

渤海天文 - 风暴潮数值模拟和一种多年一遇极值水位的计算方法

于宜法¹, 俞聿修¹

(1. 大连理工大学 海岸及近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 在渤海选用了 82 个强天气过程, 利用三维模式模拟了海区的天文-风暴潮. 模式经实测资料检验, 获得了较满意的模拟结果. 根据渤海沿岸主要验潮站观测年极值高(低)水位和年极值风增(减)水所得到的多年一遇高(低)水位和多年一遇风增(减)水, 以及天文最高(最低)潮位, 建立了由多年一遇风增(减)水和天文最高(最低)潮位的线性组合计算多年一遇高(低)水位的计算公式, 并以此公式推算了渤海海区 5 个典型地区的多年一遇高(低)水位, 供海洋工程设计时使用.

关键词: 渤海; 天文-风暴潮; 数值模拟; 线性组合公式; 多年一遇极值水位

中图分类号: P731.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4193(2003)04-0010-08

1 引言

随着海洋开发事业迅猛发展, 有限的海洋观测资料已远远不能满足需求, 海洋要素的数值模拟成为提供海洋开发利用所需资料的有效手段. 实际海洋中的水位-流场是天文潮、风暴潮及其之间非线性相互作用的结果. 当人们对渤海水位-流场进行数值模拟时, 首先要对海区上空的风场做出推算. 海洋工程设计中所需的多年一遇极值高、低水位的推算, 要求至少连续 20 a 以上的年极值高、低水位值, 可是人们不可能去做连续 20 a 以上的数值模拟, 比较可行的是选择强天气过程(寒潮、台风等)作出逐时风场, 然后对相应的水位-流场进行模拟. 但是这种方法并不能保证所选择这些强天气过程中出现的最高、最低水位就是实际的年最高、最低水位, 因为实际年最高、最低水位不仅与强天气过程引发的风暴潮有关, 还与天文潮的大小以及天文潮与风暴潮之间的非线性相互作用有关. 尽管如此, 有一点是可以肯定的: 年最高、最低风暴潮位一定是由强天气过程引发的. 另外, 天文潮的推算可由主要分潮的调和常数求得. 本文将根据风暴潮的年极高、极低风暴潮位与天文潮的最高、最低潮位给出一种多年一遇极值高、低水位的计算方法, 以提供海洋工程设计中所需的参数.

收稿日期: 2003-03-03; 修订日期: 2003-03-30.

作者简介: 于宜法(1953-), 男, 山东省文登市人, 教授, 从事物理海洋研究. Email: yfyu@mail.ouc.edu.cn

2 水位-流场的三维模式

实际海洋中的水位-流场是天文潮、风暴潮及其之间相互作用的结果. 由于渤海是内陆浅海, 平均水深仅 20 余米, 冬季和夏季在寒潮和台风作用下, 上下层的海水混合较充分, 海水接近铅直均匀, 可将渤海海水视为正压流体. 另外, 渤海水深分布并不均匀, 在渤海海峡处水较深, 而在近岸水域又很浅, 因而在数值模拟的分层计算中可能带来不便. 鉴于此, 我们选择 x, y, σ 坐标下的正压三维非线性模式, 这不仅考虑了渤海的实际, 还使分层计算变得简单. 具体的方程为

$$\frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} + \frac{\partial(Hw^*)}{\partial \sigma} + \frac{\partial \zeta}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w^* \frac{\partial u}{\partial \sigma} - fv = \\ -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} (A_x \frac{\partial u}{\partial \sigma}) + A_l (\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w^* \frac{\partial v}{\partial \sigma} + fu = \\ -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} (A_x \frac{\partial v}{\partial \sigma}) + A_l (\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}), \end{aligned} \quad (3)$$

$$w^* = \frac{1}{H} [w + (1 - \sigma)(u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y}) - \sigma (\frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y})]. \quad (4)$$

海面和海底运动学边界条件

$$w^* = 0, \quad (\text{海面 } \sigma = 1, \text{海底 } \sigma = 0) \quad (5)$$

海面动力学边界条件

$$\frac{\rho A_x}{H} \frac{\partial(u, v)}{\partial \sigma} = (\tau_x, \tau_y), \quad (\text{海面 } \sigma = 1) \quad (6)$$

海底动力学边界条件

$$\frac{\rho A_x}{H} \frac{\partial(u, v)}{\partial \sigma} = C_b (u_b^2 + v_b^2)^{1/2} (u_b, v_b), \quad (\text{近底 } \sigma = \sigma_b) \quad (7)$$

在计算中 w^* 由下式确定

$$w^*(\sigma) = -\frac{1}{H} [\sigma w'(1) - w'(\sigma)], \quad (8)$$

其中,

$$w'(\sigma) = \frac{\partial}{\partial x} (H \int_0^\sigma u d\sigma) - \frac{\partial}{\partial y} (H \int_0^\sigma v d\sigma), \quad (9)$$

而 ζ 由 w' 在 $\sigma = 1$ (海面) 处的值直接算出

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = w'(1), \quad (10)$$

其中, $\sigma = \frac{h+z}{h+\zeta}$, h 为水深, ζ 为相对静止水面的扰动, $H = h + \zeta$. 海面风应力 (τ_x, τ_y) 由海面风场 W 算出

$$(\tau_x, \tau_y) = C_D (\rho_a / \rho) W (W_x, W_y), \quad (11)$$

其中, ρ_a 为空气密度, $\rho_a/\rho = 1.15 \times 10^{-3}$, (W_x, W_y) 为风速的 x, y 分量, C_D 为海面拖曳系数.

$$C_D = \left[\frac{0.4}{14.56 - 2 \ln W} \right]^2. \quad (12)$$

利用上述三维非线性方程模拟渤海水位-流场时, 需要给出海域水界处的边界条件, 以及计算海域的初始条件. 为此, 先进行较大区域的数值模拟, 然后取与小区水界重合处的模拟结果作为小区的边界条件值. 初始条件取提前 48 h 模拟大区所得最后时刻的结果.

3 风场计算

渤海海区缺少长期的实测风速资料, 因此, 选取了表 1 列出的 1970~1993 年间的 82 个大风天气过程, 收集了这些过程的历史海面气压场和天气图资料, 然后用数值后报方法计算出海面风场. 这些天气过程的风场可分为两类: 一类是一般大风风场(包括寒潮风场), 另一类是台风风场.

(1) 一般大风风场: 首先向电脑输入天气过程的气压等值线, 由等值线分布计算出“地转风”, 然后用二层诊断模式和行星边界层动力学模式计算成海面风场.

(2) 台风风场: 首先按一般大风风场的思路求出海面风场, 由于这样得到的风场不足以描述气旋结构, 因此按台风的位置要嵌套一个“台风风场模型”, 将台风模型风场依照空间某地点至台风中心的距离按线性权重关系, 嵌入到环境风场中.

(3) 利用沿岸测风资料对计算风场订正: 以上算得的一般大风风场和台风风场未能体现沿岸地形对其的重大影响, 因此需利用沿岸观测资料对其做优化订正.

表 1 天气过程起讫时间

序号	起讫时间	序号	起讫时间
1	1970-01-01-14:00~1970-01-03-08:00	20	1974-12-01-14:00~1974-12-03-14:00
2	1970-04-13-08:00~1970-04-15-14:00	21	1975-04-08-20:00~1975-04-10-14:00
3	1970-10-23-14:00~1970-10-26-14:00	22	1975-05-03-20:00~1975-05-05-14:00
4	1971-02-15-14:00~1971-02-17-08:00	23	1975-05-14-02:00~1975-05-15-14:00
5	1971-03-01-02:00~1971-03-03-14:00	24	1976-05-14-02:00~1976-05-15-14:00
6	1971-05-10-02:00~1971-05-11-14:00	25	1976-10-29-08:00~1976-10-30-20:00
7	1971-06-25-14:00~1971-06-27-08:00	26	1976-12-17-14:00~1976-12-19-14:00
8	1972-01-22-02:00~1972-01-23-20:00	27	1977-04-10-02:00~1977-04-11-14:00
9	1972-04-02-02:00~1972-04-03-14:00	28	1977-09-10-02:00~1977-09-12-14:00
10	1972-07-26-02:00~1972-07-27-14:00	29	1977-10-27-08:00~1977-10-30-08:00
11	1972-09-01-14:00~1972-09-02-20:00	30	1977-11-06-02:00~1977-11-08-08:00
12	1973-01-22-20:00~1973-01-25-08:00	31	1977-12-09-02:00~1977-12-11-02:00
13	1973-04-18-02:00~1973-04-19-14:00	32	1978-04-13-02:00~1978-04-15-14:00
14	1973-04-23-02:00~1973-04-24-14:00	33	1978-10-26-02:00~1978-10-28-14:00
15	1973-05-04-08:00~1973-05-08-02:00	34	1979-01-09-14:00~1979-01-11-20:00
16	1973-07-19-02:00~1973-07-20-08:00	35	1979-01-26-14:00~1979-01-31-02:00
17	1974-04-02-02:00~1974-04-03-14:00	36	1979-02-20-14:00~1979-02-23-14:00
18	1974-08-28-20:00~1974-08-31-02:00	37	1979-03-18-02:00~1979-03-19-14:00
19	1974-11-07-14:00~1974-11-09-20:00	38	1979-04-06-08:00~1979-04-08-08:00

续表 1

序号	起讫时间	序号	起讫时间
39	1980-03-08-08:00~1980-03-10-08:00	61	1987-02-16-20:00~1987-02-18-14:00
40	1980-04-04-02:00~1980-04-06-14:00	62	1987-09-04-02:00~1987-09-05-20:00
41	1980-04-11-14:00~1980-04-14-02:00	63	1987-10-29-02:00~1987-10-01-02:00
42	1980-05-25-02:00~1980-05-28-02:00	64	1987-11-25-02:00~1987-11-29-02:00
43	1981-01-01-02:00~1981-01-03-02:00	65	1988-02-26-08:00~1988-02-28-02:00
44	1981-01-14-02:00~1981-01-16-02:00	66	1988-03-13-08:00~1988-03-16-02:00
45	1981-05-05-02:00~1981-05-07-14:00	67	1988-08-26-08:00~1988-08-28-02:00
46	1981-09-26-14:00~1981-09-28-02:00	68	1989-01-09-14:00~1989-01-12-20:00
47	1982-03-22-14:00~1982-03-24-08:00	69	1989-03-02-02:00~1989-03-04-20:00
48	1982-05-11-08:00~1982-05-13-14:00	70	1989-10-30-02:00~1989-10-31-20:00
49	1983-02-01-02:00~1983-02-03-14:00	71	1990-04-11-14:00~1990-04-14-08:00
50	1983-03-22-08:00~1983-03-24-14:00	72	1990-11-29-14:00~1990-11-02-14:00
51	1983-04-25-02:00~1983-04-27-02:00	73	1991-03-18-02:00~1991-03-21-02:00
52	1984-03-29-14:00~1984-03-31-02:00	74	1991-05-24-14:00~1991-05-26-14:00
53	1984-11-17-08:00~1984-11-19-14:00	75	1991-12-23-08:00~1991-12-29-08:00
54	1984-12-02-14:00~1984-12-04-14:00	76	1992-01-13-08:00~1992-01-14-14:00
55	1984-12-14-02:00~1984-12-15-14:00	77	1992-04-16-14:00~1992-04-17-14:00
56	1985-08-19-02:00~1985-08-20-02:00	78	1992-08-31-02:00~1992-08-02-02:00
57	1985-10-15-14:00~1985-10-17-14:00	79	1992-11-18-08:00~1992-11-20-14:00
58	1986-06-26-20:00~1986-06-28-20:00	80	1993-09-26-20:00~1993-09-27-20:00
59	1986-12-13-14:00~1986-12-15-08:00	81	1993-11-05-14:00~1993-11-07-02:00
60	1987-02-11-02:00~1987-02-12-08:00	82	1993-11-15-14:00~1993-11-18-02:00

4 模式的检验与模拟结果

4.1 模拟的检验

4.1.1 天文潮的模拟

在数值模式运转之前,暂时忽略风应力(τ_x, τ_y),获得了纯天文潮的结果.表2列出了渤海沿岸5个验潮站(营口、葫芦岛、秦皇岛、塘沽和龙口)的8个主要分潮的调和常数,以及由模式模拟结果得到的8个主要分潮的调和常数.通过比较可以看出,天文潮的模拟结果是可信的.

图1~3中的虚线是3个测站在5m层观测得到的流速、流向曲线,在观测期间风速较小,因此我们近似地忽略风应力来模拟它们.其结果在图1~3中以实曲线表示.可以看出实测和模拟的结果比较吻合.

4.1.2 天文-风暴潮模拟

本文主要目的是通过对天文-风暴潮的模拟,获得可信的多年一遇风增水、风减水,最后通过它们与天文最高、最低潮组合,给出一种多年一遇极值高、低水位计算方法.为此,我们对表1中的82个强天气过程进行了模拟,获得塘沽附近、秦皇岛附近和龙口附近格点上的风增水(等于模拟值减天文潮高)的年极值和风减水(等于模拟值减天文潮高)的年极值,利用第一型极值分布推算出塘沽、秦皇岛和龙口的多年一遇风增水和风减水.其结果列于表3.在该表

中同时列出了由塘沽、秦皇岛实测资料推算的多年一遇值. 由表可以看出, 模拟结果与实测的结果接近.

表 2 调和常数的计算值与观测值

分潮 常数		营 口		葫 芦 岛		秦 皇 岛		塘 沽		龙 口	
		实测	计算								
M ₂	H/cm	125.9	127	96.1	97	11.0	11	117.2	115	40.0	39
	g/(°)	143.1	141	150.1	152	310.8	310	90.3	94	316.4	320
S ₂	H/cm	33.5	35	26.7	26	4.6	5	33.8	34	12.7	10
	g/(°)	206.1	209	209.6	213	37.2	36	164.5	165	37.6	40
N ₂	H/cm	20.0	21	15.7	16	0.7	2	18.1	19	6.0	5
	g/(°)	107.2	109	114.2	115	285.4	283	49.7	53	277.4	271
K ₂	H/cm	8.5	9	6.7	7	1.6	1	10.3	10	3.7	3
	g/(°)	223.7	222	233.2	230	34.4	36	169.6	176	50.2	50
K ₁	H/cm	37.8	39	38.4	36	29.0	28	35.6	36	20.3	21
	g/(°)	101.2	99	104.2	104	110.9	114	153.9	155	200.3	199
O ₁	H/cm	29.1	30	29.0	27	23.1	22	26.9	28	16.6	18
	g/(°)	51.2	50	53.8	55	60.9	64	98.7	98	137.9	139
P ₁	H/cm	9.5	11	9.4	10	8.2	8	10.0	10	4.9	6
	g/(°)	98.5	89	94.3	94	101.5	104	145.1	144	187.2	189
Q ₁	H/cm	4.8	5	5.0	4	4.0	4	4.7	5	3.3	3
	g/(°)	13.2	10	19.2	18	28.6	26	51.4	52	86.2	88

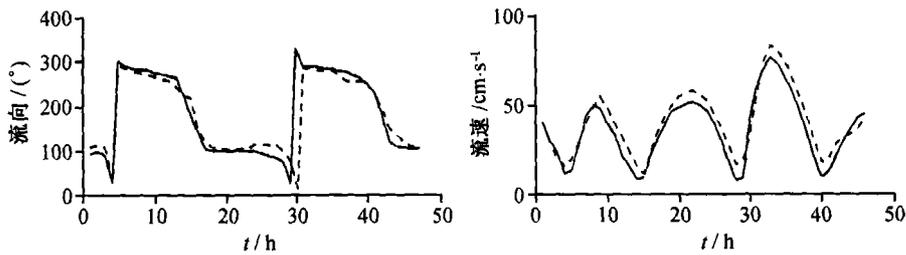


图 1 渤海湾中部流速流向曲线(1981年7月7日)

---观测结果, —计算结果

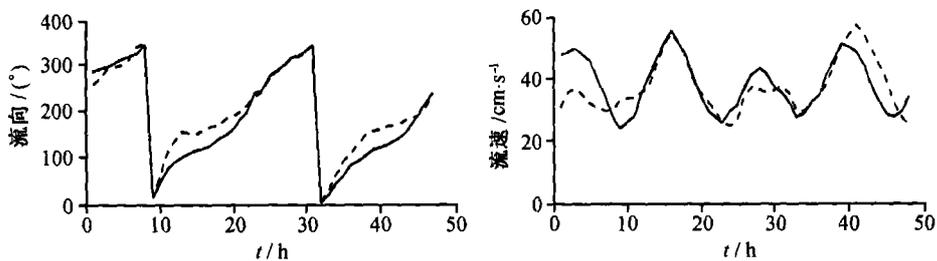


图 2 渤海中部流速流向曲线(1980年10月25日)

---观测结果, —计算结果

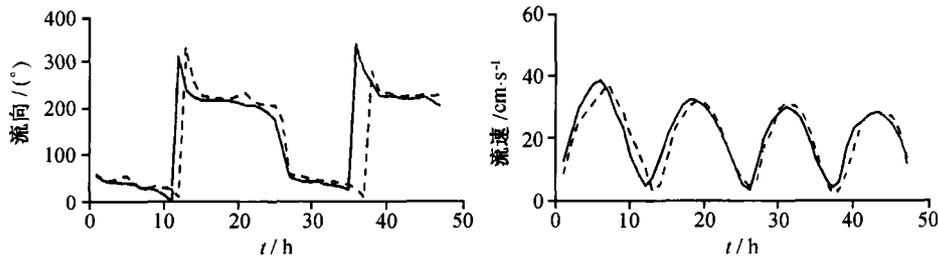


图3 辽东湾中部流速流向曲线(1980年10月30日)

---观测结果, ————计算结果

表3 模拟结果检验(单位:m)

	秦皇岛		塘沽		龙口	
	模拟	实测	模拟	实测	模拟	实测
50 a一遇风增水	1.53	1.59	2.65	2.59	2.27	2.35
100 a一遇风增水	1.71	1.74	2.87	2.77	2.39	2.41
50 a一遇风减水	-2.09	-2.01	-2.78	-2.62	-1.70	-1.63
100 a一遇风减水	-2.31	-2.29	-3.10	-2.86	-1.85	-1.76

4.2 模拟结果

给出5个站点(辽东湾中部、渤海湾中部、渤海湾湾口、莱州湾中部和渤海中部)的模拟结果(表4)。

表4 模拟风增、减水位(单位:m)

	辽东湾中部	渤海湾中部	渤海湾湾口	莱州湾中部	渤海中部
50 a一遇风增水	1.68	2.50	2.32	2.38	1.21
100 a一遇风增水	1.95	2.82	2.50	2.58	1.36
50 a一遇风减水	-1.80	-2.00	-1.60	-1.53	-0.63
100 a一遇风减水	-1.98	-2.21	-1.78	-1.69	-0.70
天文最高潮位	1.83	1.92	116	1.24	1.13
天文最低潮位	-1.33	-2.30	-123	-0.81	-0.99

5 一种多年一遇极值水位的计算方法

多年一遇极值水位的推算,对于具有长期水位观测的地点来说,可以利用20 a以上的年极值高、低水位依第一型极值分布求得.对于不具备这种条件的外海区域,如同前所述,只能选择发生在海区的强天气过程,模拟求得年极值风增水和风减水.在这里给出一种通过年极值风增水和风减水计算多年一遇极值高、低水位的方法。

在渤海海区过去多年的实际工作中,已经获得了渤海沿岸主要潮位站的多年一遇极值高、低水位,以及多年一遇极值风增水和风减水.另外,可以通过潮汐预报算出潮位站的天文最高潮位和天文最低潮位(见表5).选用以下形式的线性组合,利用多年一遇的风增水、风减水和天文最高、最低潮位推算多年一遇极值高、低水位:

多年一遇高水位等于 0.68 乘以(多年一遇风增水加天文最高潮位);
 多年一遇低水位等于 0.85 乘以(多年一遇风减水加天文最低潮位).

表 5 各种实测水位(单位:m)

	葫芦岛	秦皇岛	塘沽	龙口
50 a 一遇高水位	2.82	1.71	3.22	2.48
100 a 一遇高水位	2.89	1.82	3.37	2.66
50 a 一遇低水位	-3.02	-2.86	-3.84	-2.36
100 a 一遇低水位	-3.19	-3.06	-4.01	-2.44
50 a 一遇风增水	1.79	1.59	2.59	2.35
100 a 一遇风增水	1.96	1.74	2.77	2.41
50 a 一遇风减水	-1.99	-2.01	-2.62	-1.63
100 a 一遇风减水	-2.16	-2.29	-2.86	-1.76
天文最高潮位	2.46	0.95	2.09	1.22
天文最低潮位	-1.71	-1.13	-2.65	-0.89

以上各种水位值均从平均海面起算. 利用这些线性组合公式, 求得葫芦岛、秦皇岛、塘沽和龙口的推算值, 结果列于表 6. 由表中线性组合公式计算的结果与由实测资料推算的结果来看, 这种线性组合能给出接近实际的多年一遇高、低水位.

表 6 实测水位与由线性组合推出的水位(单位:m)比较

	葫芦岛	秦皇岛	塘沽	龙口
由实测资料推算的 50 a 一遇高水位	2.82	1.71	3.22	2.48
$0.68 \times (50 \text{ a 一遇风增水} + \text{天文最高潮位})$	2.89	1.73	3.18	2.33
由实测资料推算的百年一遇高水位	2.89	1.82	3.37	2.66
$0.68 \times (\text{百年一遇风增水} + \text{天文最高潮位})$	3.01	1.83	3.30	2.47
由实测资料推算的 50 a 一遇低水位	-3.02	-2.86	-3.84	-2.36
$0.85 \times (50 \text{ a 一遇风减水} + \text{天文最高潮位})$	-3.14	-2.67	-4.45	-2.14
由实测资料推算的百年一遇低水位	-3.19	-3.06	-4.01	-2.44
$0.85 \times (\text{百年一遇风增水} + \text{天文最低潮位})$	-3.29	-2.91	-4.68	-2.25

最后, 我们根据表 4 中给出的辽东湾中部、渤海湾中部、渤海湾湾口、莱州湾中部和渤海中部的多年一遇风增水、风减水的模拟结果和天文最高、最低潮位, 利用上面的线性组合, 推出这些地点的多年一遇高、低水位, 其结果见表 7.

表 7 由线性组合推出的多年一遇水位(单位:m)

	辽东湾中部	渤海湾中部	渤海湾湾口	莱州湾中部	渤海中部
由线性组合给出的 50 a 一遇高水位	2.39	3.01	2.36	2.46	1.59
由线性组合给出的 100 a 一遇高水位	2.57	3.22	2.49	2.60	1.69
由线性组合给出的 100 a 一遇低水位	-2.66	-3.67	-2.41	-1.99	-1.38
由线性组合给出的 50 a 一遇低水位	-2.81	-3.83	-2.57	-2.31	-1.44

参考文献:

- [1] 张延廷, 王以娇. 渤海风场中风暴潮的一次数值模拟 [J]. 海洋学报, 1983, 1(3): 261—272.
- [2] 丁文兰, 刘风树. 6208 号台风潮与天文潮相互作用的初步分析 [A]. 第一届潮汐与海平面学术研讨会论文集 [C]. 天津: 国家海洋局海洋科技情报研究所, 1986. 56—65.
- [3] 中华人民共和国交通部. 海港水文规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 1998.

The numerical modeling of astronomy-storm tide in the Bohai Sea and a calculation method for extreme water levels of multiyear return periods

YU Yi-fa¹, YU Yu-xiu¹

(1. *State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China*)

Abstract: The astronomy-storm tide in the Bohai Sea was modeled by using three-dimensional model and data from 82 selected strong weather processes. The model was tested with real observation data, and satisfactory results were obtained. From the astronomical highest (lowest) tide levels, the extreme high (low) water levels of multiyear return periods and the extreme-storm set-up (set-down) of multiyear return periods, which were obtained by the yearly extreme high (low) water levels and the yearly extreme storm set-up (set-down) observed at the coastal hydrographic stations, A linear combination formula for calculating the extreme water levels of multiyear return periods at 5 typical areas in the Bohai Sea is established. The formula can be used in the design of marine engineering projects.

Key words: Bohai Sea; astronomy-storm tides; numerical modeling; linear combination; extreme water levels of multiyear return periods