

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.06.005

基于情景模拟的城市内涝对道路交通的影响评估

梅超¹, 陈宇枫^{1,2,3}, 刘家宏^{1,4}, 王浩^{1,4}, 王东¹, 邵薇薇¹

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

2. 北京大学建筑与景观设计学院, 北京 100080; 3. 中国长江三峡集团有限公司长江生态环境工程研究中心, 北京 100038; 4. 水利部水资源与水生态工程技术研究中心, 北京 100044)

摘要:以上海市中心城区为例, 构建了城市内涝淹没数值模型, 用于模拟 50 年一遇和 100 年一遇设计暴雨情景下的内涝, 结合道路淹没模拟结果与车速衰减计算方法, 叠加车速衰减结果与城市道路通行状态模拟, 获取不同设计暴雨情景下高峰期和平峰期研究区路网运行状态。结果表明: 城市内涝会导致道路交通服务水平显著下降, 且道路运行状态与时段密切相关; 高峰期内涝对道路交通的影响更加显著, 主要表现为低服务水平的道路数量占比显著增加; 50 年一遇和 100 年一遇设计暴雨情景下, 高峰期研究区道路平均通行速度较平峰期分别下降 19.3% 和 37.4%。

关键词:城市内涝; 道路交通; 车速衰减; 高峰期; 平峰期; 上海市

中图分类号:TV122 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)06-0031-08

Impact assessment of urban waterlogging on road traffic based on scenario simulation//MEI Chao¹, CHEN Yufeng^{1,2,3}, LIU Jiahong^{1,4}, WANG Hao^{1,4}, WANG Dong¹, SHAO Weiwei¹ (1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. School of Architecture and Landscape Design, Peking University, Beijing 100080, China; 3. YANGTZE Eco-Environment Engineering Research Center, China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China; 4. Water Resources and Water Ecological Engineering Technology Research Center, Ministry of Water Resources, Beijing 100044, China)

Abstract: Taking the central urban area of Shanghai City as an example, a numerical model of urban waterlogging inundation was constructed to simulate the waterlogging under the design rainstorm scenarios with return period of 50 a and 100 a. Combining the simulation results of road inundation and the calculation method of vehicle speed attenuation, the superposition of vehicle speed attenuation results and the simulation of urban road traffic status can obtain the road network operation status of the study area in peak and flat hump periods under different design rainstorm scenarios. The results show that urban waterlogging will significantly reduce the level of road traffic service, and the road operation state is closely related to the time period. The impact of waterlogging on road traffic is more significant during the peak period, which is mainly reflected by the significant increase in the number of road sections with low service levels. Under the design rainstorm scenarios with return period of 50 a and 100 a, the average road traffic speed in the peak period decreased by 19.3% and 37.4% respectively compared with the flat hump period.

Key words: urban waterlogging; road traffic; vehicle speed attenuation; peak period; flat hump period; Shanghai City

近年来, 极端天气事件频繁发生, 许多城市发生严重内涝, “城市看海”现象几乎每年都出现, 造成重大社会影响和经济损失, 引起各界高度关注^[1-2]。2021 年, 我国发生了多起造成人员伤亡的城市内涝事件。7 月 20 日, 郑州最大 1 h 降水量达到 201.9

mm, 城市大范围严重积水, 部分低洼路段发生人员伤亡; 8 月 16 日晚, 北京遭遇局地强降雨, 一路段严重积水, 致 2 名驾车涉水被困人员不幸遇难; 9 月 4 日, 天津市强降雨短时导致一路段严重积水, 致使 1 名驾驶员不幸遇难。频发的城市内涝灾害和人员伤

基金项目: 国家自然科学基金(51739011, 52009139); 国家重点研发计划(2018YFC1508203); 流域水循环模拟与调控国家重点实验室资助团队重点项目(SKL2020ZY03)

作者简介: 梅超(1991—), 男, 工程师, 博士, 主要从事城市水文与智慧水利研究。E-mail: meichao@iwhr.com

通信作者: 刘家宏(1977—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: liujh@iwhr.com

亡事件造成了巨大损失,使得城市管理者 and 广大民众进一步认识到加强城市内涝管理的必要性和重要性^[3]。

大量城市内涝事件和灾害损失分析表明,城市内涝致灾的原因之一是内涝破坏了城市交通系统^[4],特别是城市道路交通。因此,缓解城市内涝灾害的关键之一,在于有效降低内涝对道路交通系统的影响^[5-6]。针对城市内涝对交通的影响相关研究较少,近几年逐渐受到更多关注,如赖雯洁^[7]开展了基于人口和交通动态模拟的暴雨内涝影响下城市应急服务可达性评价;张丽佳^[8]开展了城市道路交通系统内涝灾害韧性测度研究;易嘉伟等^[9]基于大数据分析了极端暴雨事件下城市道路交通时空响应;Singh 等^[10]开展了城市洪涝下的城市路网脆弱性评估;Yin 等^[11]分析了不同暴雨情景下城市内涝对路网的影响。有关研究主要聚焦内涝下道路风险评估和脆弱性评价等方面^[12-13],相关研究对于城市内涝条件下的交通管理具有重要意义。

本文基于上海市内涝和交通情景模拟及其叠加分析,评估城市内涝对道路交通的影响,以期通过评估加深城市内涝对于道路交通影响的规律性认识,为优化城市内涝下道路交通管理及降低城市内涝灾害损失提供科学参考。

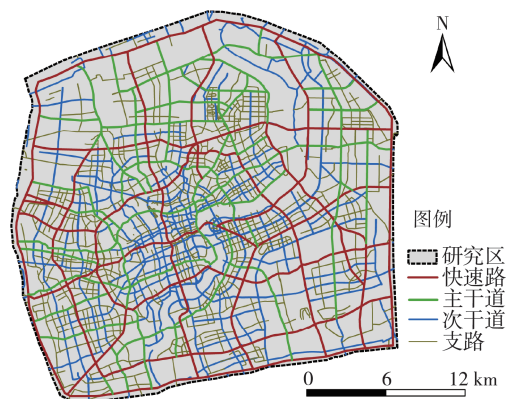
1 研究区概况与研究数据

1.1 研究区概况

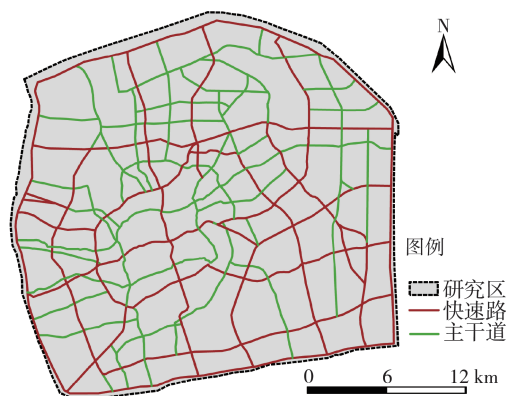
上海市位于长江入海口,整体地势低洼且平坦,平均海拔 2.19 m,城市总面积约为 6340.5 km²,截至 2020 年底,常住人口 2 487 万人,城市化率约为 88%。上海市多年平均降水量约 1 200 mm,其中约 70% 集中在汛期,洪涝灾害较为严重。本文研究区为上海市中心城区,其范围根据《上海市城市总体规划(2017—2035 年)》确定,面积约为 667 km²。研究区承载着上海市主要的经济社会活动和密集的人口,对高质量交通需求迫切,优化该区域内涝条件下的城市交通管理,开展城市内涝对道路交通的影响评估,具有一定的典型性和重要意义。

1.2 数据收集与处理

a. 城市路网数据。城市道路矢量数据在开放地图公开数据中获取,经裁剪、校准和调整,得到研究区城市路网数据如图 1(a)所示。由于原始路网较复杂,在建模过程中采用简化的城市路网数据,只保留快速路和主干道,简化后的路网如图 1(b)所示。



(a) 原始路网



(b) 简化路网

图 1 研究区路网分布

Fig. 1 Road network distribution in study area

b. 城市排水管网数据。由于大范围城市排水管网数据难以获取,本文采用类比概化的方法生成管网数据,将研究区的快速路和主干道按照一定规则概化为主干排水管网和节点^[14]。研究区排水管网系统一共概化为 1 086 个节点、1 749 条管道和 143 个排水口。根据《室外排水设计规范》等规范,结合研究区实际情况,赋予管管网径、坡度和埋深等属性数据,并构建拓扑管网关系。

c. 高程和土地利用数据。高程数据主要用于构建地表淹没模块,来源于 2019 年发布的 ASTER GDEM v3 开放数据,数据分辨率为 30 m,如图 2(a)所示。土地利用数据来源于文献公开发布的数据^[15],如图 2(b)所示,主要用于确定模型下垫面参数。

2 研究方法

2.1 城市内涝淹没模型构建

2.1.1 SWMM 与地表淹没模块耦合模型

SWMM(storm water management model)^[16-18]是城市暴雨洪涝模拟中广泛应用的一款模型,该模型具有城市地表产汇流模拟和地下管网汇流模拟功能。由于 SWMM 无法直接进行地表淹没过程模拟,

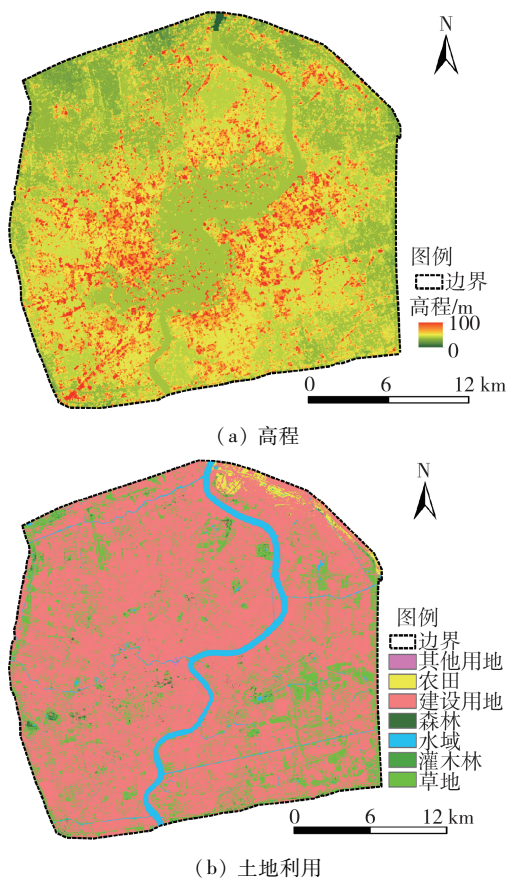


图2 研究区高程和土地利用分布

Fig.2 Distribution of elevation and land use in study area 为了拓展模型在城市内涝模拟中的应用,需开发 SWMM 与地表淹没模块耦合模型^[19]。

城市内涝模拟中管网与地表耦合模拟方法较为成熟^[20],其中,地表二维水动力淹没模拟中采用完全的水动力学方法具有物理机制强、计算精度高的优点,但计算效率较低^[21],在大范围研究区应用存在一定困难。本文为提升计算效率,城市地表淹没基于改进的地形淹没算法进行计算^[22],其基本假设:在地表高程网格中,允许水流流向正东、北、西和南4个方向,采用曼宁公式进行地表不同网格之间的水流交换计算,基于高程网格逐步迭代,实现水流基于高程地表淹没过程模拟^[23]。SWMM 的管网水流模拟与地表淹没模块间的耦合采用经验公式计算,记地面高程为 Z_{2D} ,二维模拟得到的地表水位为 h_{2D} ,一维节点水头为 h_{1D} ,则根据地面高程、积水深和节点水头三者高低关系的不同,管道节点与地表水量交换分可为3种交换情况,分别采用不同的水量交换算法^[24]。SWMM 与地表淹没模块耦合模型计算流程如图3所示,其中 T 为模拟时间。

2.1.2 研究区城市内涝淹没模型构建

以管网节点为基础划分子汇水区,经划分、调整和合并,将研究区划分成1343个子汇水区。结合相关研究结果^[25]和研究区特征等实际情况,根据模

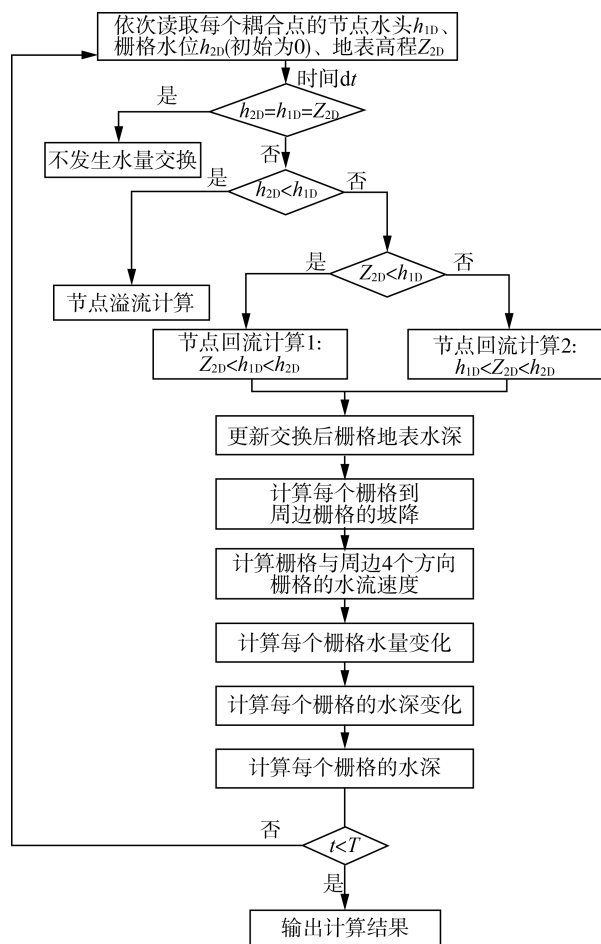


图3 耦合模型计算流程

Fig.3 Calculation flow chart of coupling model

型手册推荐的取值范围,确定模型参数。基于研究区高程数据,构建城市地表淹没模块,结合 SWMM 模型,实现研究区城市内涝淹没过程模拟。

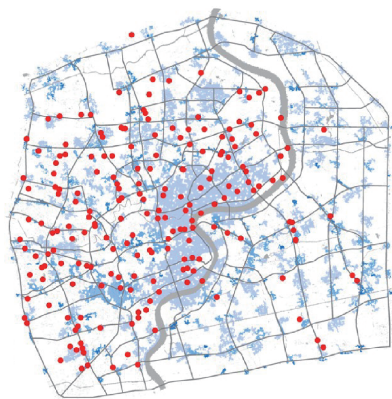
为验证模型合理性,将构建的模型用于50年一遇和100年一遇设计暴雨情景模拟,得到研究区积水分布图,将研究区范围内的历史易涝点位置与淹没分布图模拟结果叠加,结果如图4所示。从图4中可以看出二者重合度较高,一定程度上表明所构建的模型模拟结果与实际内涝情况较为吻合。基于合理性综合分析表明,本文初步构建的城市内涝模型基本合理,可用于研究区情景模拟。

2.1.3 设计暴雨情景

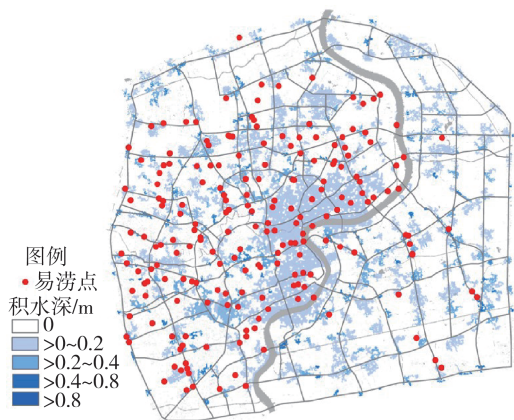
根据 DB31/T—1043《上海市暴雨强度公式与设计雨型标准》,研究区暴雨强度公式为

$$q = \frac{1600(1 + 0.846 \lg P)}{(t + 7.0)^{0.656}} \quad (1)$$

式中: q 为设计降雨强度, mm/min; P 为降雨重现期, a; t 为降雨历时, min。基于式(1),采用芝加哥雨型^[26-27],获得50年一遇和100年一遇2h设计暴雨过程,降水总量分别为117.6 mm和129.9 mm,雨峰系数为0.4,结果如图5所示。



(a) 50 年一遇



(b) 100 年一遇

图 4 不同设计暴雨情景下积水模拟结果与易涝点重合情况

Fig. 4 Overlap of waterlogging simulation results and waterlogging prone points under different design rainstorm scenarios

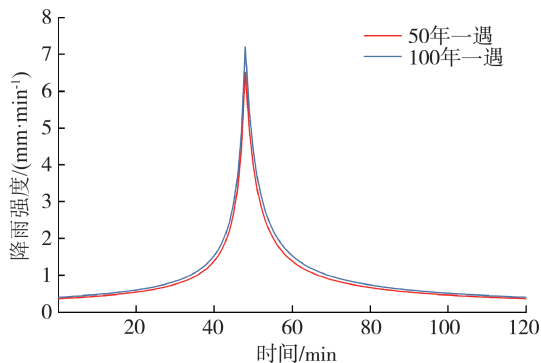


图 5 50 年一遇和 100 年一遇设计暴雨过程

Fig. 5 Design rainstorm process with return period of 50 a and 100 a

2.2 城市路网通行状态模拟

基于交通规划软件 TransCAD 对研究区路网通行状态进行模拟,根据定义的数据在软件中进行交通分配,以获取高峰时段和平峰时段交通状态模拟结果^[19,28]。表 1 为模拟得到的常态下高峰和平峰期研究区路网服务水平统计结果,其中道路服务水平分级根据道路交通饱和度进行划分。道路交通饱

和度为道路实际载流量与饱和通行能力的比值^[19],根据 JTGB 01—2014《公路工程技术标准》并结合实际情况,按该比值大小的不同区间,划分为 6 级道路服务水平:该比值小于 0.6 为自由流(A),0.6~0.8 之间为稳定流(B),0.8~1.0 之间为稍有延误的稳定流(C),1.0~1.2 之间为接近不稳定流(D),1.2~1.4 之间为不稳定流(E),大于 1.4 为阻塞的交通流(F)。结果表明,模拟得到的城市道路通行速度与设计速度统计结果呈显著的正相关关系^[19],交通状态模拟结果可用于本研究。

表 1 高峰和平峰期研究区道路服务水平统计结果

Table 1 Statistical results of road service levels in study area during peak and flat hump periods

道路服务水平	道路数量/条		平均通行速度/(km·h ⁻¹)	
	高峰期	平峰期	高峰期	平峰期
A	149	295	67.3	68.3
B	19	4	65.9	73.1
C	19	6	54.5	65.6
D	17	5	41.4	58.6
E	21	8	32.1	52.3
F	111	18	23.2	34.6

2.3 城市内涝对交通的影响评估方法

城市道路积水对行车速度有较大影响,会降低城市路网通行效率,杜磊等^[29]提出了积水深度和行车速度的关系表达式:

$$v = \frac{v_0}{2} \tanh\left(\frac{a-x}{b}\right) + \frac{v_0}{2} \quad (2)$$

式中: v 为车辆速度,km/h; v_0 为该地点的设计车速,km/h; x 为积水深度,cm; a 为使车辆停滞的临界积水深度的中值,cm; b 为衰减弹性系数,表示车速随水深衰减的速率,一般取 3~5, b 的取值越小则速度衰减越快。采用上述公式计算道路积水对行车速度的影响,本研究取 $a=15$ 、 $b=4$ ^[14]。

当积水深度达到 30 cm 时,导致行驶的车辆熄火,的概率较高,可认为道路中断,通行速度为 0。对于小于 30 cm 的道路积水,采用上述公式计算速度衰减。将淹没模拟结果与交通状态模拟结果叠加,把衰减后的车速输入 TransCAD 软件中,保持其他参数和条件不变,再次进行交通状态模拟,获得受影响后的交通状态模拟结果,将其与常态下的状态进行对比,以评估内涝对道路交通的影响^[19]。

3 结果与分析

3.1 不同设计暴雨情景下城市内涝模拟

将研究区城市内涝积水分布图与主干道路分布图叠加,得到研究区主干道路积水分布,如图 6 所示,可以看出,在 50 年和 100 年一遇设计暴雨情景下,

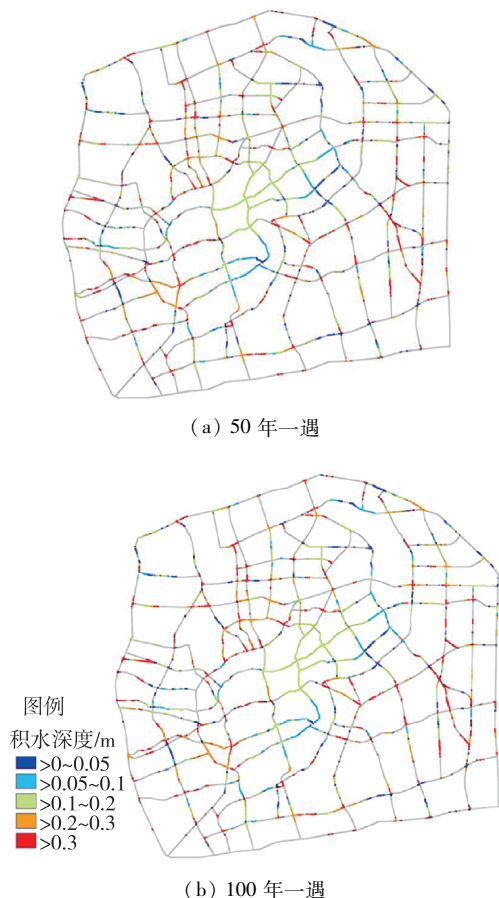


图6 不同设计暴雨情景下研究区主干道路积水情况
Fig. 6 Situation of main road ponding in study area under different design rainstorm scenarios

由于暴雨造成的积水无法及时排除,研究区道路存在不同程度积水,且分布较为广泛,表明内涝可能会对城市交通产生影响。

表2为50年一遇和100年一遇设计暴雨情景下,不同积水深度等级的道路数量、道路长度和积水面积。分析可知,在50年一遇设计暴雨情景下,0.1~0.2 m积水深度区间的积水面积最大,占总积水面积的比例达33.7%;而积水道路数量最多的则是0~0.1 m积水区间,该区间积水道路数量为178段,占总积水道路数量的53.0%;积水道路

长度占比最大的为0.1~0.2 m积水区间,积水深度在该区间的道路长度为89.6 km,占总积水道路长度的34.5%。与50年一遇设计暴雨情景相比,100年一遇设计暴雨情景下,积水面积、积水道路数量和积水道路长度的增长不明显。但各不同积水深度区间的占比结构发生了较大变化,从积水面积来看,在100年一遇情景下积水面积的变化主要表现为0.3 m以上的积水面积有较大增加,而其他积水深度区间变化不大;对积水道路数量而言,100年一遇情景下,较深积水区间的道路数量占比显著增加,如0.3 m以上积水道路数量占比从8.9%增加到39.9%;而积水道路长度占比结构则无明显变化,主要表现为较深积水区间道路长度占比略有增长。上述分析表明,研究区50年一遇和100年一遇设计暴雨情景下,道路均会显著积水,而随着设计重现期的增加,因降雨强度增加,道路积水结构特征会发生变化,主要表现为较深积水道路数量呈增加趋势。

3.2 城市内涝对道路服务水平的影响评估

城市交通运行状态在高峰期和平峰期有较大差异,高峰期城市路网道路服务水平较平峰期明显下降,同时同一级服务水平下的道路,其通行速度也明显降低。由于城市交通路网是一个复杂巨系统,外部扰动的输入可能使其运行状态产生系列连锁反应,其影响具有非线性特征。图7和图8分别给出了高峰期和平峰期不同暴雨情景下研究区道路服务水平分布,可以看出,同一时段内,100年一遇暴雨情景下的拥堵水平要明显高于50年一遇情景,这是由于降雨强度越大造成道路积水越多导致的。进一步地,高峰期较平峰期而言,拥堵水平明显较高,特别是F级道路的数量要明显高于平峰期,高峰期是城市路网交通最为繁忙时间段,在此时间段内发生城市内涝造成道路积水,将对城市交通产生重要连锁影响,使原本交通负荷就较大的城市路网更加拥堵。

表2 不同设计暴雨情景下内涝统计结果

Table 2 Statistics results of waterlogging under different design rainstorm scenarios

暴雨情景	积水深度/m	积水面积		道路数量		道路长度	
		面积/km ²	占比/%	数量/条	占比/%	路长/km	占比/%
50年一遇	>0~0.1	4.24	26.9	178	53.0	69.41	26.7
	>0.1~0.2	5.32	33.7	93	27.7	89.6	34.5
	>0.2~0.3	3.10	19.6	35	10.4	51.03	19.6
	>0.3	3.12	19.8	30	8.9	49.83	19.2
100年一遇	>0~0.1	3.94	24.8	30	8.9	64.33	24.6
	>0.1~0.2	5.32	33.5	87	25.9	89.98	34.5
	>0.2~0.3	3.16	19.9	85	25.3	52.11	20.0
	>0.3	3.45	21.7	134	39.9	54.74	21.0

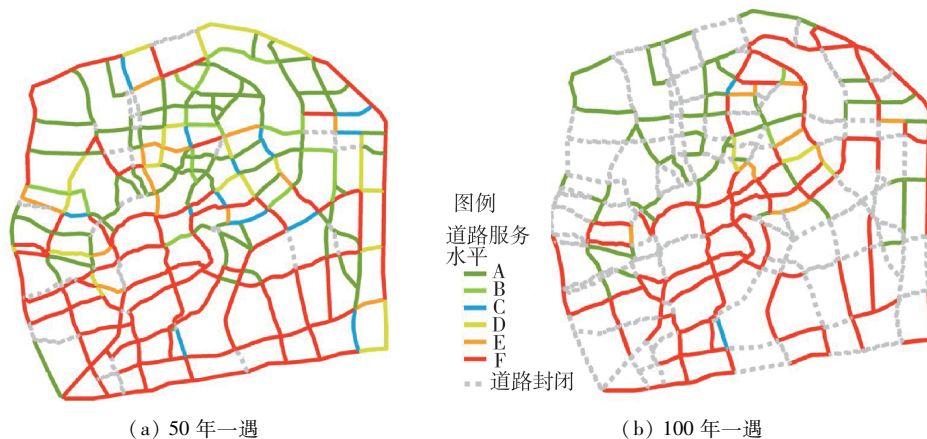


图 7 高峰期暴雨情景下研究区道路服务水平分布

Fig. 7 Road service level under rainstorm scenario in study area during peak period

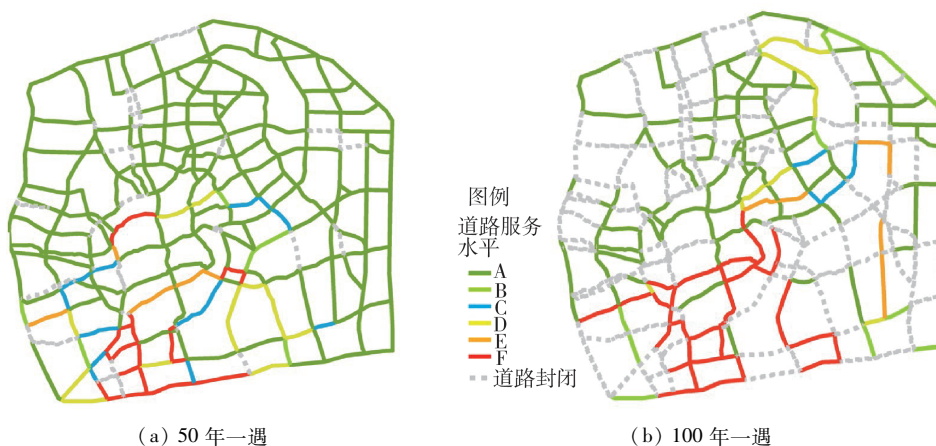


图 8 平峰期暴雨情景下研究区道路服务水平分布

Fig. 8 Road service level under rainstorm scenario in study area during flat hump period

表 3 为高峰期和平峰期城市内涝对道路服务水平的影响统计结果,可以看出,在高峰期 50 年一遇情景下,A、B、C、D、E、F 6 个等级服务水平的道路数量表现为:A、C、E 级服务水平的道路相较于常态下分别减少了 39 条、4 条和 5 条,B、D、E 级服务水平的道路则分别增加了 1 条、7 条和 10 条,道路中断的数量为 30 条;在高峰期 100 年一遇情景下,拥堵水平较 50 年一遇设计暴雨情景进一步加剧,不仅道路中断的数量由 30 条增加至 134 条,而且 A、B、C

级服务水平的道路数量显著减少,同时,各等级服务水平的道路数量平均通行速度亦显著下降,A、B、C、D、E、F 6 个服务水平的道路平均通行速度较常态下分别下降 77.7%、84.4%、69.9%、48.6%、9.7% 和 80.6%。平峰期城市内涝对道路服务水平的影响总体上与高峰期趋势一致,特别是中断道路数量并未发现变化,50 年一遇设计暴雨情景下均为 30 条,而 100 年一遇设计暴雨情景下均为 134 条,主要差异在于拥堵水平的进一步增加和不同等级服务水平道

表 3 高峰期和平峰期城市内涝对道路服务水平的影响统计结果

Table 3 Statistics results of impacts of urban waterlogging on road service levels during peak and flat hump periods

道路服务水平	道路数量/条						平均通行速度/(km · h ⁻¹)					
	高峰期			平峰期			高峰期			平峰期		
	常态	P = 50 a	P = 100 a	常态	P = 50 a	P = 100 a	常态	P = 50 a	P = 100 a	常态	P = 50 a	P = 100 a
A	149	110	62	295	249	120	67.3	29.9	15.0	68.3	46.5	21.9
B	19	20	3	4	6	21	65.9	60.6	10.3	73.1	64.3	30.6
C	19	15	3	6	14	4	54.5	51.7	16.4	65.6	57.1	52.0
D	17	24	6	5	11	10	41.4	50.0	21.3	58.6	55.8	33.7
E	21	16	11	8	4	8	32.1	31.2	29.0	52.3	26.4	11.2
F	111	121	117	18	22	39	23.2	14.1	4.5	34.6	18.2	4.7
道路封闭		30	134		30	134						

路的结构变化。通过数据对比可以发现,相较于高峰期,平峰期 F 级服务水平的道路数量减少,而 A 级服务水平的道路数量增加。总体对比可以发现,50 年一遇和 100 年一遇设计暴雨情景下,高峰期研究区道路平均通行速度较平峰期分别低 19.3% 和 37.4%。

3.3 讨论

从上述结果来看,情景模拟的结果反映的总体趋势比较合理,与实际情况和理论推断有一定相符性,基本说明本研究采用的方法是合理的,能够初步实现基于情景模拟的城市内涝对道路交通的影响评估,以获取一些规律性认知。但研究存在一些局限,还有待进一步深化,主要是建模采用数据精度较低以及模拟结果存在部分异常等。一方面,内涝模拟结果整体偏严重,从模拟结果可以看出,内涝情景模拟得到的道路淹没情况较严重,尽管空间上较为符合,但积水深度等与实际情况存在较大差异,这可能与模型基础数据概化以及地表淹没模拟所采用的高程数据精度不高有关。研究所用管网数据是采用路网数据概化的,因此水量交换节点与道路高度重合,而且数字高程数据精度较低,这是导致模拟结果道路积水较为严重的重要原因。该不利因素需要在今后的研究中,结合数据精度的提高进一步优化。另一方面,模型模拟结果存在一定的不确定性,例如高峰期 50 年一遇设计暴雨情景下,仅有 D 级道路平均通行速度较常态下有所增加,而其他均为下降,这与实际情况和理论推断在一定程度上是不相符的,初步分析表明,可能与外部干扰输入情况下城市路网交通状态模拟的复杂响应有关,或表明模型存在一定的不确定性,尚需要在进一步深化研究中,结合多种输入下的复杂交通状态模拟,进行深入研究。

4 结论

a. 暴雨内涝可导致上海中心城区道路产生明显积水,随着设计暴雨重现期由 50 a 增加到 100 a,淹没路段数仅有少量增加,但道路积水的结构性特征变化较大,0.3 m 以上积水道路段数从 8.9% 增加到 39.9%。

b. 高峰期道路内涝积水对研究区道路交通的影响明显甚于平峰期,主要表现为拥堵水平高的道路段数占比增加,且整体通行速度降低,50 年一遇和 100 年一遇设计暴雨情景下,高峰期研究区道路平均通行速度较平峰期分别低 19.3% 和 37.4%。

参考文献:

[1] 陆海明,邹鹰,孙金华,等. 基于 SWMM 的铁心桥实验

基地内涝防治效果模拟[J]. 水资源保护,2020,36(1):58-65. (LU Haiming,ZOU Ying,SUN Jinhua,et al. Simulation of waterlogging control effect in Tiexinqiao experimental base based on SWMM[J]. Water Resources Protection,2020,36(1):58-65. (in Chinese))

[2] 张建业,王银堂,贺瑞敏,等. 中国城市洪涝问题及成因分析[J]. 水科学进展,2016,27(4):485-491. (ZHANG Jianyun,WANG Yintang,HE Ruimin,et al. Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China[J]. Advances in Water Science,2016,27(4):485-491. (in Chinese))

[3] 冯钧,王云峰,邬炜,等. 城市内涝事理图谱构建方法及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(6):479-487. (FENG Jun,WANG Yunfeng,WU Wei,et al. Construction method and application of event logic graph for urban waterlogging[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(6):479-487. (in Chinese))

[4] PAPILOU T,ROTHLISBERGER V,LORETI S,et al. Flood exposure analysis of road infrastructure: comparison of different methods at national level[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction,2020,47:101548.

[5] 宋英华,李玉枝,霍非舟,等. 城区内涝条件下城市公交-地铁双层交通网络的脆弱性分析[J]. 安全与环境工程,2021,28(2):114-120. (SONG Yinghua, LI Yuzhi, HUO Feizhou,et al. Vulnerability of two-layer traffic network of bus and subway under waterlogging condition based on complex network theory[J]. Safety and Environmental Engineering,2021,28(2):114-120. (in Chinese))

[6] MORELLI A B,CUNHA A L. Measuring urban road network vulnerability to extreme events:an application for urban floods[J]. Transportation Research: Part D,2021,93:102770.

[7] 赖雯洁. 暴雨内涝影响下城市应急服务可达性评价:基于人口和交通动态模拟[D]. 上海:华东师范大学,2020.

[8] 张丽佳. 城市道路交通系统内涝灾害韧性测度研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2020.

[9] 易嘉伟,王楠,千家乐,等. 基于大数据的极端暴雨事件下城市道路交通及人群活动时空响应[J]. 地理学报,2020,75(3):497-508. (YI Jiawei,WANG Nan,QIAN Jiale,et al. Spatio-temporal responses of urban road traffic and human activities in an extreme rainfall event using big data[J]. Acta Geographica Sinica,2020,75(3):497-508. (in Chinese))

[10] SINGH Prasoon,SINHA Vinay Shankar Prasad,VIJHANI Ayushi,et al. Vulnerability assessment of urban road network from urban flood[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction,2018,28:237-250.

[11] YIN Jie,YU Dapeng,YIN Zhane,et al. Evaluating the

- impact and risk of pluvial flash flood on intra-urban road network: a case study in the city center of Shanghai, China [J]. Journal of Hydrology, 2016, 537: 138-145.
- [12] 黄国如, 李碧琦. 基于模糊综合评价的深圳市暴雨洪涝风险评估[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(1): 1-6. (HUANG Guoru, LI Biqui. Risk assessment of storm water flooding in Shenzhen City based on fuzzy comprehensive evaluation method [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2021, 32(1): 1-6. (in Chinese))
- [13] 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 Zongxue, CHEN Hao, REN Meifang, 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))
- [14] 李泽锦. 基于水动力模拟的城市洪涝及其对交通影响的动态评估[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2020.
- [15] GONG Peng, LIU Han, ZHANG Meinan, et al. Stable classification with limited sample: transferring a 30-m resolution sample set collected in 2015 to mapping 10-m resolution global land cover in 2017 [J]. Science Bulletin, 2019, 64(6): 370-373.
- [16] 芮孝芳, 蒋成煜, 陈清锦, 等. SWMM 模型模拟雨洪原理剖析及应用建议[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(4): 1-5. (RUI Xiaofang, JIANG Chengyu, CHEN Qingjin, et al. Principle analysis and application of storm water management model on stimulating rainfall-runoff [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(4): 1-5. (in Chinese))
- [17] 梅超, 刘家宏, 王浩, 等. SWMM 原理解析与应用展望[J]. 水利水电技术, 2017, 48(5): 33-42. (MEI Chao, LIU Jiahong, WANG Hao, et al. Introduction of basic principle and application prospect for SWMM [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(5): 33-42. (in Chinese))
- [18] ROSSMAN L A. Storm water management model reference manual: volume I-hydrology [R]. Cincinnati: US Environmental Protection Agency, 2015.
- [19] 陈宇枫. 基于大数据的城市内涝对道路服务水平影响的动态评估[D]. 北京: 北京大学, 2021.
- [20] 栾震宇, 金秋, 赵思远, 等. 基于 MIKE FLOOD 耦合模型的城市内涝模拟[J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 81-88. (LUAN Zhenyu, JIN Qiu, ZHAO Siyuan, et al. Simulation of urban waterlogging based on MIKE FLOOD coupling model [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 81-88. (in Chinese))
- [21] 向小华, 陈颖悟, 吴晓玲, 等. 城市二维内涝模型的 GPU 并行方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 528-533. (XIANG Xiaohua, CHEN Yingwu, WU Xiaoling, et al. GPU parallelized algorithm of urban two-dimensional inundation model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(6): 528-533. (in Chinese))
- [22] 卢庆辉, 熊礼阳, 蒋如乔, 等. 一种融合 Priority-Flood 算法与 D8 算法特点的河网提取方法[J]. 地理与地理信息科学, 2017, 33(4): 40-46. (LU Qinghui, XIONG Liyang, JIANG Ruqiao, et al. A drainage networks extraction algorithm by integrating the characteristics of priority-flood and D8 algorithm [J]. Geography and Geo-Information Science, 2017, 33(4): 40-46. (in Chinese))
- [23] 陈浩, 洪林, 梅超, 等. 基于 D8 算法的分布式城市雨洪模拟[J]. 武汉大学学报(工学版), 2016, 49(3): 335-340. (CHEN Hao, HONG Lin, MEI Chao, et al. Distributed simulation of urban storm water based on D8 algorithm [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2016, 49(3): 335-340. (in Chinese))
- [24] CHEN Wenjie, HUANG Guoru, ZHANG Han, et al. Urban inundation response to rainstorm patterns with a coupled hydrodynamic model: a case study in Haidian Island, China [J]. Journal of Hydrology, 2018, 564: 1022-1035.
- [25] 赵凯, 卢梦, 黄晶. 基于 SWMM 模型的上海某城市道路排水能力分析[J]. 城市道桥与防洪, 2020(10): 146-149. (ZHAO Kai, LU Meng, HUANG Jing. Analysis on drainage capacity of an urban road in Shanghai based on SWMM model [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2020(10): 146-149. (in Chinese))
- [26] 黄绵松, 杨少雄, 齐文超, 等. 固原海绵城市内涝削减效果数值模拟[J]. 水资源保护, 2019, 35(5): 13-18. (HUANG Miansong, YANG Shaoxiong, QI Wenchao, et al. Numerical simulation of urban waterlogging reduction effect in Guyuan sponge city [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(5): 13-18. (in Chinese))
- [27] 宋耘, 李琼芳, 牛铭媛, 等. 基于 SWMM 模型的南京典型易涝区暴雨内涝模拟[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(6): 56-61. (SONG Yun, LI Qiongfang, NIU Mingyuan, et al. Rainstorm and waterlogging simulation in typical inundated districts of Nanjing based on SWMM [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(6): 56-61. (in Chinese))
- [28] 杨幸子. 暴雨洪水对城市路网影响的模拟研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- [29] 杜磊, 杨晓宽. 不同道路积水情况对交通影响及造成损失的研究[C]//科技创新绿色交通: 第十一次全国城市道路交通学术会议论文集. 北京: 中国土木工程学会, 2011.

(收稿日期: 2021-09-27 编辑: 王芳)