

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

北京城市内涝积水的数值模拟^{* 1}

尹志聪¹ 郭文利¹ 李乃杰¹ 解以扬²

1 北京市气象局,北京 100089
2 天津市气象科学研究所,天津 300074

提 要: 北京城市内涝数值模型(BUW)根据北京复杂地形和大城市特点,将各类空间信息剖分为 6458 个网格及相应的通道,围绕城市地表、河道沟渠、排水管网等城市主要水文水动力学物理过程,模拟积水深度变化情况。以精细化的降水监测为驱动条件,BUW 可以较好地模拟出“7·21”城市内涝积水的空间分布,对重点桥区的积水深度,积水过程的模拟也比较贴近实际,具有良好的模拟性能。360 min 历时的 2 年重现期降雨情景下,北京四环内就会产生一定的积水,以孤立的积水点为主。10 和 50 年重现期下,积水的深度和范围都有所增加,且开始呈片状。100 年重现期,整个五环内都出现严重的城市积水,南部出现大片超过 50 cm 的积水区域,部分地区积水超过 80 cm。面对“7·21”级别的降水,排水管网直径拓宽 20%并不能明显改善城市排水能力。拓宽 60%时,四环到五环之间的积水明显减弱,四环以内的大部分积水减弱。拓宽 100%时,仅在二环到四环之间还有一些较浅的积水,拓宽 140%时,六环内大部分积水消失。

关键词: 暴雨, 内涝, 积水深度, 重现期, 排水

中图分类号: P456 **文献标志码:** A **doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2015.09.008

Numerical Simulation of Urban Ponding in Beijing

YIN Zhicong¹ GUO Wenli¹ LI Naijie¹ XIE Yiyang²

1 Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100089
2 Tianjin Meteorological Institute, Tianjin 300074

Abstract: Based on the complex terrain and large city characteristics, the geographic information of Beijing was cut into 6458 grids and corresponding channels. Focused on the urban hydrodynamic and hydrographic process, the Beijing Urban Waterlogging (BUW) numerical model was built to simulate the ponding depth. Driven by high-resolution precipitation observation, BUW can simulate the spatial distribution of the 21 July 2012 urban ponding in Beijing well, and the variation and max depth under concave bridges are close to actual condition too. In the scene of 2-yr Return Period (2-RP), there are some isolated ponding points inside the 4-Ring Road. The depth and range of ponding increase in 10-RP and 50-RP. Under 100-RP, there is servere pondings within the whole 5-Ring Road with most exceeding 50 cm in the south. Facing the rainfall at the 21 July 2012 level, urban drainage will not be improved obviously with 20% of pipe diameter (20%+PD) broadening. The ponding gets relieved distinctly between the Roads of 4-Ring and 5-Ring and slightly inside the 4-Ring in 60%+PD experiment. When the pipe diameter is broadened continuously, there is only shallow ponding between the 2-Ring and the 4-Ring in 100%+PD experiment and no ponding insides the 6-Ring in 140%+PD experiment.

Key words: rainstorm, urban waterlogging, ponding depth, return period, drainage

^{*} 北京市科技计划课题(北京地区一公里网格化天气要素快速融合技术及城市积水预报应用)和北京市优秀人才资助项目(2013D002034000003)共同资助
2014 年 9 月 1 日收稿; 2015 年 2 月 10 日收修定稿
第一作者:尹志聪,主要从事气候预测及城市气象方面的研究. Email:yinzhc@163.com
通信作者:郭文利,主要从事气候、应用气象业务与研究工. Email:guowenli44@163.com

引言

在全球气候变暖,极端天气事件重发、频发、突发的大背景下(王会军等,2010),夏季突发性短时强降水(王佳丽等,2012;湛芸等,2012;孙军等,2012)引发的城市内涝等次生灾害严重威胁着城市交通网的安全运行和中心城区老旧危房居民的生命安全(Shi et al,2009)。尤其是,地下停车场、下凹式立交桥和地铁的大量修建,快速增加了新的城市内涝风险点。例如,2004 年 7 月 10 日北京中心城区因立交桥积水,主干道交通多处中断。2012 年“7·21”特大自然灾害中,立交桥又一次成了北京的阿克琉斯之踵,全市共形成积水点 426 处,中心城区道路积水点 63 处,公路中断 39945 条次。城市内涝灾害发生的主要原因包括:不透水下垫面比例过大、排水管网标准低、城市空间立体开发和突发性极端强降水增多等(洛塔·弗克斯等,2011)。前三者是城市化发展的必然结果,很难在短时间有所改变。因此,精细化的短时强降水预报与内涝风险预警就成为应对城市内涝灾害的重要手段和突破口,能够为城市安全运行提供科学的决策依据。

目前,城市内涝数值模拟的主要研究方法有:基于水力学、水文学和气象学等的数值模拟(解以扬等,2004;2005),水文和气象学相结合的统计方法(马晓群等,2002),内涝起因综合分析法(Liu et al,2002),气象和社会经济学相结合的方法(扈海波等,2013;尤凤春等,2013),基于 AVHRR 和 MODIS 图像的分析方法(Huang et al,2008)。随着城市的发展,城市雨水排水系统已经由原来线状结构逐步演变成网络式,因此排水系统的水文学、水力学特性逐步显现。因此,构建城市内涝数值模拟模型,并结合精细化的降水预报,实现城市内涝风险预警是可行的。

美国在城市降水径流模型及城市排水系统的数值计算模型的开发上取得显著成绩,最有代表性的是城市暴雨雨水管理模型(SWMM),对城市排水系统有很强的模拟计算功能(董欣等,2008;Lewis,2010)。我国自 20 世纪 80 年代开始将数值模拟方法用于城市内涝研究,虽然起步较晚,但发展迅速。1998 年以来,天津气象科学研究所与中国水利水电科学研究院合作,研制了天津市城区内涝仿真模型(解以扬等,2004;2005)。2000 年以后,该模型在南

京、深圳、西安等十几个城市得到推广应用。由于各城市在地理特征、城市规划、排水系统等方面差别很大,城市内涝数值模型具备典型的城市个例特征(Quan et al,2010)。

北京的下凹式立交桥和地铁都是全国最多的,而这两种地下空间利用方式恰恰是城市内涝最大的风险点。在天津市城区内涝仿真模型的基础上,重点处理了下凹式立交桥和地铁口(权瑞松等,2011)的地理信息和物理过程,构建了适用于北京的城市内涝数值模型。同时,利用精细化的降水监测和预报结果,与城市内涝模型衔接在不同降雨个例、不同的降雨和排水情景下,对北京的城市内涝积水进行了数值模拟。

1 资料与模型介绍

1.1 资料

(1) 北京六环内 49 个高质量自动气象站的降水观测数据;(2) 桥区积水深度监测数据,监测方式包括积水监测站、视频巡检和交警巡检等;(3) 不同重现期 6 h 降水序列(马京津等,2012);(4) 1:10000 的地理信息图层,主要包括高程、河道、排水工程、建筑和道路等。

1.2 北京城市内涝数值模型

北京城市内涝数值模型(Beijing Urban Water-logging numerical model, BUW),根据北京复杂地形和大城市特点,以地理信息系统为支撑将各类空间信息剖分为 6458 个网格及相应的通道(图 1)。模型依托北京市气象局的精细化降水观测和预报,围绕城市地表、河道沟渠、排水管网等城市主要水文水动力学物理过程,模拟积水深度变化情况。

1.2.1 地表水文过程基本原理

有限元法可用来求解数学中具有初边值的偏微分方程,在地表水文模拟中得到了较广泛的应用(沈冰,1986)。BUW 模型应用有限体积法的思想,根据地形、土地使用、路网和水系等地理信息数据,将研究区划分成若干个无结构不规则的网格,每个网格的水文特性是均一和连续的。模型以城市地表和明渠河道水流运动为主要模拟对象。地表水文过程的基本控制方程以平面二维非恒定流方程(解以扬等,2004)为骨架。

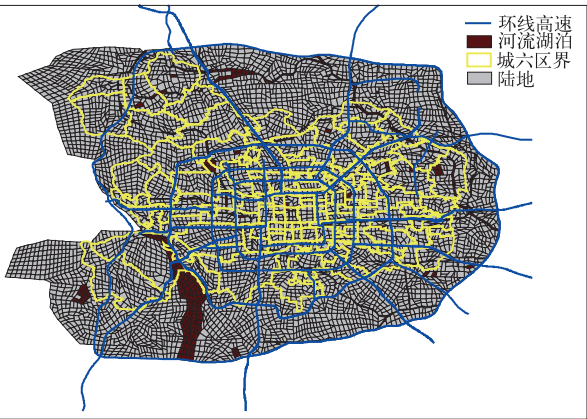


图 1 BUW 模型的网格分布和模拟范围
(叠加城六区界和主要道路)
Fig. 1 Simulation grids and range of BUW model
(overlaid boundaries and roads)

二维非恒定流基本方程如下:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = q \tag{1}$$

连续方程:

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial (uM)}{\partial x} + \frac{\partial (vM)}{\partial y} + gH \frac{\partial Z}{\partial x} + g \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{H^{1/3}} = 0 \tag{2}$$

动量方程:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial (uN)}{\partial x} + \frac{\partial (vN)}{\partial y} + gH \frac{\partial Z}{\partial y} + g \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{H^{1/3}} = 0 \tag{3}$$

式中, H 为水深; Z 为水位; q 为源汇项, 也就是径流量; M 和 N 分别为 x 和 y 方向上的单宽流量, 且 $M = Hu$, $N = Hv$; u 和 v 分别为流速在 x, y 方向上的分量; n 为糙率; g 为重力加速度。

1.2.2 地下水文过程基本原理

排水管网及配套的泵、闸、管网出口等组成了自成体系的城市地下水文系统, 对城市内涝有很大的影响。在降雨过程中, 地面积水在管道内汇集后沿各自管道系统汇合至出口处, 再经过出口处的闸门、泵站或淹没出流管道排到河道中, 形成“雨水—地面积水—管道汇水—管道排水—河道汇水”的模拟过程。由地表进入管网的单元网格的排水能力根据雨强、积水深度以及网格的最大排水能力来确定: 当降雨强度和积水深度小于网格的最大排水能力时, 降水和积水全部排入地下管网; 当最大排水强度小于积水深度和降水强度时, 超出部分则转化为地表径

流量。

为节约计算资源, 模型将管道的属性概化为: (1) 经过网格中心, (2) 经过网格周边通道的中点与相邻网格相连(图 2)。获取全部城市排水管网有极大的难度, 考虑到排水管网主要分布在道路下面, 部分管网按道路长度概化长度, 按道路等级概化管径。排水管网由于管道底部高程和管径不同, 存在明渠流动和有压流动两种形式, 模型中必须考虑在同一管网内明渠流动和有压流动的交替计算(解以扬等, 2005)。

一维明渠流动:

$$\text{连续方程: } \frac{\partial y}{\partial t} + U \frac{\partial y}{\partial l} + y \frac{\partial U}{\partial l} = 0 \tag{3}$$

$$\text{动量方程: } g \frac{\partial y}{\partial l} + \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial l} = -gAS_f \tag{4}$$

一维有压流动:

$$\text{连续方程: } \frac{\partial H}{\partial t} + U \frac{\partial H}{\partial l} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial U}{\partial l} = 0 \tag{5}$$

$$\text{动量方程: } g \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial l} = -gAS_f \tag{6}$$

式中, y 为明渠中的水深, H 为满流中的测压管水头, a 为水击波速, l 为 A 作为计算断面的过水面积, U 为断面的单宽流量, S_f 为摩阻坡降。

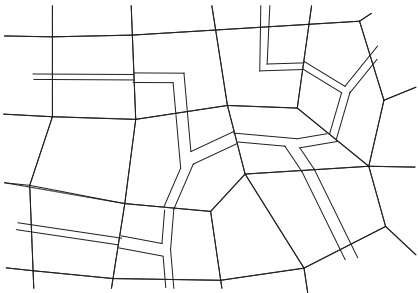


图 2 排水管网概化示意图
(双管线为管网, 单实线为网格通道)

Fig. 2 Generalization of drain network
(Double line denotes pipe and single line denotes grid boundary)

1.2.3 地势低洼处的涌出水处理

下凹式立交桥和居民小区低洼处等较四周高度明显偏低, 极易产生严重积水。除了大范围的地表客水汇流外, 地下管道涌出水也是重要来源。河道水位过高或下游排水堵塞时, 雨水管道满溢, 本应沿管道排走的水流在地势低洼处喷涌而出, 会导致极为严重的积水, 整个致灾过程往往在十几分钟内完成, 让人措手不及。

北京有数十座下凹式立交桥,桥区跨度比较大,且比周边地势偏低数米以上,在两侧形成人工堤坝,是天然的“聚水盆”,极易在短时间内形成面积大、深度深的积水区。因此,在建立下凹式立交桥所处网格时,需要将网格高程从桥面高度降低到桥底高度,并扩大有效客水面积,使地表汇流和管道涌出水过程的物理描述更符合真实情况。

在地势低洼的地方,当流入管道的水量超过管道容积时,水体沿水井涌出地面,首先计算单元管道内的水体积

$$V^{T+2dt} = V^T + 2dt \times (\sum_{i=1}^N Q_{pi}^{T+dt} + Q_1) \quad (7)$$

式中 dt 为计算时间间隔, V^T 和 V^{T+2dt} 分别为 T 和 $T+2dt$ 时刻的单元管道内的水体积, N 为单元网格内管网出口数, Q_{pi}^{T+dt} 为 $T+dt$ 时刻管网各出口的排水量, Q_1 为降水后由该网格单元地面进入管网的排水量。

设网格单元内管道总体积为 V_m , 当 $V^{T+2dt} \leq V_m$, 网格单元内的下水管道处于正常的污水状态,不会上涌;当 $V^{T+2dt} > V_m$, 下水管道向网格单元涌水,上涌的水体积 dV 为:

$$dV = V^{T+dt} - V_m \quad (8)$$

2 BUW 模型的性能检验

2.1 “7·21”降雨和积水实况

2012 年 7 月 21—22 日,北京市出现历史罕见强降雨过程,为 1951 年以来最强的一次全市性特大暴雨过程,此次暴雨过程具有历时短、雨势强、范围广、山区雨量大等特点。降雨主要集中在 21 日 10 时至 22 日 06 时,在近 20 h 内全市平均降雨量 170 mm,最大降雨量 541 mm。就城区而言,平均雨量达 215 mm,最大降雨量 328.0 mm(模式口)。由图 3 可见,降雨主要分为两个阶段,17 时前以暖区降水为主(R1),之后锋面系统移入北京,降水以锋面降水为主(R2)(孙军等,2012)。14—15 时,城区的平均雨强超过 $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。第二阶段雨强显著增大,19—20 时超过 $40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。城区最大雨强出现在丰台体育中心站,为 $85.9 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。根据《北京市气象灾害预警信号与防御指南(2013 年 5 月)》中 1 h 降雨量阈值,城区 93.9% 的站点最大雨强达到橙色以上预警级别,30.6% 的站点达到红色预警

级别(图 4)。

全市共形成积水点 426 处,中心城区道路积水点 63 处(图 5)。从总体看城区南部积水比北部严重,东部比西部严重。积水点主要分布在 ABCD 四

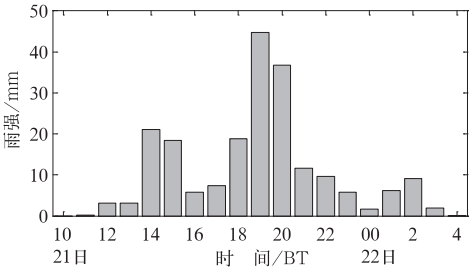


图 3 2012 年 7 月 21 日 10 时至 22 日 04 时北京城区 49 站平均雨强

Fig. 3 Rainfall intensity of 49 stations in urban area in Beijing from 10:00 BT 21 to 04:00 BT 22 July 2012

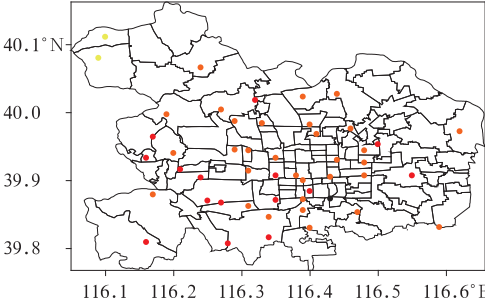


图 4 城区站最大雨强达到的预警级别 (蓝色>20,黄色>30,橙色>40,红色>60;黑色未达标准,单位: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)

Fig. 4 Warning grades with maximum rainfall intensity achieved (blue>20, yellow>30, orange>40, red>60, black means no warning, unit: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)

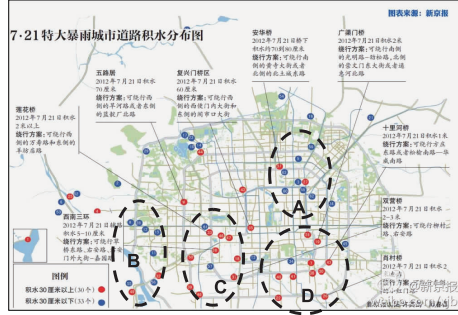


图 5 “7·21”城市道路积水分布图 (来源:新京报)

Fig. 5 Distribution of urban road ponding in the 21 July (quoted from Beijing News)

个区域,其中 CD 区域积水最严重。按照北京市的规定,下凹式立交桥和易积水路段积水深度达 27 cm 时,立即采取封路措施和车辆疏导工作。图 5 中红点的积水深度均超过 30 cm,尤其是莲花桥、广渠门桥、双营桥和肖村桥的积水深度达到或超过 2 m,D 区中广渠门桥因积水过深造成 1 人遇难。五环外,房山是重灾区,有 38 人遇难,其中青龙湖镇 5 人,河北镇 4 人,京港澳高速附近多人,多数都是城市内涝灾害的遇难者。

2.2 BUW 模拟的积水情况

以北京六环内 47 个自动气象站的降水观测数据为驱动条件,BUW 从 7 月 21 日 10 时开始模拟到 22 日 01 时,共 16 h。最大积水深度如图 6 所示,四个等级根据不同车型的涉水深度划定。从空间分布上看,能够模拟出五环内的严重内涝,也能表现出南多北少,东多西少的分布特征。图 5 中 A、B、C 三个区域的积水情况能够得到较好的模拟,D 区尽管也模拟出不少的积水,但和实况相比明显偏弱。同时,模型对五环外,尤其是房山部分地区的内涝积水也有很好的模拟能力。房山青龙湖和河北镇附近多个网格模拟出超过 1 m 的积水,部分网格超过 2 m,京港澳高速周围也模拟出严重的积水,这和灾情分布是相符的。

下凹桥区极易成为周围降雨的客水汇流区或产生地下涌出水,是城市内涝的高风险点。表 1 对北

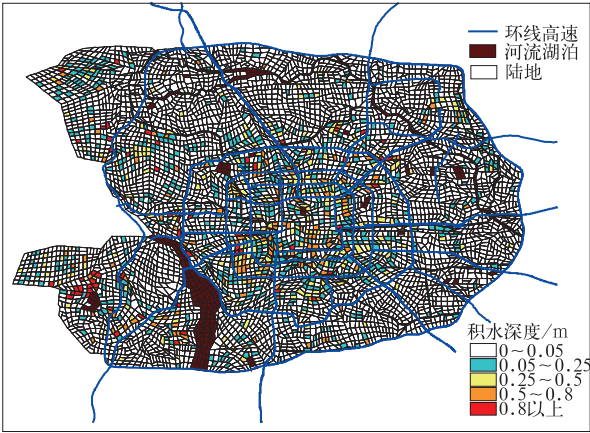


图 6 BUW 模拟的“7·21”最大积水深度
Fig. 6 Maximum ponding depth in the 21 July rainstorm simulated by BUW

京市的 21 处桥区进行了更为细致的检验分析,表 1 中的桥区主要集中在五环内,少数位于五环外。大部分桥区的模拟和实测值比较吻合,如五路桥、复兴门桥、安华桥、丽泽桥、六里桥、安贞桥、木樨园桥、赵公口桥和菜户营桥等。这些桥区的积水一般在 1 m 以下,模型对这种量级的积水有不错的模拟能力。莲花桥实测积水超过 2 m,模拟值 1.77 m,肖村桥积水 2 m,模拟值 1.23 m,其他积水达到 2 m 的桥区,模拟值都没有超过 1 m。这说明,模型对 2 m 左右的深积水模拟能力还有限,这可能是因为模型中对下凹式立交桥两侧的陡直壁和大范围客水考虑不足的原因。

表 1 “7·21”北京桥区积水模拟和实况对比(单位:m)

Table 1 Comparison between simulation and observation of pongding depth in bridge zones in the 21 Junly (unit: m)

积水桥区	莲花桥	五路桥	复兴门桥	安华桥	广渠门桥	十里河桥	双营桥
模拟	1.77	0.65	0.61	0.62	0.67	0.69	0.64
观测	>2	0.7	0.6	0.7~0.8	2	2	2~3
积水桥区	金安桥	西苑桥	丽泽桥	六里桥	正阳桥	安定门桥	东便门桥
模拟	0.41	0.05	0.34	0.48	0.78	0.19	0.66
观测	0.3	0.1	0.3	0.5	0.5	0.3	0.5
积水桥区	安贞桥	方庄桥	木樨园桥	赵公口桥	大红门桥	肖村桥	菜户营桥
模拟	0.25	0.68	0.6	0.6	0.25	1.23	0.49
观测	0.3	0.8	0.6	0.6	0.5	2	0.5

根据 4 个涉水等级,从表 1 中各选 1 个代表桥区,检验模型对积水时间、积水过程和退水时间的模拟能力(图 7)。莲花桥从降水第一阶段(R1)开始出现积水,一直在增加,到第二阶段(R2)的 19—20 时达到最大积水,这也是雨强最大的时段,之后积水开始退去。同样,复兴门桥、六里桥和安贞桥的积水过

程也和降雨的节奏是吻合的,能够模拟出积水和退水的时间。值得注意的是,因缺乏动态的积水深度数据,仅依靠雨强对积水时间、积水过程和退水时间模拟能力的检验是初步的,需要进一步加强。

除对“7·21”这种“长时间大雨强型”城市内涝进行模拟外,还对“长时间小雨强型”(2013 年 8 月

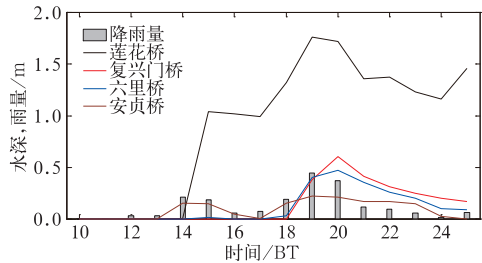


图 7 7 月 21 日下凹桥区逐小时积水深度模拟曲线
(柱形为城区 49 站的小时雨强)

Fig. 7 Simulation curves of hourly ponding depth in bridge zones in the 21 July
(Bar denotes the rainfall intensity of 49 stations in urban area)

11 日),“短时间大雨强型”(2011 年 6 月 23 日)、“短时间小雨强型”(2013 年 6 月 17 日)等三种类型的城市内涝进行了模拟。模型对四种类型城市内涝的空间分布、积水时间、积水过程和退水时间,尤其是

最大积水深度都有不错的模拟能力。

3 不同重现期强降雨的城市积水模拟

采用北京市气象台逐分钟降雨资料,应用广义偏态分布方法得出 360 min 历时不同重现期降雨量(马京津等,2013),选取其中 2 年(62.4 mm)、10 年(98.82 mm)、50 年(157.1 mm)和 100 年(208.2 mm)重现期,构建不同降雨情景。每个网格都给予相同的降雨序列,前 6 h 为将 360 min 历时降雨量平均到 6 h,后 5 h 无降雨量。如 2 年重现期降雨情景为降雨持续 6 h,每小时降雨 10.4 mm,无降水的 5 h 用于地表和地下水文过程的调整和退水模拟。

如图 8,2 年重现期情景,能够代表北京城区现行的雨水排水管网的设计标准。此情景下,北京的城市内涝主要发生在四环之内,南多北少,积水深度

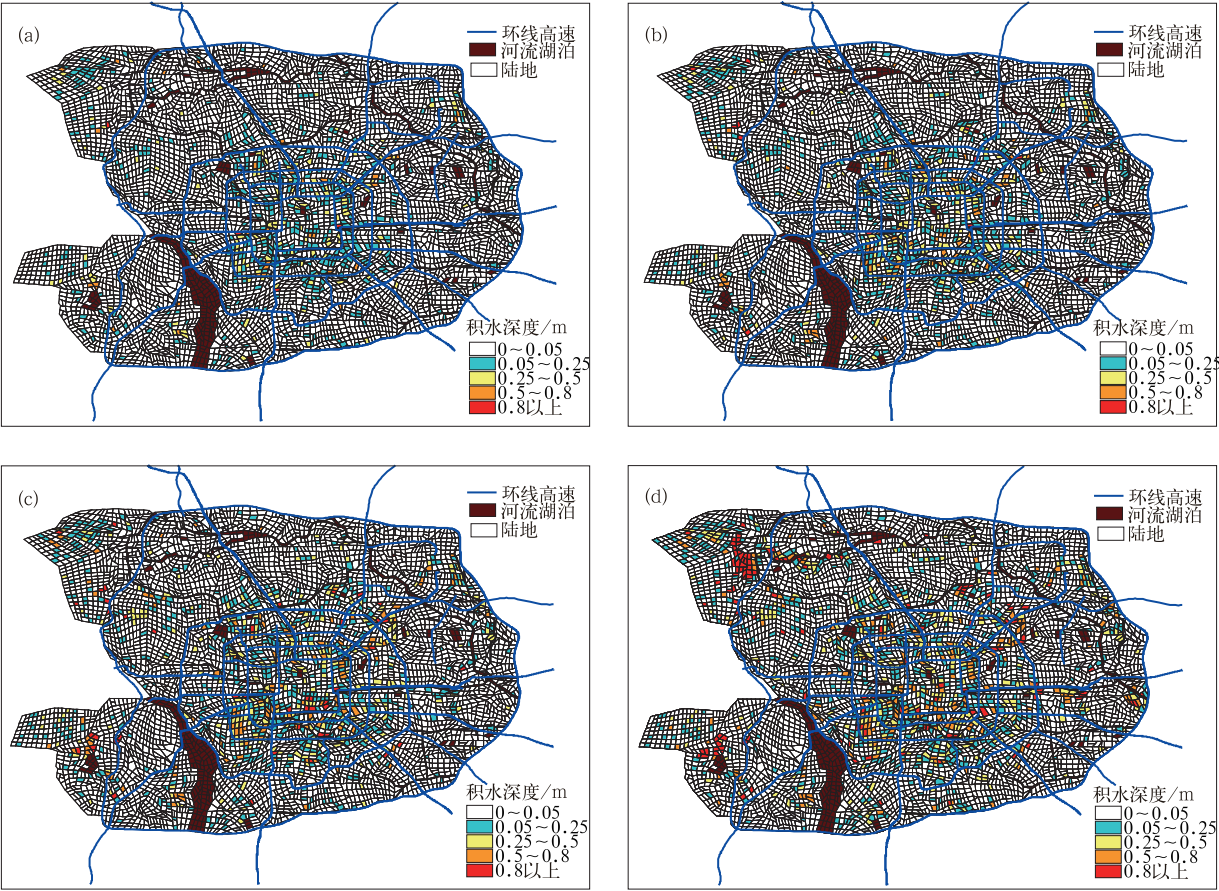


图 8 2 年(a),10 年(b),50 年(c)和 100 年(d)重现期降雨情景下,BUW 模拟的最大积水深度

Fig. 8 Maximum ponding depth simulated by BUW under 2-yr (a), 10-yr (b), 50-yr (c) and 100-yr (d) return-period scene

一般在 25 cm 以下,部分网格超过 25 cm。积水网格一般没有连成片,以孤立的积水点为主。六环外左上角也有一些积水出现,主要受山区地形的影响。10 年重现期情景下,四环内积水深度明显加深,出现大片超过 25 cm 的积水区域,东部和北部的四环和五环之间开始出现明显积水。城市内涝在空间上表现出南多北少、东多西少的分布特点,南部开始出现成片的积水区域。50 年重现期情景下,五环内城市内涝继续加重,积水深度以 25~80 cm 为主,五环到六环之间也开始出现零星的积水点。值得注意的是,房山青龙湖附近开始出现超过 50 cm 的积水。100 年重现期,即雨强 $34.7\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的降雨情景下,整个五环内都出现严重的城市内涝,部分地区积水超过 80 cm,南部,尤其是西南部出现大片超过 50 cm 的积水区域。六环外左上角出现也有一片超过 80 cm 的积水区域,可能是爆发山洪的结果。房山

青龙湖附近也出现一些超过 80 cm 的积水区域,这和“7·21”比较类似。

4 不同排水能力下的城市积水模拟

“7·21”特大暴雨引发严重城市内涝灾害的原因,除雨强大时间长外,还有排水系统设计不合理等因素,比如管道直径太小等。在 BUW 数值模型中将北京市的管网直径人为拓宽,定量评估排水管网在城市积水当中的作用。1.2 倍管网试验(1.2Pipe)中,除个别网格外,城市内涝积水并没有明显变化,也就是说直径拓宽 20%并不能明显改善城市排水。1.6 倍管网试验(1.6Pipe)中,四环到五环之间的积水明显减弱,四环以内的大部分积水减弱。但是东北二环附近却有新的超过 0.8 m 的积水出现,这可能是因为管网中的水太多,发生地下涌

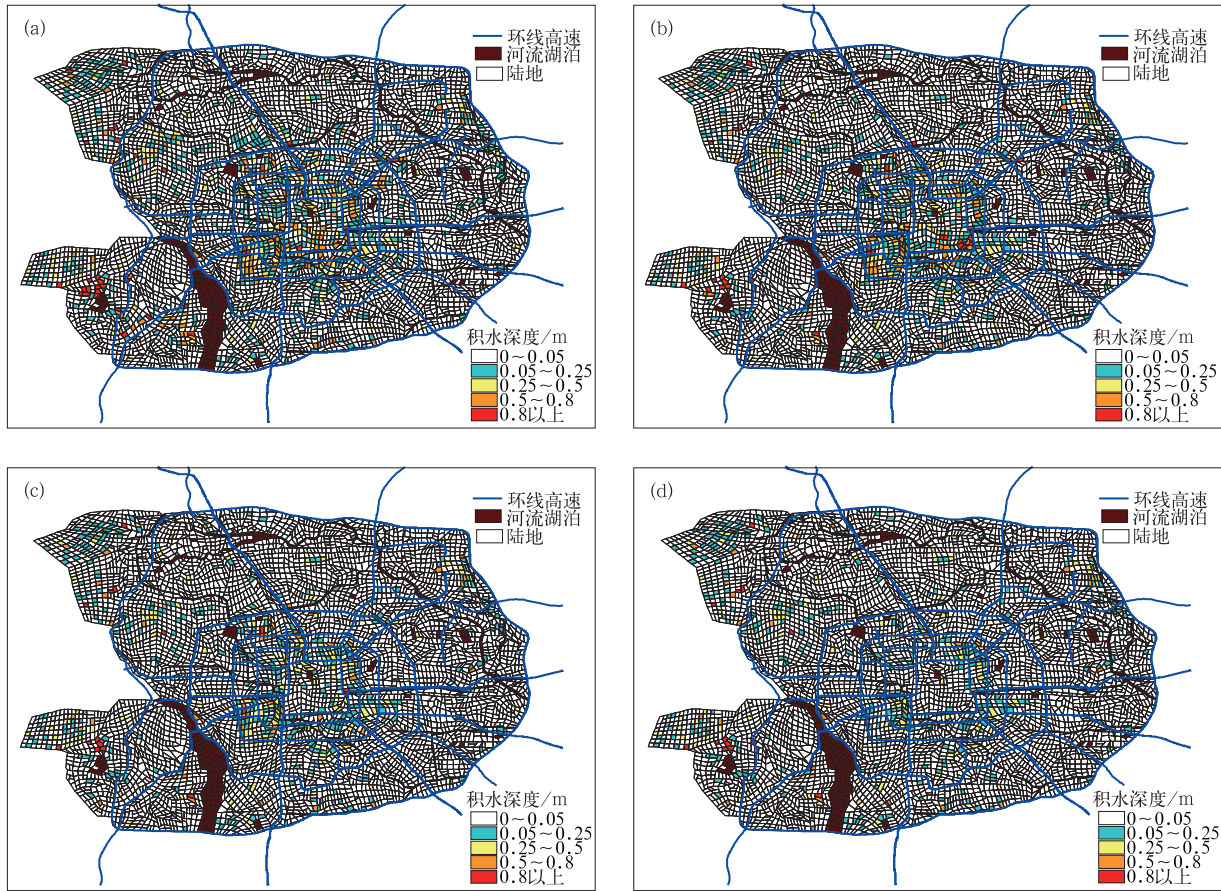


图 9 1.2 倍(a)、1.6 倍(b)、2.0 倍(c)和 2.4 倍(d)排水管网直径时, BUW 模拟的“7·21”最大积水深度

Fig. 9 Maximum ponding depth in the 21 July rainstorm simulated by BUW with 1.2 (a), 1.6 (b), 2.0 (c) and 2.4 (d) times pipe diameters

出水的原因。当管网拓宽到 2 倍时(2.0Pipe),大部分城市积水都已经消失,仅在二环到四环之间还有一些较浅的积水,东北二环也没有出现地下涌出水。当管网拓宽到 2.4 倍时(2.4Pipe),六环内大部分积水均已消失,即使面对“7·21”等级的特大暴雨也可以发挥排水系统应有的作用。值得注意的西北六环外和青龙湖附近的积水并没有减弱,它们产生的原因是地形地貌,而不是排水不畅。

5 结论与讨论

北京城市内涝数值模型(BUW)根据北京复杂地形和大城市的特点,围绕城市地表、河道沟渠、排水管网等城市主要水文水动力学物理过程,模拟积水深度变化情况。以精细化的降水监测为驱动条件,BUW 可以较好地模拟出“7·21”城市内涝积水的空间分布,对重点桥区的积水深度,积水过程的模拟也比较贴近实际,表明模型具有较好的模拟性能。

2 年重现期情景下,北京四环内就会产生一定的积水,以孤立的积水点为主。10 和 50 年重现期下,积水的深度和范围都有所加重。100 年重现期,整个五环内都出现严重的城市积水,南部出现大片超过 50 cm 的积水区域。六环外左上角出现也有一片超过 80 cm 的积水区域,可能是爆发山洪的结果。房山青龙湖附近也出现一些超过 80 cm 的积水区域,和“7·21”比较类似。

排水管网直径拓宽 20% 并不能明显改善城市排水能力。拓宽 60% 时,四环到五环之间的积水明显减弱,四环以内的大部分积水减弱。拓宽 100% 时,仅在二环到四环之间还有一些较浅的积水,拓宽 140% 时,六环内大部分积水消失。

需要指出的是城市内涝数值模式严重地依赖下垫面的地理特征和排水系统信息,因此必须不断对各种基础信息,包括泵站、蓄水池和调度策略等进行更新和调试才能持续获得良好的模拟效果。BUW 模型模拟的下凹桥区的积水深度往往偏小,可能是未能精细描述桥区结构或对客水模拟过小引起的。考虑到下凹桥区在城市内涝中的重要性,针对每个桥区单独建模也是有必要的。根据不同降水和排水情景的模拟结果,发现现有的排水系统设计标准明显偏低,同时在拓建排水管网时需要统筹考虑,以免在别的地方引发地下涌出水或堵塞。此外,随着北

京城区规模的不断扩大,西部和北部的山洪积水也必须纳入模拟范围,在边界衔接山洪模型或在 BUW 中发展山洪边界模块都是比较可行的做法。

参考文献

- 湛芸,孙军,徐珺,等. 2012. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考(一)观测分析及思考. 气象,38(10):1255-1266.
- 董欣,杜鹏飞,李志一,等. 2008. SWMM 模型在城市不透水区地表径流模拟中的参数识别与验证. 环境科学,29(6):1495-1501.
- 扈海波,轩春怡,诸立尚. 2013. 北京地区城市暴雨积涝灾害风险评估. 应用气象学报,24(1):99-108.
- 洛塔·弗克斯,刘阳青. 2011. 他山之玉可以攻石—借鉴欧洲经验解答北京城市积水难题. 北京规划建设,(6):181-182.
- 马京津,李书严,王冀. 2012. 北京市强降雨分区及重现期研究. 气象,38(5):569-576.
- 马晓群,张爱民,张家鼎,等. 2002. 基于 GIS 的市(县)级旱涝风险区划. 安徽地质,12(3):171-175.
- 权瑞松,刘敏,张丽佳. 2011. 上海市地下轨道交通暴雨内涝脆弱性评价. 人民长江,42(15):13-17.
- 沈冰. 1986. 简述有限元法在地表水文模拟中的应用. 陕西水利,(5):11-19.
- 孙军,湛芸,杨舒楠,等. 2012. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考(二)极端性降水成因初探及思考. 气象,38(10):1267-1277.
- 王会军,张颖,郎咸梅. 2010. 论短期气候预测的对象问题. 气候与环境研究,15(3):225-228.
- 王佳丽,张人禾,王迎春. 2012. 北京降水特征及北京市观象台降水资料代表性. 应用气象学报,23(3):265-273.
- 解以扬,韩素芹,由立宏,等. 2004. 天津市暴雨内涝灾害风险分析. 气象科学,24(3):342-349.
- 解以扬,李大鸣,李培彦,等. 2005. 城市暴雨内涝数学模型的研究与应用. 水科学进展,16(3):384-390.
- 尤凤春,郭丽霞,史印山,等. 2013. 北京强降雨与道路积水统计分析及应用. 气象,39(8):1050-1056.
- Huang D P, Liu C, Fang H J, et al. 2008. Assessment of waterlogging risk in Lixiahe region of Jiangsu Province based on AVHRR and MODIS image. Chin Geogr Sci, 18(2): 178-183.
- Lewis A R. 2010. Storm Water Management Model User's Manual Version 5.0. United States Environmental Protection Agency.
- Liu M, Yang H Q, Xiang Y C. 2002. Risk assessment and regionalization of waterlogging disasters in Hubei Province. Resour Environ Yangtze Basin, 11(5): 476-481.
- Quan Rui-Song, Liu Min, Lu Min, et al. 2010. Waterlogging risk assessment based on land use/cover change: A case study in Pudong New Area, Shanghai. Environ Earth Sci, (61): 1113-1121.
- Shi Y, Shi C, Xu S Y, et al. 2009. Exposure assessment of rain-storm waterlogging on old-style residences in Shanghai based on scenario simulation. Nat Hazards, 53: 259-272.