

渤海西岸致灾风暴潮的统计预报模型

王月宾^{1,2}

(1. 兰州大学, 730000; 2. 河北省沧州市气象局)

提 要: 渤海西岸是风暴潮灾害多发区, 1990 年代以后发生几率和灾害损失明显增加。利用气象科学和海洋水文科学相结合的方法, 依据黄骅港潮汐资料, 对发生在渤海西岸的风暴潮进行统计分析。结果表明, 台风和强冷空气配合气旋是造成渤海西岸风暴潮的主要天气系统, 偏东大风增水和天文潮叠加是造成风暴潮的直接因素; 风暴潮和天文潮汐都有半日潮现象。在此基础上, 建立了渤海西岸风暴潮预报模型, 通过台风或冷空气配合气旋影响时增水值的计算, 结合天文潮汐资料, 做出最高潮位预报。应用该预报方法对渤海西岸发生的 7 次风暴潮进行回报, 预报值与实测值基本相当, 是基层台站较实用的预报方法。

关键词: 渤海西岸 风暴潮 增水值 预报模型

Statistical Forecast Model of Storm Surge on West Coast of the Bohai Sea

Wang Yuebin^{1,2}

(1. Lanzhou University, Lanzhou 730000; 2. Cangzhou Meteorological Office, Hebei Province)

Abstract: Storm surge occurs frequently in the west coast of the Bohai Sea. Its frequency and disaster losses have shown an obvious tendency to increase since 1990. Based on the tide data obtained at Huanghua harbor, the feature of storm surge in the west coast of the Bohai Sea was statistically analyzed by means of a combined technique of meteorological and marine-hydrological sciences. The results show that the typhoon and strong cold air matching with cyclone are most synoptic systems which result in the storm surge of Bohai Sea. The rising water with strong easterly wind, together with astronomic tide, are the direct factors. Both the storm surge and the astronomic tide occur in the form of semidiurnal tide. On the basis of above results, a forecast model of storm surge was set up, then the rising water value caused by typhoon or cold cyclones was calculated, the maximum tide is forecasted through superposition of astronomical tidal data. The forecast method is applied to the hindcast experiments of 7 storm surges that occurred in the west coast of Bohai Sea, and the result is more satisfactory. The method is very useful for coastal stations.

Key Words: west coast of Bohai Sea storm surge rising water value forecast model

引言

风暴潮是指由强烈的大气扰动所引起的海平面异常升高现象,往往造成巨大灾难。渤海由渤海海峡与黄海相连,形如斜放着的椭圆,其长轴走向为 NE—SW,长约为 555km,海峡仅 100 多千米宽,平均水深约 18m。渤海独特的地形地貌和地理位置造成了一年四季均有风暴潮发生,历史上曾发生多次强风暴潮灾害^[1]。渤海严重的风暴潮灾害导致水位暴涨、堤岸决口,咸潮倒灌,淹没农田、盐田,冲走海水养殖,使工厂、民房进水,直接危及当地的经济建设和威胁沿海居民的生命财产安全。因此,风暴潮引起了许多学者的重视,刘凤树^[2]以及施平^[3]相继对渤海风暴潮进行了统计研究,张延廷^[4]、吴少华^[5]采用数值方法对风暴潮进行了研究,于宜法^[6]建立了渤海多年一遇最大增水值的计算方法,李云川等^[7]和胡欣等^[8]分别对 2003 年 10 月渤海湾风暴潮天气系统及风场结构进行了数值模拟和动力分析。

台风和强冷空气是造成渤海西岸风暴潮灾害的主要气象因子,袁子鹏^[9]和边清河^[10]等对登陆渤海的热带气旋的年际及季节、强度、移向、移速、源地等气候特征进行了统计分析,得出了许多有益的结论。由于资料所限,许多专家只对某次或某类风暴潮进行研究,而没有较为完善且适合地方台站的预报方法。因此,应用气象和海洋水文科学技术相结合,分析本地风暴潮灾害特征,建立风暴潮预报模型,对业务预报和地方政府指挥防风防潮有着十分重要的现实意义。

1 资料来源及说明

台风资料取自 1951—2004 年中国气象局编辑、气象出版社出版的《台风年鉴》,潮汐资料选用黄骅港 2000—2004 年的逐日逐时潮汐资料。渤海西岸有塘沽和黄骅两大港

口,地形、地貌相似,经度相当。黄骅港测潮站包含了风向、风速、逐时潮位等资料,以下用黄骅港测潮站的资料对渤海西岸的风暴潮情况进行分析,并建立适合渤海西岸的风暴潮预报方法。

2 渤海西岸风暴潮的统计特征

对发生在渤海西岸的风暴潮进行统计(表 1)发现:渤海西岸致灾风暴潮一般每隔 5~7 年发生一次,最大间隔 13 年,最小间隔 2 年,且发生强度和频率 1990 年代以后明显加大。渤海西岸致灾风暴潮有台风和强冷空气配合气旋(简称“强冷空气”,下同)两种天气系统。7 次风暴潮灾害中,前者 and 后者分别为 5 次和 2 类。7 次风暴潮灾害都集中发生在农历上半月的初四、初五和下半月的十五、十六、十七,这时正值渤海西岸天文大潮期,证实天文潮汐在产生风暴潮中起到了非常大的作用。如果不考虑东风增水因素,仅从每年天文大潮最高潮位看,最高潮位与警戒潮位相差 1.0m,不会产生风暴潮灾害,只有当天气系统影响与天文大潮叠加,潮位超过警戒潮位时,才发生风暴潮灾害。另外,风暴潮的发生与风向风速关系密切,所有风暴潮发生时都有偏东风分量;潮位较高时风速较大,而风速较小时潮位较低。

把 2003 年 10 月 11 日(农历 9 月 16 日)逐时潮位与 2000 年、2001 年、2002 年、2004 年共 4 年的 9 月 16 日(农历)逐时潮位平均进行比较发现(图 1),有风暴潮日和无风暴潮日的潮位日变化位相基本一致,都存在半日潮现象,即每天有两个高潮位和两个低潮位。前半日,有风暴潮日潮位上升较快,比天文最高潮汐早 3 小时左右,且高潮位维持时间较长,最高潮位较涨潮前高 2~3m;而落潮相对缓慢,落潮后最低潮位较最高潮位低 1~2m。后半日,有风暴潮时和无风暴潮时达到最高潮位时间相同,上升和下降幅度相当。无风暴潮时,最高潮位和最低潮位落差较大,

表 1 1950 年以来黄骅港历次致灾风暴潮简表

发生日期		潮位/cm	影响系统	风向	最大风速/ $m \cdot s^{-1}$
公历	农历				
1965.11.7	1965.10.15	5.72	强冷空气	NE	16
1972.7.27	1972.6.17	5.40	台风(7203)	SE	15
1985.8.19	1985.7.4	4.94	台风(8509)	NNE	13
1992.9.1	1992.8.5	5.71	台风(9216)	NNE	23
1997.8.19	1997.7.17	5.95	台风(9711)	ENE	27
2003.10.11	2003.9.16	5.69	强冷空气	ENE	25
2005.8.8	2005.7.4	5.02	台风(0508)	ENE	17

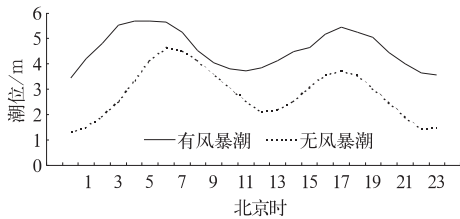


图 1 黄骅港有、无风暴潮日逐时潮位变化对比

一般为 3m 左右;有风暴潮时,最高潮位和最低潮位落差较小,一般为 2m 左右;有风暴潮日比无风暴潮日最高潮位高 1m 左右。分析风暴潮当日逐时风向资料发现,偏东风分量较大且维持时间较长时,产生的增水较大,而东风分量较小且维持时间较短时,产生的增水较小(图略)。

综合以上分析表明:渤海西岸风暴潮是由天气系统(台风、冷锋配合气旋)引起的偏东大风和天文潮配合下产生的;风暴潮日最高潮位出现时间,后半日和天文日高潮位出现时间基本一致,前半日比天文潮汐早 3 小时左右。

3 风暴潮预报方法

3.1 台风风暴潮预报方法

3.1.1 台风风暴潮天气模型

台风是造成渤海西岸风暴潮的主要天气系统,台风移向、移速、路径、强度、持续时间对风暴潮的产生及其潮位高低起关键性的作用,故我们研究台风风暴潮,首先要对上述 5 个方面作深入分析。

根据统计分析,进入渤海的台风路径有 3 条(见图 2),一是台风进入渤海后直接北上

在东北平原登陆;二是台风进入渤海后西进在华北平原登陆;三是台风进入渤海后向东北方向移动在辽东半岛登陆。

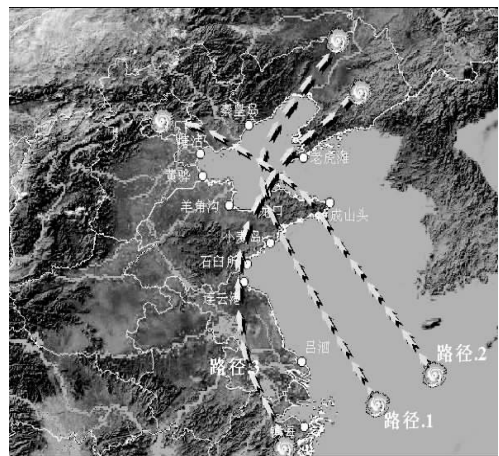


图 2 进入渤海的台风路径示意图

3.1.2 台风风暴潮计算方法

结合项素清^[11]和周淑玲等^[12]对风暴潮预报的分型方法,把影响渤海的台风移动路径分成 5 种类型:东北型、西北型、北上型、西北偏北型、东北偏北型。五种类型只体现了台风移动方向,不能准确描述台风移动的具体情况,为了更好地计算台风影响渤海西岸的增水值,按照台风影响范围、次数和类型,根据 54 年台风资料和黄骅港 5 年的潮汐资料统计,将台风分成 27 条路径(图 3)。

把 1008hPa 作为台风外围标准气压值,用 1008 减去每个台风的中心最低气压值,作为这个台风的中心气压示度。为了便于计算,把所有台风引起的增水值都订正到气压示度为 40hPa 的标准台风的增水值。

求订正后的增水值,用公式

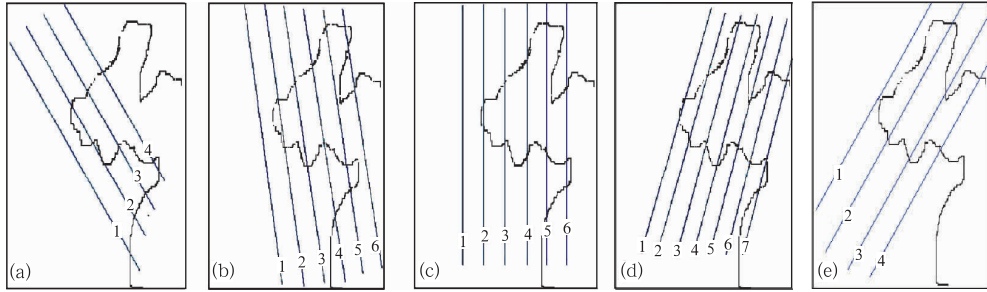


图 3 假想台风的移行路径
a. 西北型, b. 西北偏北型, c. 北上型, d. 东北偏北型, e. 东北型

$$H = (H_z - \bar{H}) \cdot \frac{\Delta P}{40} \quad (1)$$

其中, H 为订正后的增水值, H_z 为预报起始时刻实测潮位值, \bar{H} 为预报起始时刻历年平均潮位值, ΔP 为实际台风气压示度。

因为台风影响产生的增水值还与台风移动速度有关, 所以让一个中心示度为 40hPa

的台风, 以 3 种不同的速度 ($6\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $10\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $14\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 分别沿 27 条路径袭击渤海, 统计得出台风不同移动路径、移向、移速共 81 种情况下的增水值。由于资料较少, 当某种类型中的某一条(或多条)移行路径(或移速)不能根据实际值进行计算时, 采取等距离内插(外延)的方法求出, 其计算结果见表 2。

表 2 假想台风过程最大增水值(单位: cm)

速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	1			2			3			4			5			6			7		
	6	10	14	6	10	14	6	10	14	6	10	14	6	10	14	6	10	14	6	10	14
西北型	361	467	508	247	330	398	83	82	95	50	85	94									
西北偏北型	338	414	472	262	298	323	139	98	90	71	71	84	39	71	76	45	64	67			
北上型	321	351	382	252	238	226	164	134	105	110	84	78	77	57	64	46	53	52			
东北偏北型	288	295	296	264	249	226	207	177	147	147	120	95	106	87	70	80	64	53	53	47	40
东北型	248	249	241	220	201	176	164	143	120	132	107	90									

3.1.3 查算说明

短期预报查算中所用的台风移向、移速、中心气压均为国家气象中心的预报值, 根据台风中心气压、中心风力、移动速度及移动路径, 计算台风在渤海西岸造成的增水值, 为台风风暴潮的预报提供强有力的依据。

实际台风的移速是指发生最大增水前 12 小时的台风平均移速。当与假想台风移速不相等时, 可在查算时进行内插。

气压示度($1008 - p_0$)中, p_0 为天文大潮发生前 6 小时台风中心气压平均值。

如果台风移动路径不在 27 条路径中, 而是一条居间的路径, 则用相邻两条路径的最大增水值内插; 如果实际台风路径与假想台风路径横向相交, 则可采用与假想台风相近

的三条路径最大增水值内插。

短时跟踪订正预报中所用的台风移向、移速、中心气压为河北省气象台研制的 MM5 模式可以每小时输出一次结果, 空间分辨率可以精确到 20km 以内。

3.1.4 预报台风的最大增水值与假想台风的最大增水值的换算

$$\text{关系式为: } h_i = h_j \cdot \frac{\Delta P_i}{\Delta P_j} \quad (2)$$

其中, h_j 为假想台风过程的最大增水值, 可在表 2 中查得, 或通过内插得到; ΔP_j 为假想台风的气压示度, ΔP_i 为预报台风的气压示度, h_i 为预报台风过程最大增水值 (i = 预报, j = 假想)。

3.1.5 对风暴潮潮位的订正

根据 2000—2004 年的台风资料 and 对应

的黄骅港逐日逐时潮汐资料,统计分析各台风移向产生的增水值,得出各路径的订正值:

$$\text{西北型 } h = h_i + 20 \quad (3)$$

$$\text{北上型 } h = h_i + 47 \quad (4)$$

$$\text{西北偏北型 } h = h_i \quad (5)$$

$$\text{东北偏北型 } h = h_i + 83 \quad (6)$$

$$\text{东北型 } h = h_i \quad (7)$$

订正后计算的预报最高潮位(H_g)为:

$$H_g = \bar{H} + h \quad (8)$$

式中 \bar{H} 为历年逐日平均潮位。 H_g 为最后求得的预报最高潮位。

3.2 气旋和强冷空气叠加型风暴潮的预报

渤海西岸呈淮南—北向,引起增水的主要风向为偏东风,而增水的量值主要与某一时段的平均风速和大风持续时间有关,因此,我们在做强冷空气型风暴潮预报时首先计算海面平均风速,然后计算平均东向风速,根据平均东向风速计算增水极值。

3.2.1 强冷空气风暴潮天气模型

贝加尔湖冷空气从偏东路径南下,与其南边强暖湿气流在 38°N 附近交汇对峙,形成东北高西南低的气压场形势(图 4)。由于冷暖气团势力相当,致使冷锋维持 20 小时以上,造成渤海海峡长时间偏东大风天气,当与天文大潮叠加时,引发渤海风暴潮灾害。

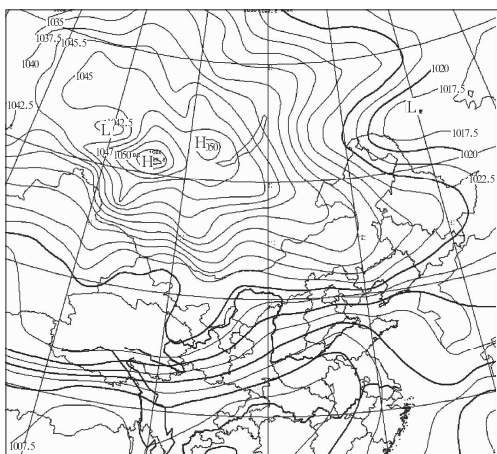


图 4 冷空气对渤海影响地面形势图

3.2.2 平均风向风速的计算

数值预报产品已广泛应用于业务实际中,许多专家学者对其预报效果检验表明^[13-15],日本传真图有较好的预报能力。对当地资料统计检验表明,日本传真图对华北地区及渤海附近冷空气及大风的预报较其它产品为好。为便于日常应用,以($35\sim 45^\circ\text{N}$, $115\sim 130^\circ\text{E}$)为关键区,日本数值预报当天 E02、E03 图上,在关键区内取气压梯度最密集的平均等压线走向的切线方向为大风平均风向。在这关键区内,沿切线垂直方向读取任意 5 个纬度距离气压差,计算出地转风^[16]:

$$V_g = -\frac{1}{f\rho} \frac{\Delta P}{\Delta n} \quad (9)$$

式中 f 为地转参数, ρ 为大气密度, ΔP 为气压差(hPa), Δn 为纬距。应用日本高桥^[17]计算出的摩擦系数,得到海面平均风速:

$$V_s = 0.65V_g \quad (10)$$

因为关键区为 $35\sim 45^\circ\text{N}$,为便于计算,所以规定,则:

$$V_s = 6.2255 \frac{\Delta P}{\Delta n} \quad (11)$$

平均东向风速的计算:

$$V_e = V_s \cos(90^\circ - \theta) \quad (12)$$

式中 θ 为风的来向与正北方向的夹角。

3.2.3 增水预报值和风暴潮最高潮位的计算

经过统计,对范文静等^[18]建立的风速对渤海增水的计算公式做改进,在平均东向风速大于 $10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 且小于 $18\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,采用下面经验公式计算增水极值:

$$\Delta H = 3.4V_e + 6.2 \quad (13)$$

当平均东向风速大于 $18\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,采用下面经验关系式计算增水极值:

$$\Delta H = 5.3V_e + 6.2 \quad (14)$$

式(14)中 ΔH 为增水值(cm), V_e 为东向风速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)。

最后计算的风暴潮最高预报潮位(H_g)为:

$$H_g = \bar{H} + \Delta H \quad (15)$$

\bar{H} 为历年(农历)平均潮位。

如果没有达到警戒潮位,则定性正确。

4 回报结果分析

回报结果检验采取定性和定量两种标准:当预报渤海西岸有风暴潮时,如果实况最高潮位超过警戒潮位,则定性正确,计算预报误差;如果实况最高潮位没有达到警戒潮位,则定性不正确。当预报渤海西岸没有风暴潮时,如果实况最高潮位超过警戒潮位,则定性不正确;

4.1 出现风暴潮的回报情况

我们对 7203、8509、9206、9711、0508 五个台风引发的风暴潮进行回报,最大误差值为 18cm,最小误差为 2cm;对 1965 年 11 月 7 日和 2003 年 10 月 11 日强冷空气引发的风暴潮回报,误差值分别为 15cm 和 4cm,具有良好的精确性(见表 3)。

表 3 风暴潮个例回报情况

日期	农历	影响系统	台风系统			强冷空气系统		最高潮位/cm		
			台风中心 气压/hPa	移动方向 及路径	移动速度 /km·h ⁻¹	气压梯度 及风向	大风持续 时数/h	实况	预报	误差
1965.11.07	10.15	强冷空气				17hPa 90°	20	572	557	-15
1972.07.27	06.17	台风(7203)	980	NW 3	35			540	531	-9
1985.08.19	07.04	台风(8509)	983	N 4	35			494	492	-2
1992.09.01	08.05	台风(9206)	990	NNE 4	20			571	553	-18
1997.08.19	07.17	台风(9711)	990	NNE 3	35			595	587	-8
2003.10.11	09.16	强冷空气				16hPa 85°	18	569	565	-4
2005.08.08	07.04	台风(0508)	992	NE 4	20			502	506	4

4.2 受台风影响未出现风暴潮的回报情况

统计台风年鉴,1950—2004 年影响渤海的台风共有 19 个,我们对未产生风暴潮的

14 个个例进行回报,预报结果为 13 次定性正确,1 次不正确,准确率达 93%,具有很高的应用价值(见表 4)。

表 4 台风影响未出现风暴潮个例潮位回报情况

日期	农历	台风系统			预报最高潮位/cm	定性评定
		中心气压/hPa	移动方向及路径	移动速度/km·h ⁻¹		
1950.8.2	6.19		路径不符合		正确	
1953.8.21	7.12	1000	NE,3	35	441	正确
1960.7.28	6.5	983	NNW,4	35	477	正确
1960.8.5	6.13	993	NW,1	35	490	正确
1963.7.20	5.30	998	NNE 3	35	527	不正确
1967.7.28	6.21	990	N,5	35	470	正确
1973.7.19	6.20	980	N,5	35	491	正确
1974.8.29	7.12	990	NW,4	35	446	正确
1978.7.25	6.21		路径不符合			正确
1981.7.27	6.26	998	NE,3	35	432	正确
1984.8.2	7.6	999	N,4	35	459	正确
2001.8.1	6.12	995	N,4	35	405	正确
2002.7.28	6.19	1000	N,3	35	476	正确
2004.9.14	8.1	1005	NW,3	50	434	正确

5 结 论

统计分析表明,渤海西岸是风暴潮多发区,造成渤海西岸风暴潮灾害的天气系统有二类,即台风和强冷空气。风暴潮日最高潮位出现时间,后半日和天文日高潮位出现时间基本一致,前半日比天文潮汐早 3 小时左右。

通过对 1965 年以来发生在渤海西岸的风暴潮回报,预报值与实测值基本相当,表明此种方法对发生在渤海西岸的风暴潮潮位有一定的预报能力。预报时所用的资料都是黄骅港潮位资料及常规气象资料,较为容易获取,所以预报方法比较适宜实际操作。

同时,此预报方法对数值预报产品依赖较大,随着数值预报的发展,天气预报准确率提高,风暴潮预报的绝对误差也逐渐减小。

参考文献

- [1] 于福江,王喜年,宋珊,等. 渤海“9216”特大风暴潮数值模拟[J]. 海洋预报,2000,17(04):9-15.
- [2] 刘凤树,王喜年. 渤海风暴潮的初步探讨[J]. 海洋科学集刊,1984,(3):1-17.
- [3] 施平,郭洪寿. 塘沽温带风暴潮及其研究[J]. 海洋预报,1984,(1):33-42.
- [4] Zhang Yangting, Wang Yijiao. Numerical simulations of cauphug effects between storm surge and stronomical tide, sea level and count fields in the Bohai Sea, storm surges observations and modeling [A]. Proceedings of the Inr emotional Symposium on Storm Surge, Sept. 15-17, 1987 [C]. Beijing: China Ocean Press, 1987. 71-82.
- [5] 吴少华,王喜年,戴明瑞,等. 渤海风暴潮概况及温带风暴潮数值模拟[J]. 海洋学报,2002,(05):28-34.
- [6] 于宜法,俞聿修. 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[J]. 海洋学报,2003,25(4):10-17.
- [7] 李云川,张迎新,王福侠,等. 2003 年 10 月风暴潮的形成及数值模拟分析[J]. 气象,2005,31(11):15-18.
- [8] 胡欣,景华,王福侠,等. 渤海湾风暴潮天气系统及风场结构个例分析[J]. 气象科技,2005,33(3):235-239.
- [9] 袁子鹏,张立祥. 黄渤海登陆热带气旋活动的统计分析[J]. 气象,2005,31(6):39-42.
- [10] 边清河,丁治英,吴明月,等. 华北地区台风暴雨的统计特征分析[J]. 气象,2005,31(3):61-65.
- [11] 项素清. 舟山港台台风风暴潮的分析及预报[J]. 气象,2004,30(3):35-38.
- [12] 周淑玲,闫丽凤. 影响山东半岛风暴潮的分析和预报[J]. 气象科技,2002,30(1):37-42.
- [13] 张建海,诸晓明. 数值预报产品和客观预报方法预报能力检验[J]. 气象,2006,32(2):58-63.
- [14] 王雨. 2004 年主汛期各数值预报模式定量降水预报评估[J]. 应用气象学报,2006,17(3):316-324.
- [15] 高松影,孙连强. 日本数值预报产品在丹东地区降水预报的检验和评估[J]. 气象,2006,32(6):79-83.
- [16] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 天气学原理和方法(第三版)[M]. 北京:气象出版社. 2000:35-37.
- [17] 高桥浩一郎. 气象集志[J],1939,17:317.
- [18] 范文静,张爱军. 塘沽海洋站水位变化及其极值与海面风的相关关系研究[J]. 海洋通报,2006,25(4):29-35.