

# 渤海湾西岸风暴潮：叠加地质因素的新探讨

王 宏<sup>1</sup>, 商志文<sup>1,2</sup>, 王 福<sup>1</sup>, 李建芬<sup>1,3</sup>, 裴艳东<sup>1,4</sup>,  
田立柱<sup>1,3</sup>, 范昌福<sup>1,5</sup>, 盛晶瑾<sup>1,6</sup>, 陈永胜<sup>1,6</sup>, 刘会敏<sup>1,6</sup>

WANG Hong<sup>1</sup>, SHANG Zhi-wen<sup>1,2</sup>, WANG Fu<sup>1</sup>, LI Jian-fen<sup>1,3</sup>, PEI Yan-dong<sup>1,4</sup>,  
TIAN Li-zhu<sup>1,3</sup>, FAN Chang-fu<sup>1,5</sup>, SHENG Jing-jin<sup>1,6</sup>, CHEN Yong-sheng<sup>1,6</sup>, LIU Hui-min<sup>1,6</sup>

1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170;
2. 中国地质科学院研究生院, 北京 100037;
3. 中国地质大学海洋学院, 北京 100083;
4. 天津科技大学海洋科学与工程学院, 天津 300457;
5. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;
6. 吉林大学地球科学学院, 吉林 长春 130061

1. *Tianjin Centre, China Geological Survey, Tianjin 300170, China;*
2. *School of Graduates, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;*
3. *School of Marine Sciences, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;*
4. *School of Marine Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China;*
5. *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;*
6. *School of Geosciences, Jilin University, Changchun 130061, Jilin, China*

**摘要:**通过对渤海湾西岸 1895 年以来 11 次风暴潮高水位的厘定,证实并确定了 50 年、100 年、200 年直至 10000 年一遇的风暴潮高水位值。定量评估了风增水与波浪对风暴潮高水位的贡献。进一步从地学角度讨论了 21 世纪 10 年间隔的海面上升量、地面下沉与围海造陆共同作用、海面上升引发的净增水效应及河口增水效应。根据上述各类参数,预测了至 2050 年的 10 年间隔、50~10000 年不同重现期的极端水位,并讨论了地面下沉对风暴潮测量准确性的影响。认为当前的防潮堤(海墙)高度可抵御 50~100 年一遇的风暴潮的侵袭,但据所讨论的综合因素的影响,建议 2020 年防潮堤的高度应达到+4.8m,2030 年达到+5.1m(85 高程)。

**关键词:**渤海湾西岸;风暴潮高水位;趋势预测

中图分类号:P736 文献标志码:A 文章编号:1671-2552(2010)05-0641-09

Wang H, Shang Z W, Wang F, Li J F, Pei Y D, Tian L Z, Fan C F, Sheng J J, Chen Y S, Liu H M. Storm surges in the west coast of Bohai Bay, China. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(5):641-649

**Abstract:** Based on collation of the flooding levels of the 11 storm surges since 1895 in the west coast of Bohai Bay, this paper verified and redefined the flooding levels with a probability of exceedance of 1 in 50, 100, 200... to 10000 years. Contributions of both wind set-up and wave to high water levels are quantitatively estimated as 50cm, respectively. Moreover, the various factors, including sealevel rise (starting from 2009 for every 10-yr-interval in 2009-2100: 3-31cm), land subsidence coincident with reclamation, net increase of flooding level stimulated by the sealevel rise (2020-2050: 7.5-30cm) and the mouth-channel effect (10cm) were discussed. Based on these parameters, the extreme flooding levels under probability of exceedance of 1 in 50 to 10000 years, respectively, were predicted until 2050 for every 10-yr-interval, and the leveling-correction affected by the subsidence was also discussed. We indicate the height of the existing seadike is capable to defense the storm surges of 1 in 50 to 100 years. However, based on the comprehensive factors discussed in this paper, it is suggested that the seadike should be reached to +4.8m in 2020 and +5.1m in 2030, respectively (both the State 85 Datum).

**Key words:** the west coast of Bohai Bay; flooding levels of storm surges; trend prediction

收稿日期:2010-01-25;修订日期:2010-03-01

科技项目:中国地质调查局国土资源大调查项目(编号:1212010540501、1212010814004、1212010911069)、国家 908 专项、天津市海洋局和天津港(集团)有限公司项目资助

作者简介:王宏(1948-),男,博士,研究员,从事泥质海岸带近现代地质环境变化研究。E-mail: tjwhong@cgs.gov.cn

位于环渤海地区中心位置的天津市滨海新区,是继深圳经济特区、浦东新区之后的又一个带动区域经济发展的新的增长极,连同“北方经济中心”天津市,近年来表现出极为强劲的经济社会发展势头。

但是,滨海新区所在的渤海湾西岸,不同于基岩海岸带和砂质海岸带,属于地质环境与生态环境更为脆弱的泥质海岸带。而沿海低地—高潮岸线—潮间带—浅海区狭长的条带正是海、陆两大系统在泥质海岸带的表面相互作用的地带,众多地质要素——地面下沉、海面上升背景下的风暴潮高水位、岸线(及沿海工程)侵蚀、河口与潮间带淤塞、浅表地层生态属性对环境的影响、断层活动、埋藏的河道及潮道、软土层等交织于此,地质条件复杂,对中长尺度的生态安全构成潜在的威胁。为此,需对所有地质要素分门别类逐一认真研究,并尽可能作出定量的评价。

本文以风暴潮灾害(它不是单纯的天气现象,地面下沉、全球变暖背景下的海面上升等复杂因素均可加剧其致灾能力)为对象,以研究小组前期的成果为基础<sup>[1-4](1)-(5)</sup>,通过对渤海湾西岸近百年来风暴潮高水位的研究,确定了不同重现期风暴潮的高水位值,并结合气象因素和地学因素对研究区不同时段的风暴潮高水位趋势进行了预测,最后对渤海湾西岸防潮堤高度设计的合理性提出了建议。

## 1 渤海湾西岸的风暴潮

渤海湾西岸数千年来的海、陆交替过程,穿插了大量短暂、剧烈的变化,其中即包括风暴潮事件<sup>(6)</sup>。由潮汐和风暴驱动的风暴潮极端高水位造成的岸线蚀退、沿海低地大面积淹没,近千年间曾反复发生<sup>(7)-(8)</sup>(图1)。

对前人统计数字的研究表明,1550—1949年的400年间,风暴潮的发生频率是1次/8年;1950—1997年间是1次/1.7年。如果说这里可能存在统计学上的误差,那么随着人类在海岸带地区经济社会活动的增强,即便是同等级别的风暴潮,今天造成的损失也远大于数百年前,是可能的<sup>[9]</sup>。本文搜集并研究了文献中近百余年来历次致灾风暴潮的高水位记录(表1),经过对众多研究者数据的对比研究和对不同高程系之间换算关系的考证,最后采用文献[5](表2)的数据,确定了渤海湾西岸不同重现期的气象风暴潮高水位值(表2)。

## 2 地学意义的风暴潮高水位趋势分析

### 2.1 风暴潮高水位趋势分析的影响因素

本文讨论的风暴潮高水位是指在海面上升、地面下沉、局部地理条件背景下向岸大风(飓风、台风)与天文大潮叠加形成的强风暴潮到达海岸时产生的异常高水位。该高水位的确定及趋势分析,除考虑气象因素的影响外,还有地学因素(包括全球变化等所有的复杂因素)的叠加。

#### 2.1.1 气象因素对风暴潮高水位的贡献

##### (1)风增水

表1和表2中的实测风暴潮水位(及据此做出的风暴潮重现期推算),是由天文潮、风增水等多种因素共同决定的。但是,风增水最高水位常不与天文潮最高水位同时发生(即二者不一定同相位)。塘沽海区1950—1974年的统计数字表明,在天文潮最高水位前后2小时(共计4小时)内风增水最高水位出现的频率是12%,前后3小时(共计6小时)内出现的频率是32%<sup>[11]</sup>。此外,零散的风增水数据还包括:1965年风暴潮最高水位由风增水贡献了211cm<sup>[7]</sup>、2003年10月11日的风暴潮最高水位由风增水贡献了178cm<sup>[8]</sup>等。文献[5,12-13]根据对强天气过程实测值的统计与模拟,获得50年一遇和100年一遇的风增水极值在塘沽分别为约2.5m、2.6m或2.7m、2.8m,在埕北分别为1.9m和2.1m。

笔者尚不完全了解表1中近百余年来的11次较大风暴潮发生时风增水的具体贡献值(潮汐预报部门可以做到这一点),目前能确定的数值是塘沽的1.14m与2.11m增水值<sup>[5,7]</sup>、歧口12次风暴潮的平均增水值1.19m<sup>[4]</sup>,与风增水2.5~2.8m极值<sup>[5,12]</sup>的差仍至少有0.5~1.5m。本文即以0.5m作为最大风增水与最大天文潮同相位(或接近同相位)时应增加的风增水补充值,超过百年一遇的情况沿用此数值。

##### (2)波浪

包含在风增水中波浪的贡献有特别加以考虑的例子(与荷兰三角洲委员会J. de Ronde的讨论,2007)。渤海湾西岸塘沽近海1973—1985年统计的平均浪高为0.6m,实测最大浪高为4.0m,一般在2.5~3.5m之间<sup>[15]</sup>。若4m极端大浪出现,比上述风增水极值2.5~2.8m还要高1m以上。对此,本文以再增加0.5m来粗略地定义浪高极值(与最高天文潮、最高风增水三者同相位时)的贡献。

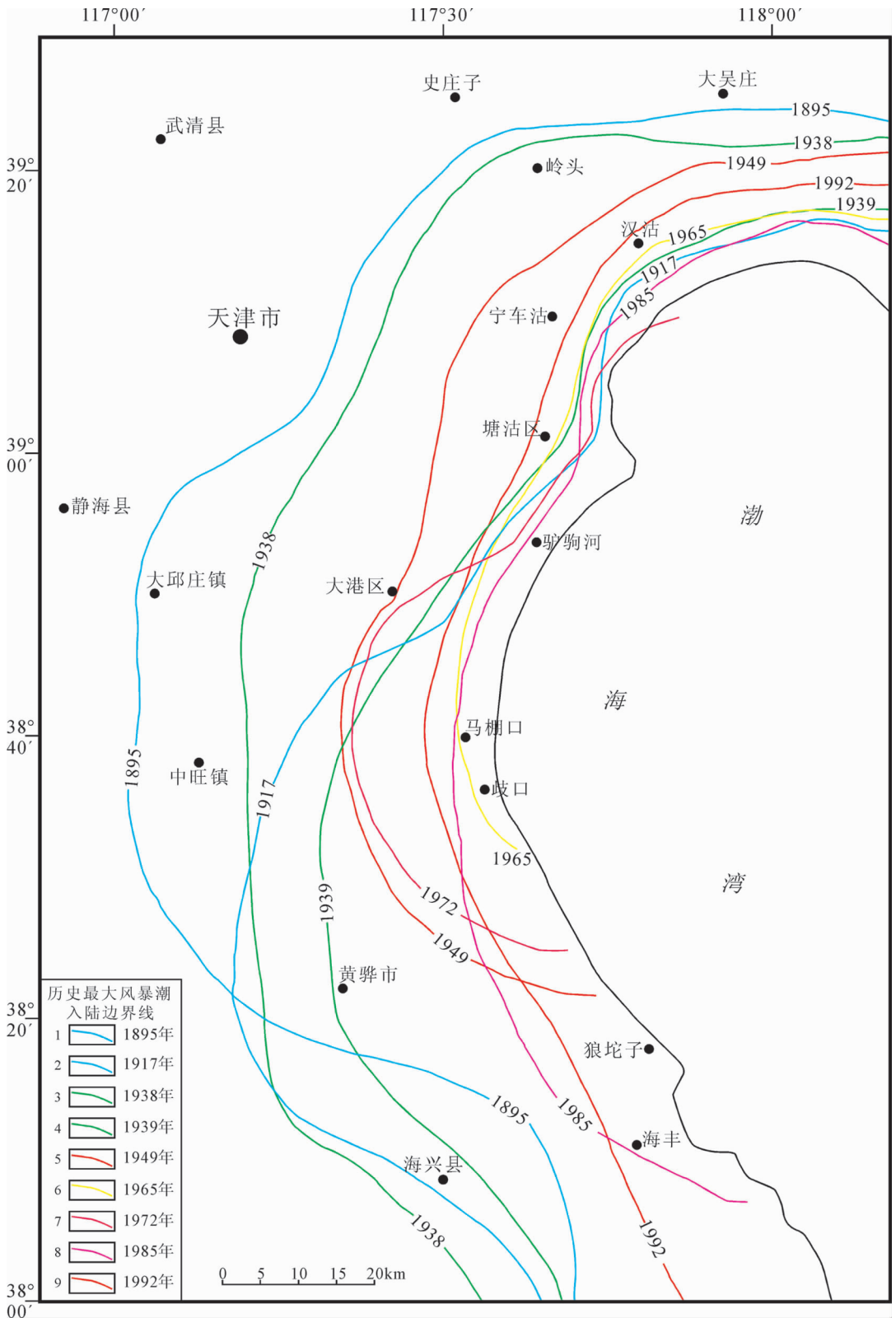


图 1 渤海湾西岸 9 次重大风暴潮淹没范围<sup>①</sup>

Fig. 1 Map showing the inundation areas of nine most severe storm surges in the west coast of Bohai Bay

9 次风暴潮指 1895、1917、1938、1939、1949、1965、1972、1985 和 1992 年的风暴潮

表1 渤海湾西岸19世纪末以来较大风暴潮水位记录(据参考文献(2)修改)

Table 1 Records of the water levels of the severe storm surges since the late 19<sup>th</sup> century in the west coast of Bohai Bay

发生时间 (年/月/日)	高水位	验潮站位置、所属高程系及出处	本文推测所 依高程系	换算为 85 高程系/m	说 明	重现期
1895/04/28	+4.8m	塘沽北炮台验潮站:“天津近百年来发生的大风暴潮位大沽沙6.1米(1895年),折算北炮台约4.8米” <sup>(8)</sup>	1951年前大沽 <sup>a</sup>	+3.557	1895—1951年的56年间,自然下沉约30cm,归化到1951年大沽高程系约+5.1m(=4.8+0.3)	介于200年一遇与500年一遇间
1911/08/30	+13.3ft	塘沽北炮台验潮站 <sup>[6](8)</sup>	1951年前大沽	+2.710	13.3ft=4.053m,1911—1950年40年间,自然下沉约20cm,归化到1951年大沽高程系+4.253m	10年一遇
1917/08/21	+13.5ft	塘沽北炮台验潮站 <sup>[6](7-8)</sup>	1951年前大沽	+2.737	13.5ft=4.115m,应增加17cm的下沉补偿量至约+4.28m	介于10年一遇与20年一遇间
1938/08/11	+5.5m	歧口以南 <sup>(7-8)</sup>	1951年大沽	+4.017	先增加13年的下沉补偿量约6cm,再减去1.543m,换算为85高程	大于1000年一遇(?)
1938/08/11	+5.1m	塘沽,“大沽标高” <sup>(10)</sup>	1951年大沽	+3.617	算法同上	介于200年一遇与500年一遇间
1939/08/31	+5.63m	塘沽北炮台,“新大沽零点” <sup>[5b]</sup>	1972年大沽	+2.962	5.63-1=4.63m,此为大沽零点。4.63-1.668=2.962m,折算为85高程值(以下凡“新大沽零点”起算的均如是)	50年一遇
1965/11/07	+5.72m	渤海湾西岸,“新大沽零点” <sup>[5]</sup>	1951年大沽	+3.052	=5.72-1-1.668	50年一遇
1965/11/07	+5.1m	塘沽,“大沽标高” <sup>(10)</sup>	1951年大沽	+3.557		介于200年一遇与500年一遇间
1965	+4.51m	大沽基面 <sup>[7]</sup>	1951年大沽(?)	+2.967		介于20年一遇与50年一遇之间
1972/07/27	+5.0m	塘沽,“大沽标高” <sup>(10)</sup>	1951年大沽	+3.457		200年一遇
1972/07/27	+5.40m	塘沽,“新大沽零点” <sup>[5]</sup>	1972年大沽	+2.732	=5.4-1-1.668	10年一遇
1972	+4.40m	大沽基面 <sup>[7]</sup>	1951年大沽(?)	+2.857		10年一遇
1985/08/19	+4.96m	塘沽,“大沽标高” <sup>(10)</sup>	1951年大沽	+3.417		200年一遇
1985/08/19	+5.45m	塘沽,“新大沽零点” <sup>[5]</sup>	1972年大沽	+2.782	=5.45-1-1.668	10年一遇与20年一遇之间
1992/08/28	+5.87m	塘沽验潮站,未提及依何种高程系 <sup>[8]</sup>	1951年大沽(?)	+4.327		?
1992/08	+4.93m	大沽基面 <sup>[7]</sup>	1972年大沽	+3.262		100年一遇
1992/09/01	+5.93m	塘沽,“新大沽零点” <sup>[5]</sup>	1972年大沽	+3.262	=5.93-1-1.668	100年一遇
1992/09/01	+6.14m	海河节制闸,从大沽冻结基面起算,扣除地面沉降为大沽高程+4.83m <sup>[9]</sup>	1951年大沽 <sup>c</sup>	+3.287		100年一遇
1997/08/20	+5.54m	塘沽验潮站,未提及依何种高程系 <sup>[8]</sup>	1972年大沽(?)	+3.872		?
1997/08/20	+5.59m	塘沽,“新大沽零点” <sup>[5]</sup>	1972年大沽	+2.922		20年一遇与50年一遇之间
1997/08/20	+3.59m	黄骅港,黄海高程 <sup>[10]</sup>	56高程	+3.561		200年一遇与500年一遇之间
2003/10/11	+5.54m	塘沽验潮站,未提及依何种高程系 <sup>[8]</sup>	1972年大沽(?)	+3.872		?
2003/10/11	+3.80m	黄骅南排河,黄海高程 <sup>[10]</sup>	56高程	+3.771		500年一遇与1000年一遇之间

(注释见下页)

注:根据目前掌握的资料,对近百年来不同时期的潮位数据所依高程系作如下定义:①1951年前,北炮台大沽高程系;②1951—1998年,黄铜点1951大沽高程系;③1998年至今,1972大沽高程系。所有高程值均统一归化至85高程系,为此,属于1951大沽高程系的高程值减去1.543m,1972高程系的数值减去1.668m<sup>[11]</sup>;属于1951年前高程系的数值先加上至1951年的累加自然下沉量(5mm/a)<sup>[12]</sup>,以校正、归化到1951大沽高程系,然后减去1.543m,进一步归化到85高程。a—塘沽海河河口(现海河船闸西侧)的北炮台验潮站始建于20世纪初,该站的水准点在很长一段时间曾作为大沽高程系的原点,是天津地区最早建立的3个验潮站之一(另2个天津港和小孙庄建于海河内河),有1910—1953年的连续验潮记录<sup>[12]</sup>。b—“新大沽零点”,经询原作者,较原大沽零点低1m(吴少华,2008.11.09);又经询北海分局塘沽中心站,自1976年1月1日后验潮尺零点较前降低1m(李甲第,2008.12.15)。因此,本文所引“新大沽零点”高程值须减去1m,恢复为1972(?)大沽高程值。c—原文表1的注特别指出大沽基面=黄海基面+1.514m,据此可确知该文是1951年大沽高程系。本表换算为85高程的渤海湾西岸100余年来的几次最高的水位记录,以斜体字表示,它们分别是+4.017、+4.327、+3.872和+3.872m。但是,这4个数据或高程系不清,或在歧口以南,不宜采用(仅在后文讨论地面沉降对水位记录准确性的影响时采用,详见下)。若依文献[9]的观点,则百年一遇(至少50年一遇)的水位是+3.287m,此与文献[5]所记载的同一天的“本世纪以来的最高潮位”+3.262m相近,是可信的,即将+3.262m(表内黑体字)视为百年一遇的高潮位,较有把握。该值又相当于新港高程+5.93m

表 2 渤海湾西岸不同重现期气象风暴潮高水位预测  
(据参考文献[5]换算)

Table 2 Flooding level predictions of the various exceedance probabilities for meteorological storm surges in the west coast of Bohai Bay

重现期	85 高程/m	1951 大沽高程/m	1972 大沽高程/m
50 年一遇	+3.092	+4.635	+4.760
100 年一遇	+3.262	+4.805	+4.930
200 年一遇	+3.422	+4.965	+5.090
500 年一遇	+3.642	+5.185	+5.310
1000 年一遇	+3.802	+5.345	+5.470
10000 年一遇	+4.352	+5.895	+6.020

注:文献[5]给出的数值以“新大沽零点”起算,本表做了折算,参见表1注。这里的85高程是国家高程。尽管天津市习惯用地方高程,但为对比和研究(例如跟踪并参考全球/全国海面变化数据,研究海面上升与风暴潮的关系等)方便,列出它们的85高程值。大沽1951高程系、1972高程系与85高程系之间的差值分别是1.543m和1.668m

### 2.1.2 地学因素对风暴潮高水位的贡献

#### (1)海面上升

IPCC(联合国政府间气候变化专门委员会)2007年指出,20世纪全球海面上升了17cm,随着全球气温升高,21世纪海面将再上升18~59cm(IPCC 6种不同预测方案的最小值与最大值)。表3给出了6种方案中处于中间位置的A1B方案的预测结果<sup>[16-17]</sup>和中国国家海洋局多年来一直发布的关于中国海平面持续上升的数据<sup>[18-19]</sup>。A1B方案预测,相对于1980—1999年的海面平均值,2100年时海面的上升幅度将达到21~48cm<sup>[16]</sup>。鉴于本文预测的是自2009年起开始的变化(即起算年份为2009年),为此对上升范围、上升量数值作了相应的调整。此外,

为计算方便,本文选用该方案预测范围的中点作为海面上升量最佳预测值(如表3第3列所示)。

#### (2)地面下沉—围海造陆共同作用

渤海湾西岸地面下沉的速率一般在1.5~2.5cm/a之间(实际上一些地区可能远大于此数值)。本文采用控沉后的塘沽地面沉降速率2.5cm/a<sup>[20]</sup>,作为渤海湾西岸地面下沉的预测速率。

当前的围海造陆是在潮间带和浅海区进行的,即在20世纪末沿平均大潮高潮线修建的“海防公路”和海埭的外侧(向海一侧)。原海防公路和海埭的内侧(向陆一侧)是大面积的沿海低地,其原始状态是泻湖、盐沼和近海的冲积洼地(河流搬运的泥砂覆于最表层)。愈向内陆,陆地和人类活动的影响愈明显;泻湖和盐沼变成淡水沼泽或湖泊(如七里海)、村落与农田相交织(如八里台镇、华明镇及周边的农田)。愈向海,则陆地和人类活动的影响愈弱。例如在津南区西部、宁河县西北部发育很好的隋唐时期形成的土壤层,向东、东南靠近海边逐渐消失——准确地说,是成陆较晚还来不及形成好的土壤,村落变得相对稀疏,农田被盐池和养殖池取代。但这一切却因20世纪末的大规模围海造陆而发生了巨大的变化。

笔者担心,沿海地区地面长期下沉与围海造陆导致地下潜水反向并积存,将使潜水位抬升,造成大雨时排水困难、地表水滞留时间变长。这一“沼泽化”发展趋势及其对中长期生态环境质量可能产生的影响不可不察(图2)。

#### (3)海面上升引发的净增水效应

模拟研究表明,某一重现期的风暴潮高水位随着海面的上升将发生变化<sup>[22-24]</sup>。一种假设是,当2050

年海面上升 20cm 时,50 年一遇的风暴潮水位将增高 50cm<sup>[22-23]</sup>。本文假定此处的海面上升 20cm 与其诱发的净增水 50cm 之间存在线性关系,并近似地适用于不同的海面上升值,根据 2050 年时全球海面上升值预计是 12cm(表 3),给出(渤海湾西岸)海面上升背景下 10 年间隔的风暴潮净增水估计值(表 4)。

(4) 河口增水效应

2008 年 11 月 29 日的遥感影像显示,天津新港南疆港区、30 万吨原油码头和天津临港工业区的围海造陆,已经导致海河防潮闸以下河道北侧加长约 14km,南侧加长约 9km。按荷兰斯凯尔特河 Vlissingen-Bath 段河道纳潮导致潮位增高的经验值 1cm/km<sup>[25][4]</sup>,同一次潮水在海河防潮闸应比开放海湾岸线处高 9~14cm,取中间值 12cm<sup>[3]</sup>。今后,海河口的人工河道还将随着造陆区向海伸展而继续延长,因此河口效应亦将继续增强。为计算方便,本文建议凡毗邻河口的防潮堤宜以再加高 10cm 设计,以抵消河口纳潮导致的增水效应。

2.2 地学意义上的风暴潮高水位预测

以上分别从气象风暴潮与地学因素影响 2 个方面综述了渤海湾西岸风暴潮的历史与现状,根据对各类数据的综合研究,表 5 列出了在各影响因素参与下不同预测时限的风暴潮高水位。

塘沽盐场 1992 年风暴潮致灾情况调查表明,该地比+4.93m(参见表 2)最高潮低约 90cm 的堤段均发生潮水漫溢现象<sup>[7]</sup>,这就是地面下沉、风增水、浪高补充值(习称“波浪爬高”)、河口增水等复杂因素

表 3 IPCC 海面上升曲线(A1B 预测方案)给出的海面上升值  
(以 2009 年海平面为起算点)<sup>[17]</sup>

Table 3 Prediction of the sea level rise given by IPCC A1B scenario from the starting point of 2009

年份	海面上升幅度 /cm	海面上升值最佳预测值 /cm	国家海洋局的相关信息
2009	0	0	
2020	0~5	3	中国近海未来 10 年海平面将比 2007 年高 3.2cm,其中天津将比 2007 年上升 3.9cm(2008)
2030	1.5~9	6	
2040	4~13	8	中国近海未来 30 年海平面将比 2008 年高 8~13cm(2009)
2050	6~19	12	
2100	19~47	31	

表 4 海面上升激发的风暴潮净增水估计值

Table 4 Net increase of the flooding level of storm surge, stimulated by the sea level rise

预测年限	海面上升最佳估计值/cm	海面上升激发的净增水量/cm
2020	3	7.5
2030	6	15
2040	8	20
2050	12	30

共同作用的结果。因此,文献[7]认为防潮堤顶的设计高度比实测潮位高 1m 是适当的。在设计中,对实际发生的高于某一风暴潮重现期的高水位的定量评估,通常并不对原因作更多的分析,仅笼统地给出一个可以接受的“超高值”<sup>[26]</sup>。表 5 的风增水补充值和浪高补充值(及暴雨等其他因素)暂定为 1m,统归入“气象因素”大类,即属于设计部门通常要考虑的超高值。至于海面上升、地面下沉、海面上升引起的净

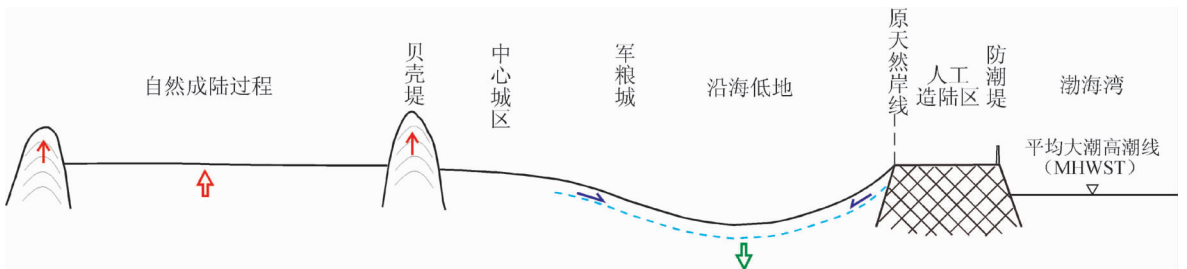


图 2 地面下沉-围海造陆共同作用对沿海低地的影响示意图

Fig. 2 Sketch map illustrating the coincident effect of ground subsidence and reclamation in coastal lowland

渤海湾西岸近 7500 年来的自然成陆:当作为古海岸线的贝壳堤形成时(堤内部向上的箭头表示贝壳堤的堆积),与堤相间的大面积的低地因河流决口带来的泥砂而同时向上加高(红色箭头)。近 1 个世纪以来的状况:河流被约束在河床内,沿海低地的向上加高几乎为零<sup>[27][3]</sup>;相反,地面因人类活动开始下沉(蓝色箭头)。沿原天然岸线分布的围海造陆区块,像一道堤坝一样阻止地下水向海的自然运移,甚至已经开始出现地下水水位反向倾斜的初步迹象(蓝色线条箭头)<sup>[6]</sup>

增水及河口效应,在表 5 中统归入“地质因素”,合计 0.38~1.445m。

### 3 讨 论

本文试图基于尽可能详尽的数据,向读者展示渤海湾西岸近百年来风暴潮的历史与现状,以及在众多因素参与下今后的风暴潮高水位趋势预测。下文中就地面沉降影响风暴潮水位测量、防潮堤高度等作进一步的讨论,并提出初步建议。

#### (1)地面下沉对风暴潮测量准确性的影响

受天津沿海平原区长期缓慢下沉的影响,该地区的水准点也处于不断下沉的过程中。这对风暴潮水位测量和风暴潮重现期的研究均会产生一定的影响。以 1938 年 8 月 11 日和 1992 年 9 月 1 日 2 次风暴潮为例,图 3 示意性地表现出 1938 年风暴潮水位比 1992 年更高的可能性,尽管后者被很多研究者和笔者用作渤海湾西岸百年一遇的记录。

这一实例说明,加强风暴潮研究是十分必要的。如果对风暴潮测量的起算基点不做下沉校正,则可能影响到对风暴潮重现期水位高度值的正确判断,从而对造陆和其他海岸工程的安全构成威胁。表 5 “地质因素”类的“地面下沉”,仅指因地面下沉造成的防潮堤下沉,等同于海面的相对升高,不包括这里因下沉造成风暴潮水位测量的误差。今后,似应在对此取得共识后,同样给出一个相对宽泛的校正范围,补加到工程设计通用的风暴潮重现期水位值之上。因此,表 5 给出的风暴潮水位数值,就这一点而言是保守的估计。

#### (2)关于防潮堤的高度

目前,沿平均大潮高潮线修建的防潮堤(海挡)

提高可以抵御 50 年至百年一遇的风暴潮侵袭(表 2 中 50 年、100 年一遇风暴潮水位)。但是,在地质因素和气象因素的影响下,这 2 个数值是偏低的。据天津地质调查中心对 69 处海挡高程进行实测获得的平均值,粗略推断天津市海挡的平均高程是约+4.5m(85 高程,折合为 1972 大沽高程约+6.17m),但有至少 7 处、累计 30~40km 长的低于+4m 的岸段,在 2003 年 10 月 11 日风暴潮时漫溢<sup>(15)</sup>(图 4)。据此,本文建议,2020 年围海造陆区的防潮堤和直接面向开放海湾高潮岸线处的防潮堤的高程,以能抵御 200 年一遇的风暴潮侵袭为标准,即应达到 1972 大沽高程系约+6.5m 的高度;2030 年时,应达到约+6.8m 的高度(表 5)。这 2 个数值折合成 85 高程,分别是约+4.8m 和+5.1m。

应予高度关注的是,在设计和施工时,必须考虑到所有可资使用的、就近的 1972 高程系水准点均已经历了近 40 年的沉降。因此,不能简单地照抄该转点的原有高程值,还必须加上该转点的相应的下沉校正值。

### 4 结 语

风暴潮对岸线及近岸低地的侵蚀、淹没是渤海湾西岸成陆过程中不可避免的现象。今天的人工围海造陆,如何适应风暴潮,协调造陆自身发展与造陆区块“腹地”沿海低地的中长期生态环境安全,是当前政府部门和造陆产业在造陆的同时必须兼顾的大事。

本文讨论了在各种因素参与下不同时段的风暴潮水位的可能高度,为今后渤海湾西岸泥质海岸带的大规模开发提供了参考数据。目前,沿平均大潮高潮线修建的防潮堤(海挡)提高可以抵御 50 年至百年一遇的风暴潮侵袭(表 2 中 50 年、100 年一遇风

表 5 渤海湾西岸不同重现期风暴潮时的极端水位预测(1972 大沽高程)

Table 5 Prediction for the extreme high flooding of the different exceedance probabilities of the storm surges in the west coast of Bohai Bay, 1972' Taku Datum

年份	地 质 因 素				合计 /cm	气 象 因 素			合计 /cm	50 年一 遇/m	100 年 一遇/m	200 年一 遇/m	500 年一 遇/m	1000 年 一遇/m	10000 年 一遇/m
	海面 上升 /cm	地面 下沉 /cm	海面上升 引起的净 增水/cm	河口 效应 /cm		风增水补 充值/cm	浪高补充 值/cm	其他 因素							
从 2009 年 12 月起算	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+4.760	+4.930	+5.090	+5.310	+5.470	+6.020
2020	3	27.5	7.5		38					+6.140	+6.310	+6.470	+6.690	+6.850	+7.400
2030	6	52.5	15		73.5	50	50	?	100	+6.495	+6.665	+6.825	+7.045	+7.205	+7.755
2040	8	77.5	20	10	105.5					+6.815	+6.985	+7.145	+7.365	+7.525	+8.075
2050	12	102.5	30		144.5					+7.205	+7.375	+7.535	+7.755	+7.925	+8.465

注:地面下沉速率按 2.5cm/a 计,地面下沉引起海面的相对上升。气象因素一栏中的“其他因素”是为暴雨等附加因素预留的

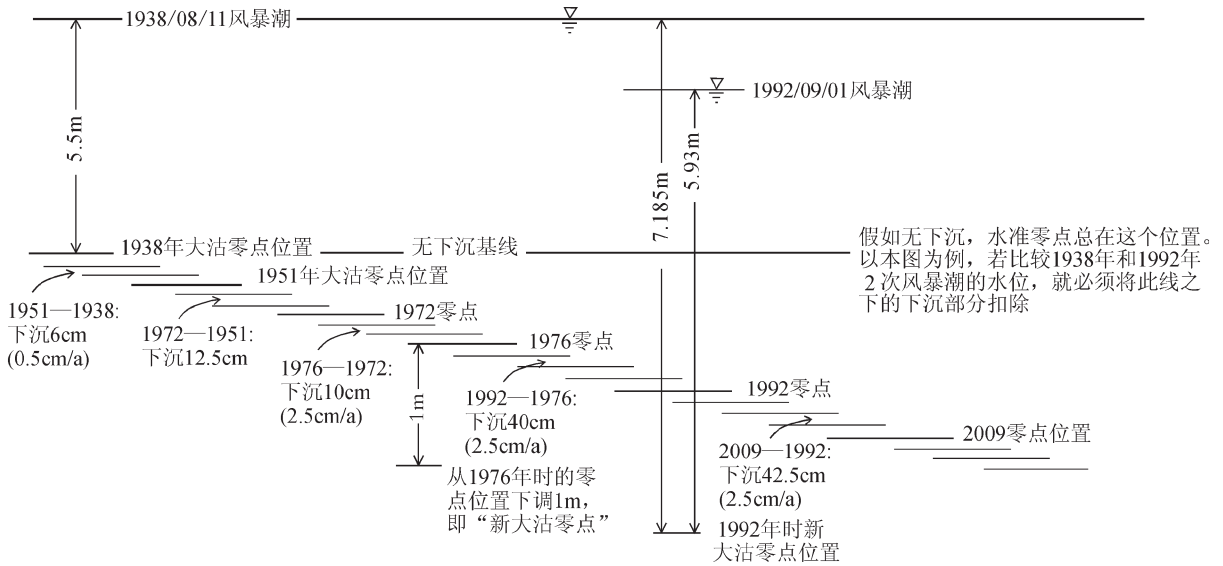


图3 水准原点沉降可能对水位观测产生影响的示意图

Fig. 3 Sketch map illustrating the local bench mark subsidence may influence the water level observations 大沽高程,图中的1992/09/01风暴潮水位+5.93m是自“新大沽零点”起算的,在表3中折合为1972高程是+4.93m。垂直比例尺是任意的。1938/08/11歧口风暴潮水位+5.5m<sup>①</sup>(表2)。大沽水准点所在位置的下沉量:1951年之前的自然沉降,按0.5cm/a计<sup>②</sup>;1951—1972年下沉量为12.5cm<sup>③</sup>;1972—2009年按平均下沉速率2.5cm/a粗略推算。1976年1月1日采用的“新大沽零点”,是从大沽零点下调1m(与吴少华的通信,2008),而1976—1972年4年的时间,该零点位置又下沉了约10cm(=2.5cm/a×4a)。如果将1992年依“新大沽零点”实际所在位置测量的水位+5.93m归化到1972高程系,必须先扣除1976—1972年的下沉量10cm(如+5.93m未作如此校正,则应校正为+5.83m),然后再减去1m

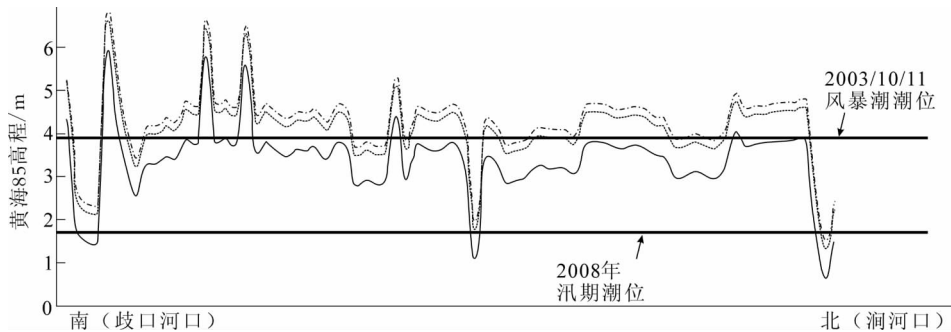


图4 天津市防潮堤实测高度与2003年10月11日风暴潮水位关系示意图<sup>④</sup>

Fig. 4 Sketch map showing the relationship between the measured height of the seadike in Tianjin City and the flooding level of the storm surge in 11.10.2003

最上面的曲线是现在153km防潮堤堤顶的连线位置(下面的2条曲线是受地面下沉的影响,该堤顶高度在2017年和2050年时的位置)。85高程小于+4m的防潮堤段(折合1972大沽高程约+5.67m)在2003年10月11日风暴潮时漫溢

记录,该区块原始地表已有高程、工程地质条件等)、投资规模、项目性质(例如是一般的招商引资或特别的政府间合作项目,后者如“中新天津生态城”),乃至可资参照的已有围海造陆区的地表高度参数(例如滨海新区新的围海造陆项目经常参照天津新港的高程)等多种因素博弈的结果。实际上决定了任何

但是,在地质因素和气象因素的影响下,这2个数值是偏低的。另一方面,假如围海造陆区固结后的地表和防潮堤足够高,自然不必担心风暴潮的发生。但是,某一具体的围海造陆区块(各功能区)高度的确定,是该地区已有的地质条件(如该地区不同重现期风暴潮高度的记录,历史上风暴潮致灾的

一个围海造陆区块的高程均受到多种因素的制约。因此,如何在经济效益与自然-社会因素(亦即综合环境承载力)之间找到一个尽可能合理的“平衡点”,是至关重要的问题。

致谢:李凤林研究员、宋美钰硕士参加了前期工作,中国地震局第一监测中心黄立人研究员审阅文稿并提出了修改意见,在此一并致谢。

## 参考文献

- [1]王宏,商志文,裴艳东,等.飓风的启示:渤海湾西岸现状与趋势分析[J].地质论评,2007,53(1):83-91.
- [2]王宏,宋美钰,王福,等.渤海湾西岸泥质海岸带地质环境现状与趋势预测[J].地质通报,2008,27(6):726-738.
- [3]宋美钰,王福,王宏.21世纪中叶天津沿海地区极端高水位趋势预测[J].地质通报,2008,27(6):829-836.
- [4]王福,宋美钰,田立柱,等.影响天津滨海新区建设的地质环境[J].海洋地质动态,2008,24(6):9-14.
- [5]吴少华,王喜年,宋珊,等.天津沿海风暴潮灾害概述及统计分析[J].海洋预报,2002,19(1):29-35.
- [6]刘安国,张德山.环渤海的历史风暴潮探讨[J].青岛海洋大学学报,1991,21(2):21-36.
- [7]张效良.天津沿海风暴潮位的频率分析与海堤建设[J].中国减灾,1995,5(2):46-48,58.
- [8]王万筠,殷海涛,赵玉洁.近50年滨海新区风暴潮及强增水个例分析[J].天津航海,2007,(2):66-69.
- [9]段志华.再析天津渤海沿岸风暴潮特性及防御减灾对策[J].海洋预报,2002,19(1):43-50.
- [10]张志悦.沧州沿海“10.11”特大温带风暴潮灾情成因分析[J].海洋预报,2004,21(2):74-77.
- [11]施平,郭洪寿.塘沽温带风暴潮及其预测研究[J].海洋预报服务,1984,1(1):33-42.
- [12]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.
- [13]赵滨,张平,汪景庸.渤海埕北海域风暴潮多年一遇极值增水的数值计算[J].黄渤海海洋,2000,18(3):14-19.
- [14]王永昌,张金堂,张志悦.渤海湾沧州岸段风暴潮[J].河北水利水电技术,1994,(1):12-15.
- [15]邹涛,刘秀梅,叶凤娟.天津沿岸海浪特征及分析[J].海洋预报,2002,19(4):11-16.
- [16]IPCC. Summary for Policymakers [C]//Solomon S, et al. Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007: 1-18.
- [17]Bindoff N L, Willebrand J, Artale V, et al. Observations: Oceanic Climate Change and Sea Level[C]//Solomon S, et al. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA,2007:387-429.
- [18]国家海洋局.2007年中国海平面公报[R].http://www.soa.gov.cn, 2008.
- [19]国家海洋局.2008年中国海平面公报[R].http://www.soa.gov.cn, 2009.
- [20]周明.本市地面沉降速率减缓[N].城市快报,2006-11-30.
- [21]李建芬,王宏,夏威夷,等.渤海湾西岸<sup>210</sup>Pb、<sup>137</sup>Cs测年与现代沉积速率[J].地质调查与研究,2003,26(3):114-128.
- [22]Lavery S, Donovan B. Flood risk management in the Thames Estuary looking ahead 100 years[J]. Philos. T. Roy. Sci. A., 2005, 363: 1455-1474.
- [23]Lowe J A, Grgory J M. The effects of climate change on storm surges around the United Kingdom[J]. Philos. T. Roy. Sci. A., 2005, 363: 1313-1328.
- [24]Nicholls R J, Wong P P, Burkett V R, et al. Coastal Systems and Low-lying Areas[C]//Climata Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2007: 317-356.
- [25]Van de Plassche O. Introduction[C]//Van de Plassche O. Sea-Level Research: A Manual for the Collection and Evaluation of Data. 1986: 1-26.
- [26]李维涛,王静,陈丽棠.海堤工程防风暴潮标准研究[J].水利规划与设计,2003,(4):5-9.
- (1)王福,裴艳东,田立柱,等.天津市潮间带后备土地资源评价与选划:我国近海海洋综合调查与评价报告(908专项).天津市海洋局项目,2008:1-50.
- (2)王福,王初生,宋美钰,等.海平面上升及极端增水对天津新港工程规划建设的影响和对策研究.天津港委托课题,2008:1-101.
- (3)王福,裴艳东,王云生,等.黄骅港及渤海新区地质环境评价报告.河北省国土资源厅项目,2008:1-117.
- (4)裴艳东,李凤林,王云生,等.天津市海岸带调查报告:我国近海海洋综合调查与评价报告(908专项).天津市海洋局项目,2008.
- (5)天津地质调查中心海岸带与第四纪地质研究所.“+5m大沽高程”的安全意义:为拟进驻天津临港工业区某企业所做的风暴潮趋势评估报告.2009.
- (6)王宏,商志文,裴艳东,等.渤海湾西岸成陆史与风暴潮.2009.
- (7)翟乾祥.渤海沿岸历史海啸(风暴潮)资料年表及初步分析.1978:1-41.
- (8)翟乾祥.渤海湾潮灾.见:崔士光.天津七十二沽与渤海西岸减灾.1998:26-55.
- (9)李凤林.渤海湾西岸环境地质图集.2008.
- (10)天津市海岸带地质地貌协调组.天津市海岸带地质地貌调查报告.1985.
- (11)天津市测绘局.关于启用“1972年天津市大沽高程系”及与国家高程系换算数值关系的通知.1998.
- (12)黄立人,赵承坤.渤海海平面变化及天津市的地面沉降.国家地震局测量大队,1989:1-16.
- (13)王宏,李建芬,康惠,等.泥质海岸带现代地质作用(沉积、剥蚀及岸线变迁)与精细测年.2002:1-82.
- (14)Van de Plassche O. Sea-level change and water-level movements in the Netherlands during the Holocene. PhD Dissertation, Vrije Universiteit Amsterdam, 1982: 1-148.
- (15)天津地质调查中心海岸带与第四纪地质研究所.2007—2008年天津市地表高程测量数据.2008.