

段丽瑶,解以扬,陈靖,等. 基于城市内涝仿真模型的天津风暴潮灾害评估. 应用气象学报,2014,25(3):354-359.

基于城市内涝仿真模型的天津风暴潮灾害评估

段丽瑶^{1)*} 解以扬²⁾ 陈靖²⁾ 赵玉洁³⁾ 任雨⁴⁾

¹⁾(天津市气象台,天津 300074) ²⁾(天津市气象科学研究所,天津 300074)

³⁾(天津市滨海新区气象局,天津 300070) ⁴⁾(天津市气候中心,天津 300074)

摘 要

基于城市内涝仿真模型,根据天津沿海地区的地形、地貌特征以及排水系统等对城市内涝仿真模型进行改进,在沿海边界和河口设置时变水位,使得模型拓展到既能模拟暴雨产生的内涝,也能模拟由于风暴潮侵袭造成的淹没情景。该模型对天津沿海地区历史上典型风暴潮个例以及 10 年、20 年、50 年、100 年一遇重现期风暴潮产生的积水范围和积水深度进行了模拟,并对 2012 年 8 月 3 日台风达维(1210)造成的天津沿海风暴潮进行了业务试应用。将历史风暴潮个例模拟结果以及 2012 年 8 月 3 日的评估结果与实际灾情进行对比,结果显示模型具有较好的模拟能力,可应用于风暴潮灾害的评估和预估业务中,为相关部门和行业提供决策参考。

关键词: 天津沿海; 风暴潮; 淹没; 评估

引 言

风暴潮灾害是沿海地区普遍存在的一种自然灾害,受全球气候变暖和海平面上升的影响,沿海城市风暴潮灾害风险显著增加^[1]。近年来,我国因风暴潮灾害而造成的损失呈逐年上升的趋势,每年都在百亿元左右^[2-4]。天津是我国风暴潮灾害的多发区和严重区,海岸线约 153 km,一级河道的防波堤近 209 km,天津市滨海新区是我国沿海海拔最低的区域,极易受到风暴潮等灾害的侵害,风暴潮灾害对天津沿海及港口等影响重大。9216 号台风减弱北上引起的风暴潮,造成天津近 100 km 海堤漫水,40 处决口,天津沿海地区直接经济损失近 4 亿元^[5]。1997 年和 2003 年出现的风暴潮也给天津沿海地区造成巨大损失。近年来天津沿海风暴潮有增加趋势,发生频率由 20 世纪 90 年代的 3~5 年 1 次增加到现在的每年 1~2 次^[6]。随着天津市滨海新区经济的快速发展,同样强度的风暴潮如今造成的损失将较以前倍增,研究天津沿海地区风暴潮灾害的评估方法,对于防灾减灾意义重大。

风暴潮灾害风险评估方法在欧美国家已相当成熟,被运用到不同城市进行实证研究,为制定合理的防灾预案提供依据,已取得了较好效果^[7]。在我国,暴雨灾害的研究和风险评估方法已经很多^[8-12],但风暴潮灾害风险评估还是一个崭新的研究领域。目前国内风暴潮灾害风险评估研究主要集中在对风暴潮数值预报、潮高估算和重现期研究,危险性评估,承灾体暴露性和脆弱性评估,灾害风险区划、灾情损失评估等^[13-16]。肖启华等^[17]以反映风暴潮灾害自然特征和社会属性的 4 个评估指标,建立了基于模糊决策的风暴潮发生过程中城市灾害的快速评估模型,并以街道为最小评估单元,对福建省厦门市风暴潮进行模拟评估。张俊香等^[18]采用基于信息扩散技术的风险计算模型对广东省沿海几个验潮站的台风风暴潮最大增水值序列分别进行了风险计算,并将其结果与基于风暴潮数值预报模型的计算结果进行对比,发现两种方法的计算结果均与实际风险情况相吻合。

城市内涝模型分为水文产流模型和水动力学模型,前者是描述降水经过损失阶段而产生径流过程的数学模型,如常说的蓄满产流(超蓄产流)模型等;

2013-04-11 收到,2013-12-17 收到再改稿。

资助项目:中国气象局关键技术集成与应用(CAMGJ2012M05)

* email: tjlyduan@163.com

后者采用水动力学方程模拟城市地表与河道的水流运动。国外常用的模型有 SWMM 模型、STORM 模型、沃林福特模型,这些模型发展时间较长,都是在传统水文学理论上建立起来的。而国内内涝积水模型虽然发展时间较晚,但起点相对较高,大都是基于水动力学方程的模型^[19-21]。由天津市气象科学研究所和天津大学联合开发的城市内涝仿真模型以城市地表和明渠河道水流运动为主要模拟对象,模拟城市暴雨产生的积水范围和积水深度^[22-23],目前已在全国 30 多个省市进行推广并得到不断完善。

本文基于城市内涝仿真模型,对模型进行改进,在沿海边界和河口设置时变水位,使得模型扩展到能够评估风暴潮高潮位产生的积水范围和积水深度,为相关部门和行业提供决策参考。

1 城市内涝仿真模型的拓展及改进

城市内涝仿真模型应用有限体积法的思想,采用无结构不规则网格设计计算区域,以城市地表和明渠河道水流运动为主要模拟对象,基本控制方程以平面二维非恒定流的基本方程为骨架。同时,针对小于离散网格尺度的排水渠涌或河道,在二维模型中结合了一维明渠非恒定流方程的算法。目前模型的应用对象大多是内陆城市,而沿海城市应用内涝模型则需考虑其地貌特点。

天津市滨海新区位于渤海西岸,地处海河要冲。模型需要考虑的不同于内陆城市的特点主要有 3 个方面:地表水系发达,蓟运河等 6 条大型河道分别从北部、西部汇入新区,再流入渤海;在 153 km 的海岸线地区,因涨潮落潮而引起水陆边界变化;退海湿地,坑塘、湖泊和干渠密布,水域面积大,地势低平。

针对天津市滨海新区的上述特点,本文对模型描述方法进行改进,使之适用于滨海新区,同时还将在模型功能拓展到能应用于风暴潮评估中。

1.1 天津市滨海新区内涝仿真模型建立

本文仍采用无结构不规则网格设计天津市滨海新区内涝仿真模型。区域内较宽的河道,如蓟运河、潮白河、永定新河、海河以及独流减河概化为河道型网格;较小的河道及排水渠涌,如黑猪河、马厂减河、大沽和北塘排污河等,处理成特殊型通道。坑塘、湖泊、盐池按形状概化为湖泊型网格;公园、成片绿地、建筑群、街区均概化为不同形状的陆地型网格。此外,对社会资源相对集中、人口相对稠密地区,加密

网格,尽可能包含街道、居民区信息。而对城市边缘或不易发生积水的地区采用较稀疏网格。城市中连续型的阻水建筑物,如堤防、高于地面的干道、铁路等,概化成连续堤,按实际走向布置在通道上,形成连续堤通道。

天津市滨海新区内涝仿真模型共设计有网格 7973 个,通道 17191 条,节点 9217 个。图 1 为天津市滨海新区的网格划分图,共分为河道型网格、湖泊型网格、陆地型网格和特殊通道。

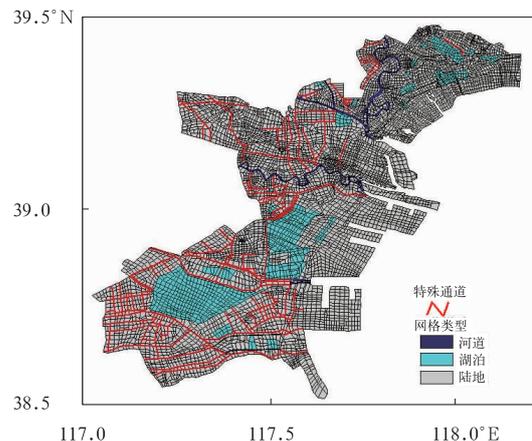


图 1 天津市滨海新区网格划分图

Fig. 1 Mesh grids of Binhai New District in Tianjin

1.2 沿海地区潮汐特征的数学描述

内陆城市的内涝仿真模型大多采用单一的边界条件,边界通常设置在小型河沟或大型江河处,此时边界水流方向单一,仅仅指向区域外。或者设置在高速公路、大型堤坝处,模型边界无水流交换。而对天津市滨海新区而言,海岸带地区潮起潮落,呈现了干湿变化,具有潮间带的性质,涉及动态边界的处理。本文在沿海边界设置了时变水位,水位即风暴潮的潮位,当潮位高于沿海的防潮堤时,潮水进入城市,造成积水。通常潮位逐小时给出,时变水位数学表达式为

$$Z_i^{T+2dt} = Z_i^T + 2dt(Z_i^{T+1} - Z_i^T)/3600. \quad (1)$$

式(1)中, Z_i^{T+2dt} 为时变水位, Z_i^T , Z_i^{T+1} 分别为第 T 小时和第 $(T+1)$ 小时的潮位, dt 为积分的时间步长(单位:s)。由式(1)可计算沿海边界水位随潮位的变化。

近年来,天津市滨海新区大规模填海造地,海岸线不断向东扩张。考虑到未来发展,按照规划图设置模型区域,在已建区域按照实况设置路面高程和

堤高,在沿海尚未填海的区域设置了较低的高程。当采用时变边界后,随着潮起潮落,这部分区域的干湿变化特征更为显著。

通过以上方法,将城市内涝仿真模型扩展到既能评估暴雨产生的内涝,又能评估风暴潮高潮位产生的积水范围和积水深度。

1.3 河口及潮位特征的描述

天津市滨海新区河流众多,蓟运河、潮白新河、永定新河、海河、独流减河和子牙新河分别从北部、西部汇入新区,为边界河口。这些河口的水位反映着进入滨海新区的客水的多寡。在盛夏季节,滨海新区上游出现暴雨,河口水位通常很高。当遇到风暴潮顶托时,天津市滨海新区内的河道高水位运行,造成排水问题。同时,滨海新区东侧临海,有 3 个出海口,其中海河设防潮闸长期关闭,而另两个河口都会受到涨落潮影响。

以往的城市内涝仿真模型的河口水位多采用常水位,主要是由于未能得到当地水位变化信息。近年来,天津市气象部门与水务部门加强合作,目前可以从当地水务部门获取实时水位信息。本文将蓟运河、潮白新河、永定新河、海河、独流减河和子牙新河 6 条河道的可变化的实时水位信息按式(1)的时变水位作为河口的边界条件代入模型,并在沿海河口按照潮位变化设置了时变水位,作为边界条件代入模型。

通过以上方法,城市内涝仿真模型扩展到既能评估行洪河道的影响,又能够评估风暴潮对河道的影响。

1.4 天津市滨海新区排水系统的概化

天津市滨海新区地下排水管网主要集中在塘沽区、汉沽区、大港区以及开发区、保税区等人口集中的区域,这部分区域属于城市区域,在滨海新区占较小的比例。考虑到排水管网主要分布在道路下面,因此模型以网格为单元,将网格单元分为含管网和不含管网两种。对含管网的网格单元,按道路长度概化管网长度,按当地道路等级概化管网的管径,并求取网格单元的平均管径,以减少模型的计算难度。排水管网内流量的计算参照文献[23]计算。

在排水系统中,泵站和闸门都起着重要的排水作用。在不同城市泵闸等排水设施的设置因地制宜,具有当地特色。天津市滨海新区共有泵站 111 座,其中分布在一级河道两侧的有 36 座,分布在二级河道两侧的有 31 座,临海的有 1 座,闸门有 150

个,其中分布在一级河道两侧的有 60 个,分布在二级河道两侧的有 12 个,临海的有 9 个。另外,用于路面排水的泵站有 20 个。

模型将泵站、闸门等排水设施概化在通道上,并按排水属性进行分类,如向一级河道排水的泵站设为属性 1,向一级河道排水的闸门设为属性 2,向二级河道排水的泵站设为属性 6,向二级河道排水的闸门设为属性 7,陆地泵属性为 11,可以分别调用不同的程序进行排水处理。由于天津市滨海新区的河道没有淹没出流式的排水管道,因此泵站和闸门的排水方向均为单向(只向临近河道排水),编程处理时只考虑开(1)或关(0)。当泵站或闸门开启时,其排水能力按单位时间内的流量进行概化。考虑到城市排水泵站通常都设有集水池,为了简化,连接泵站的网格单元的管道容水量均人为设置,使其与泵站排水量相适应。

2 风暴潮模拟

2.1 典型风暴潮个例模拟

选取 1951 年以来天津沿海地区最为严重的 1992 年 9 月 1 日以及最近 10 年最严重的 2003 年 10 月 11 日两次风暴潮个例进行模拟。两次风暴潮中 1992 年 9 月 1 日出现了超过 100 年一遇的 5.87 m 的最高潮位,当天没有出现降水。在此次风暴潮模拟中,将降水量设置为零,仅仅模拟高潮位产生的积水情况,潮位变化为 1992 年 9 月 1 日实况(图 2)。2003 年 10 月 11 日在出现风暴潮的同时伴有降水,模型同时考虑风暴潮增水和降水的共同影响,潮位变化为 2003 年 10 月 11 日实况(图 3)。本文所用时间均为北京时。

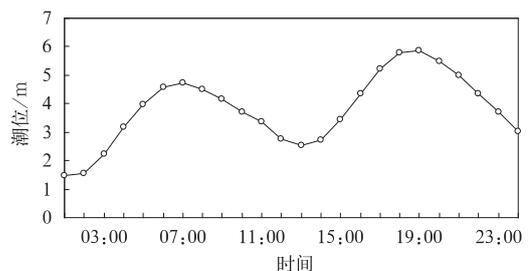


图 2 1992 年 9 月 1 日潮位实况

Fig. 2 Hourly tidal change on 1 September 1992

1992 年 9 月 1 日模型模拟结果显示(表 1),此次风暴潮积水范围达 282 km²,最大积水深度达

1.72 m,其中天津沿海出现大范围积水现象,模拟情况能基本反映出 1992 年大范围的积水情况,但由于没有当时的最大水深灾情记录,难以与实际情况进行详细对比。

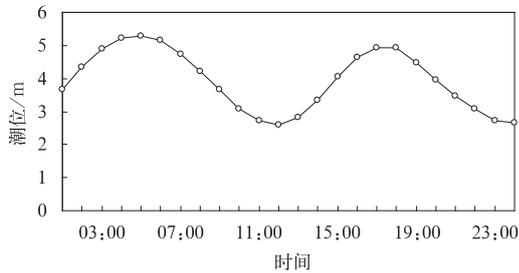


图 3 2003 年 10 月 11 日潮位实况

Fig. 3 Hourly tidal change on 11 October 2003

2003 年 10 月 11 日最高潮位达 5.29 m,塘沽气象站 24 h 降水量为 77.1 mm,由于当时没有自动气

象站,以塘沽气象站降水量计算塘沽面雨量,对应的汉沽、大港、津南、宁河等分别使用气象观测站的逐小时降水数据计算所在区域的面雨量。该日在高潮位和降水的共同作用下,天津沿海积水面积达 65 km²,最大积水深度为 1.1 m。历史灾情显示此次风暴潮塘沽、大港、汉沽三区决口 3 处,部分地区发生淹泡,造成直接经济损失 1.11 亿元。

为了进一步验证该模型的模拟效果,本文对 1951 年以来天津沿海地区出现的 5.1 m 以上的 11 次高潮位(警戒潮位 4.9 m)进行了模拟,分别计算了 11 次高潮位下所产生的积水深度和积水面积,并与历史灾情资料进行对比。模拟结果显示,模型较好地模拟出 1985 年 8 月 19 日 5.28 m、1997 年 8 月 20 日 5.46 m 高潮位等较严重的风暴潮灾害。但由于历史灾情资料记录不完整,部分风暴潮个例无历史灾情资料记录,难以与模拟结果进行对比。

表 1 1992 年和 2003 年两次风暴潮模拟结果

Table 1 Simulation outputs for two storm surges in 1992 and 2003

时间	最高潮位/m	积水面积/km ²	积水深度/m	不同深度等级积水面积/km ²			
				0.1~0.25 m	0.26~0.5 m	0.6~0.8 m	>0.8 m
1992-09-01	5.87	282.1	1.72	46.8	61.5	73.2	43.0
2003-10-11	5.29	65.0	1.13	7.6	15.1	5.5	4.1

2.2 不同重现期风暴潮模拟

采用工程理论上最为适用的耿贝尔分布的推算结果,得到天津沿海地区 10 年、20 年、50 年、100 年一遇的重现期潮位分别为 5.28 m,5.43 m,5.63 m,5.77 m。本文对重现期风暴潮淹没情景的模拟设计了 3 个试验方案。方案 1:只用潮位作为模型的边界条件;方案 2:用潮位和 2012 年 7 月 25—26 日的暴雨作为模型的边界条件;方案 3:用潮位和 2003 年 10 月 11—12 日的降水作为模型的边界条件。其中,2012 年 7 月 25—26 日的大暴雨为天津

沿海地区近 30 年来出现的最强降水,2003 年 10 月 11—12 日的降水为天津出现高潮位时伴随的最大降水。

不同重现期潮位变化曲线选取历史上出现过的与不同重现期潮位相同或者接近的风暴潮个例的潮位逐小时变化曲线作为重现期潮位变化曲线,并将相似年份的潮位订正到重现期相同的潮位。

仅考虑高潮位以及同时考虑了 2012 年 7 月 25—26 日的暴雨共同作用作为模型的边界条件计算出的天津市滨海新区积水情况详见表 2。

表 2 不同重现期风暴潮潮位下的积水模拟结果

Table 2 Simulation outputs for the submerged depth under different return-level storm surge

重现期/a	潮位/m	试验方案	积水面积/km ²	积水深度/m	不同深度等级积水面积/km ²			
					0.1~0.25 m	0.26~0.5 m	0.6~0.8 m	>0.8 m
10	5.28	潮位	51.0	1.12	5.5	12.4	4.7	4.1
		潮位及降水	1061.6	3.17	244.7	178.6	81.7	84.6
20	5.43	潮位	81.4	1.28	25.7	19.1	10.9	5.7
		潮位及降水	1071.8	3.16	259.6	175.2	89.7	85.2
50	5.63	潮位	168.5	1.47	26.9	48.3	33.9	20.6
		潮位及降水	1122.9	3.17	258.1	203.5	110.6	99.9
100	5.77	潮位	218.0	1.62	41.8	52.9	48.5	33.8
		潮位及降水	1156.4	3.18	265.7	211.1	127.4	117.1

3 业务应用

2012年8月3日,受台风达维(1210)的影响天津沿海地区出现了5.07 m的高潮位。8月2日天津市气象科学研究所自主开发的风暴潮数值预报模式预估最高潮位为5.6 m,预报员结合多种预报产品,预计3日潮位为5.2 m。模型以5.2 m的潮位进行预评估,潮位变化曲线使用数值预报模式的潮位变化结果,将高潮位降低为5.2 m,其他地方采用插值方法进行相应的降低。预评估结果为风暴潮将产生的积水范围为33.2 km²,最大积水深度为1.04 m。

2012年8月3日16:20天津市滨海新区最高潮位达5.07 m,超过4.9 m的警戒水位。客运码头、北塘码头等海水漫上岸。海河闸水位达5.6 m,出现海水倒灌。城市内涝仿真模型以最高潮位5.07 m以及24 h潮位逐小时实况变化对此次高潮位过程进行评估,评估结果积水范围为25.4 km²,最大积水深度为0.89 m,与实地采集得到的积水范围基本相符,但积水深度偏大。

4 结论和讨论

1) 本文对城市内涝仿真模型进行改进,通过在沿海边界和河口设置时变水位,加入时变水位的计算方法使改进后的模型具有了模拟和评估风暴潮积水范围和积水深度的能力。

2) 通过模拟天津沿海地区1951年以来11次5.1 m以上高潮位产生的积水范围和积水深度,并与收集到的灾情记录 and 实际走访进行对比分析,显示模型能一定程度地描述风暴潮侵袭产生的淹没情景。由于模型使用的是最新得到的地面高程数据,模拟结果可能与历史风暴潮灾害实况存在差异。

3) 模型在2012年8月3日台风达维(1210)引起的天津沿海风暴潮中进行了试应用,模拟结果与实际情况对比发现,模型积水范围和积水地点拟合效果较好,但模拟的积水深度偏大,今后还需要对模型参数进行更加细致的率订。

通过对不同重现期下高潮位的情景模拟,可以在今后的业务和服务中,当预报或出现多年一遇的风暴潮时,使用模型结果直接进行预估和评估;还可以提前计算不同潮位下的淹没情景,当预报或出现某个高度的潮位时,将提前计算的结果直接提供给

政府和服务用户,提高服务时效性。

参考文献

- [1] 李阔,李国胜. 风暴潮风险研究进展. 自然灾害学报, 2011, 20(6): 104-111.
- [2] 陆人骥. 中国历代灾害性海潮史料. 北京: 海洋出版社, 1984: 15-19.
- [3] 杨华庭, 田素珍, 叶琳, 等. 中国海洋灾害四十年资料汇编. 北京: 海洋出版社, 1994: 107.
- [4] 张俊香, 李平日, 黄光庆. 新奥尔良飓风灾难与华南沿海台风暴雨. 热带地理, 2006, 26(3): 218-222.
- [5] 天津市地方志编修委员会办公室, 天津市气象局. 天津通志气象志. 天津: 天津社会科学院出版社, 2005: 67-68.
- [6] 赵玉洁. 天津滨海新区风暴潮预报系统研究. 兰州: 兰州大学, 2005: 25-28.
- [7] 赵庆良, 许世远, 王军, 等. 沿海城市风暴潮灾害风险评估研究进展. 地理科学进展, 2007, 26(5): 32-40.
- [8] 扈海波, 轩春怡, 诸立尚. 北京地区城市暴雨积涝灾害风险评估. 应用气象学报, 2013, 23(1): 99-108.
- [9] 郑国, 薛建军, 范广洲, 等. 淮河上游暴雨事件评估模型. 应用气象学报, 2011, 22(6): 753-759.
- [10] 任雨, 李明财, 郭军, 等. 天津地区设计暴雨强度的推算与适用. 应用气象学报, 2013, 23(3): 364-368.
- [11] 谢炯光, 纪忠萍, 谷德军, 等. 广东省6月长连续暴雨过程的气候特征及成因. 应用气象学报, 2012, 23(2): 174-183.
- [12] 易笑园, 李泽椿, 孙晓磊, 等. 渤海西岸暴雨中尺度对流系统的结构及成因. 应用气象学报, 2011, 22(1): 23-34.
- [13] 乐肯堂. 我国风暴潮灾害风险评估方法的基本问题. 海洋预报, 1998, 15(30): 39-44.
- [14] 王国栋, 康建成, 闫国东. 沿海城市风暴潮灾害风险评估研究述评. 灾害学, 2010, 25(3): 114-118.
- [15] 李阔, 李国胜. 珠江三角洲地区风暴潮重现期及增水与环境要素的关系. 地理科学进展, 2010, 29(4): 433-438.
- [16] 闫丽凤, 江文胜, 周淑玲, 等. 0703温带气旋特大风暴潮数值模拟对比分析. 应用气象学报, 2008, 19(5): 595-601.
- [17] 肖启华, 张建新, 黄冬梅. 城市风暴潮灾害快速评估的模糊决策方法. 灾害学, 2011, 26(2): 77-80.
- [18] 张俊香, 黄崇福, 刘旭拢. 广东沿海台风暴雨灾害的地理分布特征和风险评估(1949—2005). 应用基础与工程科学学报, 2008, 16(3): 393-402.
- [19] 李江明. 基于SWMM模型的城市暴雨内涝研究——以东莞市典型小区为例. 广州: 中山大学, 2009: 2-3.
- [20] 耿艳芬. 城市雨洪的水动力学耦合模型研究. 大连: 大连理工大学, 2006: 40-50.
- [21] 岑国平, 沈晋, 范荣生. 城市暴雨径流计算模型的建立和检验. 西安理工大学学报, 1996, 12(3): 184-190.
- [22] 解以扬, 李大鸣, 李培彦, 等. 城市暴雨内涝数学模型的研究与应用. 水科学进展, 2005, 16(3): 384-390.
- [23] 解以扬, 韩素芹, 由立宏, 等. 天津市暴雨内涝灾害风险分析. 气象科学, 2004, 24(3): 342-349.

Tianjin Coastal Storm Surge Disaster Assessment Based on Urban Waterlogging Simulation Model

Duan Liyao¹⁾ Xie Yiyang²⁾ Chen Jing²⁾ Zhao Yujie³⁾ Ren Yu⁴⁾

¹⁾ (*Tianjin Municipal Meteorological Observatory, Tianjin 300074*)

²⁾ (*Tianjin Institute of Meteorological Science, Tianjin 300074*)

³⁾ (*Binhai New Area Meteorological Office of Tianjin, Tianjin 300070*)

⁴⁾ (*Tianjin Municipal Climate Center, Tianjin 300074*)

Abstract

Most waterlogging models for inland city use a single boundary condition, the boundary is usually set in a small or large river, with a single flow direction towards outside the region, or set on a highway or a large dam without water exchange alternatively. However, for coastal areas, the ebb and flow lead to changes in wet and dry. Adapting to the intertidal nature, the model should involve dealing with dynamic boundary.

Based on urban waterlogging simulation model, the topography and geomorphology of Tianjin coastal areas, as well as the pipe network and drainage systems, are used to expand and improve Tianjin urban waterlogging simulation model. Dynamic water level is set at the coastal border, and the water level stands for the tidal level. When the tide level is higher than the coastal embankment, the tide floods into the city and causes waterlogging. Therefore, the model simulates not only rainfall waterlogging but also the submerging scenario due to storm surge invasion. The flooding scope and standing water depth are simulated using the redeveloped model for the historically typical storm tidal cases in the coastal areas of Tianjin. Referred with the collected records of disaster and actual survey, the developed model takes on skills to some extent in simulation of the submerged scenario due to storm surge invasion. Differences between the simulation and the historical records, however, are non-intentionally increased by using the latest ground elevation data. This approach is used in operational application for simulating the storm surge caused by Typhoon Damrey on 3 August 2012. The simulated flooding scope and site are closed to the actual scene, but the simulated standing water depth is larger. Much more detailed calibration should be done in future. Furthermore, the submerging scenarios caused by storm surge in several return periods are simulated. These simulations can be directly used in projecting and assessing the submerging scenario if there is a storm surge predicted to be an N -year return-level or if it has occurred. These simulations can also be directly reported to the government and business clients for early warning.

Key words: Tianjin coastal areas; storm surge; flooding; assessment