

# 中国海岸带淹没和侵蚀 重大灾害及减灾策略\*



尤再进<sup>1,2</sup>

1 鲁东大学港口与海岸工程防灾减灾研究中心 烟台 264025

2 昆士兰大学海岸工程研究中心 布里斯班 4072

**摘要** 中国是个海洋大国，拥有1.8万公里长的大陆海岸线，沿海人口居住密度大、重大基础设施分布稠密、海洋资源丰富。同时，中国海岸带经常遭遇重大自然灾害的袭击，造成直接的年均经济损失约为188亿元，年均人员死亡为256人（1989—2015年）。其中，台风引起的风暴潮和台风巨浪是致灾主要因素。随着全球气候变化的加剧和海平面上升，中国海岸带灾情可能会持续加重，严重威胁沿海人民生命财产安全，制约海岸带经济的可持续发展。基于最新的中国海洋灾害数据（1989—2015年）和国外先进的海岸带防灾减灾技术，文章讨论了中国海岸带遭受主要海洋灾害的现状，定量地分析和评估了这些主要灾害对中国沿海经济和人员生命安全的影响，最后提出做好中国沿海防灾减灾的几点对策建议。

**关键词** 风暴潮，淹没，侵蚀，海岸灾害，海平面上升

**DOI** 10.16418/j.issn.1000-3045.2016.10.008

中国拥有1.8万公里长的大陆海岸线和1.4万公里的岛屿海岸线。沿中国大陆海岸带，集中了全国70%以上的大中城市，超过100万人口的大城市有15座，仅占陆域国土面积13%的沿海经济带承载着全国42%的人口，创造全国60%以上的国内生产总值<sup>[1]</sup>。同时，中国海岸带长期遭遇多种自然灾害的袭击（如台风、风暴潮、台风巨浪、海岸侵蚀、绿潮、冰灾等），造成直接经济损失约188亿元/年和人员伤亡（含失踪）256人/年（1989—2015年《中国海洋灾害公报》），风暴潮和风暴巨浪是中国海岸带的最主要致灾因素。随着中国沿海大中小城市发展和基础设施的迅速增加，风暴潮和其他主要海岸带灾害带来的损失将会日益加重，成为制约中国沿海城市发展的主要障碍。

## 1 中国海岸带主要自然灾害现状

中国拥大约300万平方公里的管辖海域，海洋产业和与海洋产业相关的产业可以分为三

\*资助项目：山东省“泰山学者”人才工程（201502050），国家海洋局海洋专项（GHME2014ZC01）

修改稿收到日期：2016年9月6日

大部分：主要海洋产业、海洋科研教育管理服务、海洋相关产业。《2015年中国海洋经济统计公报》的最新数据，给出了不同海洋产业的比例分布（图1），其中第3—14项属于主要海洋产业类，所有产业总和约6.47万亿元，约占2015年中国GDP的10%。

中国沿海长期遭受到多种海洋灾害，以风暴潮、海洋巨浪、海冰、赤潮和绿潮等灾害为主，海平面变化、

海岸侵蚀、海水入侵及土壤盐渍化等灾害也有不同程度发生。基于2015年《中国海洋灾害公报》的最新海洋灾害数据，中国各类海洋灾害共造成的直接经济损失约为73亿元，死亡30人（含失踪），其中风暴潮灾害占总损失的99.8%，造成死亡人数最多的海洋灾害是海洋巨浪，占总死亡人数的77%。基于《中国海洋灾害公报》的最新灾害数据分析结果（1989—2015年），中国沿海主要海洋灾害造成的年均直接经济损失约为188亿元，年均死亡人数256人，最高年死亡人数1200多人（图2），最大年经济损失超过446亿元，其中包含每年通货膨胀率（图3）。

2001—2015年期间，中国沿海省份遭受各种海洋灾害的破坏程度和人员伤亡的空间差别较大（图4），年均经济损失最严重的前五省份分别是广东（52亿元/年）、福建（24亿元/年）、浙江（18亿元/年）、山东（14亿元/年）、江苏（10亿元/年），年均人员伤亡人数最多的前五省份分别是广东（25人/年）、浙江（18人/年）、海南（13人/年）、福建（12人/年）、江苏（11人/年）。这主要是因为海洋巨浪的空间分布是从南到北逐渐减弱，所以海南、广东、福建、浙江、江苏是中国沿海省份由于巨浪灾害导致人员伤亡人数最多的五省份。

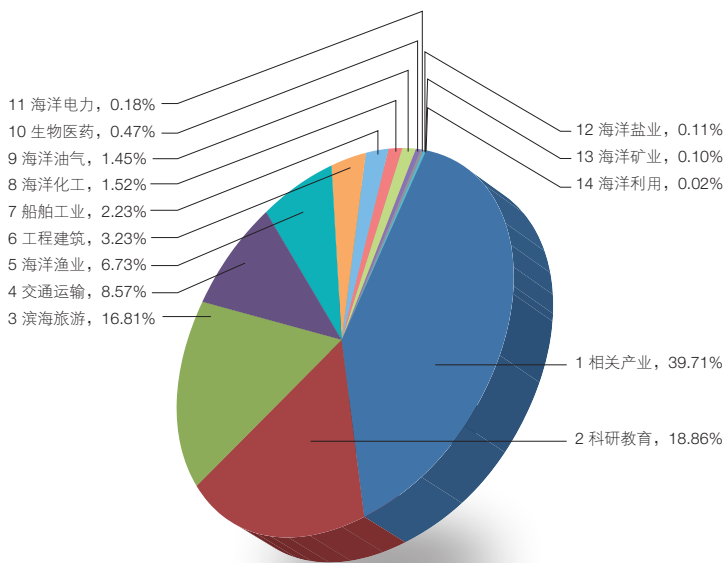


图1 2015年中国主要海洋产业、海洋科研教育管理服务、海洋相关产业的百分比分布，其中第3—14项属于主要海洋产业，14项产业总和约为6.47万亿元，约占2015年中国GDP的10%

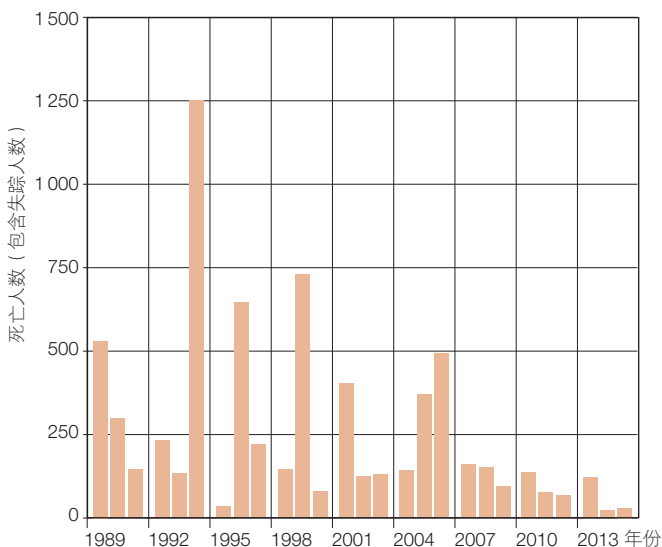


图2 中国沿海主要自然灾害造成的直接死亡人数的时间分布（《中国海洋灾害公报》，1989—2015）

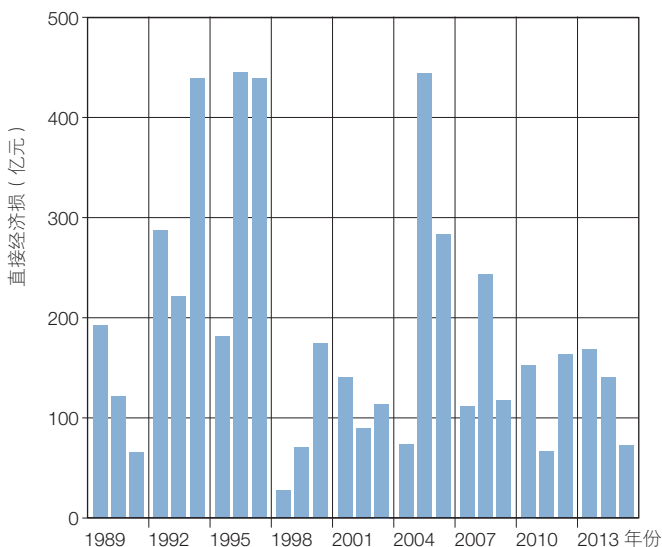


图3 中国沿海主要自然灾害造成的直接经济损失的时间分布（《中国海洋灾害公报》，1989—2015）

同期，中国沿海主要海洋灾害造成的直接经济损失和人员伤亡的空间分布强度也不一样（图5）：导致人员伤亡最多的自然灾害是海洋巨浪（65.3%），其次是风暴潮和海浪的组合（34.3%），最小的是河口涌浪（0.3%），但造成最大直接经济损失的灾害是风暴潮（83%），其他各种灾害只占总经济损失的17%（海冰、浒苔、赤潮、巨浪、绿潮、溢油）。所以，风暴潮和海洋巨浪是造成中国沿海直接经济损失和人员伤亡的最重要灾害因素或致灾因子。

综上所述，台风引起的风暴潮和海洋巨浪是造成中国沿海人员伤亡和直接经济损失的最主要灾害，海南、广东、福建、浙江、江苏是中国沿海11省份中受灾最严重的5个沿海省份。

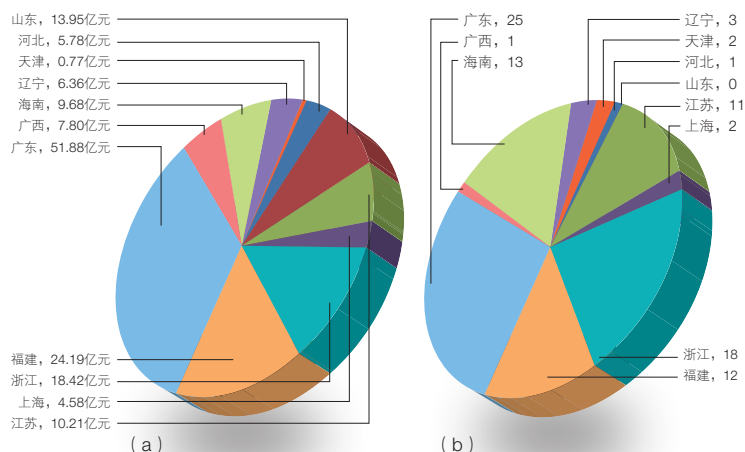


图4 2001—2015年中国沿海各省风暴潮和海洋巨浪造成的直接经济损失(a)和沿海省份年均死亡人数(b)

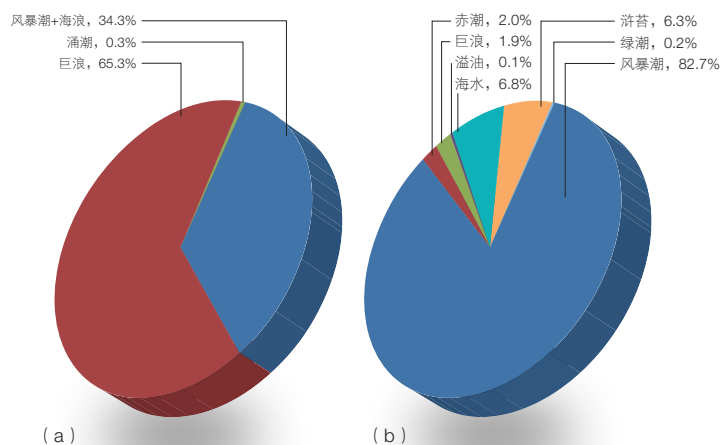


图5 2001—2015年中国沿海主要灾害类型造成人员伤亡的百分比(a)和中国沿海主要灾害类型造成直接经济损失的百分比(b)。

## 2 海岸带主要灾害的研究现状和进展

基于现有的中国海洋灾害观察数据（1986—2015年），中国海岸带自然灾害通常以风暴潮、海洋巨浪、海冰、赤潮和绿潮等灾害为主，海平面变化、海岸侵蚀、海水入侵及土壤盐渍化等灾害也有不同程度发生，台风引起的风暴潮和海洋巨浪是造成中国海岸带灾害的两个最重要因素（图5）。本节的讨论重点是导致海岸淹没和侵蚀灾害的风暴潮和海洋巨浪。

### 2.1 风暴潮灾害

风暴潮（Storm Tide）是由风暴增水和天文潮叠加而成，其中风暴增水（Storm Surge）是由风暴飓风产生的增/减水和风暴低气压中心引起增水的两部分叠加的结果。风暴潮影响的空间区域/长度一般由几十公里到上千公里的海岸线，时间尺度为几小时到几天。风暴增水量主要取决于风暴本身的特性（如风暴强度、最大风速半径、中心气压差、移动速度和方向），受灾区域的海岸/河口形状，岸上及海底地形等要素。历史风暴潮灾害给沿海和海岛国家带来了巨大的经济损失和惨重的人员伤亡：如孟加拉国风暴潮灾害造成了1970年30万人死亡和1991年的14万人死亡，2005年美国*Katrina*风暴潮灾害导致1863人死亡和705人失踪，1949—1995年中国沿海地区就发生了3次死亡千人以上的特大风暴潮灾害（图2）。

20世纪50年代起，欧美国家开始了对风暴潮的数值预报研究工作，比如1995年美洲国家研发了热带风暴灾害分析系统TAOS（The Arbiter Of Storms），模拟强风、降雨、风暴潮、海浪等致灾因子的全过程，制作风暴潮灾害图和脆弱性等级图，主要应用于人员疏散、海岸规划、防灾减灾等实际应用；美国政府飓风研究中心（NHC）主要为地方政府决策部门、保险公司、沿海社区提供风暴潮风险评估。日本基于历史典型海洋灾害案例的研究，综合考虑风暴潮致灾因子危险性和沿岸承灾体的分布情况，研制了最大海岸淹没区域和最大淹没水深的分布图，主要应用于日本沿海社区海洋灾害的防灾减灾。



欧美澳建立了较为成熟的几种风暴潮数值模式，如美国的SLOSH、英国的STWS和SEA、荷兰的DELFT3D、澳大利亚的GCO2D/3DM、丹麦的MIKE12等数值模式在世界不同区域得到了实际应用。印度、日本、孟加拉国等风暴潮易发地区经常应用SLOSH。图6是SLOSH模式结合LiDAR高程数据以及3D卫星图像的应用案例<sup>[2]</sup>，模拟美国ODU大学校园可能被淹的最大水深分布图，模式最高分辨率精确到最小建筑物尺度。

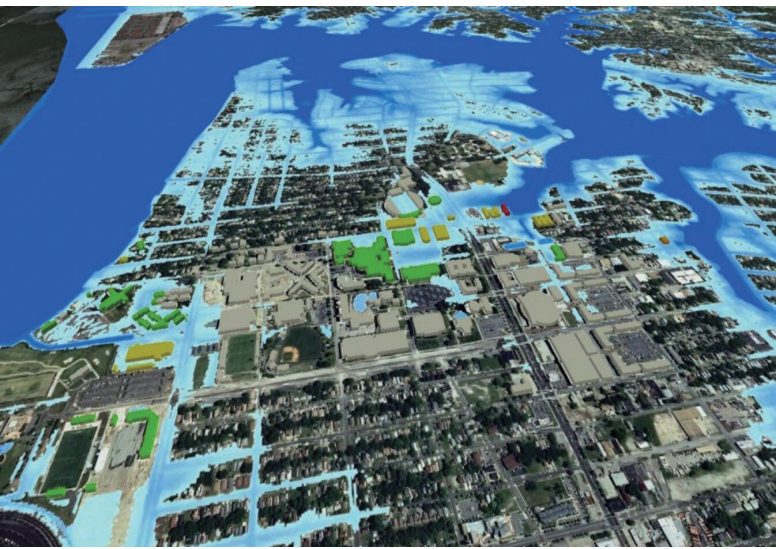


图6 风暴潮模式SLOSH结合LiDAR地面高程数据以及3D卫星图像的应用案例。模拟美国ODU大学校园可能被淹的空间水深分布图，模式分辨率精确到最小建筑物尺度，图左边是Elizabeth河、图上是Lafayette河<sup>[2]</sup>

从20世纪70年代开始，中国开始研发风暴潮数值模式，尤其在国家“七五”“八五”“十五”和“十一五”重大科技项目的大力支持下，建立了中国风暴潮数值预报业务化系统。近年来，国家海洋局预报中心联合国内科研单位开发了台风风暴潮预报CTS模式和温带风暴潮预报CES模式，风暴潮预报已覆盖了全国沿海11个省市和自治区，渤海、东海、南海都相继建立了区域性海洋预报网。但是，中国沿海地形高程和近海水深数据严重欠缺，直接影响了中国沿海风暴潮模式计算的精确度。

## 2.2 风暴巨浪、波浪增水和爬高

在中国沿海省份中（图5），导致人员伤亡最多的海洋灾害是台风引起的海洋巨浪（65.3%），其次是风暴潮

和巨浪的组合（34.3%）。但是，造成最大直接经济损失的海洋灾害是风暴潮（83%），其他各种灾害只占经济损失的17%。台风引起的海洋巨浪是导致海岸带淹没和侵蚀灾害的另外一个重要因素。风暴巨浪导致海岸淹没的主要原因是由于波浪增水（Wave Setup）和波浪爬高（Wave Runup）。波浪增水是波浪在破碎过程中引起水表面抬高的现象，随着水深的减小而增大<sup>[3]</sup>。海岸波浪增水的物理含义是，大波浪的海岸线位置要比小波浪的海岸线位置高，而且还向内陆向平推了一段距离，使得大波浪和海滩/沙丘之间的相互作用更加强烈。波浪爬高是指波浪上冲海岸线以上的高度，是波浪在上爬岸滩的过程中波动能转换成波势能的一个物理过程<sup>[3]</sup>。

大量的国外现场数据已经表明，风暴波浪增水和爬高是引起砂质海岸淹没和侵蚀的一个重要因素，风暴潮是导致砂质海岸淹没和侵蚀的另一个要素。基于澳大利亚新州海岸灾害数据的分析发现，沿海最大风暴增水约为0.4m，而波浪爬高是风暴潮的5—10倍，陡峭岩石海岸的波浪爬高高达20m—30m。在宽而深的海河口，波浪引起的增水一般可以忽略不计<sup>[4]</sup>，而在窄而浅的海河口，波浪通过“泵水”效应（Wave Pumping）引起河口表面水位上涨。

## 2.3 海岸侵蚀灾害

中国1.8多万公里的大陆海岸线和1.4多万公里的岛屿岸线上普遍存在海岸侵蚀灾害，几乎所有开敞的淤泥质海岸和约70%的砂质海岸在不同程度上均遭受到侵蚀<sup>[5]</sup>。中国海岸侵蚀带来的经济损失比较严重，如2007年3月3—5日海岸带淹没和侵蚀灾害造成山东省沿海7人死亡，经济损失高达21亿元（图7）。中国海岸沙滩面临严重的侵蚀、滩面变窄、滩面变陡等问题。

国内外学者对海滩“平衡剖面”进行了大量的研究工作。海滩平衡剖面是在海洋动力系统和海滩长期和充分相互作用下的一个具有统计意义的相对均衡的海滩状态，绝对意义上的、理想的平衡海滩剖面在自然界是难以存在的。Larson和Kraus<sup>[6]</sup>在Dean<sup>[7]</sup>的海岸平衡剖面模式的



图7 中国沿海侵蚀灾害。2007年3月3—5日发生在山东省威海—龙口沿海的侵蚀灾害。图片来源于2007年《中国海洋灾害公报》

基础上,进行试验和提出经验剖面,同时提出风暴侵蚀海滩模式SBeach。近年来,Roelvink等人<sup>[8,9]</sup>改进和完善了SBeach,研发了新一代海岸风暴侵蚀模式XBeach。

海平面上升的海岸侵蚀模式是由Bruun<sup>[10]</sup>首先提出的,也称为“Bruun法则”。Larson等人<sup>[11]</sup>建立了海岸长期演变模式GENESIS,用来数值模拟海岸线的长期演变过程。You等人<sup>[12]</sup>建立了风暴侵蚀模式,他们的模式也适用于模拟海平面上升对砂质海岸的侵蚀作用,以及其他缓慢变化的海岸动力因素对海岸线的演变作用。

现有几种国际常用的海岸泥沙输运数学模型在不同时间尺度下模拟海岸泥沙侵蚀/淤积的问题,如Delft-3D或Milke-21模拟短时间海岸泥沙输运的物理过程(时间尺度:秒—几天);XBeach估算海岸风暴引起的海滩侵蚀问题(时间尺度:小时—几天);GENESIS预测海岸线的长期演变过程(季节—几十年)。

由于现有海岸侵蚀模式还不能够较精确地预测海岸带的长期演变过程,数学模式计算结果和实际观察数据还存在很大差别。所以在实际工程应用中,海岸侵蚀灾害的评估通常还基于长期的海滩剖面观察数据(如长期的3D航拍图像、海岸高程剖面等历史数据)。图8描绘了澳大利亚新州Kingscliff海滩不同侵蚀区域的计算案例,其中绿线以外的海向区域是正在遭受海滩侵蚀灾害的区域;蓝线以外的海向区域是现在到2050年可能遭

受海滩侵蚀灾害的区域;红线以外的海向区域是现在到2100年遭受海滩侵蚀灾害的区域。

### 3 结论与建议

#### 3.1 结论

中国沿海长期遭受到多种海洋灾害,主要以风暴潮、海洋巨浪、海冰、赤潮和绿潮等灾害为主,海平面变化、海水入侵及土壤盐渍化等灾害也有不同程度发生。基于最新2001—2015年中国海洋灾害数据的分析结果,中国沿海造成人员死亡最多的海洋灾害是台风巨浪(65.4%),其次是风暴潮和巨浪的结合(34.3%),年均伤亡人数最多的沿海省份是广东、浙江、海南、福建、江苏;造成直接经济损失最大的海洋灾害是风暴潮(83%),年均直接经济损失最大的主要沿海省份是广东、福建、浙江、山东、江苏、海南。如果考虑到灾害导致的经济损失和人员伤亡还与灾害区域的人口密度、经济发达程度、地形地貌和防灾抗灾能力等因素有关,海南、广东、福建、浙江、江苏、山东是中国沿海受灾最严重的6个沿海省份。

虽然中国沿海风暴潮灾害的预警和灾害防御工作得到了很大完善、风暴潮的预报工作已覆盖了沿海11个省市和自治区,但是由于缺少大量的和高质量的沿海地形高程数据和近海水深数据,现有风暴潮模式的计算精度



图8 海岸侵蚀灾害区域的确定案例(澳大利亚新州Kingscliff)。绿线—目前正在被侵蚀的海岸区域(绿色线—海岸线);蓝线—现在至2050年期间可能被侵蚀的海岸区域(蓝色线—海岸线);红线—现在至2100年期间可能被侵蚀的海岸区域(红色线—海岸线)



受到了很大限制,台风巨浪爬高对中国海岸带淹没的重要性还未得到足够的重视。

中国海岸带的几乎所有开敞的淤泥质海岸和约70%的砂质海岸在不同程度上均遭受到侵蚀,但中国海岸侵蚀的研究工作开展甚少,缺少长期海岸侵蚀数据。

### 3.2 对策建议

完善现有中国沿海主要灾害数据的采集方法和系统,合理地布置数据采集区域或采集点站,系统地采集灾害数据以及相关的海洋动力数据;建立一个大型的、互联网的、GIS格式的中国沿海及河口灾害数据库,实现数据共享。

高度重视台风巨浪爬高对中国沿海淹没的重大影响,急需开展该领域的研究工作。根据采集的澳大利亚新州海岸波浪爬高数据,近岸最大的风暴增水约0.4 m,而沙滩的最大波浪爬高约为2 m—4 m、陡峭岩石的波浪爬高达20 m—30 m。

应用国际通用的数学模式,建立中国沿海灾害预警预报的数值模式系统,实时预测预报中国沿海主要灾害的时空变化;同时建立中国海岸的ARGO观察系统,实时纪录/观察沿海灾情的发生过程、验证/修正模拟系统。

科学管理和规划中国海岸带的使用和开发。对于沿海淹没和侵蚀灾害频繁发生的区域,应该尽量避免建造大型基础设施和居民社区;避免盲目地大量采集沙滩泥沙、围海造地、建立大型的海岸建筑。

### 参考文献

- 1 丁平兴. 近50年我国典型海岸带演变过程与原因分析. 北京: 科学出版社, 2013. 302.
- 2 Allen R T, Sanchagrin S, McLeod G. Visualization for hurricane storm surge Risk Awareness and Emergency Communication (Chapter 5), Book edited by John Tiefenbacher, ISBN 978-953-51-1093-4, 2013.
- 3 You Z J, Nielsen P. Chapter 22: Extreme coastal waves, ocean surges and wave runup. Coastal Hazard Book edited by Charles W Finkl, Coastal Research Library 6, DOI 10.1007/978-94-007-5234-4-22, Springer Publisher, 2013.
- 4 Nielsen P, Hanslow D J. Wave runup distributions on natural beaches. Journal of Coastal Research, 1991, 7: 1139-1152.
- 5 季子修. 中国海岸侵蚀特点及侵蚀加剧原因分析. 自然灾害学报, 1996, 5(2): 65-75.
- 6 Larson M, Kraus N C. SBEACH: numerical model to simulate storm-induced beach change, US Army Engineer Waterway Experiment, Technical Report CERC-89-9, 1989.
- 7 Dean R G. Equilibrium beach profile: Characteristics and application. Journal of Coastal Research, 1991, 7: 53-84.
- 8 Roelvink D, Reneir Ad, van Dongeren Ap, et al. Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. Coastal Engineering, 2009, 56: 1133-52.
- 9 Roelvink J A, Reniers A, Dongeren A, et al. XBeach model description and manual, Delft University Technology, 2010.
- 10 Bruun P. Sea level rise as a cause of shore erosion. Journal of Waterways and Harbors Division, 1962, ASCE 88, 117-130.
- 11 Larson M, Hanson H, Kraus N C. Analytical solutions of online model for shoreline change near coastal structures. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 1997, 123 (4): 180-191.
- 12 You Z J, Laine R, Wiecek D, et al. Field measurements of beach dune dynamic profiles and grain-size distributions to assess coastal erosion along NSW coast of Australia. International Coastal Engineering Conference, ASCE June 15-20, Seoul, 2014.
- 13 You Z J, Nielsen P, Hanslow D, et al. Elevated water levels at trained and untrained river entrances on the east coast of Australia. International Coastal Engineering Conference, 1-6 July, Santander, Spain, 2012.

## Coastal Inundation and Erosion Hazards along the Coast of China and Mitigation Strategies

You Zaijin

( 1 Centre for Ports and Coastal Engineering Disaster Mitigation, Ludong University, Yantai 264025, China;

2 The University of Queensland, Brisbane QLD 4072, Australia )

**Abstract** The mainland coastline of China is about 18 000 km long, along which a large number of people live and work, but it is often ravaged by major coastal typhoons/storms. High water levels and large waves were generated by coastal typhoons, resulting in severe coastal inundation and erosion problems. Typhoons-induced storm tides, large waves, and coastal erosion are major coastal hazards of China, which caused annual damage of about RMB ¥ 18.8 trillion to the coastal economy and annual losses of 256 people's lives based on the most recent data collected from 1989 to 2015. The frequency and intensity of the coastal hazards are expected to increase in response to future changing storm conditions and rising sea levels on the coast of China. This paper is designated to review on major coastal hazards occurred along the coast of China, and then assess their impacts, and finally make some recommendations on how to minimize their impacts.

**Keywords** storm tide, inundation, erosion, coastal hazards, sea level rise

**尤再进** 鲁东大学海外特聘教授、中心主任, 澳大利亚新南威尔士大学博士, 国家杰出青年基金获得者(B类), 主要从事物理海洋、港口和海岸工程、海岸防灾减灾等研究工作。拥有25年海外工作经历, 主持了多项澳大利亚联邦政府重点基金项目, 发表论文近100篇; 受聘为河海大学特聘教授、中科院客座教授。2014年聘为鲁东大学特聘教授, 2005年山东省“泰山学者海外特聘专家”、烟台市“双百计划”特聘专家。E-mail: b.you@ldu.edu.cn

**You Zaijin** Distinguished Research Professor and Centre Director at the Ludong University in Yantai, China, who was awarded a Ph.D. from the University of New South Wales, Australia. His research areas include physical oceanography, ports and coastal engineering, coastal management, and hazard mitigation. He has more than 25-year working experience and managed several Australian major research projects, published about 100 research papers. Also, he is a Distinguished Young Scholar (B) of the National Natural Science Fund, Distinguished Research Professor of Hohai University, and Adjunct Professor of the Institute of Oceanology. Since 2014, he has been working at Ludon University as Distinguished Research Professor. E-mail: b.you@ldu.edu.cn