

贺芳芳, 胡恒智, 董广涛, 等. 上海中心城区复合洪涝淹没模拟及未来重现预估[J]. 灾害学, 2020, 35(4): 93–98, 134.  
[HE Fangfang, HU Hengzhi, DONG Guangtao, et al. Compound Flooding Simulation and Prediction of Future Recurrence in Shanghai  
Downtown Area[J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(4): 93–98, 134. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.04.018]

# 上海中心城区复合洪涝淹没模拟及未来重现预估<sup>\*</sup>

贺芳芳<sup>1</sup>, 胡恒智<sup>2</sup>, 董广涛<sup>1</sup>, 许瀚卿<sup>3</sup>

(1. 上海市气候中心, 上海 200030; 2. 上海师范大学, 上海 200234; 3. 华东师范大学, 上海 200062)

**摘要:** 台风影响期间造成的极端大风、降水和台风风暴潮极易引发洪涝灾害, 叠加天文大潮、上游来水和未来海平面上升等因素将会对沿海特大城市的公共安全造成严重威胁。采用水动力模型 ICM InfoWorks 模拟了“海葵”台风影响期间“台风、暴雨、天文大潮”三碰头和“菲特”台风影响期间“台风、暴雨、上游来水及天文大潮”四碰头造成的上海市中心城区复合洪涝灾害淹没情况。结果表明历史“海葵”、“菲特”台风影响期间, 上海中心城区受淹地区主要出现在黄浦江、苏州河附近地势低洼的上海老城区。接着基于 PGW 方法驱动 WRF 模式输出 2050 年“海葵”和“菲特”台风重现期间的降水数据, 同法模拟上海地区复合洪涝灾害情况, 结果显示未来气候变暖背景下, 2050 年“海葵”和“菲特”台风重现时降水均呈增加趋势, 中心城区受淹面积和淹没深度均明显强于历史同期。

**关键词:** 洪涝灾害; 水动力模型 ICM InfoWorks; PGW 方法; 复合洪涝灾害模拟; 上海

**中图分类号:** X43; X915.5; P642; P208 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2020)04-0093-07

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.04.018

上海市位于江海交汇的长三角东缘, 受潮汐和季风气候影响, 上海地区历史上多次发生“台风、暴雨、高潮位、上游洪水”多种致灾因子同时出现的“三碰头”乃至“四碰头”的复合洪涝灾害事件。2013 年“菲特”台风影响期间更是发生了自 1949 年以来首次“风、暴、潮、洪”四碰头洪涝灾害, 在“菲特”台风和冷空气共同影响下, 上海和周边地区普降暴雨和特大暴雨, 上游洪水下泄量大, 正逢天文高潮位, 造成上海地区城区积水严重。

全球气候变化背景下极端降水事件的增加致使洪涝灾害频发<sup>[1-2]</sup>, 翟盘茂等<sup>[3]</sup>在 2004 年就指出在过去 50 多年气候明显变暖的背景下我国长江流域的强降水过程明显趋于增多, 发生洪涝灾害的频率也趋于增加; 同时不断加剧的城市化效应使得城市洪涝的危险性变得更高<sup>[4-5]</sup>, 快速城市化背景下城市洪涝灾害出现了水文特征变异性、洪涝灾害连锁性与洪灾损失突变性的新特点<sup>[6]</sup>; 上海地区洪涝灾害的危险性也在提升, HU 等<sup>[7]</sup>通过稳健决策思路构建了未来极端降雨引起的洪涝情景, 发现上海市中心城区的现有排水能力不足以应对未来极端暴雨事件产生的淹没影响; 温家洪等<sup>[8]</sup>评估一次过程雨量为 306.5 mm 的台风能造成

上海市杨浦区富禄里居委地区积水最深处达 0.61 m。

上海地区极端洪涝模拟研究聚焦未来极端洪涝情景模拟评估, 以海平面上升、暴雨重现期及水位过程的重现期进行组合情景假设, WANG 等<sup>[9]</sup>利用 Mike 模型考虑了海平面上升、历史风影响及地面沉降等因素, 模拟了上海未来极端洪涝情景; LI 等<sup>[10]</sup>基于情景的风暴潮洪水模拟和风险制图方法, 模拟浙江省玉环县洪水淹没范围并进行水深制图; 王璐阳等<sup>[11]</sup>构建了大气-海洋-陆地相耦合的一体化数值模拟系统, 实现了上海市“风”“暴”“潮”“洪”多灾种复合情景的极端洪涝淹没模拟, 认为沿海沿江堤防设施建设和上海市防台防汛中起着关键性的作用。基于极端灾害情景的洪涝风险评估研究有助于理解极端洪涝灾害的影响和损失, 但目前有关复合洪涝灾害淹没实例模拟及未来重现的研究鲜有涉及。

在未来气候变化和海平面上升背景下<sup>[12]</sup>, 城市防汛除涝安全形势更加严峻。为了有效评估未来极端洪涝灾害对上海市的影响, 本文选取 2012 年 8 月“海葵”台风影响期间“台风、暴雨、天文大

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2020-05-06 修回日期: 2020-06-30

基金项目: 国家重点研发计划“重大自然灾害监测预警与防范”重点专项项目(2018YFC1506006); 上海市发改委节能减排项目(SHXM-00-20180628-5471); 上海市气象局重大科研项目(ZD201905)

第一作者简介: 贺芳芳(1963-), 女, 汉族, 江苏无锡人, 正研级高级工程师, 主要从事气候监测与灾害评估研究。

E-mail: hff@sowether.com

通讯作者: 胡恒智(1988-), 男, 汉族, 安徽蚌埠人, 博士研究生, 主要从事洪涝灾害模拟与气候变化适应对策评估研究。

E-mail: hhz885522@126.com

潮”三碰头和2013年10月“菲特”台风影响期间“台风、暴雨、上游来水及天文大潮”四碰头事件作为个例,采用水动力模型 ICM InfoWorks 模拟上海复合洪涝灾害事件造成上海中心城区洪涝灾害淹没程度,在此基础上基于气候变化平均增量的扰动试验方法(Pseudo Global Warming 方法,简称 PGW 方法),在未来气候背景下再现“海葵”和“菲特”台风事件的降水分布,结合 ICM InfoWorks 模型模拟技术,进一步预估未来气候变化情景下复合洪涝灾害淹没情况并与历史同期进行对比,其可为上海市防御洪涝灾害提供新的解决思路和参考案例。

## 1 数据

### 1.1 建模所需数据收集

本文搜集了模拟建模所需的基础数据,包括三类:①上海市 10 m 分辨率 DEM 高程数据、上海市行政区划及土地利用等基础城市地理信息数据;②来源于上海市水务部门的黄浦江沿岸防汛墙位置和防汛墙顶高度数据、黄浦江断面数据、苏州河断面数据、水文站水位资料及上海市外环内排水能力等水文资料;③来源于上海市气象局的历史降水观测资料。

### 1.2 雨量数据的预处理

为了验证雨量数据的模拟精度,研究选取两套雨量数据进行时空对比。一是自动站雨量资料(已质量控制)订正过的逐时网格雷达雨量资料(网格间距为 1 km × 1 km 的观测数据);另外一种是基于 PGW 方法驱动 WRF 模式的“海葵”“菲特”台风未来情景重现的逐时格点降水数据,水平分辨率为 9 km。为了将数据转换为 ICM InfoWorks 能识别的 TSDB 文件,需要在 ArcGIS 中完成数据预处理。本文利用 ArcGIS 的 Model Builder 编译数据自动化处理流程,实现从 EXCEL 数据转化到 ICM InfoWorks 模型可读取的 ASCII 文件的批处理。

### 1.3 雨量和水文数据导入

“海葵”“菲特”台风期间的实测上游流量、下游水位边界条件,以及两组雷达雨量数据,采用 TSDB(空间面雨量时间序列数据库)模块导入时间空间序列数据。其中,流量、水位数据导入 Scalar TSDB 模块,雨量数据导入 Spatial TSDB 模块。表 1 以“菲特”台风为例,展示数据的导入信息。

表 1 “菲特”台风导入的数据信息

数据类型	导入模块	起始时间	终止时间	时间步长/h
流量	Scalar TSDB	2013/10/7 08:00	2013/10/9 08:00	1
水位	Scalar TSDB	2013/10/7 08:00	2013/10/9 08:00	1
降雨	Spatial TSDB	2013/10/7 08:00	2013/10/8 18:00	3

## 2 研究方法及区域

### 2.1 ICM InfoWorks 水动力模型

ICM InfoWorks 水动力模型来自英国华霖富水利研究院(HR Wallingford Institute),是国际领先专业城市水文模型,其将自然环境和人工构筑环境下的水力水文特征完整地融合到了一个综合模型中,首次实现了城市排水管网系统模型与河道模型的整合,它通过模拟流域的地上及地下组成部

分精确再现了排水系统中的所有水力路径,为模拟复合洪涝灾害淹没情况提供了有效技术支撑。ICM InfoWorks 模型在上海市有成熟应用案例,HU<sup>[13]</sup>对比了 SCS - CN 模型和 ICM InfoWorks 模型模拟的上海外环内中心城区强对流暴雨内涝事件的平均淹没深度与淹没面积,发现两者接近,说明 ICM InfoWorks 模型在城市内涝模拟精度上与具有普适性的 SCS - CN 模型有较好的一致性,该模型的模拟结果可信度较高。

### 2.2 PGW 方法

PGW 方法是利用区域模式的初始场和边界场叠加气候变暖信息来研究气候变暖背景下极端天气事件强度和结构变化的方法<sup>[14]</sup>。由于 PGW 方法历史时期的模拟试验是使用观测再分析资料驱动区域气候模式,模拟结果比较靠近观测;也可实现历史极端个例在未来变暖环境下的重现模拟,近年来在历史上发生的极端事件个例(如分别登陆美国三个飓风<sup>[15]</sup>和澳大利亚三个热带气旋<sup>[16]</sup>)未来重现得到广泛应用。PGW 方法进行“海葵”“菲特”台风未来重现降水模拟的步骤为:首先利用 CFSR(Climat Forecast System Reanalysis Data)再分析资料驱动区域模式 WRF 模拟历史时期的台风个例降水分布;然后将气候变暖的扰动信息与 CFSR 再分析资料进行累加构建新的驱动场,驱动 WRF 模式进行积分模拟其未来重现时降水情况;最后对比两组试验台风降水的异同。其中,气候变暖的信息来自于 IPCC 发布的全球模式之一(CCSM4)预估的 2050 年代(2046 - 2055 年 10 年平均)和该全球模式模拟的当代气候(1996 - 2005 年 10 年平均)的差值。

### 2.3 技术路线

首先进行上海地区基础数据的收集、整理、组织和入库,基于 ICM InfoWorks 洪涝模型,通过河道断面和防汛墙顶高程建模对城市河道(即黄浦江和苏州河)进行建模,结合地表截留、漫流、下渗等水文水动力过程,搭建上海地区复合洪涝灾害模型。

本文采用 ICM InfoWorks 水动力模型,通过耦合防汛墙模型、河道模型、漫流模型和下渗模型,根据导入数据进行“海葵”、“菲特”台风复合洪涝灾害淹没和未来重现模拟,技术流程详见图 1。

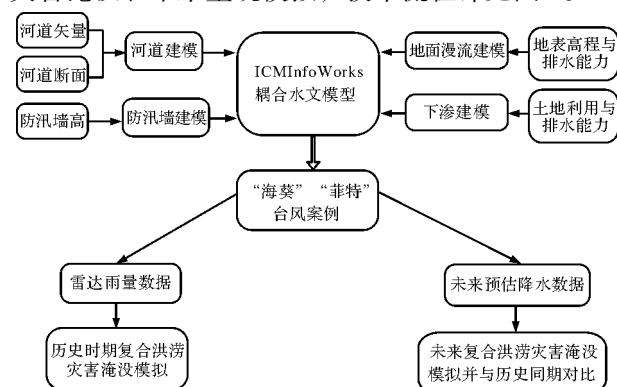


图 1 复合洪涝灾害模拟技术流程图

由于上游米市渡河段的水位过程缺乏足够的时间序列资料,重现期拟合和上下游水位相关性分析缺乏实施条件,故本次未来 2050 年“海葵”“菲特”台风重现时的水文边界条件均采用历史模拟的条件,包括上游米市渡和下游吴淞口水位过程。

### 2.3.1 城市河道建模

黄浦江全长 80 km, 苏州河全长 32 km。黄浦江共计 165 个断面, 平均断面间隔为 500 m; 苏州河共计 109 个断面, 平均断面间隔为 320 m。根据河道中心线及河道断面数据进行矢量化录入, 从而完成河道建模。

### 2.3.2 黄浦江防汛墙建模

黄浦江沿岸防汛墙现设防标准为千年一遇。首先将防汛墙进行矢量化, 并导入到 ICM InfoWorks 模型中, 根据防汛墙顶绝对高程沿途设置了防汛墙的堤顶高程, 在入海口防汛墙顶高达 7 m, 在上游防汛墙顶高仅 5.2 m, 本次建模黄浦江东、西岸防汛墙共 68 km。

### 2.3.3 城市地表下渗建模

本文采用美国水土保持局提出的径流曲线模型 (Soil Conservation Service Curve Number Model, 简称 SCS-CN 模型) 进行地表下渗建模, 该模型考虑下垫面湿度对径流系数的影响, SCS-CN 模型中降雨-径流关系可表述为:

$$Q = \begin{cases} \frac{(P - I_a)^2}{(P + S - I_a)}, & P \geq I_a; \\ 0, & P < I_a. \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $Q$  为径流总量、 $P$  为降雨总量、 $S$  为最大可能渗流量 (mm),  $I_a$  为由径流产生前植物截流、初渗和填洼蓄水等构成的初损量 (见公式 3),  $S$  可以通过径流曲线系数  $CN$  确定:

$$S = 25400 / CN - 254; \quad (2)$$

$$I_a = 0.05S. \quad (3)$$

式中:  $CN$  值是 SCS 模型中重要的无量纲参数, 不同的下垫面类型对应不同的  $CN$  值, 在一定程度上体现下垫面条件对降雨-径流关系的影响,  $CN$  值高意味着渗透量小, 产流量大;  $CN$  值低意味着渗透量大, 产流量小。当降雨量大于最大下渗量时产生地表径流, 因此需求最大下渗量  $S$ , 将其转化为固定径流系数应用于地面漫流模型。结合研究区用地类型和相关研究结论, 得到研究区内不同土地类型对应的  $CN$  值<sup>[13]</sup>, 依据公式 (2) 求得不同土地覆盖类型的最大下渗量  $S$ , 由公式 (1) 求得降雨事件的径流总量  $Q$ , 得出单位径流量对应的固定径流系数 (表 2)。

表 2 径流系数推算表

径流曲线数	最大下渗量 $S$ /mm	降雨总量 $P$ /mm	径流量 $Q$ /mm	固定径流系数
80	63.5	100	61.2	0.61
86	41.3	100	70.7	0.71
98	5.2	100	95.1	0.95

模型中径流表面统一采用 ConstInf 作为径流类型, 表面水量大于最大下渗量时的有效下渗计算可表述为:

$$I_e = ILC + (1 - FRC) \times I. \quad (4)$$

式中:  $I_e$  为有效下渗 (mm/h),  $ILC$  为入渗损失系数 (mm/h),  $FRC$  (fixed runoff coefficient) 为固定径流系数,  $I$  为降雨强度 (mm/h)。

SCS-CN 模型中不同的下垫面类型对应不同的  $CN$  值, 将  $CN$  值对应的最大下渗量  $S$  转化为模型使用的固定径流系数后应用于地面漫流模型, 则  $CN$  区内的降雨最终会按照预设好的径流系数进行折减。考虑到管网对地面积水的排出能力, 采

用一个地面的积水匀速下渗来类似表达管网的排水过程, 下渗的能力与管网的 2 h 排水能力挂钩。

### 2.3.4 城市漫流模型建模

漫流模型的搭建是基于二维河道模型和地形的耦合。在 ICM InfoWorks 中, 二维河道模型通过河岸连接与地面模型范围内的 2D 区间产生关联, 形成河道溢流。空间分布式降雨根据其时空分布特征应用于 2D 区间, 形成地表漫流。本文还模拟了基于入渗区间的下渗过程, 用于表示地表下渗、径流产生, 最终实现河道溢流及地面雨水漫流耦合模拟。

## 2.4 研究区概况

本研究模型建模范围覆盖上海市黄浦江和苏州河流域。由于外环内中心城区人口密集、资产高度聚集且地势低洼, 易遭受洪涝灾害影响, 故选取淹没影响较大的上海外环内约 667 km<sup>2</sup> 的中心城区为分析区域。此外, 由于近年来中心城区地面下沉、河网减少及不透水面增加, 导致蒸散、下渗的减少和直接径流的增加, 加剧了淹没深度和受淹范围, 一旦发生“台风、暴雨、高潮位、上游来水”等多碰头复合洪涝事件, 中心城区受影响严重。因此, 提取外环内模拟淹没深度为 15 cm 以上的影响较大区域进行分析 (图 2)。



图 2 研究区示意图

## 3 模拟结果

### 3.1 “海葵”“菲特”台风洪涝淹没模拟结果

“海葵”台风模拟结果显示: 受台风、暴雨和高潮位的共同影响, 2012 年 8 月 8 日上午上海市区出现大面积积水, 之后淹没面积不断扩大, 淹没程度的最大时刻中心城区最大淹没深度在 1.3 m 左右, 平均淹没深度为 0.29 m, 75 分位淹没深度为 0.38 m。受淹区域主要出现在黄浦江、苏州河附近的上海老城区低洼地带 (图 3a)。

从“菲特”台风模拟结果来看, 由于黄浦江上游来水的影响, 台风期间上游河段维持较高水位, 同时受下游高潮位顶托, 河水无法外排, 再加上本地出现大暴雨, 研究区域水淹最深处可达 1.1 m 左右, 最大时刻的平均淹没深度为 0.29 m, 75 分位淹没深度为 0.35 m。同样, 受淹区域主要出现在黄浦江、苏州河附近的上海老城区低洼地带 (图 3b)。

### 3.2 “海葵”“菲特”台风未来重现洪涝淹没模拟结果

3.2.1 “海葵”“菲特”台风未来重现降水模拟结果  
模拟结果表明: “海葵”“菲特”台风引起的降水分布与实际观测降水分布比较一致 (图 4a、5a 分

别与图 4b、5b 比较), 模拟的“海葵”“菲特”台风降雨分布与观测降水分布的空间相关系数分别为 0.8 和 0.72, 都通过了 99% 的置信度检验; “海葵”“菲特”台风主要降水时段(16h 累计)模式模拟上海中心城区区域平均值较实际观测区域平均值分别偏少 11% 和 16%

当“海葵”“菲特”2050 年重现时, 引起的降水均呈增加趋势(见图 4c、4d、5c、5d), 主要降水时段(16 h 累计)“海葵”“菲特”台风在上海中心地区的降水增幅分别达 67% 和 86%, 降水增幅量大于模式的模拟误差。这两个台风重现时降水增加预示着将带来更为严重的洪涝灾害。

基于以上降水数据, 采用 2.3 节模拟技术路线

模拟 2050 年代“海葵”“菲特”台风重现时造成的复合洪涝灾害情况。

### 3.2.2 “海葵”“菲特”台风未来重现洪涝淹没模拟结果

2050 年“海葵”“菲特”台风模拟结果显示(图 6), 台风重现时上海市区整体受淹情况严重, 最大淹没时刻受淹范围分别达  $367 \text{ km}^2$  和  $262 \text{ km}^2$ , 平均淹没深度为 0.43 m 和 0.38 m。与历史灾情对比发现(图 3 与图 6): 上海市的地面积水深度显著增加且空间淹没分布差异显著, 2050 年受灾区域除了黄浦公园附近的核区域, 也包含徐汇、静安、长宁、虹口等中心城区。受地形、排水能力的影响, 其淹没深度也比较严重。

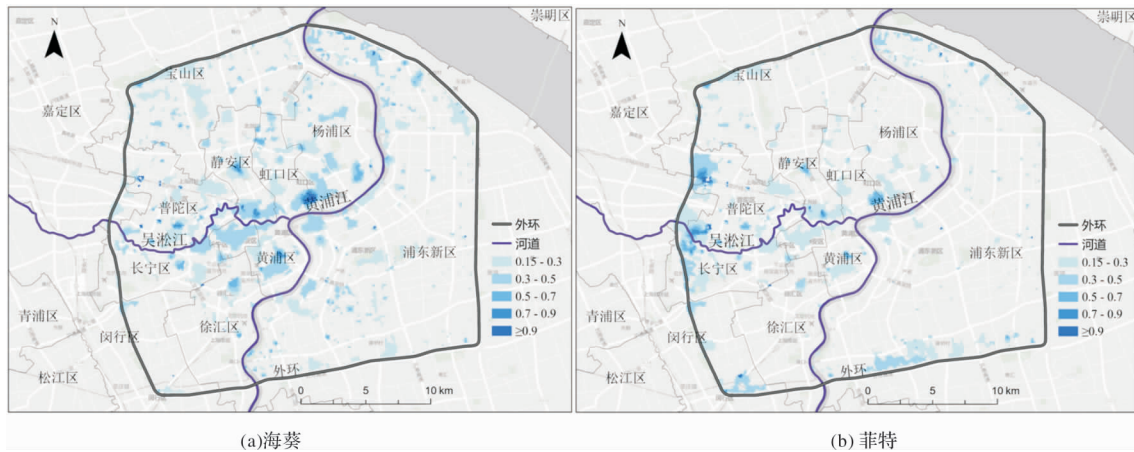


图 3 “海葵”“菲特”台风影响期间中心城区最大淹没时刻淹没模拟结果  
(注: 图中蓝色为淹没积水处(m))

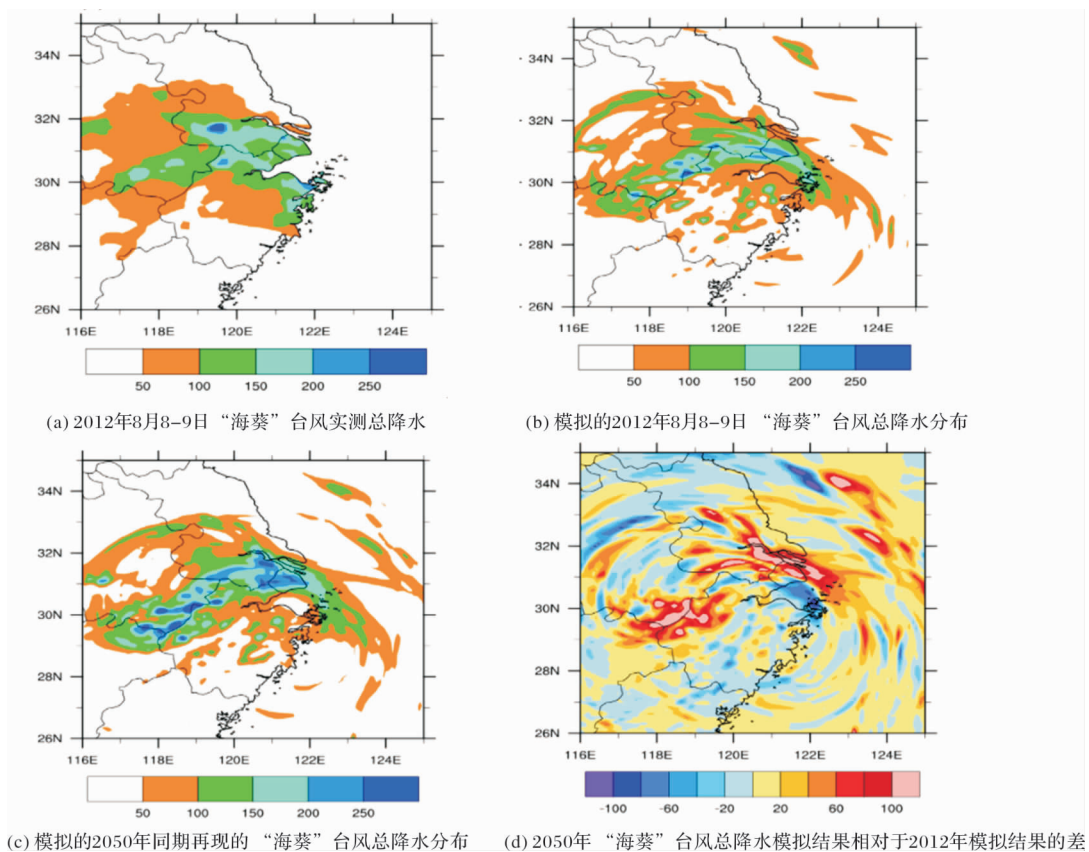


图 4 观测、当代气候背景及未来变暖背景下“海葵”台风总降水分布



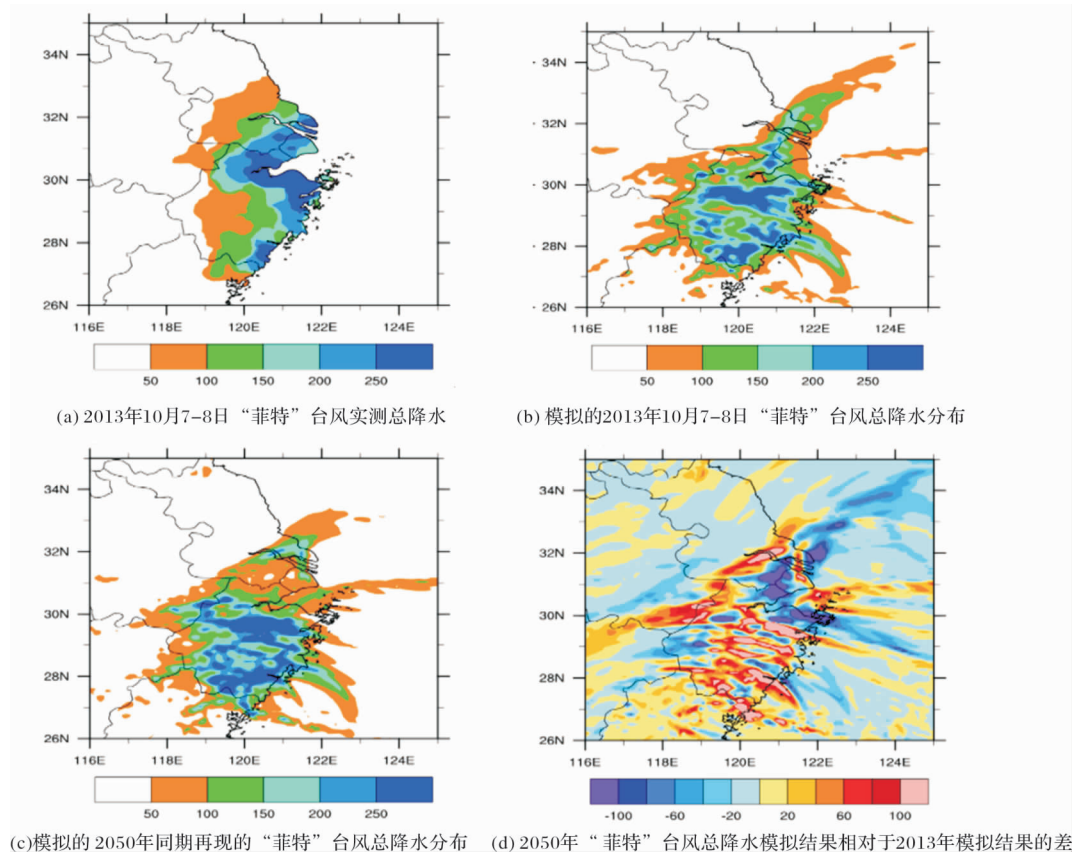
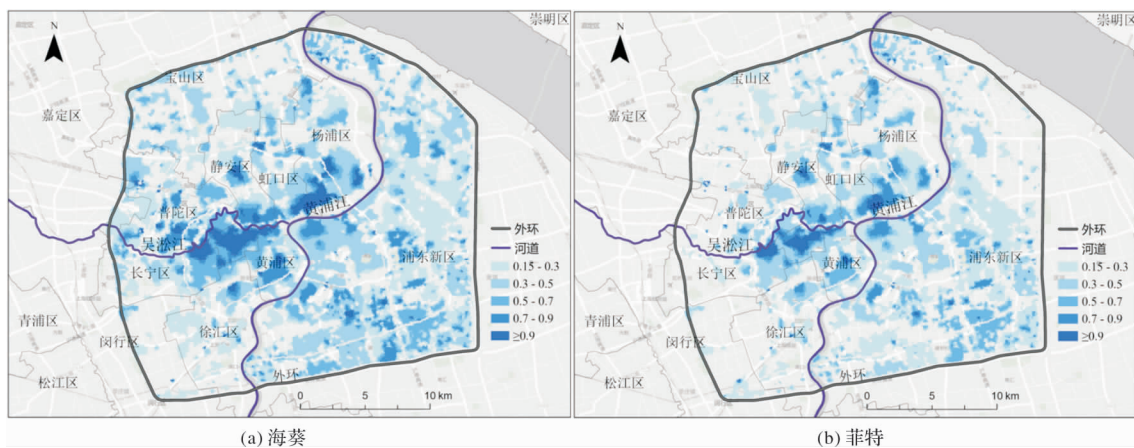


图5 观测、当代气候背景及未来变暖背景下“菲特”台风总降水分布

图6 2050年“海葵”“菲特”台风中心城区最大淹没时刻淹没模拟结果  
(注: 图中蓝色为淹没积水处(m))

### 3.3 “海葵”、“菲特”台风重现时模拟结果与历史时期对比分析

为了更好的对比灾害模拟影响, 结合 ArcGIS 地统计分析, 本文进行 2012 年“海葵”台风、2013 年“菲特”台风和 2050 年“海葵”和“菲特”台风淹没对比分析。选取最大淹没时刻的平均淹没深度、75 分位淹没深度和淹没面积表征研究区内的淹没深度和影响范围; 选取黄浦公园最大淹没深度(以黄浦江、苏州河交汇处的黄浦公园为中心, 覆盖约 5 km<sup>2</sup> 区域, 涵盖南京西路和陆家嘴等重要区域)反映本市重点区域受淹状况。

表3 各台风过程淹没影响统计对比表

台风过程	研究区平均淹没深度/m	研究区淹没面积/km <sup>2</sup>	75 分位淹没深度/m	黄浦公园最大淹没深度/m
2012 海葵	0.29	106	0.38	0.48
2013 菲特	0.29	72	0.35	0.3
2050 海葵	0.43	367	0.5	1.1
2050 菲特	0.38	262	0.45	0.85

由表 3 可知空间范围上, 2050 年“海葵”“菲特”台风淹没面积分别是 2012 年“海葵”台风和 2013 年“菲特”台风淹没面积 3.5 倍和 3.6 倍, 呈

大幅增加。淹没深度上(见平均淹没深度和 75 分位淹没深度), 2050“海葵”“菲特”台风淹没深度较 2012“海葵”台风和 2013 年“菲特”台风均呈不同程度增加, 尤其 2050 年“海葵”和“菲特”台风重现时, 市区黄浦公园附近最大淹没深度增加值都在 1 倍以上; 由此可见: 2050 年“海葵”“菲特”台风重现时, 无论是淹没面积还是最大淹没深度均明显强于 2012 年“海葵”台风和 2013 年“菲特”台风, 受灾程度总体较历史台风更为严重。

## 4 结论与讨论

(1) 基于水动力模型 ICM InfoWorks 模拟的“海葵”“菲特”台风影响期间, 受地形因素和排水能力影响, 外环内中心城区的受淹区域主要出现在黄浦江、苏州河附近的上海老城区低洼地区, 由于外环内市区段防汛墙设防标准高, 未发生河道漫溢的情况, 其淹没原因主要是降雨内涝导致。

(2) 基于 PGW 方法驱动区域气候模式 WRF 模拟的“海葵”“菲特”台风降水与观测降水空间相关较好, 主要降水段上海中心城区模拟误差分别达 11% 和 16%, 2050 年代“海葵”“菲特”台风重现时模拟降水明显增强, 主要降水时段降水增幅分别达 67% 和 86%, 中心城区降水增幅量大于模式的模拟误差。但需要指出的, 本文两个台风未来重现模拟时, 驱动 WRF 模式的大气环流场增加的扰动量仅来自于一个全球模式预估的结果, 故降水增加量仍存在一定的不确定性。未来可能需要使用 CMIP5/6 的多个全球气候模式预估的增加量驱动 WRF 模式, 得到多个全球气候模式驱动结果的集合平均, 进而减少预估的不确定性。

(3) 鉴于“海葵”和“菲特”台风重现时降水增加, “海葵”和“菲特”台风重现时受淹面积和淹没深度均明显大于历史时期。这也表明在未来全球平均温度增高的气候背景下, 重现台风的极端降水、未来天文大潮和上游洪水叠加引发的“三碰头”、“四碰头”事件可能将造成更严重的城市积涝灾害<sup>[11,13]</sup>。

然而, 历史时期的台风灾情模拟采用的雨量资料是分辨率较高的实时网格雷达逐时雨量资料(网格间距为 1 km × 1 km), 台风未来灾害情景重现采用的雨量资料只能是基于模式输出的逐时格点降水数据(水平分辨率只有 9 km)。由于输入雨量数据精度不同, 台风未来重现灾害淹没程度与历史时期比较也会存在一些客观误差, 有待于今后进一步研究改进。

值得注意的是未来由于气候变化, 海平面呈上升趋势<sup>[12]</sup>, 强台风、超强台风袭击影响显著增强, 受极端台风引发的“三碰头”“四碰头”事件造成的城市内涝问题将会愈发严重, 城市低洼地区在未来极端洪水增强的情景下受淹情况将被加倍放大, 而中心城区往往又是人口密集、资产高度集中的区域, 受洪涝灾害增强影响, 其造成的直接经济损失和对产业经济一体化的长三角地区带来的综合影响不可估量<sup>[8,17]</sup>。为此, 需完善上海市

现有的适应气候变化的内涝防治标准体系, 研发极端复核洪涝灾害耦合模拟技术, 在此基础上不断吸收、完善稳健决策科学方法<sup>[13,18-19]</sup>, 为沿海特大城市适应气候变化应对极端洪涝风险提供科学决策支撑<sup>[20]</sup>。

## 参考文献:

- [1] IPCC. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012: 582.
- [2] HALLEGATTE S, GREEN C, NICHOLLS R J, et al. Future flood losses in major coastal cities [J]. Nature Climate Change, 2013, 3(9): 802–806.
- [3] 翟盘茂, 章国材. 气候变化与气象灾害 [J]. 科技导报, 2004(7): 11–14.
- [4] 殷健, 梁珊珊. 城市化对上海市区域降水的影响 [J]. 水文, 2010, 30(2): 66–72.
- [5] 赵彩萍, 周晋红, 李兆奇, 等. 城市化对太原暴雨变化的影响 [J]. 干旱气象, 2019, 37(1): 109–118.
- [6] 李超超, 程晓陶, 申若竹, 等. 城市化背景下洪涝灾害新特点及其形成机理 [J]. 灾害学, 2019, 34(2): 57–62.
- [7] 胡恒智, 田展, 顾婷婷. 气候变化背景下的洪涝风险稳健决策方法评述 [J]. 气候变化研究进展, 2018, 14(1): 77–85.
- [8] 温家洪, 黄蕙, 陈珂, 等. 基于社区的台风灾害概率风险评估—以上海市杨浦区富禄里居委地区为例 [J]. 地理科学, 2012, 3(23): 348–355.
- [9] WANG J, GAO W, XU S, et al. Evaluation of the combined risk of sea level rise, land subsidence, and storm surges on the coastal areas of Shanghai, China [J]. Climatic Change, 2012, 115(3/4): 537–558.
- [10] LI M, WU W, WANG J, et al. Simulating and mapping the risk of surge floods in multiple typhoon scenarios: a case study of Yuhuan County, Zhejiang Province, China [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2016: 1–15.
- [11] 王璐阳, 张敏, 温家洪, 等. 上海复合极端风暴洪水淹没模拟 [J]. 水科学进展, 2019, 30(4): 546–555.
- [12] 程和琴, 王冬梅, 陈吉余. 2030 年上海地区相对海平面变化趋势的研究和预测. 气候变化研究进展, 2015, 11(4): 231–238.
- [13] HU Hengzhi, TIAN Zhan, SUN Laixiang, et al. Synthesized trade-off analysis of flood control solutions under future deep uncertainty: An application to the central business district of Shanghai [J]. Water Research, 2019, 166: 115067.
- [14] SCHÄR C, FREI C, LÜTHI D, et al. Surrogate climate change scenarios for regional climate models [J]. Geophys Res Lett. 1996, 23(6): 669–672.
- [15] PATRICOLA C M, WEHNER M F. Anthropogenic influences on major tropical cyclone events [J]. Nature, 2018, 563(7731): 339–346.
- [16] PARKER C L, BRUYÈRE C L, Mooney P A, et al. The response of land-falling tropical cyclone characteristics to projected climate change in northeast Australia. Clim Dyn, 2018, 51(9/10): 3467–3485.
- [17] 李卫江, 温家洪, 李仙德. 产业网络灾害经济损失评估研究进展 [J]. 地理科学进展, 2018, 37(3): 330–341.
- [18] YAN D, Ludwig F, HUANG H Q, et al. Many-objective robust decision making for water allocation under climate change [J]. Science of the Total Environment, 2017: 607–608, 294–303.
- [19] XIE J Q, CHEN H, LIAO Z L, et al. An integrated assessment of urban flooding mitigation strategies for robust decision making [J]. Environmental Modelling & Software, 2017, 95: 143–155.
- [20] AERTS J C J H, BOTZEN W J W, EMANUEL K, et al. Evaluating flood resilience strategies for coastal megacities [J]. Science, 2014, 344(6183): 473–475.

(下转第 134 页)

7 days of total submergence, the seed setting rate of Longdao 18 was only 68% and its the number of grains per ear was 72, which was significantly lower than the CK, so the yield reduction rate was 66%. However, the seed setting rate, grain number per panicle and 1000-grain weight of Suijing 18 were as low as 59%, 42 and 17.5g respectively, which were far lower than those of the CK, so the yield reduction rate was as high as 81%, and the average yield reduction rates of two rice varieties of 1/3 h, 2/3 h and 3/3 h were 39%, 47% and 62% respectively, the average yield reduction rates of 3 days and 7 days were 43% and 56% respectively, thus, it could be seen that rice yield loss was the more with the deepening of waterlogging depth and the lengthening of waterlogging duration; The effect degree of waterlogging stress on the growth and yield of the two rice varieties was different, in comparison, the effects of waterlogging stress on Suijing 18 were more serious than that on Longdao 18.

**Key words:** rice; waterlogging stress; critical growth period; yield; Heilongjiang

(上接第 98 页)

## Compound Flooding Simulation and Prediction of Future Recurrence in Shanghai Downtown Area

HE Fangfang<sup>1</sup>, HU Hengzhi<sup>2</sup>, DONG Guangtao<sup>1</sup> and XU Hanqing<sup>3</sup>

(1. *Shanghai Climate Center, Shanghai 200030, China*; 2. *Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China*; 3. *East China Normal University, Shanghai 200062, China*)

**Abstract:** The extreme strong winds, precipitation and typhoon storm surges caused by typhoon are very likely to cause flood disasters, in combining with astronomical tides, upstream water and future sea level rise will pose a serious threat to the public safety of coastal megacities. This paper uses the hydrodynamic model ICM InfoWorks to simulate the three encounters of “typhoon, torrential rain, and astronomical tide” during the “Haikui” typhoon and the four encounters of “typhoon, torrential rain, upstream water, and astronomical tide” during the “Fitow” typhoon inundation of compound flood disasters in downtown Shanghai. The results show that during the typhoon “Haikui” and “Fitow”, the flooded areas in the center of Shanghai mainly appeared in the low-lying old Shanghai area near the Huangpu River and Suzhou Creek. Then these two cases are simulated by using the Weather Research and Forecasting Model under future climate conditions obtained from one of CMIP5 GCMs by using a pseudo global warming technique. The results show that rainfall induced by these two tropical cyclones all increase dramatically under future warming climate. The flooding in the downtown area and submerged depth became much more stronger than the simulations from historical run during these two cases.

**Key words:** Flood disaster; hydrodynamic model ICM Info works; pseudo global warming technique; compound flood disaster simulation; Shanghai