 有风有流洪季大潮全涨潮

选点	校核高水位		设计高水位		设计低水位		校核低水位	
	$Hs(m)$	$\bar{T}(s)$	$Hs(m)$	$\bar{T}(s)$	$Hs(m)$	$\bar{T}(s)$	$Hs(m)$	$\bar{T}(s)$
C1	5.60	8.88	5.50	8.82	4.86	8.78	4.46	8.68
N1	3.61	7.68	3.09	7.36	0.97	5.50	0.51	5.83
N2	4.22	8.30	3.92	8.19	2.42	7.62	1.92	7.33
N3	4.80	8.50	4.60	8.50	3.30	8.10	2.80	7.90
C2	2.21	5.88	2.08	5.70	1.66	5.14	1.62	4.97

5 结论

(1) 本文所选用的“二维海浪谱模式”在航道内的计算合理可信。其中 C2 点的结果最为理想。

(2) 无风时的波浪周期一般大于有风时的波浪周期，低水位时的小波高周期大于高水位时的大波高的周期。

(3) 低水位时流的影响明显大于高水位。

(4) 在此特定地理、地形和底质情形下，地形和底质的影响远远大于流的影响。

(5) 局地小地形的细致描述在计算中是极其重要的。

参考文献：

[1] 文圣常, 余宙文. 海浪理论与计算原理 [M]. 科学出版社 1984.

[2] 中华人民共和国交通部. 海港水文规范 [S]. 人民交通出版社, 1998.

[3] 文圣常,等. 基于选定风浪方向谱的海浪模拟方法(英文) [J]. 青岛海洋大学学报, 1999 ,29(3) 345~397.

[4] Wu Huiding Ji Xiaoyang and Yang Chuencheng, An experimental numerical prediction of macrotide winds , Collected Oceanic Works , 1982,5 (2): 209~235.

[5] 青岛海洋大学. 海浪数值预报研究技术报告. 1990.