

塘沽温带风暴潮及其预报研究

施平 郭洪寿

(国家海洋局海洋环境预报中心)

摘 要

本文在整理塘沽港1950—1981年实测水位资料和查阅相应的欧亚天气图的基础上,描述了引起塘沽港增水的各种天气形势,并对典型的天气形势进行了较细的分类;分析了在不同天气形势下影响增水过程的一般特点;给出了相应的增水过程及极值预报方法,并对预报方法本身及其实验结果进行了讨论。

一、引 言

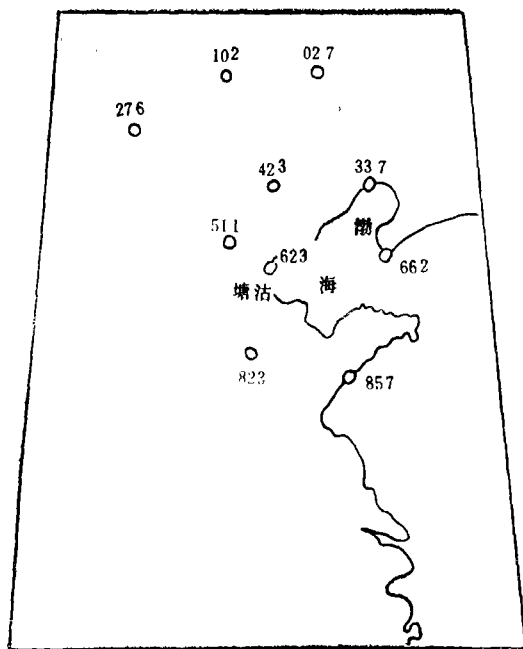
塘沽港是我国北方的重要港口之一。据记载,近百年来多次发生风暴潮灾。因此探讨和研究塘沽港风暴潮的特点及其预报方法,具有十分重要的意义。

塘沽港位于渤海湾的西北角,海岸走向大致呈东北偏北到西偏南(图1),因此渤海海面出现的偏东或东北大风是塘沽地区的迎岸风——增水主风向;反之,偏西或西北大风是离岸风——减水主风向。如果迎岸风速大且持续时间长,必然驱使海水自渤海海峡和辽东湾向渤海湾流入,在科氏力的作用下,使海水在湾顶堆积,造成沿岸较大的增水。当大的增水与天文高潮相逢时,就会导致较高水位,甚者成灾。

二、塘沽风暴潮发生的频率、季节分布

根据塘沽港32年(1950—1981)的潮位实测资料分析和统计,塘沽港增水多于减水;无论是增水还是减水,1.00—2.00米者居多(见表1、表2)。

综合分析32年的增水过程及其相应的天气形势,我们认为引起渤海风暴潮的大气扰动,基本有两大类:一类是高空上的西风槽;另一类



图① 塘沽及所选气象站站位图

表1 塘沽港1.00米以上增水过程统计表(1950—1981年)

频数 增水 季节 值 (月)	春 (3,4,5月)	夏 (6,7,8月)	秋 (9,10,11)	冬 (12,1,2月)	合 计
1.00—1.30米	37	6	47	53	143
1.31—1.60米	8	1	30	35	74
1.61—2.00米	4	2	11	12	29
2.01米以上	2	0	4	1	7
合 计	51	9	92	101	253
百分率(%)	20.2	3.6	36.4	39.8	100

表2 塘沽港-1.30米以上减水过程统计表(1950年—1981年)

频数 减水 季节 值 (月)	春 (3,4,5月)	夏 (6,7,8月)	秋 (9,10,11月)	冬 (12,1,2月)	合 计
-1.30—-1.60米	10	1	14	19	44
-1.61—-2.00米	6	0	8	16	30
-2.01米以上	1	0	1	5	7
合 计	17	1	23	40	81
百分率(%)	21.0	1.2	28.4	49.4	100

是台风。这两类大气扰动都可能造成渤海海面的区域性强风，因此，塘沽一年四季均有发生风暴潮的可能。本文的讨论仅涉及前一类大气扰动。

西风槽天气系统引起的较大增、减水、春、秋、冬三季均可能发生，以冬季为最多（见表1、表2）。但因为冬季是渤海的枯水季节，平均海平面较低（表3），加之岸冰的阻挡，不易酿成风暴潮灾。较强的风暴潮过程多发生在初春和晚秋，尤以4月为多。

预报员们密切关注的，不仅仅是增水极值及其发生的时间，而且更关注增水值与天文潮所迭加的实际水位曲线。因为风暴潮灾的发生，而是与天文潮迭加以至超过警戒水位的前后

表 3 塘沽港逐月多年平均海平面距平值 (1951—1973) (单位: 厘米)

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
距平	-32	-24	-15	-3	7	20	29	31	29	5	-11	-28

时刻, 即一般是实际水位曲线的峰值出现的前后。幸而, 最大增水出现的时间与天文高潮出现的时间大多存在一个时差。表4表明从1950—1974年历次增水过程最大增水与天文高潮的时差。显而易见, 发生在天文高潮时段的最大增水是一个小概率事件。

此外, 统计21年(1950—1960), 1970—1981)的实测水位资料表明, 天气形势越强, 变化越快, 增水率就越大。在一般风暴潮过程中, 增水率在10—20、21—30厘米/小时为大多数(表5)。

表 4 最大增水出现时刻与天文高潮的时差 (1950—1974)

最大增水出现时刻	+6	+5	+4	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6
频 数	20	22	26	30	10	10	0	2	1	9	16	25	20
百 分 率	10.5	11.5	13.6	15.7	5.2	5.2	0	1.1	0.5	4.7	8.4	13.1	10.5

(+号为风暴潮最大值出现在天文高潮前)

(-号为风暴潮最大值出现在天文高潮后)

表 5 塘沽港增水过程最大增水率(厘米/小时)分布
(1950—1960, 1970—1981)

增 水 率	10—20	21—30	31—40	41—50	51—60	61—80
频 数	48	66	41	18	12	6
百 分 比	25.1	34.5	21.4	9.4	6.3	3.3

三、塘沽港风暴潮的成因

实践表明: 风暴潮与气象因子(风速、风向、气压等)有着密切的相关性, 对于渤海湾来讲, 我们认为风应力是第一重要的强迫力。由于渤海平均水深为20米, 故气压效应与风应力相比是一个小量, 除非气压波引起共振, 一般认为风应力为主要强迫力。理论研究和经验都表明, 风暴潮的振幅与风应力成正比。因此, 对于塘沽港来讲, 区域性的强风, 即渤海海面上的东北或偏东大风, 是预报员应密切关注的。

在分析和统计塘沽港实测水位资料及查阅相应的欧亚天气图的基础上, 我们对引起塘沽增水过程的天气形势, 根据其表现出来的大气强迫力的主要特点及造成的增水过程的不同特征, 进行了较细的分类, 从而使预报方案具有各自不同的代表性。

能造成渤海海面区域性强风,对塘沽增水有贡献的西风槽系统,表现在地面天气图上有如下几种:

1、横向高压型:

这种类型天气形势的主要特点是单纯的强或较强冷空气,南方没有其它系统与之配合。此外,北方的冷高压基本为东西走向,冷高压横贯在 $40^{\circ} \sim 55^{\circ} \text{N}$, $110^{\circ} \sim 130^{\circ} \text{E}$ 一带,冷高压南缘的锋面呈东西向。1974年11月8日的天气过程,是该型的典型例子。图2—a、b、c,为此次天气过程的高空和地面天气形势及增水曲线图。由于冷高压不受其它系统阻挡,一般移动较快,不利于塘沽水位的长时间持续增长。

从表6可以看出,这种天气过程多出现在早春、晚秋和初冬。

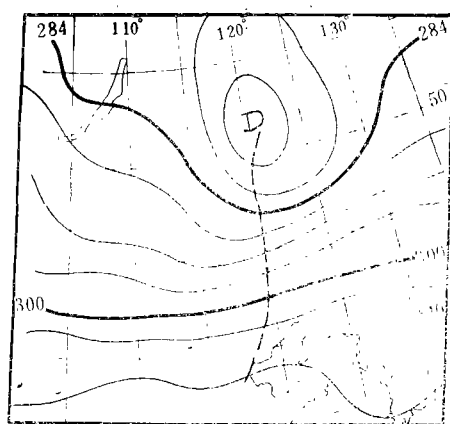


图2—a 1974年11月7日08时(北京时间)
700mb图

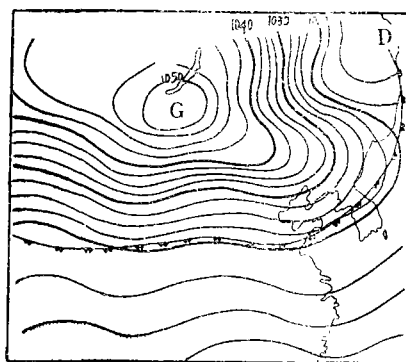


图2—b 1974年11月8日02时
地面天气形势

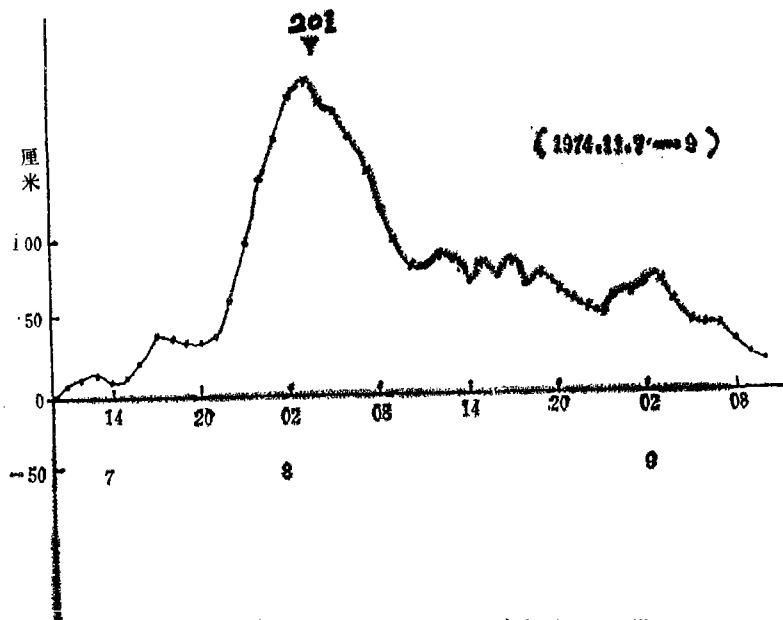


图2—c 1974年11月8日02时塘沽增水过程曲线

表6 横向高压型天气系统引起塘沽港1.00米以上增水的季节分布
(1950—1981年)

季 节	春 (3—5月)	夏 (6—8月)	秋 (9—11月)	冬 (12—2月)	合计
频 数	29	0	21	25	75
百 分 比	39	0	28	33	100

2. 北高南低型:

即冷高压配合黄、渤海气旋(或倒槽)型。

这种类型天气形势主要特点是南方有明显的系统与北面的冷高压配合。在最大增水发生

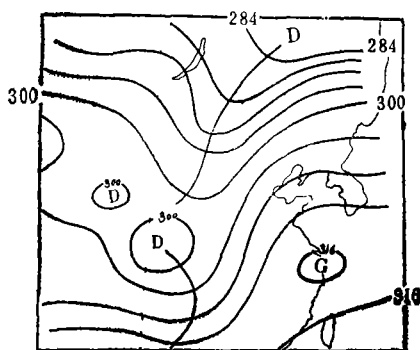


图3—a 1969年4月22日20时
700mb天气形势图

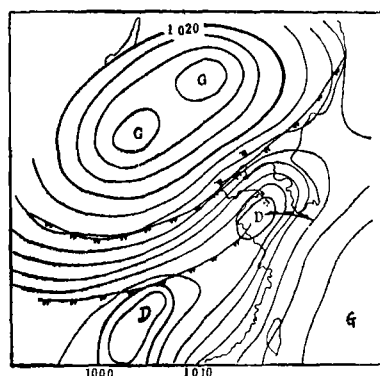


图3—b 1969年4月23日14时
地面天气形势

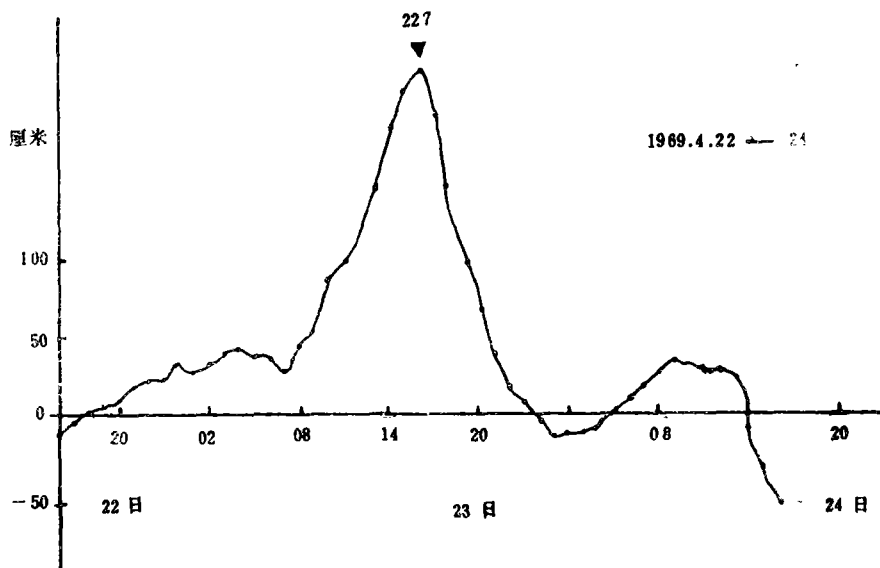


图3—c 1969年4月23日14时塘沽增水过程曲线

时刻,地面气压场呈现以渤海中部为界的北高南低形势,使渤海上空形成强大的气压梯度区,造成渤海海面持续的东北大风,引起塘沽港的强烈增水。1969年4月23日16时塘沽最大增水达2.27米。图3—a、b、c,为这次天气过程的高空和地面图及增水曲线图。从表7中可以看出,春、秋季节是这种天气形势出现频繁时期,多造成塘沽港1.50米—2.00米左右的增水。

表7 北高南低型天气形势引起塘沽港1.00米以上增水的季节分布 (1950—1981)

季 节	春 (3—5月)	夏 (6—8月)	秋 (9月—11月)	冬 (12—2月)	合 计
频 数	11	0	17	15	46
百 分 比	30	0	37	33	100

3. 黄渤海气旋型:

与第一种天气类型相反,此种天气形势特点:只有南支西风槽,无北支冷空气配合。即长江流域西风槽东移,地面天气图上往往只有锋面气旋在黄、渤海产生并加深,在气旋北部偏东风的影响下,可能引起塘沽港1.00米以上增水,图4是该型的一个典型例子。

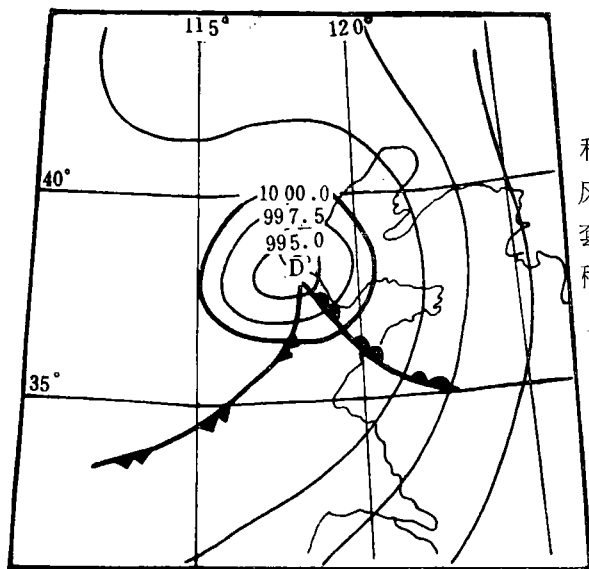


图4—a 1971年6月26日08时地面天气图

4. 河套锢囚锋型

从高空形势看,此类天气形势介于第一类和第二类天气形势之间。主要区别在于北支西风槽有超前现象。它是北路和西路冷空气在河套一带形成锢囚锋。图5为该型的一个实例。这种天气所引起的塘沽港增水一般在1.00米以上,但出现频率较低。

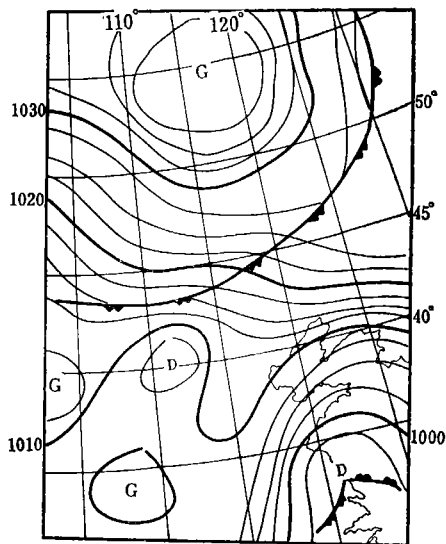


图5—a 1971年3月2日02时地面天气图

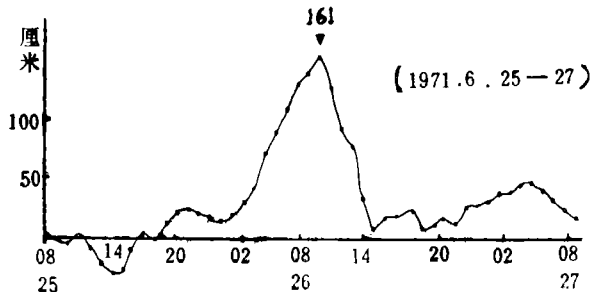


图4—b 1971年6月26日08时塘沽增水曲线

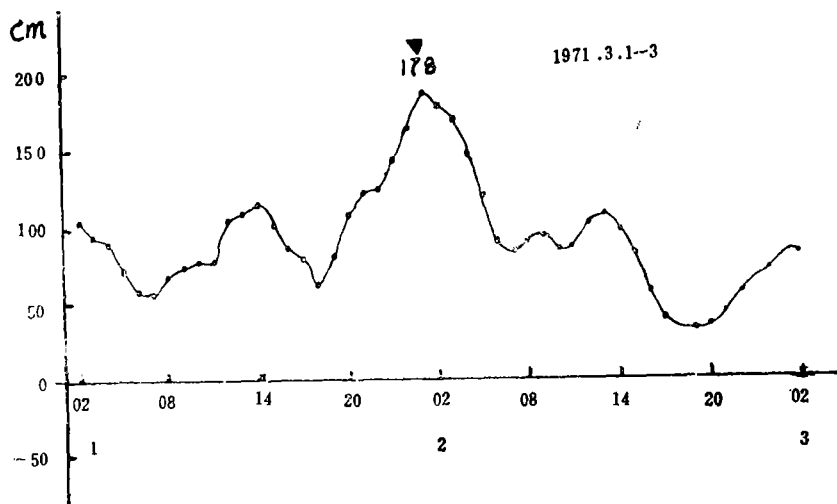


图5—b 1971年3月1~3日塘沽增水曲线

四、塘沽港增水的特点

渤海是半封闭海湾，大气扰动尺度往往大于水域尺度，海水对于大气扰动的反应，有以整个水体来作反应的性质，除了气象扰动新产生的强迫振动外，还存在着自由振荡和外部潮的影响等，显而易见，湾中的风暴潮的形态是比较复杂的。为了做好塘沽港的风暴潮预报，必须适当地考虑增水的主要特点。

渤海的主轴方向是东北——西南向，因此对于第一、第二种类型天气系统引起的增水，一般特点是：渤海湾和辽东湾的增（减）水大致为反相变化，即辽东湾减水，渤海湾增水，基本以秦皇岛附近为节点振荡。当海面东北风吹刮5~6小时后，塘沽出现最大增水，而后逐渐降低，辽东湾水位开始回升。随着海面大风北分量的增大，塘沽开始减水，由于渤海部分海水经峡口流往黄海，整个渤海出现减水现象。

此外，在做塘沽港风暴潮预报时，必须考虑由于柯氏力的作用，渤海大风增水出现的几种现象。

1、水量的逆时针转移：自黄海经渤海海峡进入渤海的海水，几乎沿逆时针方向游遍整个渤海，最后又经海峡返回黄海。

2、沿岸的最高水位基本是由北沿渤海西岸向南传播。

3、渤海西北岸增水高于东南岸。

考虑到柯氏力对渤海风暴潮的影响，无疑对风暴潮预报是极有益的。此外，各测站之间的增水有一定的相关性，可以通过前缘某些测站极值水位发生的时间，粗略地估计预报港口极值水位出现的大体时间。

五、预 报 方 法

我们对塘沽港风暴潮的预报采用经验统计法。

众所周知, 经验统计预报法的主要思路, 是依据有关的气象和水文历史资料, 来建立气象因子 (此处主要是气压) 和塘沽港风暴增水之间的经验关系, 通常利用回归分析找出相关好的因子, 建立经验回归预报方程。本文仅介绍我们常用的两种方法。

1、极值预报法

塘沽港风暴潮位的极值预报是指塘沽风暴潮位随时间变化的过程曲线中最大值的预报。

对应第一类天气形势 (横向高压型), 极值预报方程为:

$$\Delta H = 71.9 - 3.61x_1 + 0.20x_2 + 0.26x_3 - 0.21x_4 \quad (1)$$

式中 ΔH 为塘沽港风暴潮最大值, 单位厘米; x_i 为预报因子, 建立方程时, 运用 35 个样本, 复相关系数 0.69, 平均拟合误差 16 厘米, 对 1976—1981 年 11 次过程进行验证, 平均误差 24 厘米, 大于 30 厘米的 3 次, 小于 20 厘米的 5 次。

对应第二类天气形势 (北高南低型), 极值预报方程为:

$$\Delta H = 41 + 1.51x_1 + 2.17x_2 - 0.15x_3 + 0.15x_4 + 0.20x_5 + 0.40x_6 \quad (2)$$

上式中 ΔH 同前, x_i 仍为预报因子, 但与 (1) 式中含义不同。建立方程时, 运用 37 个样本, 复相关系数 0.81, 平均拟合误差 18 厘米, 误差小于 30 厘米的 31 个, 占 84%, 对 1975 年~1981 年 12 次过程进行验证, 平均误差 23 厘米, 大于 30 厘米的 3 次, 小于 20 厘米的 5 次。

(1)、(2) 式的预报时效均为 12 小时。在预报因子中, 温度以摄氏度为单位, 气压以毫巴为单位, 高度以位势什米为单位。

2、过程预报法:

风暴潮的过程预报比其极值预报具有更大的实用价值。因为风暴潮灾的发生, 不一定是增水极值出现的时刻, 而是在与正常天文潮迭加后, 以至超过警戒水位的前后时刻, 亦即实际水位曲线峰值出现的前后。所以用风暴潮的过程预报, 能描绘出某一港口或测站风暴潮的整个兴衰过程, 给实际预报带来了方便。

对于上述第一、二类天气型, 运用逐步回归正交筛选法, 在 40 多个可能的预报因子中, 选出相关较好的因子, 建立多元回归方程如下:

1) 横向冷高压型

过程预报方程为:

$$\begin{aligned} \Delta H = & 21.85 + 0.65\Delta P_{027-023}^{-9} - 0.28\Delta P_{027-337}^{-24} + 0.25\Delta P_{102(-12)-102(-6)}^{-24} \\ & + 0.4\Delta P_{027-511}^{-9} - 0.4\Delta P_{027-337}^{-9} - 0.22\Delta P_{337-002}^{-12} \end{aligned} \quad (3)$$

2) 北高南低型

过程预报方程为:

$$\begin{aligned} \Delta H = & 27.19 + 0.36\Delta P_{027-823}^{-9} - 0.48\Delta P_{027-823}^{-21} + 0.98\Delta P_{337-857}^{-9} \\ & - 0.91\Delta P_{337-857}^{-12} + 0.31\Delta P_{337-857}^{-24} + 0.18\Delta P_{027-023}^{-15} \end{aligned} \quad (4)$$

上二式中, ΔH 为塘沽预报风暴潮高, 单位厘米, 预报时效为 9 小时。 ΔP 代表两个气象站的气压差或某一站的变压, 单位 0.1 毫巴, 其右角上标代表提前的小时数 (相对于作预报时而言), 下标代表气象站的站号*。

(3) 式采用 19 个增水过程, 每个过程 9 个点, 共 171 个样本点, 复相关系数 0.79, 平均拟合均方误差 26.7 厘米, 误差小于 30 厘米的过程有 15 个, 大于 40 厘米的 1 个。对 1976~1981 年从个增水过程进行验证, 平均误差为 26.7 厘米, 误差小于 30 厘米的 4 个过程。

(4) 式采用 15 个增水过程, 每个过程 9 个点, 共 135 个样本点, 复相关系数 0.78, 平均拟合均方误差 31 厘米, 小于 30 厘米的过程 9 个, 大于 40 厘米的过程 3 个。对于 1976 年~1981 年 9 个增水过程进行验证, 平均误差为 26.5 厘米, 误差小于 30 厘米的过程 8 个。实况与计算曲线比较见图 6。

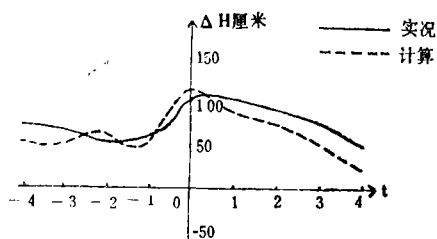


图 6 —— a 横向高压型非独立预报

1981、1、18、10 时, $\Delta H_{\max} = 105$ 厘米

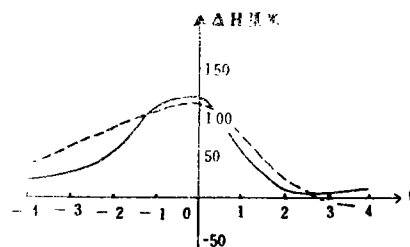


图 6 —— b 横向高压型独立预报

1978、12、13、20 时

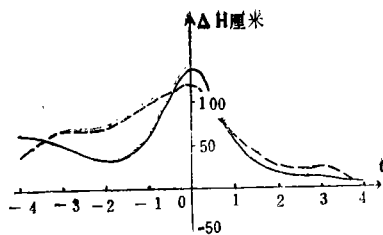


图 6 —— c 北高南低型非独立预报

1966、11、13、20 时, $\Delta H_{\max} = 140$ 厘米

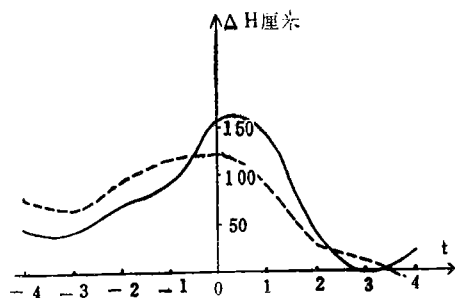


图 6 —— d 北高南低型独立预报

六、结 果 讨 论

1、上述极值预报方程, 经过几年预报验证, 效果较好, 预报误差比较稳定。可见所选

* 站号说明: 027—林东, 102—锡林浩特, 337—锦州, 123—承德, 511—北京, 623—塘沽, 662—大连, 823—济南, 857—青岛。

的几个预报因子,基本能反映出诱发风暴潮的大气强迫力的作用。

2、增水过程预报方程,无论从复相关系数,或者从增水曲线拟合趋势来看,都不如羊角沟过程预报方程。这可能由于选气象因子的区域范围受到限制所致,对于羊角沟而言,在 $38^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$ 、 $115^{\circ}\sim 123^{\circ}\text{E}$ 范围内选上游气象因子基本可以,但塘沽位置偏西北,在上述范围内选气象因子显得不够,再往西北延伸,又受资料缺乏和代表性差的限制。要想提高预报精度,有待采用别的途径。

3、我们采用的回归模型,基本属于线性模型,由于风暴潮是由若干复杂因子综合作用造成的,对于一些不能近似看成线性关系的因素和一些由于各种条件限制还无法考虑的因素,仅用一种简单的回归模型是无法反映出来的,这在某种程度上也影响预报的精度。

4、文中所用的风暴潮位,是用简单差值法获取的,由于正常天文潮的推算也有某些误差,因而使风暴潮预报精度的提高受到一定的限制。

5、无论极值预报方程,或者过程预报方程,都受经验统计法的限制,对于少见但危险性大的增水过程,却无能为力,本文所介绍的预报方案也不例外。

参 考 文 献

〔1〕、冯士筭:《风暴潮导论》,科学出版社,1982。

〔2〕、山东海洋学院风暴潮小组:《渤海风暴潮的机制和预报(1)》,“海洋科技”、4

STORM SURGES OF THE TEMPERATE ZONE IN TANGGU AND ITS FORECAST RESEARCH

Shi Ping, Guo Hongshou

(Marine Environmental Forecasting Center of NBO)

Abstract

On the basis of the analysis of the sea level records and the corresponding Eurasian synoptic charts for Tanggu from 1950 to 1981, the variable weather situations which caused the storm surges in Tanggu are described, and the typical weather situations are classified. The general characteristics of the storm surge processes under different weather conditions are studied. The forecasting methods of the corresponding storm surge processes and of the maximum surge are obtained, and the forecasting methods and experimental results are also discussed in this paper.