

基于 FloodArea 模型的城市内涝灾害风险评估与预警¹

谢五三^{1,2}, 吴蓉¹, 丁小俊¹

(1. 安徽省气候中心, 安徽合肥 230031; 2. 安徽省大气科学与卫星遥感重点实验室, 安徽合肥 230031)

【摘要】: 近年来, 城市内涝问题日益突出, 严重影响着城市的可持续发展。运用合肥市气象数据、地理信息数据、社会经济统计数据以及历史内涝灾情数据, 基于二维非恒定流水动力模型(FloodArea), 开展城市内涝灾害风险评估与预警技术研究。研究表明: 根据城市内涝预警业务需求, 综合暴雨强度公式和广义极值分布两种方法, 推算出合肥市 1、3、6、12、24h 下 5、10、20、30、50、100a 一遇的降水量, 应用 FloodArea 模型模拟得到不同历时下多个重现期的淹没水深图谱, 耦合精细化的承灾体信息及脆弱性曲线, 完成合肥市城市内涝风险评估, 再结合强降水预报, 开展城市内涝风险预警业务应用; 由典型内涝过程的效果检验可知, 风险评估结果与灾情调查数据较为吻合、可靠度高, 进而建立了降水预报→淹没模拟→风险评估→预警发布→效果检验一套较为完备的城市内涝风险评估与预警业务流程, 可用于城市内涝实时风险评估与预警业务。

【关键词】: 城市内涝 风险评估 风险预警 FloodArea

【中图分类号】: TV992 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2018)12-2848-08

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201812021

城市内涝主要是由于降水量过多、地势低洼以及积水不能及时排出所形成的, 随着全球气候变化的不断加剧以及城市化的快速发展, 城市内涝灾害发生的频次更加频繁, 影响范围也逐渐扩大^[1, 2]。近年来, 我国大中城市不断发生严重的城市内涝, 如北京市 2012 年的“7·21 特大暴雨”, 造成 81 人死亡, 经济损失 116.4 亿元, 2013 年 10 月、2014 年 5 月以及 2016 年 7 月, 上海、深圳、武汉等大城市多次上演“雨后看海”的悲剧, 对经济社会发展造成了严重的影响, 已成为我国政府和社会公众普遍关注的问题^[3-6]。在城市内涝防灾减灾工作中, 灾害预防工作尤为重要, 而城市内涝风险评估与预警是灾害预防的重要手段之一, 可为防洪救灾规范化、科学化决策管理提供科学依据, 因而开展城市内涝风险评估与预警技术研究具有重要意义。

目前, 国内外针对城市内涝风险评估的研究较多, 扈海波等^[7]基于危险性、敏感性和暴露度指数构建城市暴雨积涝风险指数, 完成北京地区城市暴雨积涝灾害风险预评估; 吴海春等^[8]基于 PCSWMM 城市雨洪模型, 对海口市海甸岛进行内涝风险评估; 黄国如等^[9-11]基于 GIS 和 SWMM 模型自主构建城市内涝淹没模型, 开展城市内涝风险分析; 苏伯尼等^[12]基于二维水力学模型, 建立基于情景模拟的城市暴雨内涝灾害定量风险评估方法; 尹志聪等^[13]基于北京城市内涝数值模型(BUW), 完成不同重现期下北京城市内涝积水的数值模拟; 石勇等^[14, 15]基于情景模拟, 针对城市暴雨内涝主要承灾体, 开展城市内涝淹没模拟及损失风险评

¹收稿日期: 2018-04-13; 修回日期: 2018-05-22

基金项目: 中国气象局气候变化专项(CCSF201714); 淮河流域气象开放研究基金(HRM201607)

作者简介: 谢五三(1981~), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事气候监测评估与气象灾害风险研究。

E-mail: xiewusan_2008@sina.com

估。诸多研究在城市内涝淹没模型的构建及内涝淹没模拟、承灾体暴露度及脆弱性分析、内涝损失风险评估等方面取得长足进步，推动了城市内涝风险评估与预警技术的发展；但基于指标体系和历史灾情的风险评估，评估结果为较大范围的区域整体风险，空间精度低，且无法模拟灾害的不确定性和动态过程，PCSWMM, SWMM, BUW 等淹没模型输入参数较多，计算较为复杂，难以满足面向实时气象防灾减灾的城市内涝风险评估与预警业务。

合肥市为安徽省省会城市，地处我国华东地区、江淮之间，属于亚热带季风气候，是长三角城市群副中心和综合性国家科学中心，也是“一带一路”和长江经济带战略双节点城市，为国家重要的科研教育基地、现代制造业基地和综合交通枢纽。本文基于 FloodArea 二维非恒定流水动力模型，针对合肥市开展城市内涝灾害风险评估与预警技术研究，建立城市内涝风险评估与预警业务流程，为城市气象防灾减灾工作提供技术支撑。

1 资料与方法

本文开展合肥市城市内涝灾害风险评估与预警技术研究，所用资料主要分为四类：气象数据、地理信息数据、社会经济统计数据、历史内涝灾情数据，其中气象数据包括合肥气象站建站（1953 年）至 2016 年分钟、小时降水以及典型强降水过程资料；地理信息数据包括合肥市行政区划、DEM（30m×30m）、水系、土地利用、Mannirig 系数等；社会经济统计数据包括道路网、建筑物分布、典型易涝点、排水管网、泵站分布等；历史内涝灾情数据为合肥市 2008 年以来典型内涝过程的灾情数据，主要包括积水点位置、积水深度、采取措施、积水排除时间、灾害损失情况以及相关灾情图片等。

城市内涝淹没模拟采用 FloodArea 二维非恒定流水动力模型，该模型为德国 Geomer 公司开发，以模块形式与 ArcGIS 无缝集成，计算基于水动力学方法，具体的模拟演进以栅格为单位，同时考虑了一个栅格的周围八个单元，相邻单元的水流宽度被认为是相等的，位于对角线的单元，以不同的长度算法来计算，FloodArea 计算原理见下图（图 1）。

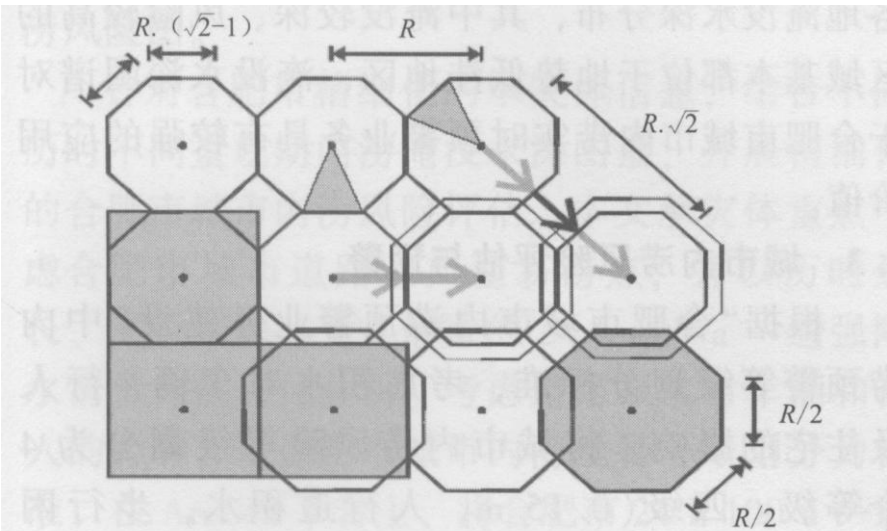


图 1 FloodArea 计算原理示意图

Fig. 1 Sketch map of calculation principle for FloodArea model

对邻近单元的泻入量由 Manning-Stricker 公式计算，水流淹没深度为淹没水位高程和地面高程之间的差值，淹没过程中的水流方向由地形坡向所决定，地形坡向反映了斜坡所面对的方向，坡向指地表面上一点的切平面的法线矢量在水平面的投影与过该点的正北方向的夹角，表征该点高程值改变量的最大变化方向，计算公式如下：

$$aspect = 270 - \frac{360}{2\pi} \cdot \alpha \tan 2 \left[\frac{\partial Z}{\partial y}, \frac{\partial Z}{\partial x} \right] \quad (1)$$

式中： α 为地形坡度； $\frac{\partial z}{\partial y}$ 为南北方向高程变化率； $\frac{\partial z}{\partial x}$ 为东西方向高程变化率^[16]。FloodAreaox 模型有 3 种基本的淹没情景：漫顶、溃口以及暴雨模式，不同情景下选择不同的淹没模式，模型输入参数也有所不同。本文开展合肥市城市内涝淹没模拟时，根据城市内涝淹没实际情况，采用的是 3 种情景之一的暴雨模式。

2 结果分析

2.1 不同历时及重现期降水量

根据合肥市城市暴雨内涝预报预警业务需求，在进行城市内涝淹没模拟时，降水历时选取 1、3、6、12、24h，重现期选取 5、10、20、30、50、100a 一遇。针对城市强降水重现期分析，基本采用暴雨强度公式^[17]，但依据《室外排水设计规范》（GB50014-2006, 2014 版），暴雨强度公式只适合短历时强降水重现期分析，降水历时一般不超过 180min（3h），对于较长历时（6、12、24h）强降水重现期，目前国内外大多采用广义极值分布函数拟合计算重现期，因而采用暴雨强度公式和广义极值分布相结合的方法确定合肥市不同重现期下各种历时的降水量。

依据《室外排水设计规范》，暴雨强度公式的定义为：

$$q = \frac{167A_1(1 + C \lg P)}{(t + b)^n} \quad (2)$$

式中： q 为暴雨强度（L/（S·hm²））； P 为重现期（a），取值范围为 0.25a~100a； t 为降雨历时（min）。 A_1 、 b 、 c 、 n 是与地方暴雨特性有关且需求解的参数： A_1 雨力参数，即重现期为 1a 时的 1min 设计降雨量（mm）； c 为雨力变动参数； b 为降雨历时修正参数，即对暴雨强度公式两边求对数后能使曲线化成直线所加的一个时间参数（min）； n 为暴雨衰减指数，与重现期有关。根据合肥气象站分钟自记雨量记录，利用暴雨强度计算系统推算出合肥市暴雨强度总公式为：

$$q = \frac{2364.32 \times (1 + 0.895 \lg P)}{(t + 15.208)^{0.745}} \quad (3)$$

由精度检验可知，该暴雨强度总公式符合国家标准规定的精度，进而推算出合肥市不同重现期下 1、3h 降水量。

广义极值分布函数是将 Gumbel、Frechet、Weibull 3 种极值分布统一为具有 3 个参数的分布函数^[18, 19]：

$$F_{X(x)} = P(X < x) = \begin{cases} \exp \left\{ - \left[1 - \zeta \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right)^{1/\zeta} \right] \right\} & \zeta \neq 0 \\ \exp \left[- \exp \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right] & \zeta = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中 ζ 、 μ 、 σ 分别为形状参数、位置参数和尺度参数。形状参数 ζ 决定了分布的尾部形状,当 $\zeta \rightarrow 0$ 时,分布的尾部呈指数状,为极值 I 型(Gumbel 分布);当 $\zeta > 0$ 时,分布的尾部较长,为极值 II 型(Frechet 分布);当 $\zeta < 0$ 时,分布具有有限的上端点,为极值 III 型(Weibull 分布)。选用合肥站建站(1953 年)至 2016 年逐小时降水资料,推算出广义极值分布函数的形状参数、尺度参数、位置参数,进而计算出合肥市不同重现期下 6、12、24h 降水量。

综合暴雨强度公式和广义极值分布两种方法,推算出合肥市 1、3、6、12、24h 下 5、10、20、30、50、100a 一遇降水量见下表(表 1)。

表 1 合肥市不同重现期下 1、3、6、12 及 24 h 降水量(mm)

Tab. 1 1-hour, 3-hour, 6-hour, 12-hour and 24-hour precipitation of different return periods in Hefei city (mm)

重现期 历时	100 a 一遇	50 a 一遇	30 a 一遇	20 a 一遇	10 a 一遇	5 a 一遇
1 h	95.0	85.8	79.1	73.7	64.5	55.4
3 h	140.1	126.5	116.6	108.7	95.1	81.6
6 h	165.6	145.0	131.1	120.1	102.8	86.2
12 h	175.3	158.7	146.8	136.9	120.4	103.4
24 h	209.0	188.9	174.4	162.5	142.4	121.7

2.2 城市内涝淹没模拟

城市主城区地表大多为水泥路面,为不透水层,汇流速度快,但城市拥有较为完善的排水系统,因此在利用 FloodArea 模型进行城市内涝淹没模拟时,为使模拟结果与实际更加吻合,需考虑城市排水因素。本文在分析合肥市城市排涝能力时,参考上海市城市建设设计研究总院编制的《合肥市城市排水(雨水)防涝综合规划》(工程编号:规 13020),该规划将合肥市雨水管网数据、排涝泵站数据、降水频率曲线、地面坡度、汇流面积等带入计算机水力学模型进行模拟,估算出合肥市城区管网排水能力基本达到 1 年一遇的标准,结合合肥市暴雨强度公式和广义极值法,推算出合肥市不同历时的排水能力如下(表 2):

表 2 合肥市不同历时(1、3、6、12、24 h)排水能力

Tab. 2 Drainage capacity of different durations (1,3,6,12,24 hour) in Hefei city

历时	1 h	3 h	6 h	12 h	24 h
排水量 (mm)	13.4	22.4	27.0	28.6	30.8

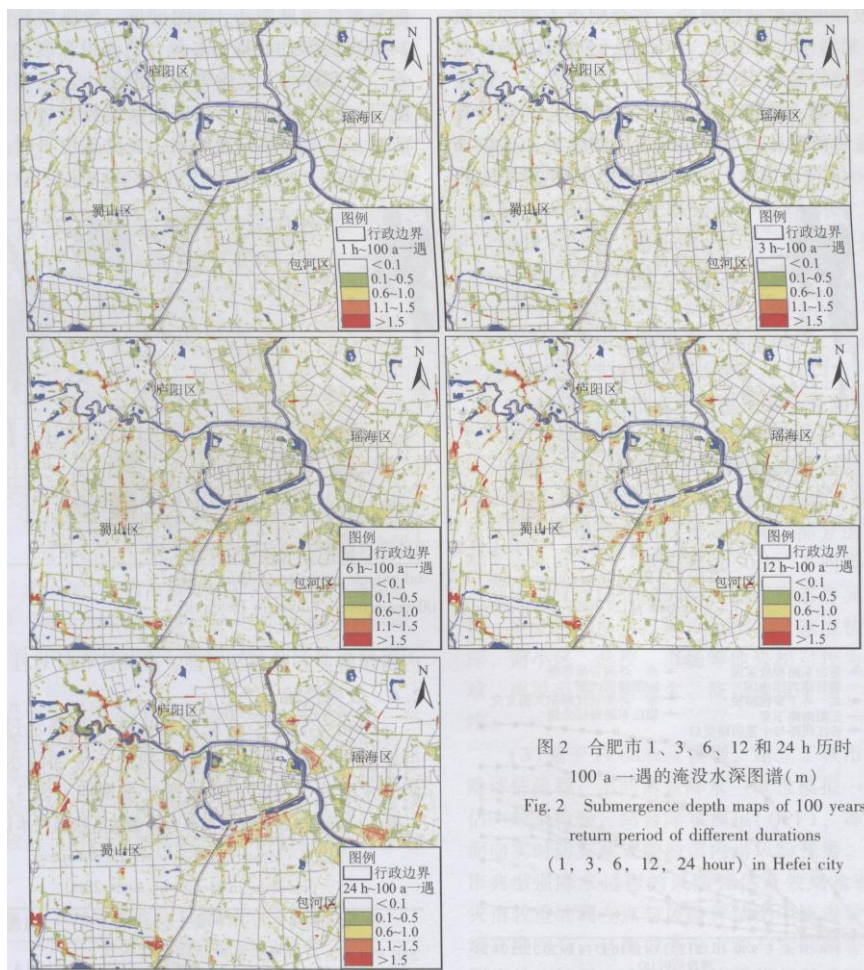
将合肥市高精度的 DEM (30m×0m)、道路网、建筑物分布(阻水物)、Manning 系数(地面糙率)、模拟时长、最大交换率、不同重现期降水量以及排涝能力估算结果带入 FloodArea 模型进行内涝淹没模拟,得到不同历时不同重现期的淹没水深图谱,其中淹没最深、受灾最重的 1、3、6、12 和 24h 历时 100a 一遇的淹没水深图谱见图 2。

由图可以看出不同历时不同重现期的合肥市各地淹没水深分布,其中淹没较深、风险较高的区域基本都位于地势低洼地区,淹没水深图谱对于合肥市城市内涝实时预警业务具有较强的应用价值。

2.3 城市内涝风险评估与预警

根据“合肥市城市内涝预警业务建设”中内涝预警等级划分标准,考虑积水对车辆、行人及住宅的影响,将城市内涝风险

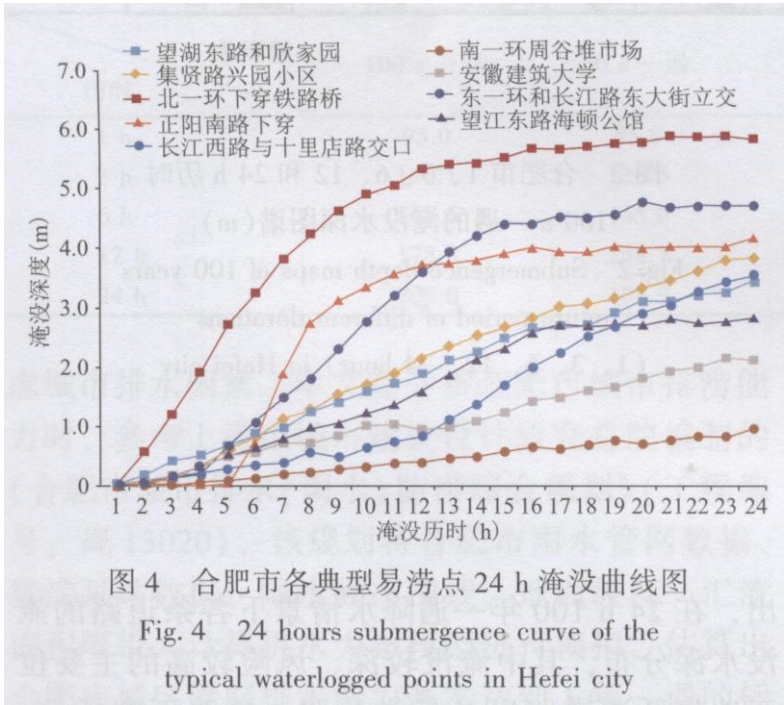
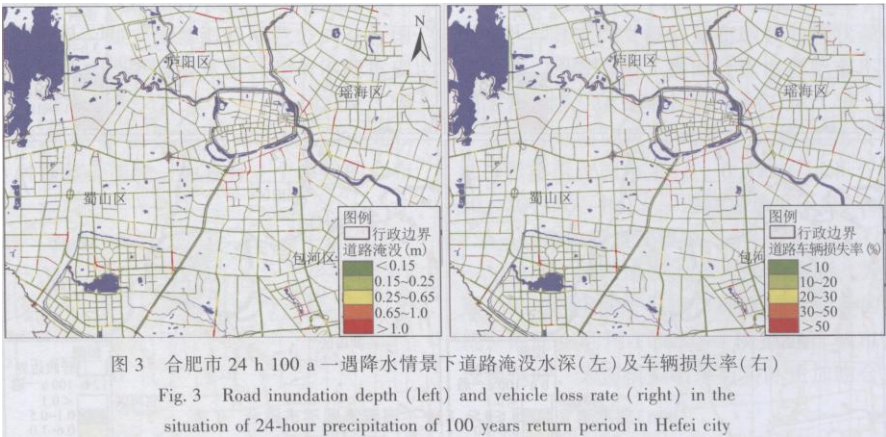
等级划分为 4 个等级：四级（0.15m，人行道积水，步行困难）；三级（0.25m，车辆排气管可能进水）；二级（0.65m，车辆进气口进水熄火）；一级（1m，楼道进水，交通堵塞），再结合淹没水深图谱，即可推算出不同历时不同重现期的合肥市城市内涝风险图。



针对合肥市精细化的承灾体信息，结合不同历时不同重现期内涝淹没水深图谱，开展精细化的合肥市城市内涝风险评估。本文承灾体重点考虑合肥市城市道路和典型易涝点，并以历时最长、淹没最深、受灾最重的 24h100a 一遇强降水情景为例进行分析。考虑道路积水对车辆和行人的影响，以合肥市城市内涝预警等级划分为标准，在 ArcGIS 平台上，将合肥市 24h100a 一遇降水淹没水深图谱与城市道路进行叠加，提取各条道路淹没水深图（图 3 左）。由图可以清楚的看出，在 24h100 年一遇降水情景下各条道路的淹没水深分布，其中淹没较深、风险较高的主要位于地势低洼道路以及各类公路、铁路下穿桥等；进一步利用车辆涉水脆弱性曲线 [20] 进行评估可知，部分道路（橙色区域）车辆损失率超过 30%，局部道路（红色区域）车辆损失率超过 50%（图 3 右）。

易涝点是指在汛期或雨量过大时容易被淹没且可能造成一定经济损失和人员伤亡的区域，经合肥市排水办统计，合肥市城区易涝点约有 30 多处，将各易涝点与 24h100a 一遇降水的淹没水深叠加，再利用 ArcGIS 提取功能即可得到各易涝点的淹没水深及范围等。为进一步分析易涝点的淹没深度随时间的演变，在合肥市不同的行政区内（瑶海区、蜀山区、庐阳区、包河区），针对不同类型的易涝点（公路交口、公路立交、铁路下穿、小区、学校、市场等），选取了 9 个具有代表性的典型易涝点进行淹没历时分析，在 24h100a 一遇降水情景下，各典型易涝点随时间（24h）的淹没曲线见图 4，由图可见，各典型易涝点的 24 小时淹没曲线形态各异，从淹没深度和速率来看，下穿桥、立交桥等淹没范围小、速度快、深度深，而小区、学校、市场等地势相对

较为平缓区域，淹没范围相对较大、淹没速度平缓、深度相对较小。



针对不同历时不同重现期的淹没水深图谱，结合不同时效（1、3、6、12 和 24h）的降水预报（QPF）及精细化的承灾体信息，即可开展城市内涝风险预警。业务流程具体如下：将不同时效的降水预报（QPF）及高精度的 DEM 等数据带入 FloodArea 模型进行淹没模拟，得到淹没水深分布，结合精细化的承灾体信息（城市道路、典型易涝点等）及 ArcGIS 提取功能，得到各承灾体淹没水深及其随时间的演变，针对淹没较深、风险较高的区域发布有针对性的预警信息，提高城市内涝预警业务服务及时性、准确性和针对性。

2.4 效果检验

2000 年以来，合肥市发生多次强降水过程并引发城市内涝，其中最为典型的 5 次强降水过程的降水时间、历时、降水量及重现期见表 3。

表 3 2000 年以来合肥市最为典型的 5 次强降水过程

Tab. 3 Most typical 5 heavy precipitation processes in Hefei city since 2000

降水时间	降水历时	降水量	重现期
2003 年 7 月 9 日 20 时~7 月 10 日 19 时	24 h	124.1 mm	5~10a—遇
2005 年 7 月 6 日 8 时~13 时	6 h	120.2 mm	20 a—遇
2008 年 6 月 21 日 20 时~22 日 7 时	12 h	127.9 mm	10~20a—遇
2010 年 7 月 12 日 9 时~20 时	12 h	130.2 mm	约 20 a 一遇
2016 年 7 月 1 日 0 时~23 时	24 h	132.5 mm	5~10a—遇

表 4 2010 年 7 月 12 日合肥市几个内涝积水点 的调查和模拟积水深度

Tab. 4 Water depth got with the methods of investigation and simulation of waterlogging points in Hefei city on July 12, 2010

调查点 编号	调查点 名称	调查的 积水深度 (cm)	模拟的 积水深度 (cm)
1	樊洼路与十里店路交口	40-80	50-100
2	亳州路（原自行车二厂宿舍）	20-30	20-40
3	望湖南路	100	90-120
4	十五里河 312 国道沿河路	100	90-100
5	机场路（312 国道南侧）	100	90-110
6	合作化路与东流路交口	100	100-120
7	六安路（寿春路-淮河路段）	60	50-70
8	天河路	50	40-80

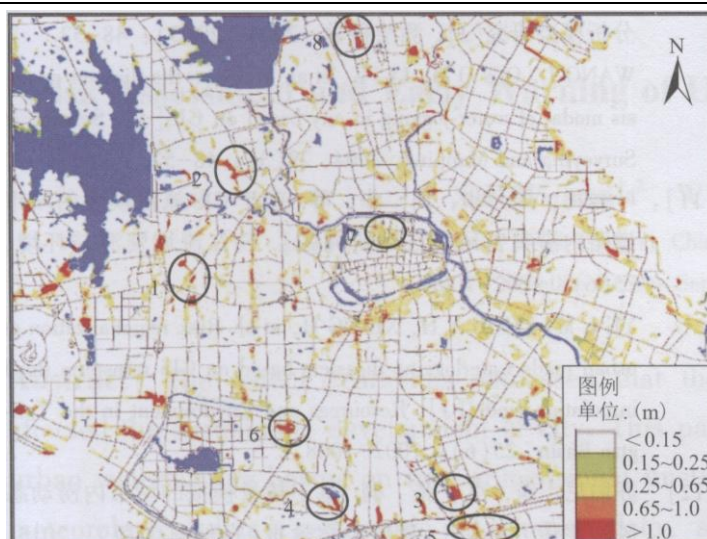


图 5 2010 年 7 月 12 日模拟淹没与灾情调查点叠加图

Fig. 5 Superposed map of simulated submerged depth and disaster investigation points on July 12, 2010 in Hefei city

以时间较近、降水量较大且灾情较重的 2010 年 7 月 12 日 9 时~20 时强降水过程为例,开展效果检验,12h(9~20 时)降水总量达 130.2mm,约为 20a 一遇。将各小时降水量以及 DEM、道路网、建筑物分布(阻水物)、Manning 系数等带入 FloodArea 模型进行淹没模拟,得到本次强降水过程的淹没分布图,再与合肥市应急办灾情调查统计数据对比验证,其中灾情调查数据中有 8 个调查点(名称见表 4)淹没较深、受灾较重,将此 8 个调查点与模拟的淹没分布图进行叠加(图 5),由图可以看出,8 个调查点在模拟的淹没图中均出现不同程度的淹没,两者吻合度较高。

进一步提取 8 个调查点的模拟淹没深度,并与调查得到的积水深度进行对比(表 4),由表可知,模拟淹没水深与实际调查的积水深度较为接近,表明城市内涝淹没模拟结果可靠度高、模拟效果较好,可用于城市内涝实时风险评估与预警业务。

3 结论与讨论

(1) 基于合肥市小时及分钟降水资料,采用暴雨强度公式和广义极值分布相结合的方法,推算出合肥市 1、3、6、12、24h 下 5、10、20、30、50、100a 一遇的降水量,再与 DEM、道路网、建筑物分布、Manning 系数、模拟时长、最大交换率以及排涝能力估算等结果带入 FloodArea 模型进行模拟,得到 5 个历时 6 种不同重现期的淹没水深图谱,总体来看,淹没较深、风险较高的区域基本位于地势低洼地区。

(2) 根据合肥市城市内涝预警等级划分标准,针对合肥市城市道路和典型易涝点的风险评估可知,淹没较深、风险较高的城市道路主要为地势低洼地区的道路以及各类公路、铁路下穿桥等,由车辆涉水脆弱性曲线推算可知,部分道路车辆损失率超过 30%,局部超过 50%。不同类型易涝点的淹没深度随时间的演变曲线形态各异,下穿桥、立交桥等易涝点淹没范围小、速度快、深度深,而小区、学校、市场等地势相对较为平缓区域,淹没范围相对较大、淹没速度平缓、深度较浅。

(3) 基于 FloodArea 模型,建立了城市内涝风险评估流程:不同情景降水淹没模拟—风险评估—效果检验,结合降水预报(QPF),即可开展面向实时防灾减灾的城市内涝风险预警。由合肥市典型强降水过程的风险评估及效果检验可知,灾情较重的调查点与风险评估图中淹没较深的区域高度吻合,且模拟淹没水深与实际调查的积水深度较为接近,表明内涝淹没模拟效果好、可靠度高,可用于城市内涝风险评估与预警业务。

众所周知,城市内涝灾害的形成机理较为复杂,影响因素众多,风险评估与预警的成败取决于多方面的因素,一方面,FloodArea 模型自身的区域适应性、带入到淹没模型的 DEM、道路网、建筑物分布、Manning 系数等相关参数对城市下垫面刻画精度和准确性以及城市排涝能力估算结果等因素都影响着风险评估结果的可靠性;另一方面,降水的强度及落区预报(QPF)的准确与否,是风险评估与预警是否成功的关键所在,决定着风险评估与预警的成败。在城市内涝实时风险评估与预警业务中,需综合考虑各方面因素的影响,加强效果检验,优化模型参数,提高内涝风险评估与预警的精度和准确性,为面向实时气象防灾减灾业务提供决策依据。

参考文献:

[1] 张冬冬,严登华,王义成,等.城市内涝灾害风险评估及综合应对研究进展[J].灾害学,2014,29(1):144-149.

ZHANG D D, YAN D H, WANG Y C, et al. Research progress on risk assessment and integrated strategies for urban pluvial flooding[J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(1): 144-149.

[2] 王伟武,汪琴,林晖,等.中国城市内涝研究综述及展望[J].城市问题,2015(10):24-28.

WANG W W, WANG Q, LIN H, et al. Summarization and prospection for the studies on China's urban water logging

[J]. Urban Problems, 2015(10) : 24-28.

[3] 顾孝天, 李宁, 周扬, 等. 北京“7·21”暴雨引发的城市内涝灾害防御思考[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(2): 1-6.

GU X T, LI N, ZHOU Y, et al. Thinking on urban waterlogging disaster defense initiated by “7·21” extraordinary rainstorm in Beijing[J] . Journal of Natural Disasters, 2013 , 22(2) : 1-6.

[4] 房国良, 高原, 徐连军, 等. 上海市降雨变化与灾害性降雨特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(10): 1270-1273.

FANG G L, GAO Y, XU L J, et al. Analysis of precipitation change and the characteristics of disaster rainfalls in shanghai [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(10) : 1270-1273.

[5] 杨辰, 王强, 顾宇丹. 上海市城市暴雨内涝评估建模及模拟研究[J]. 气象, 2017, 43(7): 879-886.

YANG C, WANG Q, GU Y D. Study of Shanghai urban flood-ing assessment modeling and simulation [J]. Meteorological Monthly, 2017, 43(7) : 879-886.

[6] 李盼盼, 张勇, 郝中豫, 等. 基于遥感影像与地理国情数据的城市内涝灾害评估分析[J]. 城市勘测, 2017, 3: 19-23.

LI P P, ZHANG Y, HAO Z Y, et al. Assessment of urban wa-terlogging disaster based on remote sensing image and geographical conditions data [J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2017, 3: 19-23.

[7] 扈海波, 轩春怡, 诸立尚. 北京地区城市暴雨积涝灾害风险预评估[J]. 应用气象学报, 2013, 24(1) : 99-108.

HU H B, XUAN C Y, ZHU L S. The pre-event risk assessment of Beijing urban flood [J] • Journal of Applied Meteorological Science, 2013, 24(1) : 99-108.

[8] 吴海春, 黄国如. 基于PCSWMM模型的城市内涝风险评估[J]. 水资源保护, 2016, 32(5): 11-16.

WU H C, HUANG G R. Risk assessment of urban waterlogging based on PCSWMM model [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(5) : 11-16.

[9] 黄国如, 黄维, 张灵敏, 等. 基于GIS和SWMM模型的城市暴雨积水模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(4) : 1-6.

HUANG G R, HUANG W, ZHANG L M, et al. Simulation of rainstorm waterlogging in urban areas based on GIS and SWMM model [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2015, 26(4) : 1-6.

[10] 王林, 秦其明, 李吉芝, 等. 基于GIS的城市内涝灾害分析模型研究[J]. 测绘科学, 2004, 29(3): 48-52.

WANG L, QIN Q M, LI J Z, et al. Study on the disaster analysis modal of water-logging in city based on GIS [J]. Science of Surveying and Mapping, 2004, 29(3) : 48-52.

[11] 叶丽梅, 周月华, 向华, 等. 基于GIS淹没模型的城市道路内涝灾害风险区划研究[J]. 长江流域资源与环境, 25(6) :

1002-1008.

YE L M, ZHOU Y H, XIANG H, et al. Risk regionalization of urban roads waterlogging disasters based on GIS rainstorm flood inundation model [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 25(6) : 1002-1008.

[12] 苏伯尼, 黄弘, 张楠. 基于情景模拟的城市内涝动态 风险评估方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2015, 55(6) : 684-690.

SU B N, HUANG H, ZHANG N. Dynamic urban waterlogging risk assessment method based on scenario simulations [J]. Tsinghua Univ(Sci & Technol), 2015, 55(6) : 684-690.

[13] 尹志聪, 郭文利, 李乃杰, 等. 北京城市内涝积水的数值模拟[J]. 气象, 2015, 41(9) : 1111-1118.

YIN Z C, GUO W L, LI N J, et al. Numerical simulation of urban ponding in Beijing[J]. Meteorological Monthly, 2015, 41 (9) : 1111-1118.

[14] 石勇, 许世远, 石纯, 等. 基于情景模拟的上海中心 城区居民住宅的暴雨内涝风险评价[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(3) : 177-182.

SHI Y, XU S Y, SHI C, et al. Risk assessment of rainstorm waterlogging on old-style residences downtown in Shanghai based on scenario simulation [J] . Journal of Natural Disasters, 2011, 20(3): 177-182.

[15] 尹占娥, 许世远, 殷杰, 等. 基于小尺度的城市暴雨内 涝灾害情景模拟与风险评估[J]. 地理学报, 2010, 65(5) : 553-562.

YI Z E, XU S Y, YIN J, et al. Small-scale based scenario modeling and disaster risk assessment of urban rainstorm waterlogging [J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(5): 553-562.

[16] GEOMER. Floodarea-ArcGIS extension for calculation flooded ; areas (User manual Version 9. 5) , Heidelberg: geomer, 2008.

[17] 张子贤, 孙光东, 孙建印, 等. 城市暴雨强度公式拟合方 法研究[J]. 水利学报, 2013, 44(11) : 1263-1271.

ZHANG Z X, SUN GD, SUN J Y, et al. Study on fitting methods for urban storm intensity formula [J] • Journal of Hydraulics Engineering,, 2013, 44(11): 1263-1271.

[18] 陈心池, 张利平, 闪丽洁, 等. 基于 Copula 函数的汉江中上游流域极端降雨洪水联合分布特征[J]. 长江流域资源 与环境, 2015, 24(8) : 1425-1433.

CHEN X C, ZHANG L P, SHAN L J, et al. Joint distribution of the extreme rainfall and flood for the upper-middle reaches of the Hanjiang River based on Copula function [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(8) : 1425- 1433.

[19] COLES S. An introduction to statistical modeling of extreme values[M]. London: Springer, 2001: 45-57.

[20] 尹占娥, 许世远. 城市自然灾害风险评估研究[M]. 北京: 科学出版社, 2012.

YIN Z E, XU S Y. Study on risk assessment of urban natural hazards[M]. Beijing: Science Press, 2012.