

# 基于一二维耦合内涝模型的城市道路积水来源量化分析

吴俊毅 秦华鹏<sup>†</sup>

北京大学深圳研究生院环境与能源学院, 城市人居环境科学与技术重点实验室, 深圳 518055;

<sup>†</sup> 通信作者, E-mail: qinhp@pkusz.edu.cn

**摘要** 为模拟道路地表径流和排水系统溢流对道路积水的影响, 对道路汇水区采用地表二维模型, 对其他汇水区和地下管网采用一维模型, 并构建基于PCSWMM的一二维耦合内涝模型, 提出以本地道路地表径流和检查井溢流对积水贡献比例为指标的积水来源定量分析方法。基于实测检查井液位数据和积水深度数据对模型进行验证后, 利用该模型对设计暴雨条件下深圳市南山区某排水片区的道路积水进行模拟, 得到如下结果。1) 研究区存在4个主要道路积水点(A, B, C和D), 在重现期为5年的暴雨下, 有两个积水点(A和D)发生溢流, 溢流在积水中的占比分别为24%和61%; 在重现期为50年的暴雨下, 有3个积水点(A, C和D)发生溢流, 溢流在积水中的占比分别为49%, 62%和73%。随着暴雨强度增大, 检查井溢流对积水的贡献增加。2) 道路积水的动态变化受到积水来源、下游壅堵和局部地形等诸多因素的综合影响。3) 对于溢流在积水中占比较大的内涝点, 建议着重提高管网排水能力, 并对上游汇水进行海绵化改造; 对于本地道路径流在积水中占比较大的内涝点, 建议对本地进行海绵化改造, 适当地改造局部地形, 或增加排涝泵站等设施。

**关键词** 道路积水; PCSWMM; 一二维耦合; 城市内涝; 来源分析

## Quantitative Source Analysis of Waterlogging on Urban Roads Based on a 1D and 2D Coupling Waterlogging Model

WU Junyi, QIN Huapeng<sup>†</sup>

School of Environment and Energy, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055;

<sup>†</sup> Corresponding author, E-mail: qinhp@pkusz.edu.cn

**Abstract** To simulate the influences of road surface runoff and drainage system overflow on road waterlogging, 2D surface runoff model is adopted for road catchment areas, 1D model is adopted for other catchment areas and underground pipe networks, and then a 1D and 2D coupling waterlogging model is developed based on PCSWMM. A quantitative source analysis method for road waterlogging is also proposed, which takes the contribution ratio of surface runoff from local road or overflow from drainage system to road waterlogging water as the indexes. After calibration and validation based on the measured water level in the manholes and the measured waterlogging depth on the road, the model is used to simulate the road waterlogging in a drainage area of Nanshan District of Shenzhen City under designed storm events. The results indicate that there are four main road waterlogging points (A, B, C, D) in the study area; overflow occurs on two points (A, D) under the storm event with a return period of 5 years, the overflow volume accounts for 24% and 61% of the total volume of waterlogging water respectively; while overflow occurs on three points (A, C, D) under the storm event with a return period of 50 years, the overflow volume accounts for 49%, 62%, and 73% of the total volume of waterlogging water, respectively; and the contribution of the overflow volume from manholes to the total waterlogging volume increases as the storm intensity increases. The dynamic change of road waterlogging is comprehensively affected by many factors such as

the sources of waterlogging water, downstream blockage, local terrain and so on. For the waterlogging points where overflow volume accounts for a large amount of waterlogging water, it is recommended to improve the drainage capacity of the drainage system and promote the sponge city construction in the upstream catchment; for the waterlogging points where the local road surface runoff volume accounts for a relatively large amount of waterlogging water, it is recommended to promote the sponge city construction in the local area, and properly modify the local terrain or increase pump stations for drainage.

**Key words** road waterlogging; PCSWMM; 1D and 2D coupling; urban flooding; source analysis

在城市化进程中,我国许多城市出现较严重的内涝问题,其中道路积水问题尤为严重,给城市交通和居民生活造成极大的影响。城市道路积水来源主要有本地道路汇水和排水管网的检查井溢流。本地汇水主要与局部微地形、雨水口排水能力和路面渗透性等因素有关,检查井溢流主要与管网排水能力和上游的汇水区产流有关。准确掌握道路积水来源,可以为分析积水成因和治理城市内涝提供科学依据。

城市雨洪模型是分析内涝规律的主要方法,常用的模型有 SWMM, MIKE-Urban, Info Work CS 和 MOUSE<sup>[1]</sup>等。国内外学者利用这些模型对城市尺度的内涝时空分布和风险开展了大量的研究<sup>[2-5]</sup>,其中,城市道路积水的特征和成因是当前内涝研究的重点。潘安君等<sup>[6]</sup>应用分布式立体化城市洪水模型,研究北京万泉河桥下的积水成因。张成才等<sup>[7]</sup>等基于高精度 DEM 数据,对郑州某积水路段的积水深度进行模拟计算。Starita 等<sup>[8]</sup>通过动态混合整数编程模型,模拟洪水对英格兰赫特福德郡道路网络的影响。但是,现有的研究一般不区分排水系统溢流与本地道路地表径流对道路积水的影响,也缺乏针对道路积水来源的量化分析。

为模拟道路地表径流和排水系统溢流对道路积水的影响,本研究对道路汇水区采用地表二维模型,对其他汇水区和地下管网采用一维模型,并构建基于 PCSWMM 的一二维耦合内涝模型。基于模型计算结果,提出以本地道路汇水和检查井溢流对积水贡献比例为指标的道路积水成因量化分析方法,并以深圳市南山区某排水片区为例,研究局部道路积水的成因。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区域

深圳是亚热带海洋性气候的临海城市,多年平均降雨量为 1944 mm,4—9 月的降雨量占全年 84% 以上,雨季暴雨频发。本文选取的研究区域(图 1)

为南山区的 3 个排水片区,边界根据排水系统的上游管网节点确定。研究区地势北高南低,占地面积为 269 hm<sup>2</sup>,其中建设用地占 72%,主要土地利用类型为居民用地、商业用地和工业用地,是深圳市科研和教育中心。随着城市内涝治理力度逐渐加大,该区内涝情况整体上有所缓解,但局部地区仍存在内涝风险,且主要分布在城市道路中。解决局部内涝的问题需要精准地掌握道路积水的分布和明晰积水成因。

### 1.2 城市道路积水模型

#### 1.2.1 PCSWMM 模型

PCSWMM 是由加拿大水力计算研究所(Computational Hydraulics International, CHI)开发的以 SWMM 为核心的城市雨洪模型,采用一维(1D)地下排水系统与二维(2D)地表排水系统耦合的双排水系统。其中,地下排水系统是传统的城市排水管网系统,地表排水系统通过地表网格单元之间的地表明渠来模拟水在地表的流动过程。地下排水系统的一维节点和地表排水系统的二维节点通过底部孔口或直接连接的方式连接<sup>[9]</sup>。该模型已广泛用于城市内涝的模拟<sup>[10-11]</sup>。

#### 1.2.2 一维排水系统概化

排水系统的概化包括对管网系统和河道的概化。SWMM 的水力要素包括管段和节点两种,节点主要指雨水检查井和雨水篦子等,管网主要包括雨水渠和雨水管。由于本模型的排水系统只有一个排口进入河道,所以不对河道进行概化。由于模拟城市地区道路上的积水,所以对部分地区的雨篦子也进行概化。地下排水系统概化节点为 486 个(检查井),管道管渠共概化 476 个。

#### 1.2.3 二维排水系统概化

由于本文主要针对道路积水,所以边界层由 ArcGIS 提取的研究区内道路边界构成。边界层的网格包括六边形、定向、自适应和矩形 4 种类型,河流和道路一般采用定向网格,为了更好地反映道路的积水情况,模型采用六边形网格。二维检查井



图 1 研究区域  
Fig. 1 Study area

根据 DEM 生成, 提取精度由网格精度确定, 每个网格的中心分别有一个二维检查井, 井底高程为地表高程, 超载深度设置成检查井的井深。共设置二维检查井 4960 个。

相邻检查井之间用深度为 30 m 的明渠相连, 用地表明渠来模拟相邻地表网格单元之间水的流动, 明渠的宽度由相邻地表单元的面积确定。由于研究区域为非河道区域, 所以采用底部孔口连接方式来实现一维与二维排水系统耦合。共设置二维地表明渠 112918 个。

#### 1.2.4 汇水区概化及一二维模型耦合

为模拟道路地表径流和排水系统溢流对道路积

水的影响, 对模型的应用做以下改进。将汇水区分为小区汇水区(1D)和道路汇水区(2D)两类。小区汇水区的水直接排入一维排水系统, 道路汇水区的水直接进入二维排水系统, 在模型中道路积水先进入地表二维排水系统, 然后再进入地下一维排水系统。这样的汇水区设置可以更好地对局部内涝进行模拟和诊断。

小区汇水区根据管网、道路街区、地形和建筑物等因素进行调整和划分。根据管网节点, 采用泰森多边形的方法划分大汇水区 153 个(图 2)。小区汇水区的坡度为平均坡度, 其排口根据深圳水务集团的排水资料确定。共划分道路汇水区 1817 个。

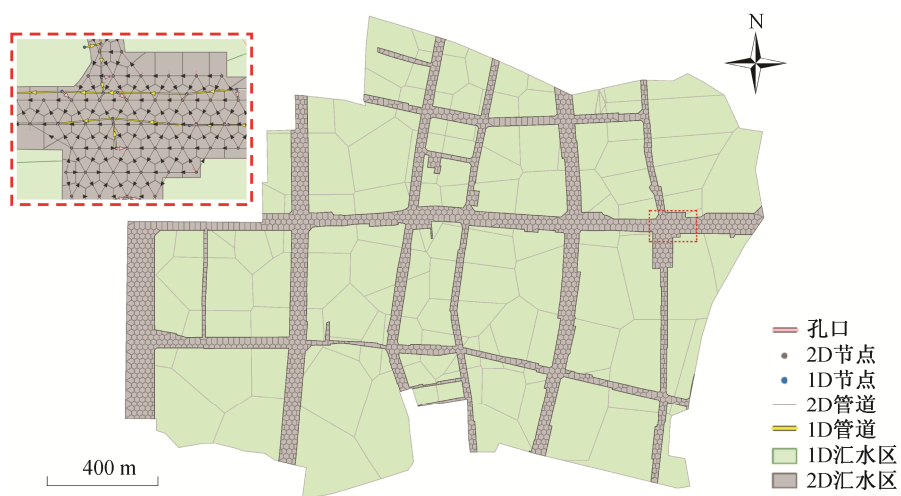


图 2 汇水区划分  
Fig. 2 Division of subcatchment

道路汇水区(2D)采用六边形网格进行划分,与PCSWMM的地表排水系统的2D网格大小相同,并指定每个道路汇水区的排口为二维节点,即雨水首先进入地表二维网格,根据地形进行摊水,然后通过孔口进入一维排水系统。本文只在道路网格中考虑积水的二维流动,小区汇水区的雨水直接进入一维排水系统。

通过 ArcGIS 栅格表面计算工具,计算汇水区的坡度。将子汇水区的面积与汇流长度相除,得到子汇水区的汇流宽度。通过 ArcGIS 统计各个子汇水区中渗透路面(城市绿化和公园)和不渗透路面(主要是建筑及小区路面)的占比,从而计算汇水区的不渗透率。

### 1.3 积水指标与来源定量分析方法

本文根据积水的面积、深度和持续时间3个指标来分析道路积水特征。积水面积指标为水深大于某阈值的积水面积占积水点本地汇水区面积的比例,积水深度为积水点的最大深度,积水时间为水深大于某阈值时持续的时间。

积水的主要原因有管网排水能力不足、地形和汇水区不渗透率较高等。为了更好地分析城市内涝的成因,本文提出内涝点积水来源的定量分析方法。根据来源不同,可将内涝点积水分成两类:一类为因本地道路汇水不能及时排出产生的积水,受积水点局部地形、路面渗透性和雨水口排水能力等因素影响;另一类为因上游来水过多而从本地管网检查井溢流产生的积水,受上游汇水区的排水量以及管网排水能力等因素影响。若无溢流产生,说明积水全部来源于本地积水;若有溢流产生,可以根据本地道路汇水和检查井溢流对积水的贡献比例来

分析积水主要成因。

根据内涝模型模拟的结果,进一步统计不同来源积水的占比:1)通过地表二维网格的积水面积乘以相应的深度得到地表积水总量;2)一维管网和地表二维节点通过孔口连接,对孔口的流量过程线进行积分,可得到进出孔口的净水量,且净水量 $>0$ 时,溢流量=净水量,净水量 $<0$ 时,则溢流量=0;3)将积水总量减去溢流量,得到本地道路汇水贡献的水量。

### 1.4 模型验证

本文从检查井液位曲线和监测点积水深度两方面进行模型的率定和验证。

检查井液位监测点位于桃园路与前海路交叉路口(图1)。根据2018年6月5日(降雨量为27.5 mm,历时3.5小时)和6月8日(降雨量为57.6 mm,历时8.5小时)两场降雨的实测检查井液位数据,分别对模型进行参数率定和验证,对应的NS系数分别为0.95和0.91(图3(a)和(b))。

积水监测点位于南山区南新路南山欢乐颂购物中心西门门口前的道路上(图1)。我们共监测4场雨,利用6月8日和8月7日的监测数据做率定,8月20日和9月16日的监测数据做验证。结果表明,模拟与监测结果基本上吻合(表1)。

### 1.5 设计暴雨

设计暴雨的计算参考《深圳市暴雨强度公式及查算图表》(2015版),采用在国际上广泛应用的芝加哥雨型进行降雨过程分配,降雨历时为3小时,时间间隔为1分钟,雨峰位置 $r=0.4$ ,得到设计重现期为5,20,50和100年的降雨过程。

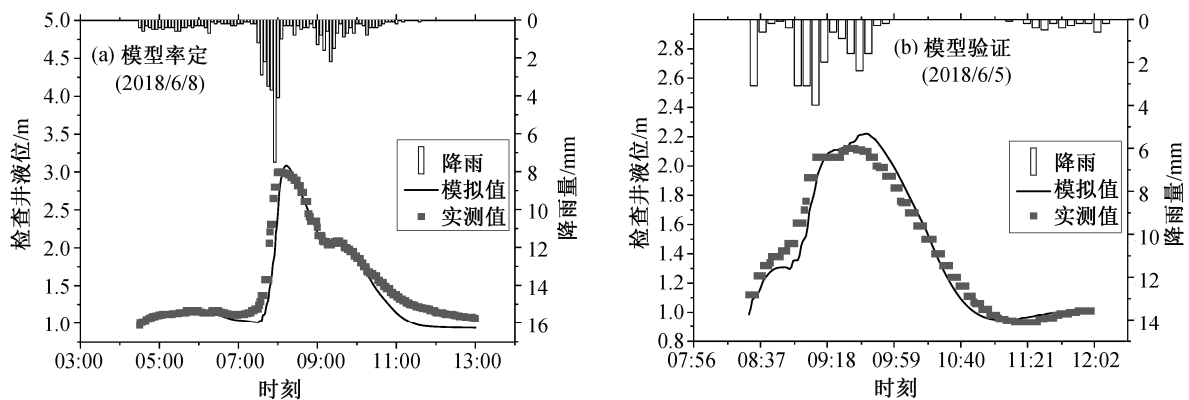


图3 实测和模拟检查井液位的比较

Fig. 3 Comparison between measured and calculated water level in manhole model calibration and model validation



表 1 实测道路积水深度

Table 1 Measured depth of urban road waterlogging

日期	降雨量/ mm	降雨历时	实测 水深/m	模拟 水深/m	误差/ m
6 月 8 日	59.9	8 小时 10 分钟	0.071	0.060	0.011
8 月 7 日	26.5	1 小时 20 分钟	0.150	0.144	0.006
8 月 20 日	44.1	1 小时 20 分钟	0.250	0.230	0.020
9 月 16 日	173.3	19 小时 35 分钟	0.210	0.213	0.003

## 2 结果与讨论

### 2.1 主要道路积水点及其积水来源的分析

图 4 显示 5, 20, 50 和 100 年一遇的积水分布, 积水较严重的主要在 A, B, C 和 D 这 4 处, 重现期为 5~100 年暴雨下各点的最大积水水深分别为 0.22~

0.4, 0.32~0.6, 0.3~0.76 和 0.55~0.76 m。从最大积水水深看, 积水最严重的为 D 点; 从积水面积看, 积水最严重的为 C 点, 50 年暴雨的积水面积达到 21426 m<sup>2</sup>。

表 2 列出研究区主要积涝点积水的来源统计。在重现期 5 年的暴雨下, 溢流对 A, B, C 和 D 点积水的贡献分别为 24%, 0%, 0%和 61%。因此, A 点积水主要源于本地道路汇水, 但也受到溢流的影响; B 和 C 点积水源于本地道路汇水; D 点积水主要源于溢流。

在重现期 50 年的暴雨下, 溢流对 A, B, C 和 D 点积水的贡献分别为 49%, 0%, 62%和 73%。因此, A 点积水源于本地道路汇水和溢流的共同影响, 两者的贡献相当; B 点积水仍源于本地道路汇水; C 和

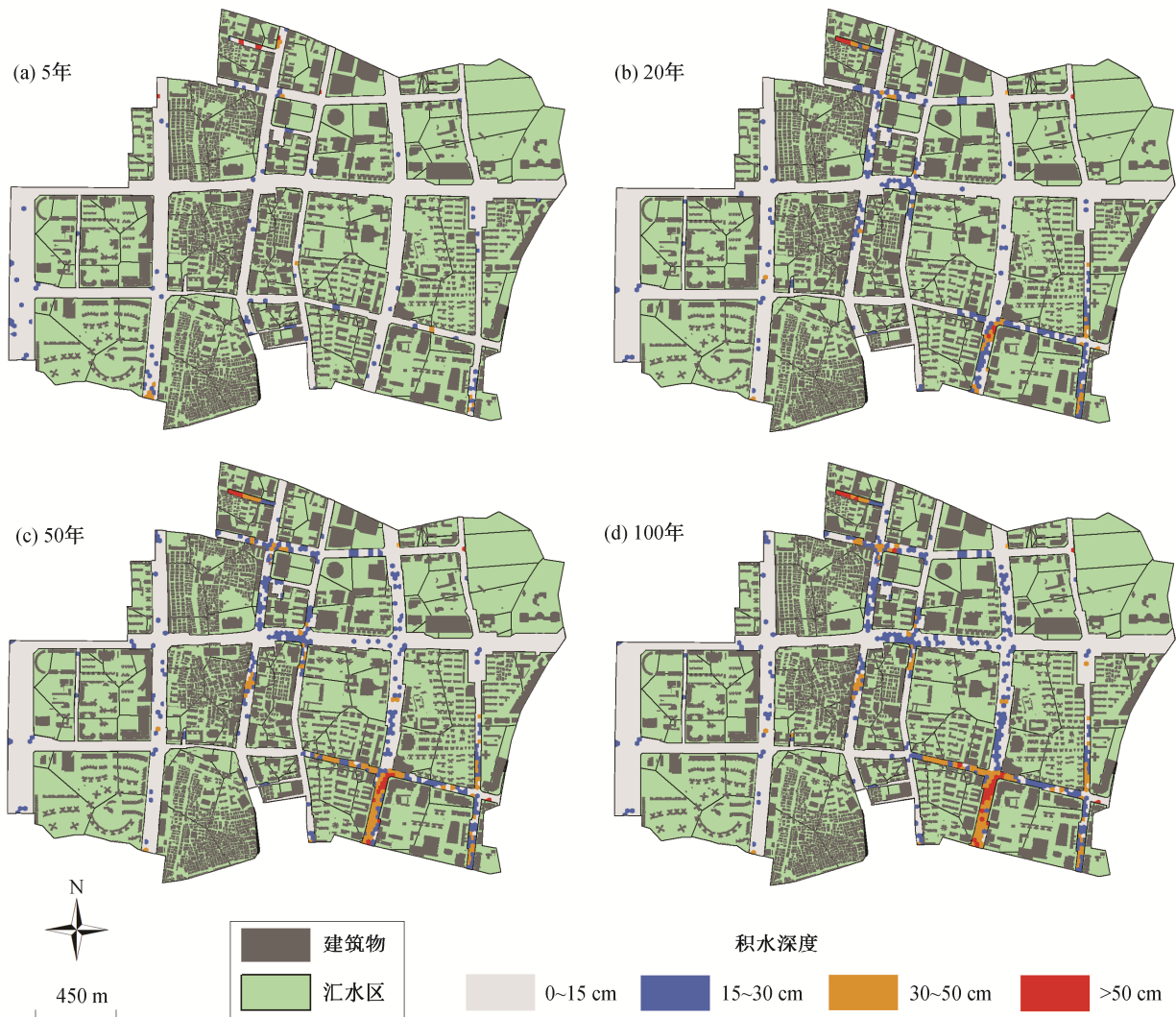


图 4 不同重现期暴雨下道路积水分布

Fig. 4 Road Waterlogging under different return period of storm events

表 2 积水水量统计  
Table 2 Stagnant water volume statistics

积水点	重现期 5 年			重现期 50 年		
	溢流量/ $\text{m}^3$	积水总量/ $\text{m}^3$	溢流贡献/%	溢流量/ $\text{m}^3$	积水总量/ $\text{m}^3$	溢流贡献/%
A	124	523	24	830	1707	49
B	0	833	0	0	2271	0
C	0	849	0	2595	4188	62
D	556	915	61	1179	1624	73

D点积水主要源于溢流。随暴雨强度增大,检查井溢流对积水贡献增加。

## 2.2 道路积水的动态变化及其原因

本文以50年重现期暴雨下A、B、C和D这4个点为例,分析道路积水深度和积水面积的动态变化特征。

### 2.2.1 积水深度的动态变化

从积水深度大于0.15 m的持续时间看,A、B、C和D点积水时间分别为192、140、65和221分钟,其中A和D点的积水时间较长(图5(a))。

从水深峰值来看,C和D点的积水深度(约为0.7 m)大于A和B点的积水深度(约为0.4 m),可能与C和D点产生较多检查井溢流有关。

从水深变化来看,在峰值到达前,C和D两点呈现水深先缓增加再暴涨的现象,水深暴涨与C和D点开始溢流有关;在峰值到达后,B点出现水深先缓降再暴跌的现象,可能与B点下游排水不畅造成的壅堵有关:C点位于B点下游,在C点积水几乎排净之后,B点水深下降速度变快。A点的积水深度最后稳定在0.15 m左右,经过分析发现A点附近存在局部地势低洼的情况,导致积水不能排出。

### 2.2.2 积水面积的动态变化

根据《城镇内涝防治技术规范 GB51222—2017》<sup>[12]</sup>,本文以0.15 m为阈值,统计内涝面积,并分析内涝点的积水面积占道路汇水区面积比例的动态变化过程(图5(b))。可以看出,4个点均出现积水铺满相应道路汇水区的现象(积水面积占比达100%),其中A、B和C点的积水面积随时间变化的趋势相似,达到峰值后迅速下降,而C点的积水面积下降最快。这是由于C点所在的南山大道路面较宽,且水流较通畅,随着降雨强度的减弱,管网排水能力能够快速恢复。D点的积水面积达到峰值后下降缓慢,可能与D点有较多溢流、路面相对较窄和排水能力较差等因素有关。

## 2.3 道路积水成因与控制措施

A点和D点的积水中,溢流占比大,本地汇水占比小,这与A和D两点上游汇水区不透水下垫面占比较高,来水较多有关。因此,为解决A和D两点的积水问题,首先应提高排水能力,或者对上游汇水区进行海绵设施建设,提高入渗量,减少向下游的排放量。另一方面,A点的积水时间较长,表明其积水不能排出(积水深度最后保持不变),即A点存在局部地势低洼的情况。因此,针对A点还应考虑对局部地形进行改造或增加排涝泵站设施等。

B点在重现期5年和50年暴雨下未产生溢流。C点位于B点的下游,C点在5年暴雨下没有溢流,但在50年暴雨下产生溢流,且溢流量对积水贡献较大(占总积水的62%)。结合积水深度的动态变化,C点积水排净后,B点积水也随之迅速排出,说明C点排水能力较差,且对B点产生壅堵。因此,为了解决B和C两点的积水问题,一方面,应在B点通

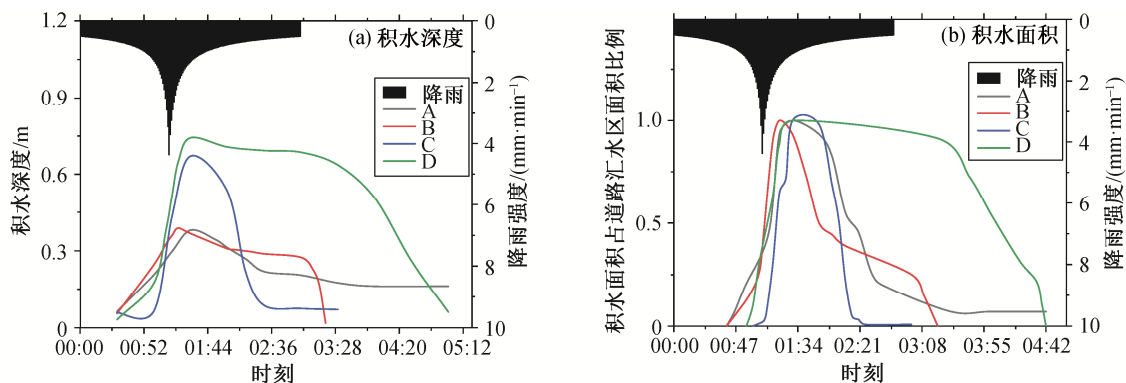


图 5 50 年重现期暴雨下道路积水动态变化

Fig. 5 Variation of urban road waterlogging under storm with 50-year return period

过海绵设施建设,提高入渗量,减少向下游的排放量;另一方面,应提高 C 点的管网排水能力,减少对上游的壅堵。

### 3 结论

本文构建基于 PCSWMM 的一维二维耦合内涝模型,模拟道路地表径流和排水系统溢流对道路积水的影响,并提出以本地道路汇水和检查井溢流对积水贡献比例为指标的解析积水来源的方法,用来判断积水成因。本文以深圳南山区某排水片区为研究区开展案例研究,得到如下结果。

1) 研究区存在 4 个主要道路积水点(A, B, C 和 D),在重现期 5~50 年暴雨下,其最大积水深度分别为 0.22~0.4, 0.32~0.6, 0.3~0.76 和 0.55~0.76 m;在重现期 5 年的暴雨下,有两个积水点(A 和 D)发生溢流,溢流在积水的占比分别为 24%和 61%;在重现期 50 年暴雨下,有 3 个积水点(A, C 和 D)发生溢流,溢流在积水中的占比分别为 49%, 62%和 73%。随着暴雨强度增大,检查井溢流对积水的贡献增加。

2) 道路积水的动态变化受到积水来源、下游壅堵和局部地形等诸多因素的综合影响。在 50 年暴雨重现期下,对于溢流在道路积水中占比最多的点(D),积水较深,持续时间较长,且在积水达到最大值前呈现水深先缓增再暴涨的趋势,在积水达到最大值后呈现水深先缓降再暴跌的趋势;对于本地道路汇水在积水中占最多的点(B),积水较浅,且由于受到下游壅堵,在积水达到最大值后也呈现水深先缓降再暴跌的趋势。

3) 对于溢流在积水中占比较大的内涝点,建议着重提高管网排水能力,并对上游汇水进行海绵化改造。对于本地汇水在积水中占比较大的内涝点,建议对本地进行海绵化改造,适当地改造局部地形,或增加排涝泵站设施等。

### 参考文献

- [1] 宋晓猛,张建云,王国庆,等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战——II. 城市雨洪模拟与管理. 水科学进展, 2014, 25(5): 752-764
- [2] Wang Ying, Luan Qinghua, Wang Haichao, et al. Risk

assessment of rainstorm waterlogging in New District based on MIKE Urban // Sustainable Development of Water Resources and Hydraulic Engineering in China. Handan, 2019: 29-40

- [3] Bouvier C, Chahinian N, Adamovic M, et al. Large-scale GIS-based urban flood modelling: a case study on the city of Ouagadougou // Advances in Hydroinformatics. Nice, 2018: 703-717
- [4] Bermudez M, Ntegeka V, Wolfs V, et al. Development and comparison of two fast surrogate models for urban pluvial flood simulations. Water Resources Management, 2018, 32(8): 2801-2815
- [5] Wang Yuntao, Chen A S, Fu Guangtao, et al. An integrated framework for high-resolution urban flood modelling considering multiple information sources and urban features. Environmental Modelling & Software, 2018, 107: 85-95
- [6] 潘安君,侯爱中,田富强,等. 基于分布式洪水模型的北京城区道路积水数值模拟:以万泉河桥为例. 水力发电学报, 2012, 31(5): 19-22
- [7] 张成才,黄河,朱祖乐,等. 基于高精度 DEM 的城市道路积水淹设计算方法研究. 水利水电技术, 2017, 48(12): 1-6
- [8] Starita S, Scaparra M P, O'Hanley J R. A dynamic model for road protection against flooding. The Journal of the Operational Research Society, 2017, 68(1): 74-78
- [9] 黄国如,麦叶鹏,李碧琦,等. 基于 PCSWMM 模型的广州典型社区海绵化改造水文效应研究. 南方建筑, 2017(3): 38-45
- [10] Ahiablame L, Shakya R. Modeling flood reduction effects of low impact development at a watershed scale. Journal of environmental management, 2016, 171: 81-91
- [11] Irvine K, Sovann C, Suthipong S, et al. Application of PCSWMM to assess wastewater treatment and urban flooding scenarios in Phnom Penh, Cambodia: a tool to support eco-city planning. Journal of Water Management Modeling, 2015: C389
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城镇内涝防治技术规范: GB 51222—2017 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2017