

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2023.02.005

极端降水下的城市地表-地下空间洪涝过程模拟

郭元¹, 王路瑶¹, 陈能志², 金菊香³

(1. 郑州大学水利与土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 福建省水利水电勘测设计研究院有限公司, 福建 福州 350000;
3. 福州大学土木工程学院, 福建 福州 350100)

摘要: 极端降水引起的城市内涝问题日益严峻, 大量地表积水甚至衍生出部分地下空间的淹没受灾。针对目前水文水动力模型地下空间研究应用不足的现状, 以郑州市某片区 2021 年“7·20”特大暴雨下的内涝过程为例, 构建基于 InfoWorks ICM 的区域地表-地下空间联合模拟模型, 对地下空间采用概化蓄水池法和水力连通法 2 种方式建模, 分析局地内涝的成因、发展和影响。结果表明: 地下空间内涝对地表积水的削减作用有限; 概化蓄水池法简洁易行, 水力连通法详细还原地下淹没过程; 累积雨量和强降水时段对地下空间洪涝均有重要影响。地表-地下空间洪涝模拟丰富了城市暴雨洪水预警预报的内容, 为防灾减灾提供支撑依据和参考。

关键词: 极端降水; 地下空间; 地表-地下联合模拟; 城市内涝; 致灾降水

中图分类号: TV122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2023)02-0209-09

近年来极端降水所引起的区域内涝时有发生^[1-3], 甚至伴随着地下空间的淹没受损。例如, 2007 年济南“7·18”暴雨导致银座地下广场被淹; 2020 年广州“5·22”暴雨引起地铁 13 号线进水; 2021 年郑州“7·20”特大暴雨造成 380 人遇难, 地铁 5 号线和京广快速路北隧道发生淹水倒灌, 大量地下车库进水^[4]。面对日益复杂的城市洪涝问题, 雨洪模型所属数值模拟方法因建模方便有效、复现性强^[5-6], 在研究中占有重要地位。

当前城市雨洪模型主要有 InfoWorks ICM、MIKE 系列、SWMM 以及一些独立研发模型^[7], SWMM 作为一维模型, 无法直接计算出地表淹没水深; MIKE 系列具备二维模拟能力, 但需要多模型组合完成城市的地表水流模拟, 稳定性受限; InfoWorks ICM 模型能够基于水力联系一体化城市区域建模, 计算稳定性强, 愈发受到研究者的青睐。代表性研究包括黄国如等^[8]基于 ICM 模型模拟评估了广州东濠涌流域城市洪涝灾害风险; 袁绍春等^[9]利用 ICM 模型设计重庆市万州区某老旧建筑小区的海绵改造方案; CHEN 等^[10]以海口市为例构建 DRIVE-Urban 模型实现了流域-城市洪涝过程的耦合计算。针对地下空间的研究如 Shin 等^[11]提出了考虑洪水强度和逃生路线的地下空间洪水风险评估方法; Nakasaka 等^[12]模拟了极端洪水中日本大阪区域地下空间淹没情况和人群疏散的成功率; 陈峰等^[13]针对地下空间洪涝灾害事故的预防提出了对策和建议。当前城市洪涝研究较多集中于地表洪水响应变化、城区与流域水体关系特征等, 针对地下空间的研究集中在人群疏散风险和防灾救灾对策上, 很少结合作为受灾来源的地表洪水和构建地表-地下空间一体化模型作为支撑, 面临极端降水很难及时做出有效的预报预警。结合中国城市现状和发展特点, 建立完整的地表-地下空间区域模型显得十分必要。

本文基于 InfoWorks ICM 对 2021 年郑州“7·20”暴雨中地下车库受淹的某小区及其所属片区进行地表-地下联合建模, 分别采用概化蓄水池法和水力连通法模拟极端暴雨所致地下空间洪涝过程, 分析局地洪水成因和影响, 从不同角度推求降水对地下空间内涝的致灾标准, 以期在城市地下空间洪涝预警和整体防灾规划提供科学依据和决策辅助。

收稿日期: 2022-11-05; **网络出版日期:** 2023-03-25

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20230323.1626.002.html>

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFC3090601); 河南省高等学校重点科研项目(23A170003)

作者简介: 郭元(1987—), 男, 河南洛阳人, 讲师, 博士, 主要从事水文模型与城市排水研究。

E-mail: g0628718@zzu.edu.cn

通信作者: 金菊香, E-mail: xiang@fzu.edu.cn

1 研究区域

郑州市位于中原腹地，地势西南高、东北低，多年平均降水量为 640 mm。在“7·20”暴雨期间，市属中原区的某小区地下车库进水。研究区域相对属于高地势，东北部沿河道存在大型人工湖，区域整体水流为外排趋势，部分地表洪水会通过道路外排至周边区域。

研究区域总面积为 5.2 km²，其中居民小区 c、f、h、k、l 内设有大型地下车库，在“7·20”暴雨期间该片区内仅 f 小区地下车库受淹。受灾小区地下车库出入口共有 5 个，分别是小区内部 1 个、东门处 2 个、南北门处各 1 个，最终仅南门出入口未进水。受灾地下车库为 2 层结构，通过现场测量，地下 2 层底面积为 1 792 m²，高 3 m，容积为 0.54 万 m³；地下 1 层底面积为 67 904 m²，高 3 m，容积接近 20.4 万 m³。研究所需高程资料采用地理空间数据云，研究区域概况如图 1。选取气象局郑州站 2021 年 7 月 19 日 20:00 至 7 月 21 日 08:00 共计 36 h 的降水数据进行模拟。

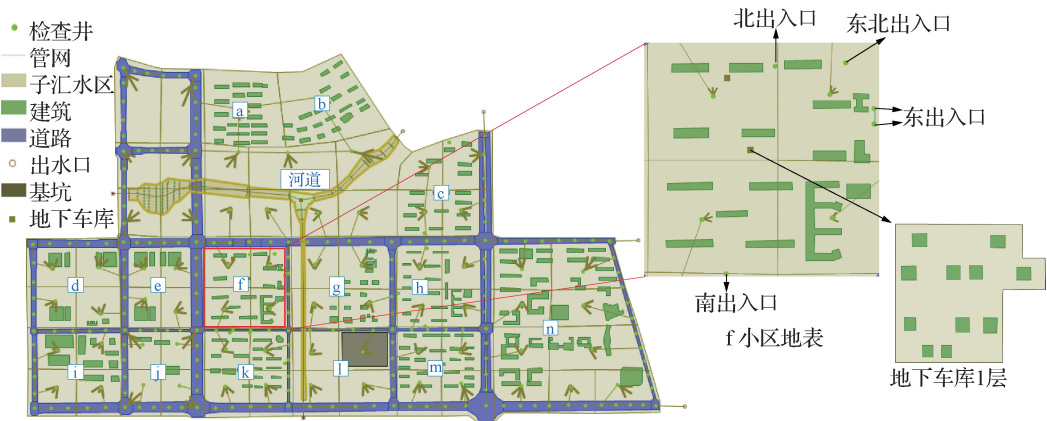


图 1 研究区域概况
Fig. 1 Overall distribution of the study area

2 模型构建

2.1 产汇流及地表淹没模型

根据已有管道数据和郑州市雨水主干图，构建研究区域的管网模型，并依托地形等因素手动划分子汇水区，最终管网排水系统共包含 278 个节点、282 根管道和 72 个子汇水区。结合片区下垫面透水特点将土地利用类型分为道路、建筑、裸土、绿地 4 种，参考《室外排水设计标准：GB 50014—2021》设定不同区域产流参数如表 1 所示。在研究区域内设定 2-D 区间，根据卫星影像图中的道路和建筑区位进行高程修正，边界条件设置为自由出流，由 DEM 数据生成 2-D 区间网格 158 590 个。

表 1 各类产流表面参数设定
Table 1 Setting of various flow producing surface parameters

产流表面	初期损失值	径流量类型	固定径流系数	初渗率/(mm·h ⁻¹)	稳渗率/(mm·h ⁻¹)	衰减系数	曼宁系数
道路	0.001 5	径流系数法	0.7				0.02
建筑	0.001 0	径流系数法	0.8				0.02
绿地	0.003 0	霍顿下渗法		60	3	3	0.20
裸土	0.005 0	霍顿下渗法		20	1	3	0.05

InfoWorks ICM 中子汇水区包含多种降水产汇流模型, 本次产流计算使用径流系数法和霍顿下渗法, 汇流部分使用非线性水库法。管网汇流模块的计算采用完全求解的圣维南方程组, 对超负荷情况下的压力管流模拟采用 Preissmann Slot 方法。洪水演进过程模拟采用 Godunov 有限体积格式求解二维浅水方程如下:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0$$

（1）

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(hu^2 + \frac{gh^2}{2}\right) + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = gh(S_{0x} - S_{fx})$$

（2）

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}\left(hv^2 + \frac{gh^2}{2}\right) = gh(S_{0y} - S_{fy})$$

（3）

式中: h 为水深; u 、 v 分别为 x 和 y 方向的流速分量; g 为重力加速度; S_{0x} 和 S_{fx} 分别为 x 方向的床面坡降和阻力坡降; S_{0y} 和 S_{fy} 分别为 y 方向的床面坡降和阻力坡降。

2.2 地下车库模型

现有模型没有直接的地下空间模块, 需要以等效概化的方式实现。地下车库的出入口设置为检查井, 根据小区物业规定, 设定防护标准为 1.2 m, 若水位超过 1.2 m 即防护措施失效, 出入口开始进水。通道概化为长方形管道, 管道长宽以及上下游高程根据实际尺寸高程设置, 坡降为 8%。

地下车库分 2 种方式模拟, 分别为概化蓄水池法和水力连通法, 将内部结构概化为等体积地下空间。概化蓄水池法: 将地下车库概化为节点蓄水池, 根据地下车库空间面积和高度来设置相应的蓄水池参数, 该方法模拟简便, 但仅以节点形式概化, 无水流演进过程。水力连通法: 根据地下车库的地理空间信息构建一个等效的 2-D 网格化区间, 与原有地表模型相连接, 该方式与地表模型的做法等同, 但需要设置水位最大高度代表顶部。地下空间进水来自地表的洪水, 不涉及降水的产汇流, 水流演进仍采用有限体积法求解二维浅水方程计算。模型计算结果表明(表 2), 模拟水深与实测基本一致, 受灾地下空间进水时刻在 15: 35, 蓄满时刻为 17: 07, 符合实际记录, 说明模型能够较为准确地反映出研究区域的内涝积水情况, 具有良好的合理性。

表 2 “7·20”暴雨内涝点最大积水深度统计
Table 2 Statistics of the maximum water depth of waterlogging points in rainstorm on July 20

内涝点位置	实测水深/m	模拟水深/m	相对误差/%
f 小区北门道路	2.1	2.10	0
f 小区操场	1.1	1.03	6.4
a 小区西道路	0.5	0.56	12.0
l 小区南门道路	0.5	0.49	2.0
c 小区东门道路	0.6	0.63	-5.0
k 小区北门道路	0.9	0.88	2.2

3 结果分析

3.1 受灾成因分析

涝水需经出入口通道流入地下空间, 出入口的防护效果直接影响地下内涝的发生, 研究选取最早失守的北出入口为代表分析受灾成因。经实际调研发现, 受灾小区北出入口处于区域相对较低位置, 且防护设施未设在地下通道最高点(图 2), 实际防护效果有一定降低。依据模型结果统计经该通道进入地下空间的洪水来源, 从园区内两侧道路来水约 5.8 万 m³, 占比为 55.2%; 园区外北门道路来水约 4.7 万 m³, 占比为 44.8%。

进一步地, 查看受灾小区地下内涝前的水深淹没过程(图 3), 7 月 20 日 6: 00, 小区内出现少量积水,

东和北道路普遍积水；9：00，小区内部积水汇集在北出入口附近；12：00，小区内出现较大范围积水，北出入口水深达到 1 m；15：00，小区内部水深普遍超过 0.2 m，北出入口水深接近防护标准。从北出入口附近道路分布和小区淹没过程可知，防护设施由于设置不当使得实际防洪高度低于 1 m，而出入口水深高于 1 m 的时段为 20 日 15：00 至 21 日 2：00，约 11 h，期间最高达到 1.56 m，3 股水流汇集所致防洪压力远超现有防护设施，因此，在当前条件下面对“7·20”暴雨，受灾小区地下内涝无法避免。

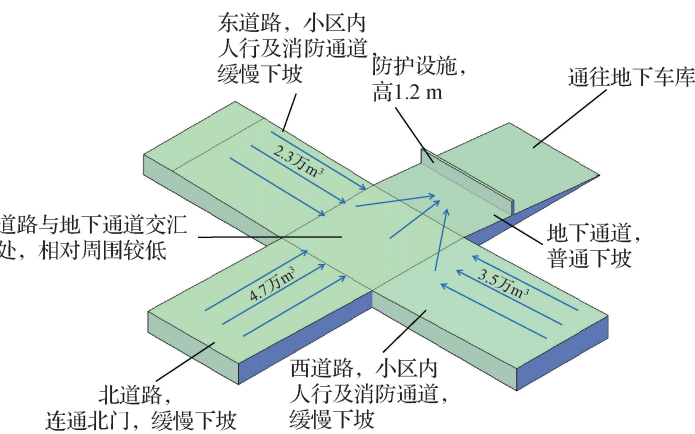


图 2 北出入口附近道路分布

Fig. 2 Distribution of roads near the north entrance

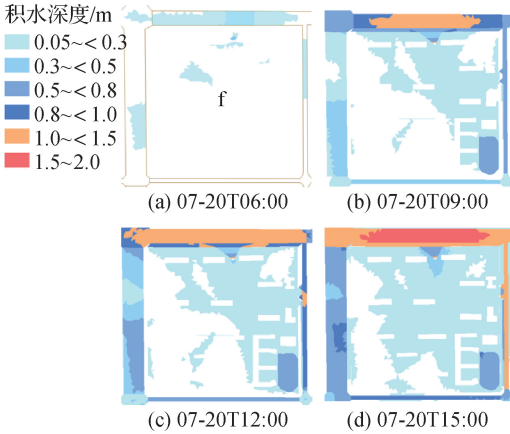


图 3 小区灾前水深变化

Fig. 3 Water depth changed before the disaster

3.2 地下空间内涝对地表洪水影响

地下空间内涝会影响到地表洪水过程，为捕捉这一影响，提取地表-地下联合模型(图 4(a))与单独地表模型(图 4(b))的地表最大淹没水深和洪量，前者情况下 f 小区普遍水深为 0.2 ~ 0.5 m，北门道路水深为 1.8 ~ 2.1 m，地表最大洪量为 92.8 万 m³；后者情况下 f 小区普遍水深为 0.5 ~ 0.8 m，北门道路水深普遍达到 2 m 以上，地表最大洪量为 106.6 万 m³。进一步计算绘制二者淹没水深之差(图 5)，地库进水使得出入口附近点位水深普遍下降 0.1 ~ 0.2 m，离受灾小区较远的园区和道路水深下降在 0.05 m 以下。

综上所述，f 小区地库进水能够降低附近地表的积水深度；地库内涝对地表最大洪量的削减效果仅为 12.9%，且进水后续需面临抽水、更换设备等一系列问题，不仅经济损失大，效果也有限。因此，依赖地下空间减灾并不可取，地下内涝应尽可能避免。

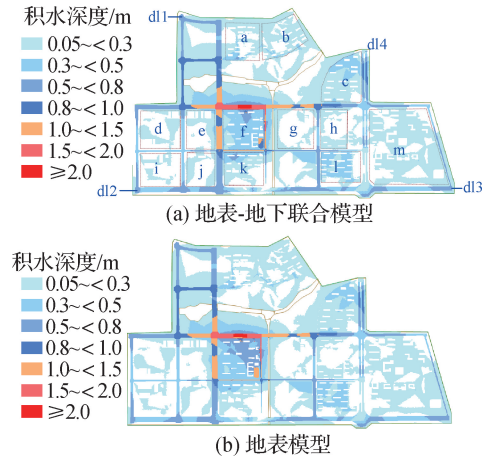


图 4 最大淹没水深对比

Fig. 4 Comparison of maximum submerged depth

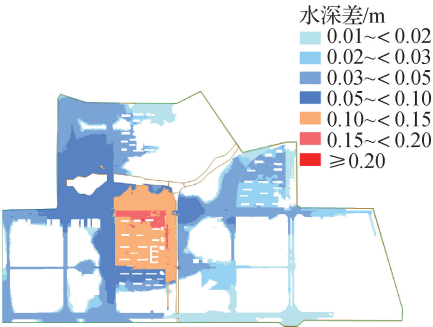


图 5 地表最大积水深度差值

Fig. 5 Differences of maximum surface water depth

3.3 模拟方式对比

对地下空间不同方式的模拟结果分析评估, 并对比。

(1) 概化蓄水池法模拟。以概化蓄水池法模拟受灾地下车库并查看进水时段, 车库于 20 日 15: 35 进水, 15: 42 地下 2 层蓄满, 17: 07 地下 1 层蓄满。提取分析地下车库 1 层的结果(图 6), 车库水位变化为 3 m, 体积变化为 18.1 万 m³; 水位和体积曲线在 16: 15 斜率显著上升, 原因是外部水位上涨、多个通道口灌水导致总体进水加快。这种模拟方式可直观快速得出受灾地下空间的平均水位和进水量变化, 在广泛区域的地表-地下联合模拟中, 能够迅速判别出淹没地下空间对地表水量的削减和分洪作用。

(2) 水力连通法模拟。水力连通法模拟受灾地下车库进水、蓄满时间与概化蓄水池法一致。该方法可计算车库内部不同位置水深变化(图 7)以及洪水流动过程(图 8), 结果表明, 地下 1 层进水从 15: 42 由北部起始, 经 11 min 漫延至整个区域; 在 16: 15 东入口进水, 总体进水加快, 曲线斜率显著提高; 不同位置水深的变化趋势等同。基于地下水深和流速分布可对不同位置的人员撤离时间进行分析, 以成人在地下 1 层自北向南的撤离为例, 依据水利行业标准《城市防洪应急预案编制导则: SL754—2017》^[14]中的风险指标, 将地下空间划分为 5 个区域, 可计算得出不同位置对应撤离时间(于图 8(d)中标注), 其中, F2 区域可供安全撤离时间最短, 路径也较长, F4 区域撤离风险最小。

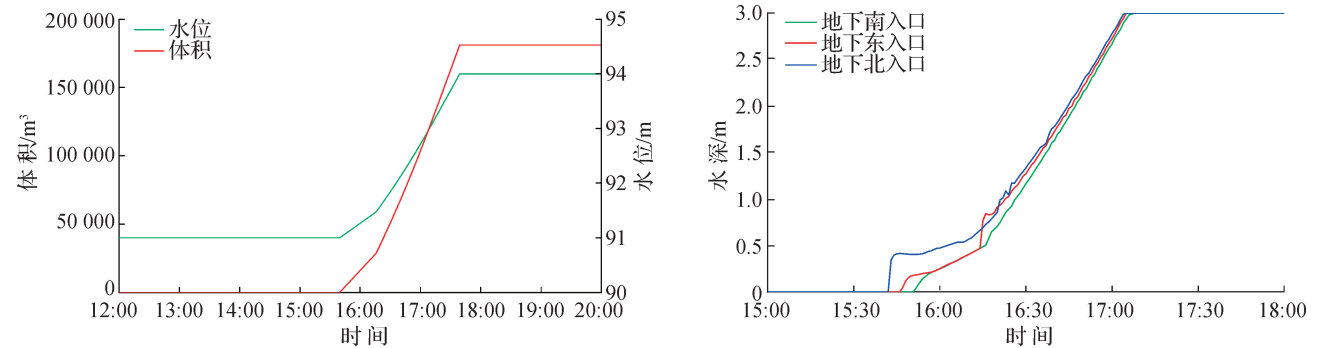
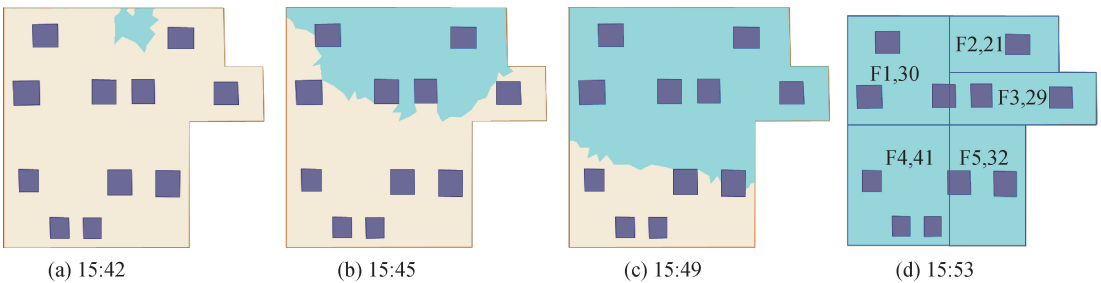


图 6 地下车库 1 层水位和体积变化

Fig. 6 Change of water level and volume of 1st floor underground garage

图 7 地下 1 层各入口水深变化

Fig. 7 Water depth changes at each inlet of underground 1 floor



注: FX,Y 中 FX 代表区域代号, Y 代表在产生风险前的撤离时间, 单位为 min。

图 8 地下空间内部洪水流动过程

Fig. 8 Flood flow process in underground space

3.4 地下空间内涝致灾降水分析

3.4.1 强降水时段对地下空间内涝影响

为评估强降水时段对地下内涝造成的影响, 设置以下 3 种降水情景进行模拟分析(图 9): 情景 1——“7 · 20”暴雨; 情景 2——无峰值长历时降水(取前期历时平均雨强代替 3 h 强降水时段); 情景 3——独立 3 h 强

降水时段。汇总模拟结果见图 10 和表 3。

情景 1 最早进水蓄满，受灾出入口数量最多，峰值流量最大，进水历时较短；情景 2 最晚进水蓄满，受灾出入口最少且进水流量也有限，进水历时最长；情景 3 仍发生了进水蓄满，受灾出入口数量和峰值流量均较多，进水历时最短，由图 10 可知，该情景的受灾时刻在雨强最大的 16：00—17：00，进水速度能很快达到并保持较高水平。由此可见，“7·20”暴雨从防洪角度处于非常不利的情况，前期累积降水较高，又出现了短时极强降水，两者都能造成地下空间洪涝损失。因此，需要从雨量、雨强等角度分别量化区域地下空间洪涝预警指标。

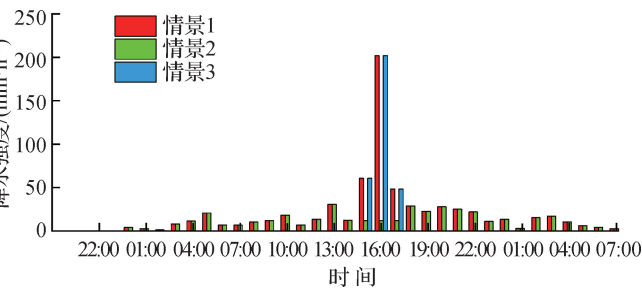


图 9 各情景下的降水事件

Fig. 9 Rainfall events under different scenarios

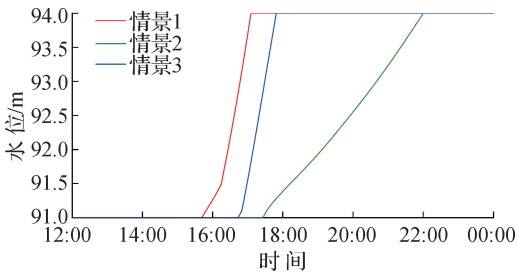


图 10 各情景下的地下 1 层水位变化

Fig. 10 Water level change of underground 1 layer under each scenario

表 3 不同情景模拟结果汇总

Table 3 Summary of simulation results of different scenarios

情景	降水量/ mm	最大雨强/ (mm·h ⁻¹)	进水时段		进水历时/min	各出入口峰值流量/(m·s ⁻¹)		
			地下 2 层	地下 1 层		北	东	东北
1	710.1	201.9	15：35—15：42	15：42—17：07	92	23.89	16.72	1.07
2	435.6	30.6	17：22—17：34	17：34—22：03	281	17.56	—	—
3	310.8	201.9	16：33—16：39	16：39—17：49	76	21.59	15.32	—

3.4.2 地下空间致灾降水推求

为及早预警严重洪涝事件，本研究从雨量、雨强和双致灾的角度^[15]对地下空间致涝降水标准进行推断。以往地下内涝极少发生，相关资料匮乏，故对一些发生过的典型暴雨同倍比放大作为可能发生的地下空间致灾降水，时间步长统一取“7·20”暴雨的步长 1 h。

通过 3.4.1 中分析可知，雨量致灾的特点是降水历时久、雨强相对不大，因此，采用 24 h 作为长历时雨量致灾的代表历时。导入降水资料如图 11 反复模拟计算直至地下内涝恰好发生，结果总结见表 4，降水历时 24 h 的情况下，致灾雨量为 251～312 mm。进一步结合雨型分布可知，雨型对致灾雨量有显著影响，降水在前期较集中的情况下对应致灾雨量较大，可达 312 mm；相同降水逆序排布后对应致灾雨量仅为 251 mm。

雨强致灾具有短历时、高强度的降水特征，“7·20”暴雨的强降水时段为 3 h，其中最大 1 h 降水占比 65.0%，选择 3 h 作为超强降水雨强致灾的代表历时，1 h 最大雨强为致灾指标。代表性雨强致灾降水经放大后对比研究，汇总结果见表 5。降水历时 3 h 的情况下，致灾雨强在 66～110 mm/h，进一步结合雨型分布可知，雨峰位置对致灾雨强影响较小；在雨峰位置固定的情况下，不同峰值倍比集中下的致灾雨强差异较大，总雨量相近且远低于雨量致灾标准，证明雨强过程对地下内涝标准有重要影响。从致灾标准和郑州本地强降水特征看，单一雨强致灾因素所致地下空间洪涝过程的可能性较低。

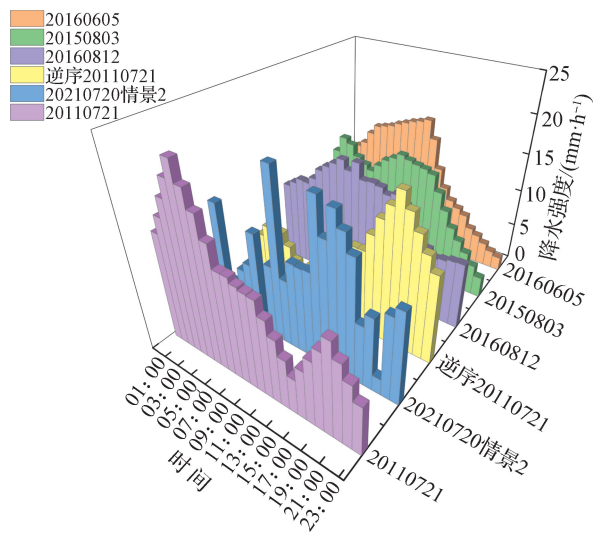


图 11 不同场次下的致灾雨量

Fig. 11 Disaster-causing rainfall under different fields

表 4 24 h 致灾雨量
Table 4 24 h disaster rainfall

暴雨雨型	降水特点	致灾雨量/mm
20110721	降水集中在前期	312
20210720 情景 2	降水集中在中后期	269
逆序 20110721	降水集中在后期	251
20160812	降水整体平稳	298
20150803	降水集中在中期	272
20160605	中期降水稳步上升	260

表 5 3 h 不同降水特点下致灾雨强

Table 5 3 h disaster-causing rainfall under different rainfall characteristics

暴雨雨型	降水特点	各时段降水量/mm			总降水量/mm	致灾雨强/ (mm · h ⁻¹)
		0 ~ 1 h	1 ~ 2 h	2 ~ 3 h		
20160801	雨峰位置靠后, 峰值倍比为 0.5	19.8	46.2	66.0	132	66
20180801	雨峰位置靠后, 峰值倍比为 0.65	8.2	37.8	86.0	132	86
20161108	雨峰位置靠后, 峰值倍比为 0.8	4.3	21.7	105.0	131	105
20130606	雨峰位置居中, 峰值倍比为 0.5	15.5	67.0	51.5	134	67
20210720 情景 3	雨峰位置居中, 峰值倍比为 0.65	25.9	87.0	21.1	134	87
20140619	雨峰位置居中, 峰值倍比为 0.8	21.6	107.0	5.4	134	107
20120827	雨峰位置靠前, 峰值倍比为 0.5	69.0	43.5	25.5	137	69
20170706	雨峰位置靠前, 峰值倍比为 0.65	89.0	38.0	9.0	136	89
20180810	雨峰位置靠前, 峰值倍比为 0.8	110.0	43.5	25.5	138	110

双致灾降水同时具备雨量累积和极端雨强的特点。结合现行暴雨预警信息, 在有一定前期降水的情况下推断不同预警等级下的致灾降水特征。取相对均匀的 20160812 场次降水作为前期降水雨型, 计算结果见表 6。随着预警等级的上升, 致灾雨强逐渐下降, 蓝色预警等级下的地下空间致灾雨强为 112 mm/h, 而红色预警等级下的致灾雨强仅为 43 mm/h, 此时需要密切关注地下空间的受灾。“7·20”暴雨不论在雨强和雨量方面都远远超过了当前下垫面状况下的地下空间受灾标准, 城市防洪需要更多的预案和扩展, 应重视和跟进地下空间洪涝的防洪和救灾。

表 6 不同预警等级下致灾雨强

Table 6 Disaster-causing rain intensity under different warning levels

预警等级	前期降水量/mm	致灾雨强/(mm · h ⁻¹)
蓝	50(12 h)	112
黄	50(6 h)	101
橙	50(3 h)	87
红	100(3 h)	43

4 结 论

本文以郑州市中原区某片区为例,基于 Infoworks ICM 提出城市洪涝的地表-地下联合模拟方式,还原了该片区地下空间受灾过程,评估了地下空间进水对地表内涝的影响。主要结论如下:

(1) 极端降水下地下空间的低洼入口处水位上涨快、水流来源广、高水位时间久,局地不合理的设计施工进一步增加了地下内涝风险,地下空间内涝对地表积水的减灾效果有限。

(2) 概化蓄水池法便于直接计算总进水量,适合大范围模拟快速找出受灾的地下空间;水力连通法可以查看水流在地下空间的演进过程和不同位置水深变化,适用于精细化整体模拟复杂区域受灾。

(3) 降水量累积和强降水时段均可造成地下空间的内涝,强降水时段地下空间进水较快;降水历时 24 h 的情况下,地下空间致灾雨量为 251 ~ 312 mm;历时 3 h 情况下的致灾雨强为 66 ~ 110 mm/h;双致灾暴雨红色预警下的致灾雨强仅为 43 mm/h。

参考文献:

- [1] 梅超,刘家宏,王浩,等. 城市下垫面空间特征对地表产汇流过程的影响研究综述[J]. 水科学进展, 2021, 32(5): 791-800. (MEI C, LIU J H, WANG H, et al. Comprehensive review on the impact of spatial features of urban underlying surface on runoff processes[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(5): 791-800. (in Chinese))
- [2] 徐宗学,陈浩,任梅芳,等. 中国城市洪涝致灾机理与风险评估研究进展[J]. 水科学进展, 2020, 31(5): 713-724. (XU Z X, CHEN H, REN M F, et al. Progress on disaster mechanism and risk assessment of urban flood/waterlogging disasters in China[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(5): 713-724. (in Chinese))
- [3] 宋晓猛,张建云,贺瑞敏,等. 北京城市洪涝问题与成因分析[J]. 水科学进展, 2019, 30(2): 153-165. (SONG X M, ZHANG J Y, HE R M, et al. Urban flood and waterlogging and causes analysis in Beijing[J]. Advances in Water Science, 2019, 30(2): 153-165. (in Chinese))
- [4] 国务院灾害调查组. 河南郑州“7.20”特大暴雨灾害调查报告[R]. 北京: 中华人民共和国应急管理部, 2022: 5-14. (Disaster investigation Team of The State Council. Investigation report on “7·20” rainstorm disaster in Zhengzhou City, Henan Province[R]. Beijing: Ministry of Emergency Management, PRC, 2022: 5-14. (in Chinese))
- [5] 郭元,李玉玲,王慧亮,等. 气象水文模型耦合的郑州城区内涝预警研究[J]. 水文, 2022, 42(4): 61-67. (GUO Y, LI Y L, WANG H L, et al. Research on the meteorological and hydrological coupling models on early warning of urban waterlogging in Zhengzhou[J]. Journal of China Hydrology, 2022, 42(4): 61-67. (in Chinese))
- [6] 张红萍,李敏,贺瑞敏,等. 城市洪涝模拟应用场景及相应技术策略[J]. 水科学进展, 2022, 33(3): 452-461. (ZHANG H P, LI M, HE R M, et al. Application scenarios and corresponding technical strategies of urban flood modeling[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(3): 452-461. (in Chinese))
- [7] 徐宗学,叶陈雷. 城市暴雨洪涝模拟: 原理、模型与展望[J]. 水利学报, 2021, 52(4): 381-392. (XU Z X, YE C L. Simulation of urban flooding/waterlogging processes: principle, models and prospects[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(4): 381-392. (in Chinese))
- [8] 黄国如,罗海婉,陈文杰,等. 广州东濠涌流域城市洪涝灾害情景模拟与风险评估[J]. 水科学进展, 2019, 30(5): 643-652. (HUANG G R, LUO H W, CHEN W J, et al. Scenario simulation and risk assessment of urban flood in Donghaochong basin, Guangzhou[J]. Advances in Water Science, 2019, 30(5): 643-652. (in Chinese))
- [9] 袁绍春,王怀望,吕波,等. 基于 InfoWorks_ICM 模型的山地城市老旧建筑小区海绵化改造方案设计 & 评估[J]. 水资源保护, 2020, 36(5): 43-49, 70. (YUAN S C, WANG H J, LYU B, et al. Design and evaluation of sponge city reconstruction scheme for old building district in mountainous city based on InfoWorks_ICM model[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(5): 43-49, 70. (in Chinese))
- [10] CHEN W T, WU H, KIMBALL J S, et al. A coupled river basin-urban hydrological model (DRIVE-urban) for real-time urban flood modeling[J]. Water Resources Research, 2022, 58(11): 1-19.
- [11] SHIN E, KIM H J, RHEE D S, et al. Spatiotemporal flood risk assessment of underground space considering flood intensity and

- escape route[J]. *Natural Hazards*, 2021, 109(2): 1539-1555.
- [12] NAKASAKA Y, ISHIGAKI T. Vulnerability to mega underground inundation and evacuation assuming devastating urban flood [J]. *Journal of Disaster Research*, 2021, 16(3): 321-328.
- [13] 陈峰, 刘曙光, 刘微微. 城市地下空间地面洪水侵入成因和特征分析[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(2): 38-43. (CHEN F, LIU S G, LIU W W. Causes and characteristics of flooding in urban underground space[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2018, 35(2): 38-43. (in Chinese))
- [14] 中华人民共和国水利部. 城市防洪应急预案编制导则: SL 754—2017[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2017: 2-7. (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Guidelines for the formulation of urban flood emergency plan: SL 754—2017[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2017: 2-7. (in Chinese))
- [15] 韩亚静, 吴泽宁, 郭元, 等. 芝加哥雨型与城市灾害性降水的比较研究[J]. 人民长江, 2022, 53(5): 35-40, 52. (HAN Y J, WU Z N, GUO Y, et al. Comparative study on Chicago rainstorm pattern and urban disastrous precipitation[J]. *Yangtze River*, 2022, 53(5): 35-40, 52. (in Chinese))

Simulation of the flood process in urban surface-underground space under extreme rainfall*

GUO Yuan¹, WANG Luyao¹, CHEN Nengzhi², JIN Juxiang³

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Fujian Provincial Investigation, Design & Research Institute of Water Conservancy & Hydropower, Co. Ltd, Fuzhou 350000, China; 3. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350100, China)

Abstract: Urban waterlogging due to extreme precipitation presents an increasingly serious challenge. Pooling of large volumes of surface water can result in flooding of underground spaces. However, there remains limited studies on flooding of underground spaces through the application of hydrological and hydrodynamic models. This study examined flooding in an urban district of Zhengzhou City, China during an extreme rainstorm event on 20th July, 2021. An integrated simulation model of regional surface and underground spaces was established based on InfoWorks Integrated Catchment Model (ICM) software. The generalized reservoir and hydraulic connectivity methods were used to simulate underground spaces. Factors contributing to the initiation and development of flooding of underground spaces were analyzed. The results showed that underground waterlogging was less conducive to alleviation of surface water ponding. The advantages of the generalized reservoir method were shown to be its relative simplicity and feasibility, whereas that of the hydraulic connection method was its detailed representation of underground flooding. Both the cumulative quantity of rainfall and rainfall intensity were shown to have important effects on underground inundation. The results of this study can help to improve urban stormwater forecasting and warning systems, and provide a theoretical basis for regional disaster prevention and reduction.

Key words: extreme rainfall; underground space; integrated surface-underground space simulation; urban waterlogging; disaster causing rainfall

* The study is financially supported by the National Key R&D Program of China (No. 2022YFC3090601) and Key Research Project of Colleges and Universities in Henan Province, China (No. 23A170003).