

高潮位洪水的致灾机制、风险评估与预报评述

李思达¹, 方佳毅^{2,3}, 周巍⁴, 蒋廷臣⁵, 柳林涛^{1*}, 冯曦^{6,7}

(1. 大地测量与地球动力学国家重点实验室, 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院, 武汉 430077;
2. 杭州师范大学遥感与地球科学研究院, 杭州 311121; 3. 浙江省城市湿地与区域变化研究重点实验室, 杭州 311121;
4. 热带海洋环境国家重点实验室, 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301; 5. 江苏海洋大学海洋技术与测绘学院, 江苏 连云港 222005; 6. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 南京 210098;
7. 海岸灾害及防护教育部重点实验室, 南京 210098)

摘要: 全球气候变化背景下, 由海平面上升带来的长期慢性水患——一种发生于高潮位附近的小型海岸洪水变得愈加频繁, 对沿海社会经济和自然环境造成一定影响, 是当前国际上的研究热点之一。论文梳理了高潮位洪水的定义, 并从高潮位洪水驱动因素、影响与风险评估以及高潮位洪水预报3个方面, 系统总结了相关研究方法与研究成果的主要进展以及存在的主要问题。未来建议加强沿海地区高潮位洪水的驱动因素、风险评估以及预报的研究工作, 包括对高潮位洪水的广泛监测, 从驱动因素的变化和驱动因素间的相互作用角度研究高潮位洪水的形成, 对沿海关键地区和重要基础设施开展全面的高潮位洪水风险评估研究, 开展更加准确可靠的高潮位洪水发生频次、持续时间的预报工作, 最终服务于沿海城市高潮位洪水的防灾减灾。

关键词: 高潮位洪水; 海岸洪水; 海平面上升; 风险评估; 预报模型

极端海水位引起的海岸洪水是沿海城市面临的主要海洋自然灾害之一, 每年造成近百亿元的直接经济损失, 严重损害了沿海地区经济社会的高质量和可持续发展^[1-3]。极端海水位主要由高潮位叠加温带气旋与热带气旋等极端天气过程带来的巨大风暴潮增水引起。随着全球海平面的上升, 日常海水位与海岸洪水阈值的差距在不断缩小, 一种常发生在高潮位附近、淹没地面数厘米到分米、持续时间数小时之久的小型海岸洪水逐渐盛行, 这种海岸洪水被称为高潮位洪水(high-tide flooding, 图1)^[4-6]。近年来, 高潮位洪水灾害已经引起了政府与学术界的高度关注^[6-9], 联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次报告指出, 发生于高潮位附近的长期

慢性水患是人类面临的最为紧迫的挑战之一(the most urgent challenge)^[7]。在全球气候变化背景下, 高潮位洪水的发生频次、淹没深度和影响程度呈现快速增长和扩大的趋势^[6,8]。频繁发生的高潮位洪水威胁城市交通系统、排水系统、生态环境、个人财产和公共安全设施等^[10-13], 带来的累积损失甚至不亚于一次极端风暴潮灾害^[10,14]。

中国沿海地区饱受由风暴潮引起的极端海岸洪水灾害影响困扰^[15-21], 也多次经历了频率高、危害小的高潮位洪水事件。在山东青岛市澳门路、福建厦门沙坡尾地区、福建泉州滨江公园、广州珠江沿岸、广西北海海堤街、台湾高雄等沿海地区都已经观测到了高潮位洪水事件, 受到了社会广泛关注。

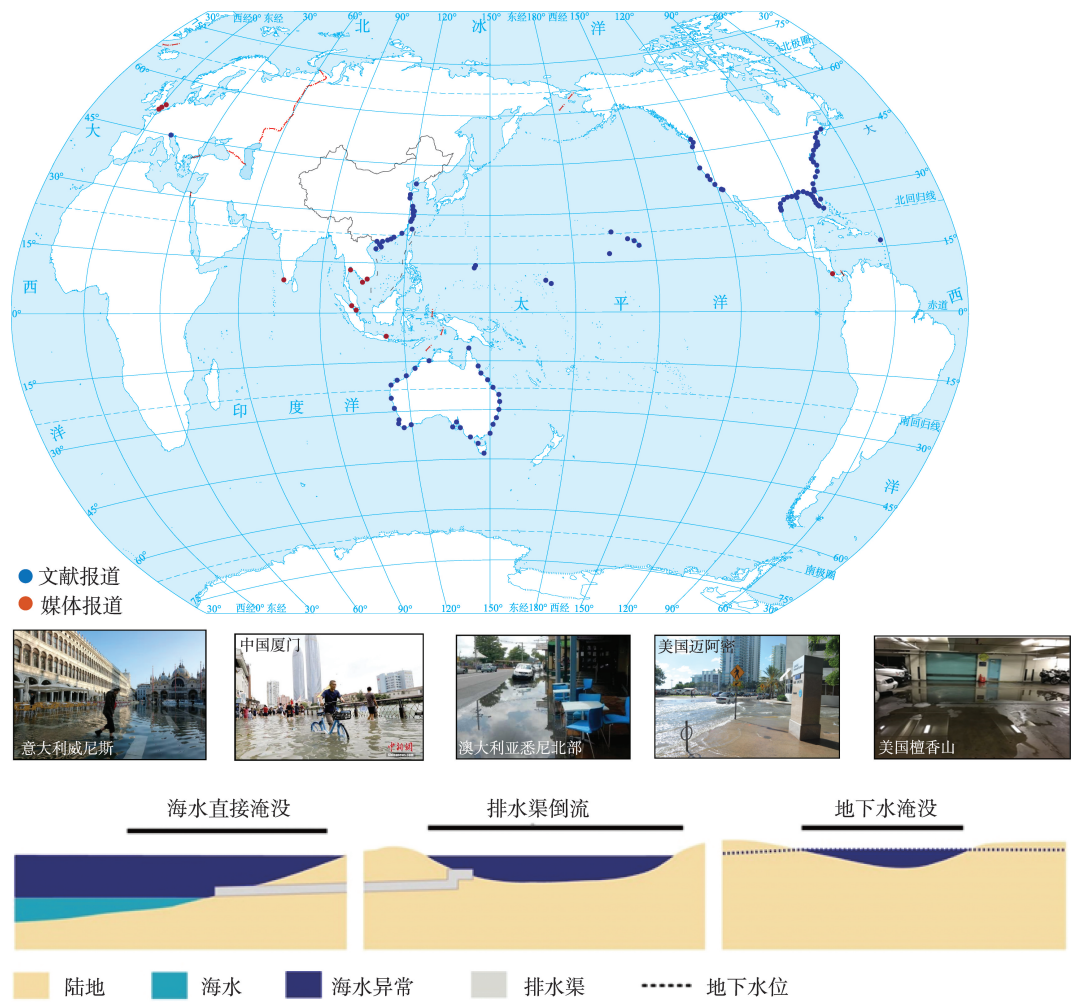
收稿日期: 2023-04-19; 修订日期: 2023-10-16。

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ120045); 国家自然科学基金项目(42001096); 浙江省科学技术厅“尖兵”“领雁”项目(2022C03107)。[Foundation: The Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China, No. 2011YQ120045; National Natural Science Foundation of China, No. 42001096; The Key R&D Program Projects in Zhejiang Province, No. 2022C03107.]

第一作者简介: 李思达(1991—), 博士后, 主要从事海洋潮汐分析与高潮位海岸洪水变化研究。E-mail: s.li@knights.ucf.edu

*通信作者简介: 柳林涛(1967—), 研究员, 主要从事地球物理信号分析与海洋重力仪研制。E-mail: llt@asch.whigg.ac.cn

引用格式: 李思达, 方佳毅, 周巍, 等. 高潮位洪水的致灾机制、风险评估与预报评述[J]. 地理科学进展, 2024, 43(1): 190-202. [Li Sida, Fang Jiayi, Zhou Wei, et al. High tide flooding: Drivers, risk assessment, and prediction. Progress in Geography, 2024, 43(1): 190-202.]
DOI: 10.18306/dlkxjz.2024.01.014



注:根据文献[38]进行修改。本图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)2950号的标准地图制作,底图无修改。

图1 高潮位洪水分布与致灾过程

Fig.1 Distribution of high tide flooding and its mechanisms

国内对于高潮位洪水的研究也逐步展开,包括分析海平面上升对高潮位洪水的贡献^[22],以及考虑海平面上升情景下预报未来高潮位洪水的发生频次等^[22]。在未来海平面持续上升的背景下,这些地区的高潮位洪水事件势必越加频繁,带来的累积损失也将越来越严重。因此,迫切需要加强有关海平面上升背景下的高潮位洪水驱动因素、风险评估和预报相关研究,为沿海城市适应全球气候变化和沿海地区经济社会的可持续发展提供科学支撑。本文重点介绍高潮位洪水定义、驱动因素、风险评估和高潮位洪水预报的研究进展。从理论上,开展上述工作可加深对于高潮位洪水的发生机理和演变规律的理解;从实践上,可以为沿海城市警戒潮位和防洪工程设计、防灾减灾规划提供重要的参考。

1 高潮位洪水的定义

高潮位洪水指在沿海地区由海洋因素导致(例如海平面上升、高潮位、风暴潮)的小型海岸洪水^[4,6,11,23]。因经常发生于高潮位附近,故此称为高潮位洪水。高潮位洪水带来的影响主要包括干扰日常出行活动、增加通勤时间、损害公共设施、造成经济损失、威胁公共卫生和城市用水安全、威胁生物栖息和生态环境等^[10,24]。虽然高潮位洪水常发生于高潮位附近,但不局限于仅仅发生在高潮位时刻附近^[5-6,8,25]。盛行风的变化、洋流的变化、风暴潮的增水等因素叠加在中等程度的潮位上同样能使得静态总水位(still water levels,即不考虑风浪影响的水位)超过洪水阈值。由于验潮站记录的水位数据一般是逐时的,逐时的观测记录中一般无法获取风浪的信息,

所以此处我们使用静态总水位的概念。

高潮位洪水的名称还包括滋扰洪水(nuisance flooding)、小型洪水(minor flooding)、晴天洪水(sunny day flooding)、重复性潮汐洪水(recurrent flooding)、国王潮汐洪水(king tides flooding)等。高潮位洪水的名称主要经历了3个阶段的更迭。初始时因超过小型洪水阈值,所以称为小型海岸洪水^[4]。其后为突出小型洪水的滋扰特性,多称为滋扰洪水^[5,23,26-27]。近年来特别是2018年以来,为了突出因潮致灾的频繁,美国国家海洋与大气管理局(NOAA)和IPCC第六次报告以及国内外科研人员多采用高潮位洪水^[6,11,28-30]。IPCC报告还提及了高潮位洪水的慢性(chronic)特征,因此也有少量文献和媒体将高潮位洪水称作慢性潮汐洪水(chronic tidal flooding)或是慢性洪水(chronic flooding)^[31]。在新闻媒体的报道中多采用晴天洪水、国王潮汐和高潮位洪水的描述方式,以方便大众理解。虽然Haigh等^[32]认为滋扰洪水比小型海岸洪水的影响更小,Moftakhari等^[5]认为滋扰洪水的含义比高潮位洪水的含义更宽广,但当前的研究一般认为这些不同名称描述的是同一类型的洪水,鼓励使用高潮位洪水这一术语。

高潮位洪水的阈值主要对应于当地小型洪水的阈值,一般由水文气象海洋等部门依据当地实际情况给出。在没有官方洪水阈值且有水位观测数据的地方,研究人员采用多种方法推算高潮位洪水阈值:①以潮差为基础。美国NOAA年度报告提出依据平均高高潮与低低潮的差值作为输入量,代入线性模型拟合洪水阈值^[6]。②以历史灾害数据为基础。基于媒体报道的洪水事件中的最低值作为高潮位洪水阈值,该方法应用于澳大利亚沿海的高潮位洪水研究^[33]。③以社会影响为基础。基于社交软件对洪水话题的热度,选择热度达到25%时刻的水位高度作为高潮位洪水阈值^[34],应用于美国墨西哥湾和东部沿海,这种新颖的方式类似于以灾害的社会影响程度来定义高潮位洪水。④以极值水位重现期为基础。采用极值水位小于5年的重现期作为小型洪水阈值^[22],这是GBT 22482—2008(水文情报预报规范)建议的方式。⑤此外,也有采用超过当地平均较高高潮0.3 m作为洪水阈值^[35],或是采用水位的第99分位数作为小型洪水阈值^[22],这两种方式的定义类似于研究极值水位,与当地真实的情况相关性并不足。

虽然政府部门给出了一部分水文站点的高潮位洪水(或小型洪水)阈值数据,但目前仍有许多观测站点并没有可靠的官方数据,这阻碍了实际可能发生的高潮位洪水研究。考虑到城市之间的差异性,适用于美国沿海城市的高潮位洪水阈值拟合方式可能并不适合其他国家和地区,且潮差超过4 m时上述拟合方式并不适用^[5]。采用社交媒体热度是一种新颖的方式^[34],但当前没有获得广泛的使用。采用小于5年的重现期作为小型洪水阈值是一种可行的办法^[22],但是并没有考虑岸基防护措施的影响,容易高估高潮位洪水的风险。2017年,中国完成了沿海大规模警戒潮位核定,填补了以岸段警戒潮位值为基准的预警报业务空白^[36-37]。因此,在中国沿海地区,应当使用核定的警戒潮位数据作为洪水阈值。

2 高潮位洪水驱动因素

高潮位洪水致灾过程主要分为3类(图1)^[5-6,38]:

①海水直接淹没沿海地面,这种情况发生在直接与海水相连的地方;②海水通过地下排水管道倒灌进沿海城市,这种情况发生在沿海低洼地区;③海水将地下水位抬升至高于地表的高度,此种情况通常也发生在沿海低洼地区。

海水直接淹没沿海地面是高潮位洪水的主要形式。海水自海洋蔓延到陆地,可以无阻碍到达的地区通常被判定为淹没区域,例如美国北卡罗纳州威尔明顿地区、越南胡志明市西贡河入海口、英国泰晤士河沿岸、意大利威尼斯地区、哥斯达黎加地区、中国厦门沙坡尾、马来西亚雪兰莪州沿海地区等发生的高潮位洪水事件。城市排水管道通常是基于重力的原理将水从高处排放至低处,排水的性能部分取决于陆地与海水之间的高度差异。在地势低洼的沿海地区,涨潮会减小这些高度差异,并可能减缓或逆转排水速度。例如美国迈阿密戴德地区、美国佛罗里达圣奥古斯丁地区,高潮位洪水有部分通过排水渠倒灌。这种形式的淹没难于管理,因为其能够避开海岸防护措施而造成城市内部的淹没。美国檀香山是四面环海的岛屿,在檀香山的大部分低洼沿海地区,海平面的上升使得地下水已经非常接近地表,因此高潮位带来的地下水位抬高会导致基础设施(如污水池、地下室等)被淹没。需要说明的是,上述致灾过程并不是相互孤立的,

例如在无防护措施的沿海地区,海水可以通过直接淹没沿海的道路,以及通过沿海道路的排水口倒灌两种形式一同淹没。但从当前全球已发生的高潮位洪水事件来看,致灾过程以前两种形式为主。北美、澳洲、欧洲等国家和地区的沿海城市建设较早,当时的防护设计标准难以应对当前的气候变化^[5,39],且欧美国家的自然海岸线比例较低^[40-41],因此较容易受高潮位洪水事件影响。相比之下,中国人工海岸线比例较高,且大量人口居住在沿海地区,根据《防洪标准》(GB50201—2014)、《海堤工程设计规范》(GB/T51015—2014)、《全国海堤建设方案》(发改委水利部2017),中国沿海主要城市形成了防御20年一遇以上台风风暴潮的抗灾保障体系,因此目前已观察到的高潮位洪水事件并不如其他国家和地区频繁。厦门地区曾遭受一段时间高潮位倒灌的困扰,采取应对措施后该问题已基本得到解决。但随着全球海平面上升和沿海极端复合事件增多,高潮位洪水事件发生频次将进一步增长。

高潮位洪水位的驱动因素(图2)可由式(1)描述:

$$WL = MSL_0 + \Delta SLR + \Delta VLM + SLA + \text{Tides} + \Delta \text{Tides} + \text{NTR} \quad (1)$$

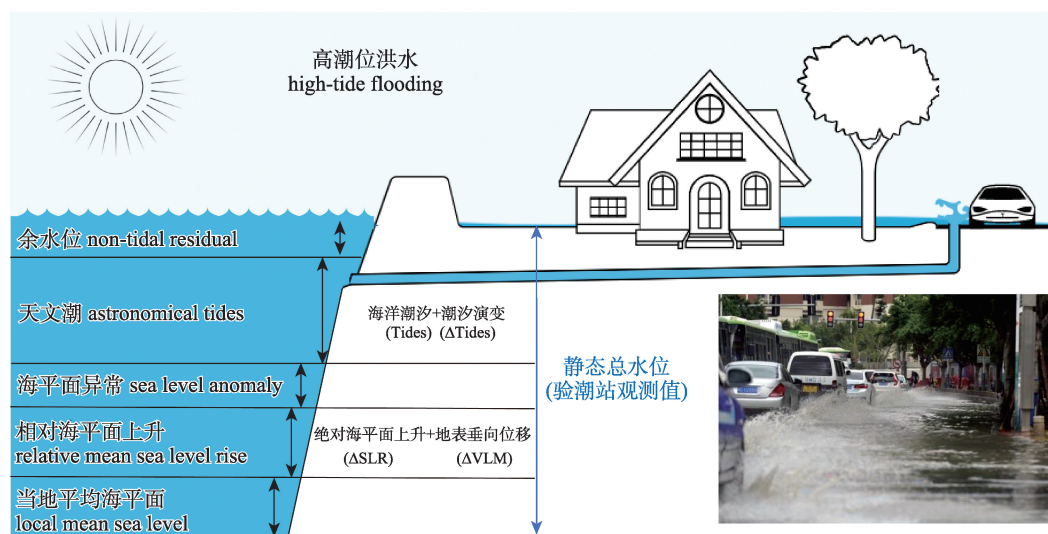
式中:WL为验潮站水位观测值;MSL₀是平均海平面;ΔSLR是绝对海平面上升;ΔVLM为地表垂向位移;SLA是由气象因素导致的海平面异常;Tides是海洋潮汐,由多个不同振幅、相位、频率的分潮组合而成;ΔTides是潮汐演变;NTR为非潮残差,因为NTR还包含了时间误差和调和分分析误

差等,因此,NTR并不完全代表增水^[42-43]。

相对海平面上升是高潮位洪水频发的主要因素之一^[6,8,23,44-48]。1980—2020年全球绝对海平面以平均每年3.35±0.45 mm的速度上升^[49-51],而城市地表沉降放大了海平面上升的影响^[52-55],一同加剧了沿海城市暴露于海岸洪水的风险。相对海平面上升在不同程度上影响了高潮位洪水的发生频次。由于相对海平面上升,澳大利亚东部沿海高潮位洪水的发生频次在1980—2020年增加了约1~4倍^[8],意大利威尼斯的高潮位洪水发生频次自1990年代的10 d/a增加到现在的约40 d/a^[48]。

除了相对海平面上升,海洋潮汐长期增强(ΔTides)对高潮位洪水发生频次的增加也有一定的贡献^[56]。由于城市建设和河道疏浚等人为因素和海平面上升等自然因素影响,一些沿海城市的潮汐增幅不断增强^[57-60],并且增强的趋势不亚于局地的海平面上升^[57,60]。潮汐增强使得美国威尔明顿站点的高潮位洪水频次在2019年增加了近27%^[27]、迈阿密地区高潮位洪水的发生提前了约10年^[28]。如果剔除潮汐增强和海平面上升因素的影响,2020年纽约市牙买加湾的15起高潮位洪水事件中仅有2起会发生^[56]。

除了以上两种直观的长期变化影响外,高潮位与海平面季节性或年际变化峰值碰头时,也会显著增加高潮位洪水发生频次^[6,8,25,61]。实际上,即便上述水位分量并未达到各自的峰值,而是处于中等程度的叠加也能够触发高潮位洪水事件。从数值上讲,



注:因为一般验潮站的观测装置无法捕捉短周期海浪引起的海水位变化,所以此处仅列出静态总水位。

图2 高潮位洪水驱动因素示意图

Fig.2 Factors causing high-tide flooding

即使只考虑当地海平面($MSL_0 + \Delta SLR + \Delta VLM$)与天文潮汐($Tides + \Delta Tides$)也能够带来高潮位洪水,并且这种情况占总体高潮位洪水发生频次的比例并不低,例如在美国西南沿海的部分站点超过25%^[6,25],在澳大利亚东部沿海的一些站点达35%~50%^[8]。

当前对高潮位的驱动因素已经开展了广泛深入的研究,获得了丰硕的研究成果。但全面了解高潮位洪水的驱动因素还需要进一步深入。至少有两方面的工作可以展开:①不同驱动因素在不同时间尺度上的变化是否促进了洪水发生;②进一步细化驱动因素,找寻背后的物理机制。从海洋动力与海岸动力学等角度,量化局部和区域因素如海面高度对气压的响应(*inverted barometer effect*)、中尺度涡旋、河道疏浚等驱动因素的贡献。

高潮位洪水的各个驱动因素存在不同时间尺度上的变化,例如在墨西哥湾发现海平面季节性变化的振幅呈增大趋势^[62]、非潮残差极值与海平面相当的长期变化趋势^[63-64]、非潮残差每年的最大值提前出现的趋势^[65-66],这些不同尺度的变化是否增加了高潮位洪水的发生频次,是有待研究的问题。从海气动力学角度讲,海平面异常是多种海气变化因素所造成^[67-68],例如大西洋的罗斯贝波激发了美国东南沿海海平面季节性信号振幅的年际变化^[69],海面高度对气压的响应解释了近25%的海平面年际变化^[70]。有必要量化如海面高度对气压的响应、中尺度涡旋、风生增水、罗斯贝波等局部和区域气候驱动因素对高潮位洪水的影响。从海岸工程学角度,高潮位洪水多发生在感潮河段和沿海城市低洼地区,而这些地区经历的城市化和河道变化又各不

相同,例如Ralston等^[71]指出纽约哈德逊河的河道疏浚增大了潮波振幅,但是削弱了洪水;Pareja-Roman等^[56]指出纽约牙买加湾地区的城市化和河道变化使得高潮位洪水更易于发生。因此,同样需要从人为因素的角度(如快速城市化引起局地地面沉降、河道疏浚、下水管除涝能力等)去研究高潮位洪水的影响因素。总的来说,目前国内相关研究还较为薄弱,是未来突破的难点之一。

3 高潮位洪水影响与风险评估

高潮位洪水灾害不足以严重到造成巨大财产损失和人员伤亡,但着实能够干扰日常出行活动、增加通勤时间、损害公共设施、威胁公共卫生和城市用水安全、威胁生物栖息和生态环境等(表1)。高潮位洪水的一大特点是发生频率高,因此即使是较小的损失经历多次累积后也会被放大,这种累积损失是不可忽视的。

研究表明,高潮位洪水事件显著增加通勤时间和道路维护成本,造成交通延误。如美国2020年因高潮位洪水灾害导致13亿~15亿美元的直接和间接经济损失^[72];仅2018年高潮位洪水对美国公路系统造成了近1亿h的车辆延迟时间^[73];相比于2002—2004年,2015—2017年的高潮位洪水增加了美国迈阿密区域平均通勤时间15 min,最大通勤时间274 min^[12]。高潮位洪水事件对沿海旅游业造成一定影响,2017年,在美国安那波利斯市地区减少了1.7%的旅游人次,导致了0.7%~1.4%的总收入损失^[11]。尽管一次高潮位洪水事件带来的影响程度较小,但由于其频繁的发生,高潮位洪水的累积经济

表1 已有高潮位洪水灾害评估的相关案例
Tab.1 Examples of disaster impact assessment regarding high tide flooding

主要文献	研究区域	研究对象	评估方法
Moftakhari 等 ^[23]	美国城市	经济损失	拟合经济损失随水位变化曲线
Hino 等 ^[11]	美国城市	旅游人次	拟合旅游人次随水位变化曲线
Ghanbari 等 ^[14]	美国城市	暴露程度	构造水位超越概率与暴露程度函数关系
Carpio Camargo 等 ^[75]	厄瓜多尔城市	海龟孵化成功率	不同孵育情况下的对照实验
Jacobs 等 ^[73] 、Fant 等 ^[72]	美国城市	通勤时间及其经济损失	静态淹没形式结合淹没时长的概率分布
Hanslow 等 ^[80]	澳大利亚城市	淹没范围	静态淹没模型
Habel 等 ^[38]	美国岛屿	淹没范围	静态淹没模型与数值模拟淹没
Hauer 等 ^[12]	美国城市	通勤时间	基于GIS的最优路径规划
Macías-Tapia 等 ^[24]	美国城市	海水水质	实测水质与数值模拟水质
Li 等 ^[22]	中国城市	淹没损失比	静态淹没模型与损失曲线

损失在美国西雅图和旧金山甚至比极端水位带来的损失还要多^[10],而带来的暴露程度在西雅图、华盛顿特区、杰克逊维尔等地区大于中等—大型洪水^[14]。此外,高潮位洪水事件对沿岸生态环境造成影响。高潮位洪水通过排水管道倒灌进城市低洼地区,将区域内废水处理系统中的有害物质^[38]和溶解性成分^[24]等带入河流和海水中,是沿海地区海水水质异常的主要原因之一^[24,74]。另外,潮汐带来的淹没与红海龟孵化率、玳瑁海归孵化率、绿海龟孵化率有明显的负相关^[75-76]。

在洪水发生概率方面,研究人员多是预报高潮位洪水在年和月时间尺度上的发生频次^[6,8,12,30]。例如,考虑不同海平面上升情景下高潮位洪水的发生频次。当前仅有 Dusek 等^[77]依据统计学方法预报高潮位洪水每日的发生概率。

在高潮位洪水的定量风险评估方面,相关研究主要利用统计经验模型或水动力模型方法(表1),结合高潮位洪水未来发生频率变化,开展承灾体暴露分析和损失评估。基于统计经验模型方法是指构建水位高度与灾害损失的函数关系,结合淹没深度的经验累积分布概率和超越概率计算累积损失^[10,14,22,78];采用回归分析的方式建立逐时的影响人群与水位高度的函数关系^[11]。这些评估方法简易但缺乏精度,在函数关系构建时还需深入分析。基于淹没模型方法是利用 GIS 手段或数值模型,计算高潮位洪水淹没范围^[38,79-80],进而结合道路网络、通行数据等计算交通影响和其他损失^[73]等。国内针对高潮位

洪水风险评估,主要利用淹没深度与财产损失曲线开展^[22]。总体而言,高潮位洪水的风险评估还有较大的进步空间,对承灾体的暴露度种类、承灾体脆弱性(如人口密度、收入、关键基础设施等)、承灾体致灾过程(例如土地盐碱化、农作物产量、地下水变化、人口受灾、水质变化、生物生态、交通出行等)和级联效应等研究仍需加强。

4 高潮位洪水事件预测

在气候变化与人类活动的共同作用下,未来高潮位洪水的强度会更强、持续时间会更长、发生频次会更多^[23,41,81-82]。由于高潮位洪水低危险性,在预报过程中其强度并不是主要的关注点,研究人员更关注预报高潮位洪水的发生频次。当前高潮位洪水的预报主要基于统计模型(表2),基于水动力模型的暂无报道。统计预报主要采用两种方式:①基于统计模型建立洪水发生频次与自变量(如海平面上升)的关系;②预报水位并统计洪水发生频次。

在采用统计模型进行预报时,自变量一般是海平面上升、海平面周期性变化和海洋潮汐等。例如使用线性回归和指数函数拟合发生频次与海平面上升的关系^[26];基于广义帕累托分布计算水位超越概率,进而加入海平面上升估计未来的水位超越概率^[9];基于 β -二项分布或经验累积分布建立海平面上升、海平面年际变化和海洋潮汐与高潮位洪水逐月或逐年发生频次的关系^[22,30,81];基于累积分布函数和

表2 当前高潮位洪水统计学预报方法的比较
Tab.2 Comparison of HTF frequency prediction using statistical methods

主要文献	研究区域	方法模型	模型输入量				预报尺度
			Δ SLR	Tides	SLA	NTR	
Moftakhari 等 ^[23]	美国沿海	线性拟合	✓				年
Sweet 等 ^[4]	美国沿海	经验概率分布	✓				年
Hague 等 ^[8]	澳大利亚城市	经验概率分布	✓				年
Le Cozannet 等 ^[31]	法属群岛	经验概率分布	✓				年
Ghanbari 等 ^[14]	美国城市	混合正态-GPD	✓				年
Thompson 等 ^[81]	美国沿海	β -二项分布	✓	✓	✓		月
Dusek 等 ^[77]	美国沿海	概率分布的累积	✓	✓	✓	✓	日
Sweet 等 ^[9]	美国沿海	GEV/GPD	✓				年
Li 等 ^[22]	中国城市	经验概率分布	✓	✓	✓		年
Ezer ^[84]	美国城市	预测水位	✓				年
Burgos 等 ^[82]	美国城市	预测水位	✓	✓	✓		年

注:GEV(generalized extreme value)为广义极值分布,GPD(generalized Pareto distribution)为广义帕累托分布,两者是计算极值水位重现期的常用方法。

相关性方法计算海平面上升、海洋潮汐和增水与高潮位洪水日超越概率的关系^[78]。基于Thompson等^[30]的研究成果,美国国家航空航天局提供了预报美国沿海高潮位洪水逐月发生频次的线上查询网站。基于Dusek等^[77]的研究成果,NOAA也将上线美国高潮位洪水逐日发生概率的预报工具。

基于预报的水位统计高潮位洪水发生频次时,一般是以预报的潮汐作为基准,再模拟海平面在不同时间尺度上的变化,最终与海平面上升相叠加。例如使用蒙特卡洛结合高斯过程模拟未来海平面的多尺度变化,进而结合潮汐和海平面上升预报未来水位^[82];将预报潮汐叠加在海平面上升上预报未来仅由高潮位引发的高潮位洪水发生频次^[83];为保留潮汐与增水的非线性作用而采用蒙特卡洛结合高斯过程模拟未来海水的高度,进而结合海平面上升预报水位^[84]。

从研究结果来看,在美国沿海海平面上升0.3 m将导致高潮位洪水发生频次增加到20~50 d/a^[14]。在中等程度的海平面上升情景下,未来美国西南部海岸和东中部沿海、中国东南沿海容易发生高潮位洪水事件^[6,9,22],并且在未来30~50年,这些沿海城市会陆续出现每年至少发生50次高潮位洪水的情形,进入严重的长期水患过程^[22,30]。在温室气体保持高排放的情景下,预计到2050年悉尼将平均每周发生一次沿海洪水^[85]。在法属瓜德罗普群岛的高风险地区,高潮位洪水的发生频次将快速增长,预计到2060—2100年间,平均每隔一天就会发生一次高潮位洪水^[31]。除了这些直观的增加趋势,发生频次受潮汐的长周期调制影响展现出每约4.4年和约18.6年出现一个峰值。此处潮汐的长周期调制是月球轨道与黄道的交点对时间的进动(周期为18.6年),以及月球近地点周期性变化(8.8年),对潮汐振幅产生的准18.6年和4.4年信号调制。受此影响,在2027、2046年前后,美国西部沿海需要注意高潮位洪水的集中爆发^[30],厦门地区的高潮位洪水在2035年前后将迎来集中爆发^[22]。

当前在高潮位洪水的预报中通常是以不同排放情景下的海平面上升作为主要的输入参数,代入不同的统计模型预报未来的高潮位洪水发生频次。要获得更加可靠的高潮位洪水预报结果,至少有4件事情可以探索:①是否有更可靠的统计模型或预报方法;②是否考虑其他输入变量的变化;③是否考虑变量之间的相关性;④是否能够预报

更细致的时间尺度。

当前被用于预报的统计模型包括 β -二项分布、核密度估计、泊松分布、经验概率密度函数等,但这些模型的适用性有一些局限性,例如核密度估计会出现过度拟合的情况(使得预报结果超过365 d/a),采用经验概率分布虽然不会过度拟合,但会使得预报结果不连续(例如超过200 d的概率比超过190 d的概率还要大)。是否还有更可靠的预报模型或方法预报高潮位洪水发生频次,是有待研究的问题。

已有的文献指出,海洋潮汐在一些感潮河段存在明显的增大趋势^[54,86-88]。随着城市化进程的推进以及海平面的持续上升,部分地区潮汐的长期趋势可能会持续^[53,89]。同时,在墨西哥湾海平面季节性变化的信号中发现的振幅增大趋势,在非潮残差的极值中发现的与海平面相当的长期变化趋势,以及季节性相位的长期偏移,这些长期趋势与气候变化和人类活动相关,可能会继续保持下去^[19,60]。当前已有的预报模型中均没有考虑这些长期变化趋势,在统计预报模型中忽略这些长期趋势将会低估高潮位洪水发生频次。此外,当前的统计模型中均没有考虑输入变量间的协方差^[90]。协方差是一种复合效应的展现,而复合效应会导致长期增强的极端活动或极端统计中的长期非平稳性,因此在预报模型中考虑变量间的协变特征非常重要。

高潮位洪水事件的持续时间在不断延长^[6],然而当前开展的预报工作中少有涉及预报高潮位洪水的持续时间。这一指标对评估高潮位洪水的影响十分重要,一个持续3 h的高潮位洪水与只持续1 h的高潮位洪水带来的影响显然是不同的。总而言之,对高潮位洪水的发生频次、持续时间等方面的预报仍有许多工作要开展。

5 展望

随着全球气候变暖以及沿海地区城市化进程加快,过去需要风暴潮才能触发的小型海岸洪水,现在或不远的将来仅需天文大潮就能触发。在海平面持续上升的情景下,高潮位洪水的发生频次、强度、持续时间、影响程度等将会变得更强。迫切需要加强沿海地区高潮位洪水的驱动因素、风险评估以及预报的研究工作。在前人研究工作的基础上,本文提出以下几点展望:

(1) 加强高潮位洪水的关注与监测,针对高潮

位洪水的致灾过程特性,在与海洋直接相连的地段、在城市内部的地下排水管道、在内部的湿地等放置更多的水位监测设备,同时加强通过社交媒体收集洪水信息。加强数据开放力度和建立完善的数据共享机制。高精度的数值模拟依赖于高精度和分辨率的基础数据如数字高程模型、地下管道布设数据等。此外,沿海水位的长期观测数据和河流径流数据是研究海岸动力过程演变的重要数据,但长期观测数据在整个中国沿海往往是难以获取的。缺乏这些数据往往使得研究工作处于“巧妇难为无米之炊”的状态。加强高潮位洪水阈值的判定研究,为高潮位洪水监测和预警提供更可靠的支撑。

(2) 加强高潮位洪水驱动因素研究。从驱动因素的变化和驱动因素间的相互作用等角度,通过驱动数值模式来量化不同因素在激发高潮位洪水过程中的贡献,探究高潮位洪水的驱动因素以及高潮位洪水在过去和现在的变化。警惕极端情景和“黑天鹅”事件的出现,加强高潮位洪水驱动因素间的耦合效应研究,采用统计模型和动力模型分析多驱动因素耦合的非线性效应及显著性特征。量化人为因素与自然变化对高潮位洪水的影响。

(3) 加强高潮位洪水的对沿海城市的风险评估工作。站在国家层面上给出整个海岸线的评估报告以及沿海关键地区和重要基础设施的风险评估研究。在评估报告中涉及对人口、经济、农业和湿地等承灾体。评估高潮位洪水对社会经济和自然环境等各个方面的影响,例如土地盐碱化、农作物产量、地下水变化、人口受灾、水质变化、生物生态、交通出行等。此外,目前的研究多关注高潮位洪水的影响与风险,需要加强高潮位洪水适应措施(风险管理措施)的研究,从而应对全球变化下的海岸洪水灾害。

(4) 加强高潮位洪水发生频次的预报工作,提高预报的准确和可靠性。建立合适的统计预报模型,考虑更多的输入参数并顾及参数的变化特征(包括年际和长期趋势)以及参数之间的相关性,预报高潮位洪水发生频次。同时,随着信息技术的不断发展,利用人工智能去建立高潮位洪水发生频次预报模型也能够提供解决问题的办法。加强高潮位洪水持续时长的预报工作,从而更准确地评估高潮位洪水带来的损失。

致谢:作为一名博士后写评述文章实在感觉力有不逮,幸好有审稿人以及同行专家的帮助与包容,使得该项工作能够顺利发表。感谢两名匿名审稿人对我们工作的肯定以及提出的有建设性的审稿意见;感谢厦门大学商少平教授、自然资源部海洋一所潘海东博士提出的宝贵意见与建议。

参考文献(References)

- [1] 方佳毅, 史培军. 全球气候变化背景下海岸洪水灾害风险评估研究进展与展望 [J]. 地理科学进展, 2019, 38(5): 625-636. [Fang Jiayi, Shi Peijun. A review of coastal flood risk research under global climate change. Progress in Geography, 2019, 38(5): 625-636.]
- [2] 自然资源部. 海洋灾害公报 [EB/OL]. 2022-04-05 [2023-03-05]. http://gi.mnr.gov.cn/202304/t20230412_2781112.html. [Ministry of natural resources of the People's Republic of China, Bulletin of China marine disaster. 2022-04-05 [2023-03-05]. http://gi.mnr.gov.cn/202304/t20230412_2781112.html.]
- [3] 侯一筠, 尹宝树, 管长龙, 等. 我国海洋动力灾害研究进展与展望 [J]. 海洋与湖沼, 2020, 51(4): 759-767. [Hou Yijun, Yin Baoshu, Guan Changlong, et al. Progress and prospect in research on marine dynamic disasters in China. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2020, 51(4): 759-767.]
- [4] Sweet W V, Park J. From the extreme to the mean: Acceleration and tipping points of coastal inundation from sea level rise [J]. Earth's Future, 2014, 2(12): 579-600.
- [5] Moftakhari H R, AghaKouchak A, Sanders B F, et al. What is nuisance flooding? Defining and monitoring an emerging challenge [J]. Water Resources Research, 2018, 54(7): 4218-4227.
- [6] William S, Greg D, Obeysekera J, et al. Patterns and projections of high tide flooding along the U.S. coastline using a common impact threshold [EB/OL]. 2018-02-01 [2023-05-05]. <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/17403>.
- [7] Cooley S, Schoeman D, Bopp L, et al. Oceans and coastal ecosystems and their services, IPCC AR6 WGII [M]: Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2022: 478-479.
- [8] Hague B S, Jones D A, Jakob D, et al. Australian coastal flooding trends and forcing factors [J]. Earth's Future, 2022, 10(2): e2021EF002483. doi: 10.1029/2021EF002483.
- [9] Sweet W, Kopp R, Weaver C, et al. Global and Regional Sea Level Rise Scenarios for the United States [EB/OL]. 2022-02-01 [2023-03-05]. <https://aampublicoceanservice.blob.core.windows.net/oceanserviceprod/hazards/sea-levelrise/noaa-nos-techrpt01-global-regional-SLR-scenari->

- os-US.pdf.
- [10] Moftakhari H R, Aghakouchak A, Sanders B F, et al. Cumulative hazard: The case of nuisance flooding [J]. *Earth's Future*, 2017, 5(2): 214-223.
- [11] Hino M, Belanger S T, Field C B, et al. High-tide flooding disrupts local economic activity [J]. *Science Advances*, 2019, 5(2): eaau2736. doi: 10.1126/sciadv.aau2736.
- [12] Hauer M, Mueller V, Sheriff G, et al. More than a nuisance: Measuring how sea level rise delays commuters in Miami, FL [J]. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(6): 064041. doi: 10.1088/1748-9326/abfd5c.
- [13] Hilmi E, Amron, Christianto D. The potential of high tidal flooding disaster in North Jakarta using mapping and mangrove relationship approach [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, 989(1): 012001. doi: 10.1088/1755-1315/989/1/012001.
- [14] Ghanbari M, Arabi M, Obeysekera J, et al. A coherent statistical model for coastal flood frequency analysis under nonstationary sea level conditions [J]. *Earth's Future*, 2019, 7(2): 162-177.
- [15] 于福江, 张占海. 一个东海嵌套网格台风暴雨潮数值预报模式的研制与应用 [J]. *海洋学报*, 2002, 24(4): 23-33. [Yu Fujiang, Zhang Zhanhai. Implementation and application of a nested numerical typhoon storm surge forecast model in the East China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 2002, 24(4): 23-33.]
- [16] 端义宏, 余晖, 伍荣生. 热带气旋强度变化研究进展 [J]. *气象学报*, 2005, 63(5): 636-645. [Duan Yihong, Yu Hui, Wu Rongsheng. Review of the research in the intensity change of tropical cyclone. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 63(5): 636-645.]
- [17] 谢丽, 张振克. 近20年中国沿海风暴潮强度、时空分布与灾害损失 [J]. *海洋通报*, 2010, 29(6): 690-696. [Xie Li, Zhang Zhenke. Study on the relationship between intensity, spatial-temporal distribution of storm surges and disaster losses along the coast of China in past 20 years. *Marine Science Bulletin*, 2010, 29(6): 690-696.]
- [18] 石先武, 谭骏, 国志兴, 等. 风暴潮灾害风险评估研究综述 [J]. *地球科学进展*, 2013, 28(8): 866-874. [Shi Xianwu, Tan Jun, Guo Zhixing, et al. A review of risk assessment of storm surge disaster. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(8): 866-874.]
- [19] Feng J L, Li D L, Wang H, et al. Analysis on the extreme sea levels changes along the coastline of Bohai Sea, China [J]. *Atmosphere*, 2018, 9(8): 324. doi: 10.3390/atmos9080324.
- [20] 张莉, 商少平, 谢燕双, 等. 基于有限元法的福建沿岸天文潮—风暴潮耦合预报模式研究 [J]. *应用海洋学学报*, 2016, 35(2): 256-265 [Zhang Li, Shang Shaoping, Xie Yanshuang et al. A tide-storm surge coupled model based on finite element method for Fujian coast. *Journal of Applied Oceanography*, 2016, 35(2): 256-265.]
- [21] 石先武, 高廷, 谭骏, 等. 我国沿海风暴潮灾害发生频率空间分布研究 [J]. *灾害学*, 2018, 33(1): 49-52. [Shi Xianwu, Gao Ting, Tan Jun, et al. Research on occurrence frequency of storm surge disaster distribution in the coastal areas of China. *Journal of Catastrophology*, 2018, 33(1): 49-52.]
- [22] Li S, Wahl T, Fang J, et al. High-tide flooding along the China coastline: Past and future [J]. *Earth's Future*, 2023, 11(4): e2022EF003225. doi: 10.1029/2022EF003225.
- [23] Moftakhari H R, AghaKouchak A, Sanders B F, et al. Increased nuisance flooding along the coasts of the United States due to sea level rise: Past and future [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(22): 9846-9852.
- [24] Macías-Tapia A, Mulholland M R, Selden C R, et al. Effects of tidal flooding on estuarine biogeochemistry: Quantifying flood-driven nitrogen inputs in an urban, lower Chesapeake Bay sub-tributary [J]. *Water Research*, 2021, 201: 117329. doi: 10.1016/j.watres.2021.117329.
- [25] Li S, Wahl T, Barroso A, et al. Contributions of different sea-level processes to high-tide flooding along the U.S. coastline [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2022, 127(7): e2021JC018276. doi: 10.1029/2021JC018276.
- [26] Morris J T, Renken K A. Past, present, and future nuisance flooding on the Charleston peninsula [J]. *PLoS One*, 2020, 15(9): e0238770. doi: 10.1371/journal.pone.0238770.
- [27] Li S D, Wahl T, Talke S A, et al. Evolving tides aggravate nuisance flooding along the U.S. coastline [J]. *Science Advances*, 2021, 7(10): eabe2412. doi: 10.1126/sciadv.abe2412.
- [28] De Leo F, Talke S A, Orton P M, et al. The effect of harbor developments on future High-Tide flooding in Miami, Florida [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2022, 127(7): e2022JC018496. doi: 10.1029/2022JC018496.
- [29] Piecuch C G, Coats S, Dangendorf S, et al. High-tide floods and storm surges during atmospheric rivers on the US west coast [J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(2): e2021GL096820. doi: 10.1029/2021GL096820.
- [30] Thompson P R, Widlansky M J, Hamlington B D, et al. Rapid increases and extreme months in projections of United States high-tide flooding [J]. *Nature Climate Change*, 2021, 11(7): 584-590.
- [31] Le Cozannet G, Idier D, de Michele M, et al. Timescales of emergence of chronic flooding in the major economic

- center of Guadeloupe [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2021, 21(2): 703-722.
- [32] Haigh I D, Ozsoy O, Wadey M P, et al. An improved database of coastal flooding in the United Kingdom from 1915 to 2016 [J]. *Scientific Data*, 2017, 4: 170100. doi: 10.1038/sdata.2017.100.
- [33] Hague B S, Murphy B F, Jones D A, et al. Developing impact-based thresholds for coastal inundation from tide gauge observations [J]. *Journal of Southern Hemisphere Earth Systems Science*, 2019, 69(1): 252. doi: 10.1017/ES19024.
- [34] Moore F C, Obradovich N. Using remarkability to define coastal flooding thresholds [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 530. doi: 10.1038/s41467-019-13935-3.
- [35] Ezer T, Atkinson L P. Accelerated flooding along the U. S. East coast: On the impact of sea-level rise, tides, storms, the Gulf Stream, and the North Atlantic Oscillations [J]. *Earth's Future*, 2014, 2(8): 362-382.
- [36] 付翔, 车助镁, 丁俊, 等. 新核定风暴潮警戒潮位的筛选及适用性研究 [J]. *海洋预报*, 2017, 34(2): 1-9. [Fu Xiang, Che Zhumei, Ding Jun, et al. An application approach of new warning water level in storm surge forecasting and warning. *Marine Forecasts*, 2017, 34(2): 1-9.]
- [37] 李岩松, 王久良, 杨超, 等. 河北智能型警戒潮位监测点建设探究及应用 [J]. *海岸工程*, 2022, 41(2): 181-186. [Li Yansong, Wang Jiuliang, Yang Chao, et al. Exploration and application of intelligent alert tide level monitoring site construction in Hebei Province. *Coastal Engineering*, 2022, 41(2): 181-186.]
- [38] Habel S, Fletcher C H, Anderson T R, et al. Sea-level rise induced multi-mechanism flooding and contribution to urban infrastructure failure [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 3796. doi: 10.1038/s41598-020-60762-4.
- [39] Vousedoukas M I, Mentaschi L, Voukouvalas E, et al. Extreme Sea levels on the rise along Europe's coasts [J]. *Earth's Future*, 2017, 5(3): 304-323.
- [40] Gittman R K, Fodrie F J, Popowich A M, et al. Engineering away our natural defenses: An analysis of shoreline hardening in the US [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2015, 13(6): 301-307.
- [41] Olds A D, Frohloff B A, Gilby B L, et al. Urbanisation supplements ecosystem functioning in disturbed estuaries [J]. *Ecography*, 2018, 41(12): 2104-2113.
- [42] Muis S, Verlaan M, Winsemius H C, et al. A global re-analysis of storm surges and extreme sea levels [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 11969. doi: 10.1038/ncomms11969.
- [43] Haigh I, Nicholls R, Wells N. Assessing changes in extreme sea levels: Application to the English Channel, 1900-2006 [J]. *Continental Shelf Research*, 2010, 30 (9): 1042-1055.
- [44] Taherkhani M, Vitousek S, Barnard P L, et al. Sea-level rise exponentially increases coastal flood frequency [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 6466. doi: 10.1038/s41598-020-62188-4.
- [45] Ritman M, Hague B, Katea T, et al. Past and future coastal flooding in Pacific Small- Island Nations: Insights from the Pacific Sea Level and Geodetic Monitoring (PSLGM) Project tide gauges [J]. *Journal of Southern Hemisphere Earth Systems Science*, 2022, 72(3): 202-217.
- [46] Dahl K A, Fitzpatrick M F, Spanger-Siegfried E. Sea level rise drives increased tidal flooding frequency at tide gauges along the U.S. East and Gulf Coasts: Projections for 2030 and 2045 [J]. *PLoS One*, 2017, 12(2): e0170949. doi: 10.1371/journal.pone.0170949.
- [47] Ferrarin C, Lionello P, Orlic M, et al. Venice as a paradigm of coastal flooding under multiple compound drivers [J]. *Scientific Reports*, 2022, 12: 5754. doi: 10.1038/s41598-022-09652-5.
- [48] Rubinetti S, Taricco C, Zanchettin D, et al. Interannual-to-multidecadal sea-level changes in the Venice lagoon and their impact on flood frequency [J]. *Climatic Change*, 2022, 174(3): 26. doi: 10.1007/s10584-022-03448-2.
- [49] Frederikse T, Landerer F, Caron L, et al. The causes of sea-level rise since 1900 [J]. *Nature*, 2020, 584: 393-397.
- [50] 金涛勇, 刘文轩, 姜卫平, 等. 卫星测高确定全球海平面变化研究进展 [J]. *测绘地理信息*, 2022, 47(3): 1-8. [Jin Taoyong, Liu Wenxuan, Jiang Weiping, et al. Research progress on global sea level change determined by satellite altimetry. *Journal of Geomatics*, 2022, 47(3): 1-8.]
- [51] 徐天河, 穆大鹏, 闫昊明, 等. 近20年海平面变化成因研究进展及挑战 [J]. *测绘学报*, 2022, 51(7): 1294-1305. [Xu Tianhe, Mu Dapeng, Yan Haoming, et al. The causes of contemporary sea level rise over recent two decades: Progress and challenge. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(7): 1294-1305.]
- [52] Karegar M A, Dixon T H, Malservisi R, et al. Nuisance flooding and relative sea-level rise: the importance of present-day land motion [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 11197. doi: 10.1038/s41598-017-11544-y.
- [53] Shirzaei M, Freymueller J, Törnqvist T E, et al. Measuring, modelling and projecting coastal land subsidence [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 2(1): 40-58.
- [54] Fang J, Nicholls R J, Brown S, et al. Benefits of subsid-

- ence control for coastal flooding in China [J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 6946. doi: 10.1038/s41467-022-34525-w.
- [55] 何秀凤, 高壮, 肖儒雅, 等. InSAR 与北斗/GNSS 综合方法监测地表形变研究现状与展望 [J]. *测绘学报*, 2022, 51(7): 1338-1355. [He Xiufeng, Gao Zhuang, Xiao Ruya, et al. Application and prospect of the integration of InSAR and BDS/GNSS for land surface deformation monitoring. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(7): 1338-1355.]
- [56] Pareja-Roman L F, Orton P M, Talke S A. Effect of estuary urbanization on tidal dynamics and high tide flooding in a coastal lagoon [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2023, 128(1): e2022JC0187777. doi: 10.1029/2022JC018777.
- [57] Talke S A, Jay D A. Changing tides: The role of natural and anthropogenic factors [J]. *Annual Review of Marine Science*, 2020, 12(1): 121-151.
- [58] Haigh I D, Pickering M D, Mattias Green J A, et al. The tides they are A- Changin': A comprehensive review of past and future nonastronomical changes in tides, their driving mechanisms, and future implications [J]. *Reviews of Geophysics*, 2020, 58(1): e2018RG000636. doi: 10.1029/2018RG000636.
- [59] 陈才明, 厉海斌, 李玲. 浙南地区潮汐特性长期变化趋势研究 [J]. *水资源与水工程学报*, 2016, 27(6): 108-112. [Chen Caiming, Li Haibin, Li Ling. Study on the long term trends of tidal change characteristics in South Zhejiang Province. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2016, 27(6): 108-112.]
- [60] Feng X B, Tsimplis M N, Woodworth P L. Nodal variations and long-term changes in the main tides on the coasts of China [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2015, 120(2): 1215-1232.
- [61] Goodman A C, Thorne K M, Buffington K J, et al. El Niño increases high-tide flooding in tidal wetlands along the US Pacific coast [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2018, 123(10): 3162-3177.
- [62] Wahl T, Calafat F M, Luther M E. Rapid changes in the seasonal sea level cycle along the US gulf coast from the late 20th century [J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(2): 491-498.
- [63] Calafat F M, Wahl T, Tadesse M G, et al. Trends in Europe storm surge extremes match the rate of sea-level rise [J]. *Nature*, 2022, 603: 841-845.
- [64] Feng J L, Li D L, Wang T, et al. Acceleration of the extreme sea level rise along the Chinese coast [J]. *Earth and Space Science*, 2019, 6(10): 1942-1956.
- [65] Roustan J B, Pineau-Guillou L, Chapron B, et al. Shift of the storm surge season in Europe due to climate variability [J]. *Scientific Reports*, 2022, 12: 8210. doi: 10.1038/s41598-022-12356-5.
- [66] Reinert M, Pineau-Guillou L, Raillard N, et al. Seasonal shift in storm surges at brest revealed by extreme value analysis [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2021, 126(12). doi: 10.1029/2021JC017794.
- [67] Han W Q, Meehl G A, Stammer D, et al. Spatial patterns of sea level variability associated with natural internal climate modes [J]. *Surveys in Geophysics*, 2017, 38(1): 217-250.
- [68] 左军成, 左常圣, 李娟, 等. 近十年我国海平面变化研究进展 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(5): 442-449. [Zuo Juncheng, Zuo Changsheng, Li Juan, et al. Advances in research on sea level variations in China from 2006 to 2015. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2015, 43(5): 442-449.]
- [69] Calafat F M, Wahl T, Lindsten F, et al. Coherent modulation of the sea-level annual cycle in the United States by Atlantic Rossby waves [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 2571. doi: 10.1038/s41467-018-04898-y.
- [70] Piecuch C G, Ponte R M. Inverted barometer contributions to recent sea level changes along the northeast coast of North America [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(14): 5918-5925.
- [71] Ralston D K, Talke S, Geyer W R, et al. Bigger tides, less flooding: Effects of dredging on barotropic dynamics in a highly modified estuary [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, 124(1): 196-211.
- [72] Fant C, Jacobs J M, Chinowsky P, et al. Mere nuisance or growing threat? The physical and economic impact of high tide flooding on US road networks [J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2021, 27(4). doi: 10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000652.
- [73] Jacobs J M, Cattaneo L R, Sweet W, et al. Recent and future outlooks for nuisance flooding impacts on roadways on the U.S. east coast [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2018, 2672(2): 1-10.
- [74] Mulholland M R, Macías-Tapia A, Loftis J D. Water quality impacts from tidal flooding in Southern Chesapeake Bay [C]// *OCEANS 2022. Hampton Roads, USA: IEEE*, 2022. doi: 10.1109/OCEANS47191.2022.9977117.
- [75] Carpio Camargo A J, Ivarez Gutiérrez Y, Jaramillo Véliz J, et al. Nesting failure of sea turtles in Ecuador - causes of the loss of sea turtle nests: The role of the tide [J]. *Journal of Coastal Conservation*, 2020, 24(55). doi:

- 10.1007/s11852-020-00775-3.
- [76] Martins S, Patino J, Abella E, et al. Potential impacts of sea level rise and beach flooding on reproduction of sea turtles [J]. *Climate Change Ecology*, 2022, 3: 100053. doi: 10.1016/j.ecochg.2022.100053.
- [77] Dusek G, Sweet W V, Widlansky M J, et al. A novel statistical approach to predict seasonal high tide flooding [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9: 1073792. doi: 10.3389/fmars.2022.1073792.
- [78] Ghanbari M, Arabi M, Obeysekera J. Chronic and acute coastal flood risks to assets and communities in South-east Florida [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2020, 146(7): 04020049. doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.000124.
- [79] Habel S, Fletcher C H, Rotzoll K, et al. Development of a model to simulate groundwater inundation induced by sea-level rise and high tides in Honolulu, Hawaii [J]. *Water Research*, 2017, 114: 122-134.
- [80] Hanslow D J, Morris B D, Foulsham E, et al. A regional scale approach to assessing current and potential future exposure to tidal inundation in different types of estuaries [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 7065. doi: 10.1038/s41598-018-25410-y.
- [81] Thompson P R, Widlansky M J, Merrifield M A, et al. A statistical model for frequency of coastal flooding in Honolulu, Hawaii, during the 21st century [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, 124(4): 2787-2802.
- [82] Burgos A G, Hamlington B D, Thompson P R, et al. Future nuisance flooding in Norfolk, VA, from astronomical tides and annual to decadal internal climate variability [J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(22): 12432-12439.
- [83] Ray R D, Foster G. Future nuisance flooding at Boston caused by astronomical tides alone [J]. *Earth's Future*, 2016, 4(12): 578-587.
- [84] Ezer T. A demonstration of a simple methodology of flood prediction for a coastal city under threat of sea level rise: The case of Norfolk, VA, USA [J]. *Earth's Future*, 2022, 10(9): e2022EF002786. doi: 10.1029/2022EF002786.
- [85] Hague B S, McGregor S, Murphy B F, et al. Sea level rise driving increasingly predictable coastal inundation in Sydney, Australia [J]. *Earth's Future*, 2020, 8(9): e2020EF001607. doi: 10.1029/2020EF001607.
- [86] 暴景阳, 许军. 中国沿岸验潮站潮汐调和常数的精度评估 [J]. *海洋测绘*, 2013, 33(1): 1-4. [Bao Jingyang, Xu Jun. The accuracy evaluation of harmonic constants for long term tidal stations along the coast of China. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2013, 33(1): 1-4.]
- [87] Devlin A T, Jay D A, Talke S A, et al. Coupling of sea level and tidal range changes, with implications for future water levels [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 17021. doi: 10.1038/s41598-017-17056-z.
- [88] 吕咸青, 潘海东, 王雨哲. 潮汐调和分析方法的回顾与展望 [J]. *海洋科学*, 2021, 45(11): 132-143. [Lv Xianqing, Pan Haidong, Wang Yuzhe. Review and prospect of tidal harmonic analysis method. *Marine Sciences*, 2021, 45(11): 132-143.]
- [89] Pickering M D, Horsburgh K J, Blundell J R, et al. The impact of future sea-level rise on the global tides [J]. *Continental Shelf Research*, 2017, 142: 50-68.
- [90] Idier D, Bertin X, Thompson P, et al. Interactions between mean sea level, tide, surge, waves and flooding: Mechanisms and contributions to sea level variations at the coast [J]. *Surveys in Geophysics*, 2019, 40(6): 1603-1630.

High tide flooding: Drivers, risk assessment, and prediction

LI Sida¹, FANG Jiayi^{2,3}, ZHOU Wei⁴, JIANG Tingchen⁵, LIU Lintao^{1*}, FENG Xi^{6,7}

(1. State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, CAS, Wuhan 430077, China; 2. School of Information Science and Technology, Hangzhou Normal University, Hangzhou 311121, China; 3. Institute of Remote Sensing and Earth Sciences, Zhejiang Provincial Key Laboratory of Urban Wetlands and Regional Change, Hangzhou 311121, China; 4. State Key Laboratory of Tropical Oceanography, South China Sea Institute of Oceanology, CAS, Guangzhou 501310, China; 5. School of Marine Technology and Geomatics, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, Jiangsu, China; 6. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 211098, China; 7. Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence, Nanjing 211098, China)

Abstract: High tide flooding (HTF)—a kind of minor coastal flooding that usually occurs near the high tide level, becomes more frequent under climate change. It has a certain impact on the coastal socioeconomic system and natural environment, and is a hot issue in low-lying coastal cities. This article examined the definition of HTF, and systematically summarized the main progress of HTF research in terms of its drivers, impacts, risk assessment, and frequency forecasting. In the future, it is recommended to strengthen the research on the drivers, risk assessment, and forecast of HTF frequency. These include extensive monitoring of HTF, quantifying the role of interactions between factors leading to HTF, comprehensively assessing HTF risk, and accurately predicting HTF frequency. All these works will finally contribute to the disaster prevention and mitigation of HTF in coastal cities.

Keywords: high tide flooding; coastal flooding; sea level rise; risk assessment; prediction model