



浙江大學 海洋學院

OCEAN COLLEGE, ZHEJIANG UNIVERSITY

Coastal Morphodynamics

# 海岸动力地貌学

## 第四章 海岸动力过程

### 风暴潮的介绍

林颖典

Ocean College  
Zhejiang University

# 风暴潮(Storm surge, storm tide)

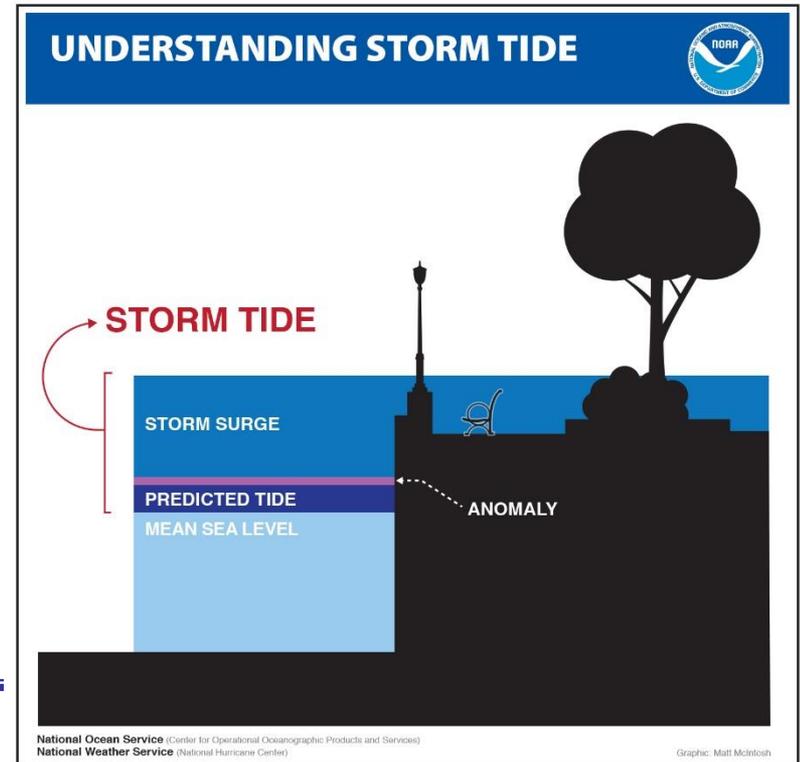
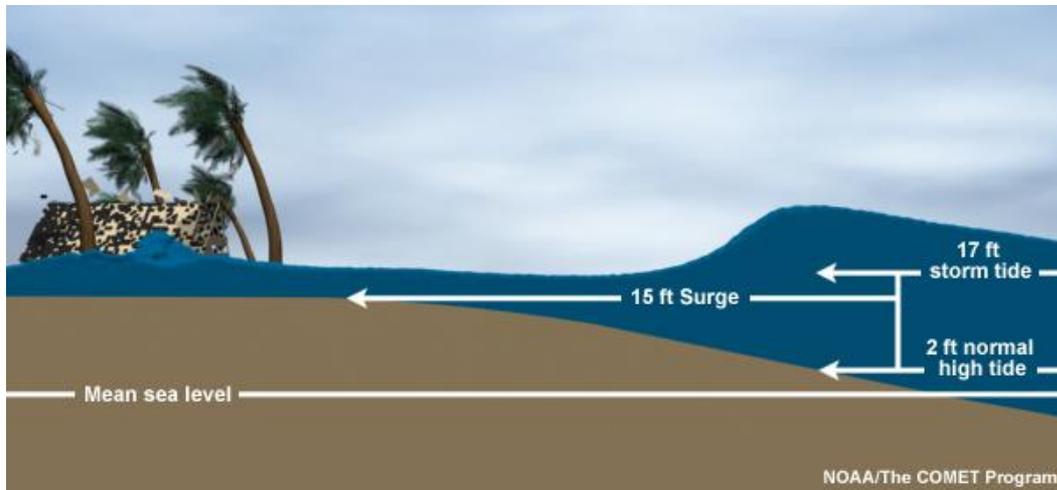
- 风暴潮是一种灾害性的自然现象。由于剧烈的大气扰动，如强风和气压骤变（通常指台风和温带气旋等灾害性天气系统）导致海水异常升降，同时和天文潮（通常指潮汐）叠加时的情况，如果这种叠加恰好是强烈的低气压风暴涌浪形成的高涌浪与天文高潮叠加则会形成更强的破坏力。又可称“风暴增水”、“风暴海啸”、“气象海啸”或“风潮”。





# 风暴潮(Storm surge, storm tide)

- 美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)认为Storm surge是在天文潮上海面异常增加的高度。





# 风暴潮(Storm surge, storm tide)

- 如果风暴潮恰好与天文高潮相叠（尤其是与天文大潮期间的高潮相叠），加之风暴潮往往夹狂风恶浪而至，溯江河洪水而上，则常常使其影响所及的滨海区域潮水暴涨，甚者海潮冲毁海堤海塘，吞噬码头、工厂、城镇和村庄，使物资不得转移，人畜不得逃生，从而酿成巨大灾难。
- 风暴潮的空间范围一般由几十公里至上千公里，时间尺度或周期约为1-100小时，介于地震海啸和低频天文潮波之间。但有时风暴潮影响区域随大气扰动因子的移动而移动，因而有时一次风暴潮过程可影响一两千公里的海岸区域，影响时间多达数天之久。风暴潮的高度与台风或低气压中心气压低于外围的气压差成正比例，中心气压每降低1hPa(百帕，1大气压=101325 Pa)，海面约上升1cm。较大的风暴潮，特别是风暴潮和天文潮高潮叠加时，会引起沿海水位暴涨，海水倒灌，狂涛恶浪，泛滥成灾。



# 风暴潮的成灾因素

- 风暴潮灾害居海洋灾害之首位，世界上绝大多数因强风暴引起的特大海岸灾害都是由风暴潮造成的。
- 1992年8月28日至9月1日，受第16号强热带风暴和天文大潮的共同影响，我国东部沿海发生了1949年以来影响范围最广、损失非常严重的一次风暴潮灾害。潮灾先后波及福建、浙江、上海、江苏、山东、天津、河北和辽宁等省、市。风暴潮、巨浪、大风、大雨的综合影响，使南自福建东山岛，北到辽宁省沿海的近万公里的海岸线，遭受到不同程度的袭击。受灾人口达2000多万，死亡194人，毁坏海堤1170公里，受灾农田193.3万公顷，成灾33.3万公顷，直接经济损失90多亿元。



# 風暴潮(Storm surge, storm tide)

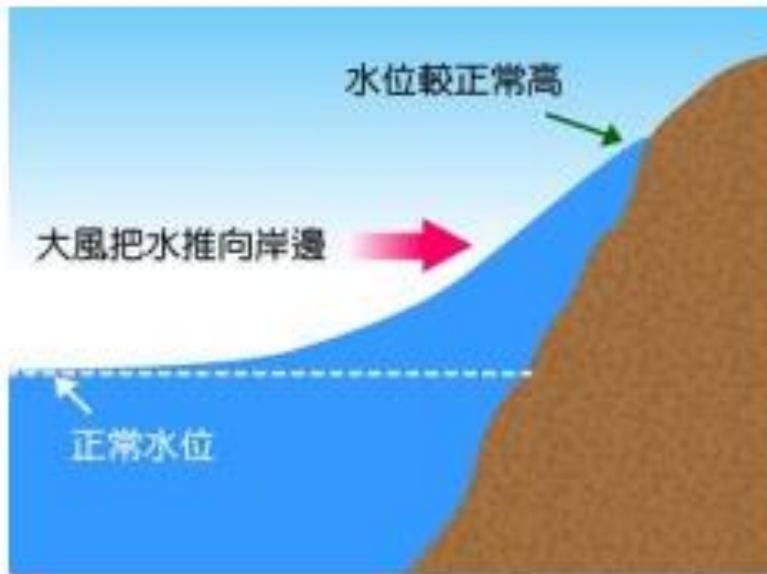


图 1 风暴本身的风力引致的水位上升

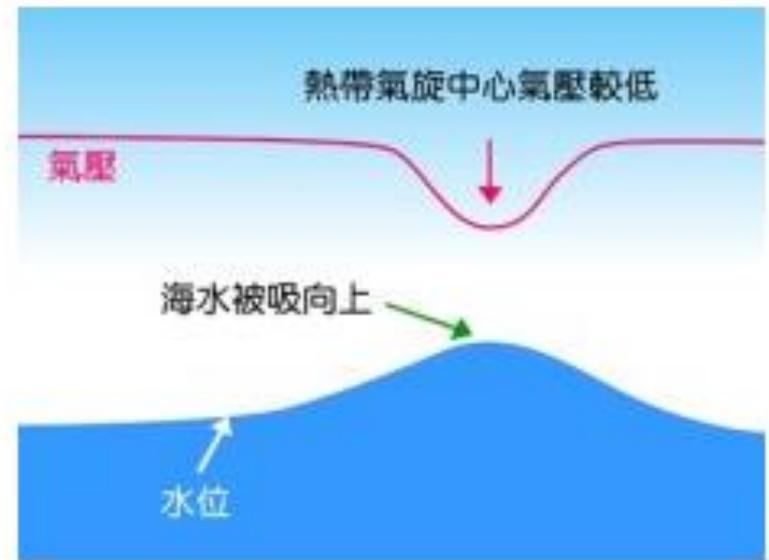


图 2 风暴的低气压造成的水位上升



# 风暴潮(Storm surge, storm tide)

Example of Storm Surge





# 风暴潮(Storm surge, storm tide)

- 如1953年2月发生在荷兰沿岸的强大风暴潮，使水位高出正常潮位3米多。洪水冲毁了防护堤，淹没土地80万英亩，导致2000余人死亡。又如1970年11月12-13日发生在孟加拉湾沿岸地区的一次风暴潮，曾导致30余万人死亡和100多万人无家可归。孟加拉湾沿岸较低的地势及喇叭口状的海岸，风暴潮特别容易造成巨大伤害。





# 风暴潮(Storm surge, storm tide)

- 1962年，台风温黛在香港吐露港引发严重风暴潮。2013年，台风海燕侵袭菲律宾礼智省独鲁万市，导致1万人以上死亡及140亿美金的经济损失。2008年5月的飓风Nargis，造成缅甸沿海地区约138000人死亡，是21世纪最严重的风暴潮灾害。



Total destruction of the Bolivar Peninsula (Texas) by Hurricane Ike's storm surge in 2008



Hurricane Ike storm surge damage in Gilchrist, Texas in 2008



# 风暴潮的形成

- 风暴潮根据风暴的性质，通常分为由温带气旋引起的**温带风暴潮**和由台风引起的**台风风暴潮**两大类。
- **温带风暴潮**：多发生于春秋季节，夏季也时有发生。其特点是：增水过程比较平缓，增水高度低于台风风暴潮。主要发生在中纬度沿海地区，以欧洲北海沿岸、美国东海岸以及我国北方海区沿岸为多。
- **台风风暴潮**：多见于夏秋季节。其特点是：来势猛、速度快、强度大、破坏力强。凡是有台风影响的海洋国家、沿海地区均有台风风暴潮发生。



类型	发生季节	发生地区	危害
热带 风暴潮	7-10月夏秋 季节	东南沿海	不仅毁坏船只，而且破坏房屋、农田、海堤以及码头、港口等工程设施，并造成不同程度的人员伤亡。
温带 风暴潮	冬春秋季节	北方沿海	

# 风暴潮的灾害

## 为什么孟加拉湾能成为风暴潮的多发区呢？

夏季，多西南季风，势力较强，有时飓风频繁而且正面袭击孟加拉

河流众多，汛期时河流水量大，汛期时加大了风暴潮的灾害

地势低平，对风暴潮的阻力大大减小

海岸呈喇叭形，

城市密集，人口众多。

总结：孟加拉湾 风暴潮多发区

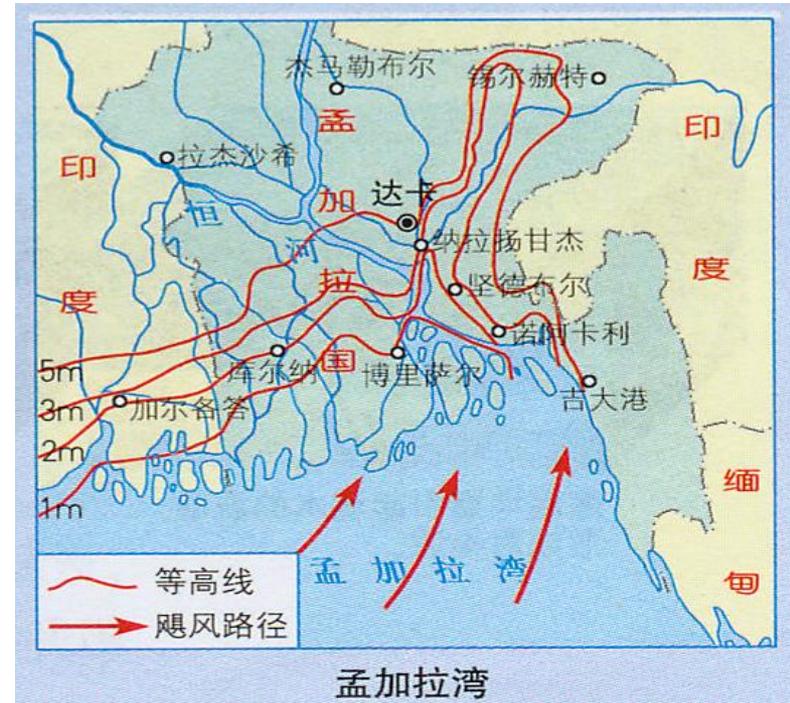
地理位置 → 飓风多发地区

海岸形状 → 呈半封闭或喇叭口状

地势地形 → 低平开阔

河流 → 河流众多，流量大（大河注入，有顶托作用）

社会经济 → 城市密集，人口众多





# 风暴潮的灾害

## • 美国

美国也是一个频繁遭受风暴潮袭击的国家，并且和我国一样，既有飓（台）风风暴潮又有温带大风风暴潮。1969年登陆美国墨西哥湾沿岸“卡米尔-Camille”飓风风暴潮曾引起了7.5米的风暴潮，这是迄今为止世界第一位的风暴潮记录。

## • 荷兰

荷兰是世界上地势最低的国家，有四分之一的国土低于海平面，最低点在鹿特丹附近，居然在海平面以下6.7米，全国最高海拔也不过300多米，更可怕的是荷兰还是一个沿海国家，还有四分之一的土地海拔不到1米，也就是说随便一个海浪就有可能把荷兰淹没。历史上，荷兰曾不止一次被海水淹没，又不止一次地从海洋里夺回被淹没的土地。这些被防潮大堤保护的陆地约占荷兰全部国土的3/4。荷兰、英国、原苏联的波罗的海沿岸、美国东北部海岸和中国的渤海，都是温带风暴潮的易发区域。



# 荷兰的三角洲工程

- 三角洲工程**（荷兰语：Deltawerken）  
 ，在荷兰西南国土的一系列防洪工程，用来保护莱茵河-默兹河-斯海尔德河三角洲地带。在1953年2月洪水发生之后（飓风侵袭、海水倒灌，荷兰将近5万栋房屋被洪水冲毁，这场大水夺走了近两千条人命，190千米的提防被冲坏，89个闸坝垮掉，损失总额达15亿荷兰盾，相当于60多亿人民币）。这次惨痛的教训，让荷兰人更深的意识到抗水防洪的重要性。荷兰政府就开始提出这项工程计划。这项工程计划建造了一系列水坝、水门、船闸、堤防与防洪闸门（Floodgate）等，用来防止荷兰的海岸被侵略，减少洪水与海水倒灌的发生频率。





# 荷兰的三角洲工程

- 三角洲工程计划是全世界至今最大型的防洪计划，在其中的须德海工程（Zuiderzee Works）完成后，被美国土木工程师学会选为世界七大工程奇迹之一



The **Zuiderzee Works** in the Netherlands turned the dangerous Zuiderzee, a shallow inlet of the North Sea, into the tame IJsselmeer, and created 1650 km<sup>2</sup> of land.





# 荷兰的三角洲工程前身

- 阿夫鲁戴克大堤（荷兰语：Afsluitdijk）是荷兰的一条拦海大堤，这个大坝开工于1927年，1932年完工。坝基宽220米，高10余米，全长32.5公里，坝顶为高速公路。大坝建成后，荷兰的海岸线不仅缩短了300公里，更是大大减轻了海水对内陆的侵袭。一条大道堵住海水！不仅如此，这个堤坝仅用6个月的时间就排出了6亿多平方米海水，海底露出后，荷兰人就撒播芦苇和茅草；于是乎，海底就这样变干了，一块土地就这样出来了。靠着这样的围海造地技术，荷兰人获得了相当于国土面积1/5的千万顷良田。



## 荷兰的三角洲工程

从1958年开始，荷兰还建起了世界知名的「三角洲工程」(Delta Works)。这个震惊世界的工程不仅可以阻挡强劲海潮、排放河水、让船只通过，也是连接出海口三角洲各岛之间的桥梁，成为荷兰西南部的交通要道，包括了在Oosterschelde、Haringvliet与Grevelingen等三大出海口建立第一防线的大坝，以及在河流较上游处兴建第二、第三防线的大坝。从图上看是这样的，西北沿海地区有三道第一防线，内陆还有第二和第三道防线（红色线条即是各道防线大坝）。这一道道防线，把大海圈在外围，保证了居民的安全。





# 荷兰的三角洲工程

- 而这几道大坝，也是汇聚了荷兰人的奇思妙想。哈灵夫勒特（Haringvliet）闸坝。1971年建成，位于哈灵水道，是三角洲北部主要水利工程，具有防潮、防洪、供水与航运等综合效益。
- 东斯海尔德（Eastern Scheldt）闸坝。1986年建成，位于东斯海尔德河口。人们起初设想在东斯海尔德河上建造大坝将其截流，河水也将逐渐变成淡水。然而很快便出现了反对的声音——尽管安全有了保障，但东斯海尔德河流域独特的咸水生态环境会因此遭到严重破坏。1976年一项替代方案诞生了，原规划中的“东斯海尔德大坝”将改建成一座水闸，仅在出现极端气候条件时才关闭。流域内的咸水生态环境、贝类、牡蛎养殖业和潮汐将得以保存。





# 荷兰的三角洲工程

- 马斯朗特（Maeslant）闸(storm surge barrier)。马斯朗特水闸是全世界唯一一组拥有如此大型可活动部件的防潮水闸，每扇闸门长240米。正常情况下，闸门完全打开，隐藏在设于河岸边的坞体内，这样通往鹿特丹的航路便畅行无阻。风暴潮来临时，闸门闭合。闸门的弧形设计保证了风暴期间闸门能够抵抗海水的冲击力。1997年5月10日星期六，北海航道水闸竣工启用仪式在荷兰角举行。这座水闸保护了南荷兰省超过100万的居民免于海水的威胁。

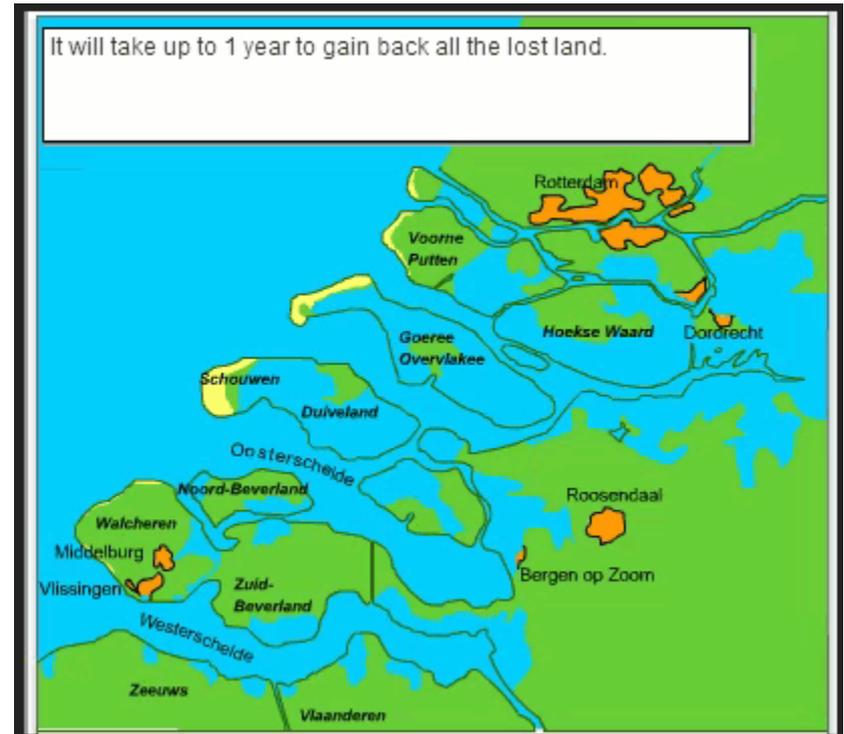
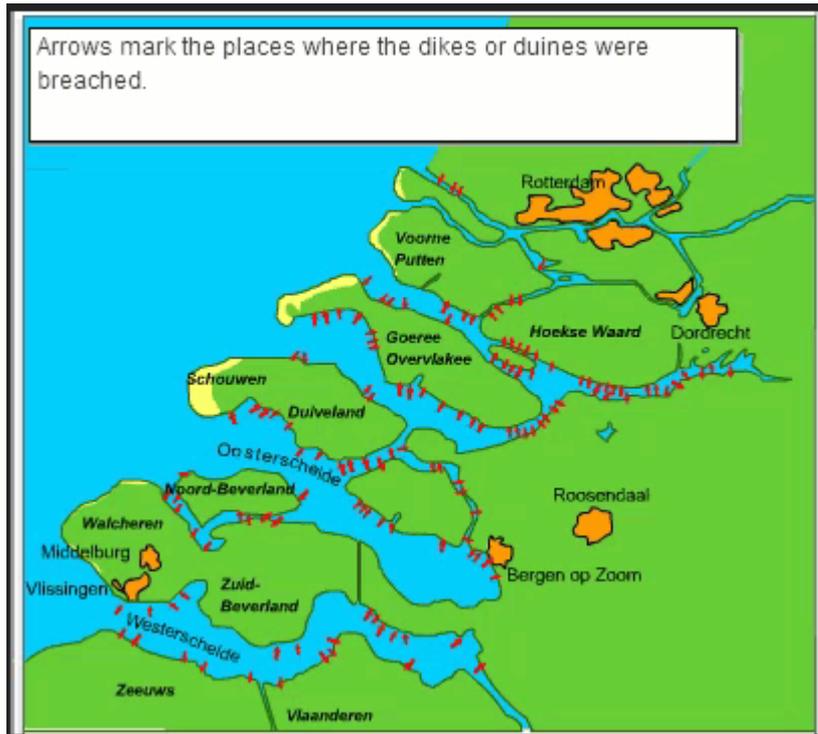




# 荷兰三角洲工程的意义

- 三角洲工程的花费远远超过人们预估的6.8亿至9亿欧元，达到近50亿欧元。除了最重要的将海防线缩短了700公里外，三角洲工程的优势还体现在以下几个方面。
- 首先，农业用淡水资源管理得到大幅改善。其次，三角洲地区的水管理体系有了整体性的进步，工程对内河航运起了推动作用。再次，三角洲工程推动地区经济、旅游休闲和自然生态的发展。尽管一些天然生态区受到无可挽回的影响，但其他地方却因此创造和维持了其自然价值。
- 三角洲工程是世界上以人类和环境安全为核心的技术发展的典范。荷兰也因此拓展了对生存安全问题和水资源的视野。三角洲工程是生存安全、经济发展、旅游休闲和生态保护之间一个独特的妥协。
- 全球气候变化要求荷兰人重新审视如何为后代开辟适于永久居住的新方案。干旱土地盐碱化、地表下陷等问题以及人们对水质和生态环境的新要求也呼唤新的思路。无论现在还是将来，荷兰会继续以社会可接受的经济成本投资开发一个可持续发展的三角洲系统，针对这些挑战担负起自己的责任。

## 荷兰三角洲工程的效果





# 风暴潮的灾害

- 中国

中国历史上，由于风暴潮灾造成的生命财产损失触目惊心。

1782年清代的一次强温带风暴潮，曾使山东无棣至潍县等7个县受害。

1895年4月28、29日，渤海湾发生风暴潮，毁掉了大沽口几乎全部建筑物，整个地区变成一片“泽国”，“海防各营死者2000余人”。

1922年8月2日一次强台风风暴潮袭击了汕头地区，造成特大风暴潮灾。上海地区在历史上也曾发生多起非常严重的特大风暴潮灾。

其中最严重的一次发生在1696年，“康熙三十五年六月初一日，大风暴雨如注，时方值亢旱，顷刻沟渠皆溢，欢呼载道。二更余，忽海啸，飓风复大作，潮挟风威，声势汹涌，冲入沿海一带地方几数百里。宝山纵亘六里，横亘十八里，水面高于城丈许；嘉定、崇明及吴淞、川沙、柘林八、九团等处，漂没千丈，灶户一万八千户，淹死者共十万余人。黑夜惊涛猝至，居人不复相顾，奔窜无路，至天明水退，而积尸如山，惨不忍言”。这是我国风暴潮灾害历史的文字记载中，死亡人数最多的一次。



# 风暴潮的灾害

- 中国

风暴潮（含近岸浪）是我国水文气象灾害中最严重的海洋灾害，近20年来造成的经济损失高达2500亿元，约占全部海洋灾害的94%。据统计，1949—1993年的45年中，我国共发生过程最大增水超过1米的台风风暴潮269次，其中风暴潮位超过2米的49次，超过3米的10次。共造成了特大潮灾14次，严重潮灾33次，较大潮灾17次和轻度潮灾36次。

四十多年中，尽管沿海人口急剧增加，但死于潮灾的人数已明显减少，这不能不归功于我国社会制度的优越和风暴潮预报警报的成功。但随着濒海城乡工农业的发展和沿海基础设施的增加，承灾体的日趋庞大，每次风暴潮的直接和间接损失却正在加重。据统计，中国风暴潮的年均经济损失已由50年代的1亿元左右，增至80年代后期的平均每年约20亿元，90年代前期的每年平均76亿元，1992和1994年分别达到93.2和157.9亿元，风暴潮正成为沿海对外开放和社会经济发展的一大制约因素。

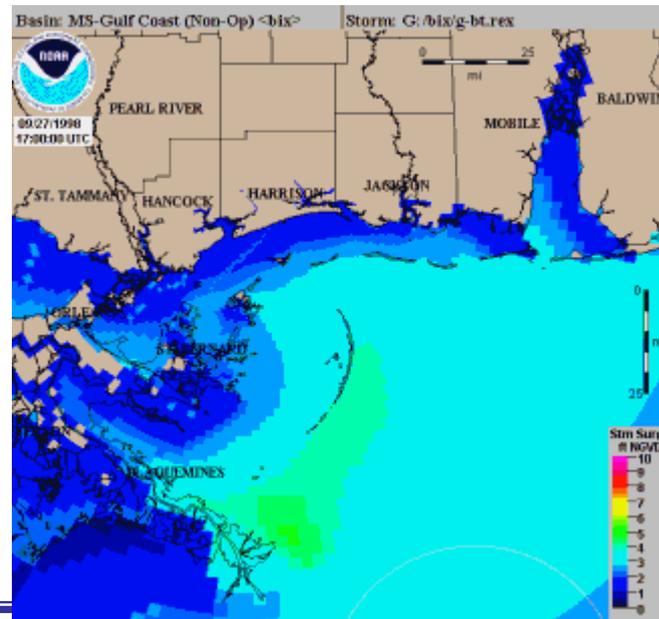


# 风暴潮的防御措施

- **工程措施**：加固堤坝、建筑工程等设施
- **生物措施**：营造沿海防护林体系，例如红树林，保护珊瑚礁
- **技术措施**：在沿海区修建风暴潮观测站，加强监测预报
- **管理措施**：提高公众防灾减灾意识和能力，制定应急撤离计划和抗灾组织管理

# 风暴潮的预测

- 美国国家海洋和大气管理局(NOAA)使用SLOSH (Sea, Lake, and Overland Surge from Hurricanes) 模拟风暴潮，误差大概在20%。SLOSH模式中需要飓风的中心气压、飓风大小、行进方向及轨迹、最大持续阵风以及地形资讯等。





## 气象海啸

### (Meteotsunami or Meteorological Tsunami)

- **气象海啸**是一种类似海啸的海水面剧烈变化，但是是因为气象因素所引起的。当**大气气压**的快速变化引起水体的位移时，就可能会产生气象海啸。与“普通”脉冲型海啸源相反，一个行进的大气扰动通常在一段有限的时间（从几分钟到几小时）与海洋相互作用。海啸和气象海啸是非常相似的，很难区分一个。另一种情况，如海啸波，但没有地震记录的情况。气象海啸在晴天也有可能发生。跟畸形波(freaking wave)类似。



# 气象海啸

## (Meteotsunami or Meteorological Tsunami)

Area	Country	Wave height (m)	Fatalities
Vela Luka (21 June 1978) <sup>[1][2]:1046</sup>	Croatia	5.9	0
Nagasaki Bay (31 March 1979) <sup>[3]</sup>	Japan	5	3
Pohang Harbour	Korea	0.8	
Kent and Sussex coasts (20 July 1929) <sup>[4]</sup>	UK	3.5-6	2
Longkou Harbour (1 September 1980) <sup>[2]:1044</sup>	China	3	
Ciudadella Harbour (15 June 2006) <sup>[3]</sup>	Spain	4	
Gulf of Trieste	Italy	1.5	
West Sicily	Italy	1.5	
Malta	Malta	1	
Chicago, IL (26 June 1954) <sup>[3]</sup>	US	3	7
Daytona Beach, FL (3-4 July 1992) <sup>[3][5]</sup>	US	3.5	0



# 气象海啸

## (Meteotsunami or Meteorological Tsunami)



荷兰在未有地震的情况下海边出现疑似罕见“气象海啸”



## 气象海啸的可能成因

1. 大气中必须产生一个风暴系统，造成大气压力的变化，若大气压力变化为标准一大气压的0.2%-1%，则可以产生波浪；
2. 风暴必须和波浪行进速度一致，产生共振现象，以提供波浪行进的能量；
3. 一旦海浪有足够的能量到达岸边，海啸就需要撞击一个类似瓶装或V形的海港或海湾，在那里它能迅速地升高高度并冲向海岸。狭窄的港湾通过来回反射或振荡波浪来放大海浪。



*Thank You*

