

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.01.012

# 基于示踪方法的沿海城市内涝防灾方案研究

马 超<sup>1</sup>,赵 凯<sup>1</sup>,齐文超<sup>1</sup>,陈姿帆<sup>1</sup>,许红师<sup>2</sup>

(1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室,天津 300350;  
2. 郑州大学水利科学与工程学院,河南 郑州 450001)

**摘要:**针对沿海城市日益突出的内涝灾害防治需求,开展基于示踪方法并考虑复杂河网系统水量交换的城市内涝防灾方案研究,以排水分区为分析单元,构建耦合示踪方法的城市内涝模型,显性化城市排水分区复杂的水量关联性。以海口市龙昆沟排水系统为例,采用PCSWMM构建耦合示踪方法的城市内涝模型,结果表明:模型可定量识别内涝积水来源,得到不同排水分区对关注区域内涝积水的贡献量,有效支撑分区防灾措施规划;基于示踪方法的防灾方案可削减关注区域积水量的36.10%,达到预期内涝整治效果。

**关键词:**城市内涝;示踪方法;PCSWMM;致灾机理;防灾方案;海口市

**中图分类号:**TU992      **文献标志码:**A      **文章编号:**1004-6933(2022)01-0091-09

**Formulation of flood mitigation scheme in coastal cities based on source tracking method//** MA Chao<sup>1</sup>, ZHAO Kai<sup>1</sup>, QI Wenchao<sup>1</sup>, CHEN Zifan<sup>1</sup>, XU Hongshi<sup>2</sup> (1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. School of Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In view of the increasing needs for urban flood prevention in coastal cities, a study was performed on the flood mitigation scheme based on the source tracking method. With subcatchments used as the analysis units, the complex water volume correlation between urban subcatchments was investigated through establishment of an urban flooding model for simulation of the urban rainfall-runoff process. With the Longkungou drainage system in Haikou City taken as an example, PCSWMM was used to establish the urban flooding model with the source tracking method, and the results show that sources of accumulated water in the inundation area were identified quantitatively and contribution ratios of different subcatchments to the accumulated water in the inundation area could be obtained by the model, which provided a basis for the selection of reasonable flood mitigation measures for different subcatchments. The implementation of the flood mitigation scheme formulated based on source tracking results can reduce the accumulated water amount by 36.10% in the serious inundation area, achieving the desired effect of flood mitigation.

**Key words:** urban flood; source tracking method; PCSWMM; disaster-causing mechanism; flood mitigation scheme; Haikou City

随着城市化进程的加快,频发的强降雨事件、发展滞后的城市排水系统及其有限的排水能力导致城市易遭受严重的内涝灾害<sup>[1-4]</sup>,已成为目前亟待解决的全球性问题<sup>[5-7]</sup>。如果不采取有效的内涝防灾策略和措施,到21世纪末,全球内涝灾害造成的损失将增加约20倍<sup>[8-9]</sup>。受季风气候影响,我国城市尤其沿海城市内涝灾害极为突出<sup>[10]</sup>。水利部发布的《中国水旱灾害公报》显示,2015年我国有168座

城市遭受不同程度的内涝灾害,受灾人口7641万人,直接经济损失1661亿元,福州、临海等多个沿海城市灾害损失严重<sup>[11]</sup>;2016年城市内涝影响范围进一步扩大,受淹城市192座,受灾人口1.02亿人,直接经济损失3661亿元,多个沿海城市出现年内雨季多次受灾情况<sup>[12]</sup>。城市内涝灾害频繁发生,严重影响了城市公共安全,也制约了社会经济的可持续发展<sup>[13-14]</sup>。

基金项目:国家自然科学基金(51679159,51722906)

作者简介:马超(1981—),男,教授,博士,主要从事城市内涝防灾研究。E-mail: mac\_tju@126.com

为提升城市内涝灾害防治能力,降低内涝灾害程度和影响,国内外学者围绕城市内涝防灾措施规划<sup>[15]</sup>、措施调控<sup>[16]</sup>等方面开展了大量研究。措施规划方面,Maharjan 等<sup>[17-19]</sup>将城市内涝数值模拟耦合到单目标或多目标优化决策模型中,优化排水管网尺寸、蓄水池和排水泵站的规模及其布置;Lu 等<sup>[20-21]</sup>在此基础上提出两阶段多目标优化框架,以期寻得更优的措施规划方案。低影响开发 (low impact development, LID)<sup>[22-24]</sup>、最佳管理措施 (best management practices, BMPs)<sup>[25]</sup>、水敏感城市 (water sensitive urban design, WSUD)<sup>[26]</sup>等分散式内涝治理研究也受到广泛关注,为城市内涝综合治理提供了支撑<sup>[27-28]</sup>。措施调控方面,与快速计算模型<sup>[29]</sup>、智能系统<sup>[30]</sup>、各类优化算法<sup>[31-32]</sup>等相结合的实时调控及其系统开发成为当前研究重点,研究成果可为制定各项措施的调控方案提供参考与支持。此外,随着计算机软硬件技术的快速发展,人工智能<sup>[33]</sup>、神经网络<sup>[34]</sup>、强化学习<sup>[35]</sup>等技术也开始广泛应用于城市内涝及防灾决策研究中。

当前城市内涝防灾措施规划及措施调控决策的制定主要依据内涝积水的深度、时长、分布范围等特征信息,但由于各排水分区、河渠排水通道及闸泵排水设施间存在复杂紧密的水量关联性,如不能有效识别内涝积水来源、量化源头排水分区对积水过程的贡献,制定的防灾方案虽能产生局部减灾效果,但在整体层面无法达到协同最优,甚至产生此消彼长的不利影响。因此,量化识别复杂排水系统的水量关联性是实现精细化和整体协同内涝灾害防治的基础。已在水环境和水文领域使用的示踪方法因具有显性化水流路径、可识别水流来源等突出优点使其成为量化识别复杂排水系统水量关联性的有效手段<sup>[36-38]</sup>,基于此,本文以海口市龙昆沟排水系统为例,开展基于示踪方法的沿海城市内涝防灾方案研究,基于示踪方法识别径流过程,揭示城市多区域间的水量关联性,进而制定城市内涝整体防灾治理方案,以期获得更优的区域整体防灾效果。

## 1 基于示踪方法的城市内涝治理方案

### 1.1 基于 PCSWM 的示踪方法

选取污染物作为示踪剂,通过耦合城市内涝模型中的水文水动力模块和水质模块,实现基于示踪方法的城市内涝分析。具体研究方法为:在不同排水分区设置源头示踪剂,实现对各排水分区产汇流水体的追踪;通过耦合示踪剂输移与产汇流水体流动,实现积水来源识别和对各排水分区贡献程度的定量分析。

采用 PCSWM (personal computer storm water management model) 进行示踪方法研究。PCSWM 是加拿大水力计算研究所 (Computational Hydraulics International, CHI) 以美国环境保护局 (Environmental Protection Agency, EPA) 研发的 SWMM (storm water management model) 为核心开发并改进的城市雨洪管理模型,具有强大的水文、水力模拟模块,能够计算地表产汇流、管网水动力传输和水质变化,支持 1D/2D 模型的耦合;可完整模拟降雨径流和污染物输移过程,实现场次暴雨或连续暴雨下降雨径流的动态分析<sup>[39]</sup>。

#### 1.1.1 源头示踪剂设置

在各排水分区中采用污染物堆积模型生成对应编号的示踪剂,用于对各产汇流水量进行示踪;采用污染物平均浓度冲刷模型(式(1))<sup>[40]</sup>生成产汇流过程中质量浓度恒定的源头示踪剂。

$$\rho = \frac{\int_0^T \rho_t Q_t dt}{\int_0^T Q_t dt} \quad (1)$$

式中: $\rho$  为污染物冲刷质量浓度, mg/L;  $t$  为时间, s;  $T$  为总径流时间, s;  $\rho_t$  为随径流变化的污染物质量浓度, mg/L;  $Q_t$  为径流流量, m<sup>3</sup>/s。

由于示踪剂用于内涝积水贡献量的量化,故各排水分区内的污染物平均浓度冲刷模型系数设置相同,确保不同源头示踪剂的质量浓度相等且恒定,本文设定为 1 mg/L。

#### 1.1.2 示踪剂与产汇流水量耦合

PCSWM 将城市排水系统概化为地表 2D 排水系统和地下 1D 排水系统,基于 1D/2D 耦合将二者连接进行计算。管网内示踪剂输移计算不考虑对流扩散,示踪剂的输移速度与水流流速相同,当水体流出管网时,示踪剂质量浓度通过质量平衡方程计算;对于地表网格和具有储水容量的节点,示踪剂质量浓度计算采用与管网内相同的计算方法,对于没有储水容量的节点,示踪剂质量浓度由进入该节点水体的示踪剂质量浓度表示<sup>[41]</sup>。模型整体通过联立水量平衡方程与示踪剂质量平衡方程,实现水量与示踪剂耦合模拟。质量平衡方程为<sup>[38]</sup>

$$\frac{d(\rho_s S)}{dt} = \sum_j Q_j \rho_j - \sum_k Q_k \rho_k \quad (2)$$

式中: $\rho_s$  为示踪剂质量浓度, mg/L;  $S$  为节点或管网蓄水量, L;  $Q_j, Q_k$  分别为以流入方式  $j$  (如旁侧入流等) 流入和以流出方式  $k$  (如旁侧出流等) 流出的流量, m<sup>3</sup>/s;  $\rho_j$  为流入方式  $j$  的水流中示踪剂质量浓度, mg/L;  $\rho_k$  为流出方式  $k$  的水流中示踪剂质量浓度, mg/L。

### 1.1.3 关注区域积水量划分

示踪剂的流动与径流过程同步,示踪剂累积质量与累积降雨产汇流成正比。因此,基于模拟得出的关注区域的积水量和各示踪剂质量变化过程,根据质量守恒原理,可计算出各时刻不同排水分区对关注区域的内涝积水贡献量:

$$V_{it} = \frac{m_{it}}{\sum_{i=1}^n m_{it}} V_t \quad (3)$$

式中: $V_{it}$ 为 $t$ 时刻源头区域 $i$ 对关注区域的内涝积水贡献量, $m^3$ ; $V_t$ 为 $t$ 时刻关注区域的积水量,为各示踪剂源头区域在 $t$ 时刻对关注区域的内涝积水贡献量之和, $m^3$ ; $m_{it}$ 为 $t$ 时刻关注区域内来自源头区域 $i$ 的示踪剂质量,g; $n$ 为源头区域的数量。

### 1.1.4 示踪方法可行性验证

采用如图1所示的区域验证示踪方法的可行性。区域包含A1、A2、A3 3个排水分区,其下垫面参数如表1所示,其中A2、A3内存在内涝积水区域W1、W2。基于PCSWMM的区域1D/2D耦合内涝模型如图2所示。3个排水分区采用污染物堆积模型和污染物平均浓度冲刷模型生成各自的源头示踪剂P1、P2、P3。区域降雨自8:00开始,历时1 h,降雨强度为25 mm/h。

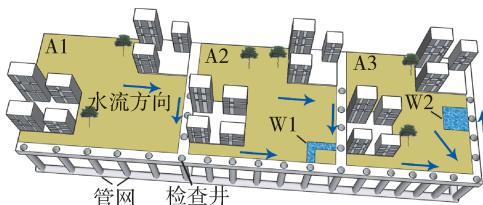


图1 验证示踪方法可行性的区域示意图

Fig. 1 Area for validating feasibility of source tracking method

表1 各排水分区的下垫面参数

Table 1 Underlying surface parameters for each subcatchment

排水分区	面积/ $\text{hm}^2$	不透水区占比/%	不透水区洼蓄量/mm	透水区洼蓄量/mm	无洼蓄量比例/%
A1	2	75	4	5	7
A2	2	85	2	3	2
A3	2	30	3	1	3

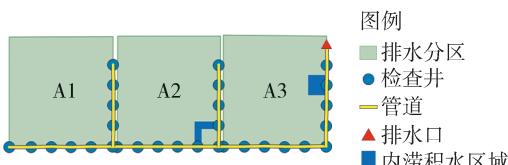


图2 验证示踪方法可行性的PCSWMM

Fig. 2 PCSWMM for validating feasibility of source tracking method

验证模型计算结果如图3所示,自8:02起,各

排水分区出现产汇流,源头示踪剂质量浓度保持1 mg/L,表明污染物平均浓度冲刷模型能够在产汇流时段内生成浓度恒定的源头示踪剂。

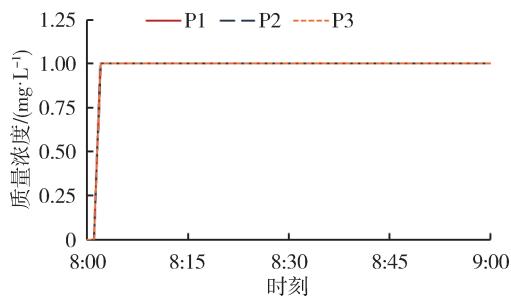
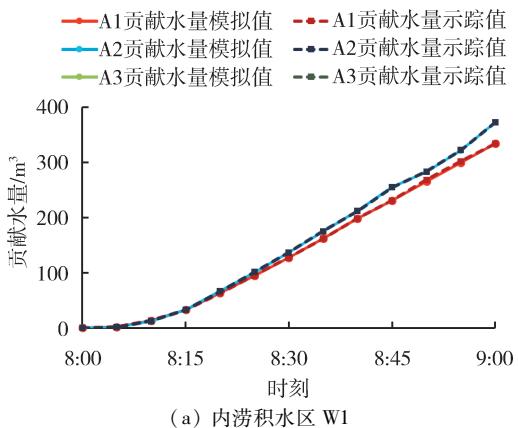


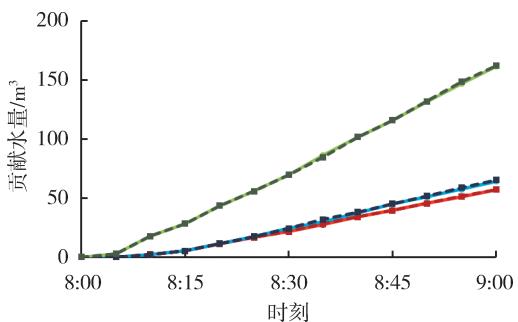
图3 各排水分区源头示踪剂质量浓度变化过程

Fig. 3 Variation in source tracer concentration of each subcatchment

内涝积水区域W1中积水来自A1、A2,内涝积水区域W2中积水来自A1、A2、A3。利用式(3)和基于管网内流量统计,分别计算出各排水分区对W1、W2贡献水量的示踪值和模拟值,结果如图4所示。二者过程吻合,表明利用式(3)可求得任意时刻不同排水分区对内涝积水区的水量贡献。



(a) 内涝积水区 W1



(b) 内涝积水区 W2

图4 各排水分区对内涝积水区贡献水量的模拟值与示踪值对比

Fig. 4 Comparison of simulation and source tracking results of water amount of each subcatchment contributing to inundation areas

示踪剂自源头生成后随产汇流水体输移,一部分留存于内涝积水区域W1、W2中,另一部分则从排水口排出。由图5可知,任意时刻示踪剂P1、P2、

P3 留存于 W1、W2 的质量和排水口累积排出质量之和与源头累积生成的质量吻合,结果证明任意时刻各示踪剂质量守恒。

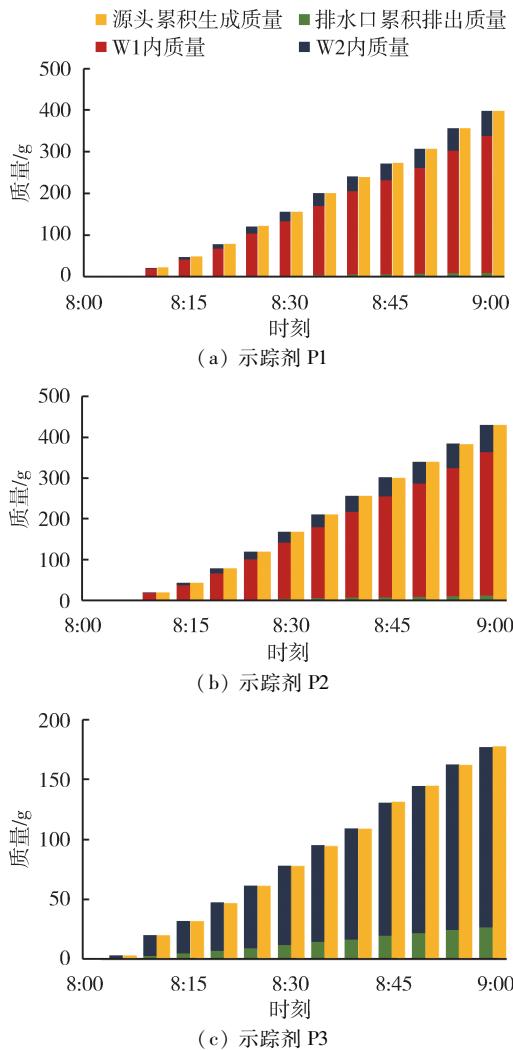


图 5 示踪剂累积排出质量与源头累积生成质量对比

**Fig. 5 Comparison of cumulative mass of tracer released from and that generated at source of each subcatchment**

综上所述,基于 PCSWMM 的示踪方法可行,模拟结果可识别城市区域排水分区间的复杂水量联系,并量化各排水分区对关注区域积水量的贡献占比,以支撑精细化和整体协同的内涝灾害防治方案。

## 1.2 基于示踪结果的分区防灾措施规划

以图 6 为例阐述基于示踪方法的积水溯源和各排水分区防灾措施规划。设 B1 为关注区域,排水分区 B2、B3 的径流汇入 B1,与 B1 自身的积水共同导致 B1 的严重内涝。图 6 显示关注区域的积涝过程以及基于示踪方法计算得到的各时刻不同排水分区对关注区域 B1 的积水量贡献占比。基于示踪方法的各排水分区防灾措施规划步骤为:

**步骤 1** 确定关注区域的防灾关注时段。取容许积水深度以及对应积水时间为灾害条件的量化指

标,根据模拟计算得出关注区域的内涝过程,确定超过灾害条件量化指标的时刻为灾害时刻。如图 6 所示,灾害时刻  $T_a$ ,关注区域此时出现积水深度超标的点位。灾害时刻  $T_a$  后,关注区域的内涝程度逐步增加,直至时刻  $T_b$  关注区域的积水量达到峰值  $V_{\text{峰}}$ ,因此,防灾关注时段为  $T_a \sim T_b$ 。

**步骤 2** 确定各排水分区内涝积水削减量。内涝积水削减从  $T_a$  开始,并使  $T_b$  时区域积水量不超过容许积水深度对应的水量  $V_{\text{容}}$ ,因此削减总量  $\Delta V = V_{\text{峰}} - V_{\text{容}}$ 。各排水分区内涝积水削减量根据防灾关注时段内各排水分区对关注区域内涝积水的贡献程度确定。

**步骤 3** 防灾措施布设位置及类型确定。考虑关注区域的内涝分布和关联影响区域间水量传递路径特点,就近制定防灾措施的布设位置和利用方式;根据  $T_a$  时刻后关联影响区域的贡献水量特征确定防灾措施类型。对关注区域贡献积水量比例小的排水分区,采取 LID 措施进行源头蓄滞,如图 6 中的 B3 区域;当关联影响排水分区的贡献水量较大,且呈现稳定或者稳增的特征时,采取排涝泵站增排来转移积水量,如图 6 中的 B1 区域;当关联影响排水分区的贡献水量过程呈现突增的特征时,采取蓄水池进行源头蓄滞,如图 6 中的 B2 区域。排涝泵站与蓄水池的应用时段均为防灾关注时段  $T_a \sim T_b$ 。

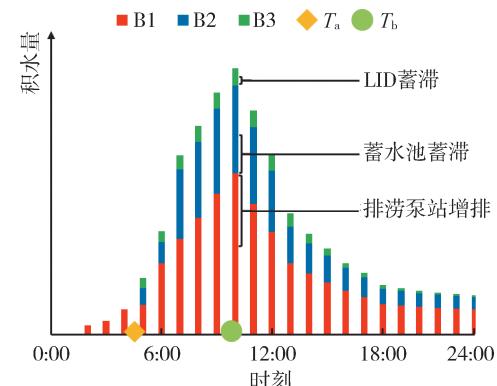


图 6 基于示踪结果的防灾措施方案概化图

**Fig. 6 Flood mitigation scheme based on results of source tracking**

## 2 应用实例

### 2.1 研究区概况

海口市地处热带滨海地区,毗邻琼州海峡。龙昆沟排水系统(图 7)位于海口市北部,在北纬  $19^{\circ}59' \sim 20^{\circ}03'$ 、东经  $110^{\circ}18' \sim 110^{\circ}21'$  之间,地势为西南高、东北低,总面积约  $27.90 \text{ km}^2$ 。排水系统内部建筑设施林立,土地利用类型多样,下垫面情况复杂。受季风气候影响,多年平均降水量为

2 067 mm, 其中 5—10 月雨季降水量占全年的 78.1%。受强降雨与潮位顶托影响, 海口市易受到城市内涝灾害的影响, 例如 2014 年 7 月 17—19 日受台风“威马逊”袭击, 日降水量达 509.2 mm, 内涝灾害造成 8 人死亡, 损失近 90 亿元<sup>[42]</sup>。

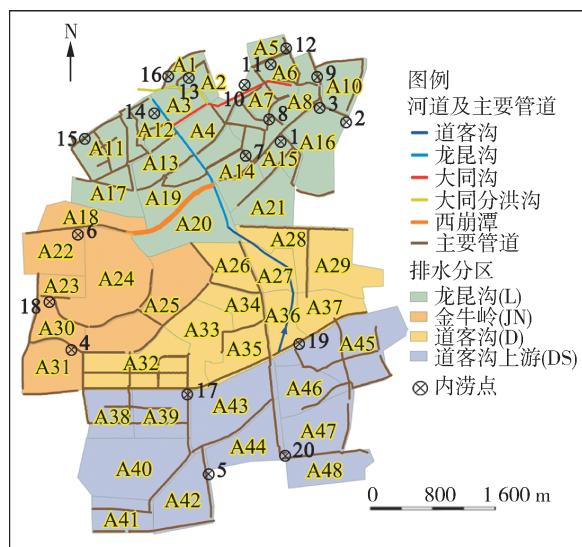


图 7 海口市龙昆沟排水系统组成

Fig. 7 Composition of Longkungou drainage system in Haikou City

## 2.2 模型构建和参数率定

根据海口市水务局提供的检查井、管网以及地形高程等基础资料, 用 PCSWMM 构建耦合示踪方法的海口市龙昆沟排水系统内涝模型, 构建的模型包含管网 4 401 根、检查井 4 563 处、河道 5 条、排水口 5 处、地表网格 18 953 个、汇水区 48 个 (A1 ~ A48)。选取 2014 年 7 月“威马逊”台风期间海口市降水量、潮位数据作为输入边界条件, 采用降雨期间不同点位的实测积水深度对模型进行参数率定<sup>[43-44]</sup>。龙昆沟排水系统 20 处内涝点的实测最大积水深度和模拟结果如表 2 所示。实测最大积水深度为 20 ~ 80 cm, 模拟最大积水深度为 22 ~ 73 cm, 二者积

表 2 “威马逊”台风期间龙昆沟排水系统内涝点实测和模拟最大积水深度

Table 2 Comparison of measured and simulated maximum water depths at flooding points in Longkungou drainage system during typhoon Rammasun

编号	位置	最大积水深度/cm		相对误差/%	编号	位置	最大积水深度/cm		相对误差/%
		实测值	模拟值				实测值	模拟值	
1	海秀东路	70	68	2.9	11	龙华路	35	48	37.1
2	五指山路	70	73	4.3	12	解放西路	50	61	22.0
3	海府路	30	29	3.3	13	新华北路	50	52	4.0
4	滨涯路	60	51	15.0	14	盐灶路	50	60	20.0
5	学院路	40	32	20.0	15	龙昆北路	20	22	10.0
6	海秀中路	50	41	18.0	16	滨海大道	25	23	8.0
7	义龙路	60	66	10.0	17	滨海大道	30	25	16.7
8	大同路	30	35	16.7	18	南海大道	80	72	10.0
9	东湖路	30	36	20.0	19	金垦路	30	39	30.0
10	海秀东路	70	68	2.9	20	红城湖路	50	49	2.0

水深度平均值分别为 46.5 cm 和 47.5 cm, 仅相差 1 cm。模拟结果的确定性系数  $R^2$  和纳什效率系数分别为 0.851、0.845。结果表明, 所构建的龙昆沟排水系统内涝模型合理可行, 模拟精度满足要求。

## 2.3 内涝积水溯源及贡献量化

根据 GB 51222—2017《城镇内涝防治技术规范》及《城市排水(雨水)防涝综合规划编制大纲》规定, 省会城市中心城区能有效应对不低于 50 年一遇的降雨<sup>[45-46]</sup>。故以 50 年一遇设计降雨和同频率潮位组合为设计情景, 开展龙昆沟排水系统积水来源和内涝成因分析。基于海口雨量站 1974—2012 年实测降雨及潮位数据, 采用 P-III 型曲线计算 50 年一遇设计降雨和潮位值, 选取 1996 年 9 月 19—20 日的 24 h 暴雨过程为典型暴雨过程, 采用同频率放大法得到设计降雨时程分布(图 8); 选取 2014 年 7 月“威马逊”台风期间实测潮位过程作为典型潮位过程, 采用同倍比放大法得到设计潮位时程分布(图 8)。设计情景下龙昆沟排水系统最大积水深度及其分布模拟结果如图 9 所示。

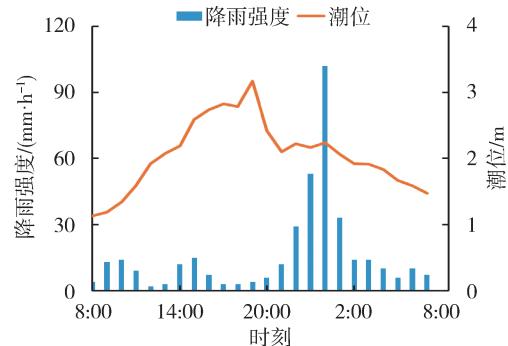


图 8 50 年一遇设计降雨及同频率潮位时程

Fig. 8 Time course of 50-year design rainfall and tidal level

根据空间关联性和排水管网布置情况, 龙昆沟排水系统内的 48 个汇水区被划分为龙昆沟(L)、金

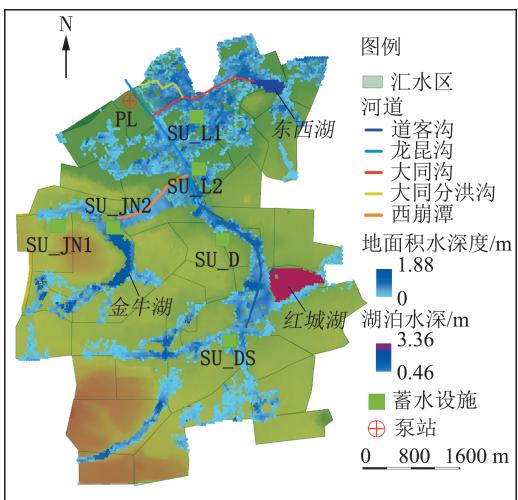


图9 设计情景下积水分布及各排水分区防灾措施布置  
Fig. 9 Accumulated water distribution in study area in design scenario and layout of flood mitigation measures for each subcatchment

牛岭(JN)、道客沟(D)、道客沟上游(DS)4个排水分区,见图7。模拟结果表明,50年一遇降雨情景下,4个排水分区峰值时刻的积水面积分别占各排水分区总面积的39.48%、20.86%、11.40%和7.53%。L排水分区的内涝灾情最严重,内涝积水总量过程与降雨过程同步,但积水总量峰值滞后降雨峰值3 h(图10)。

确定内涝灾情最严重的下游L排水分区为关注区域。基于示踪方法计算得出L排水分区积水来源及其过程,如图10所示。L排水分区的内涝程度受自身和JN、D、DS排水分区共同影响,各排水分区对峰值积水量的贡献比例分别为40.85%、25.05%、16.74%和17.36%。因龙昆沟、大同沟和

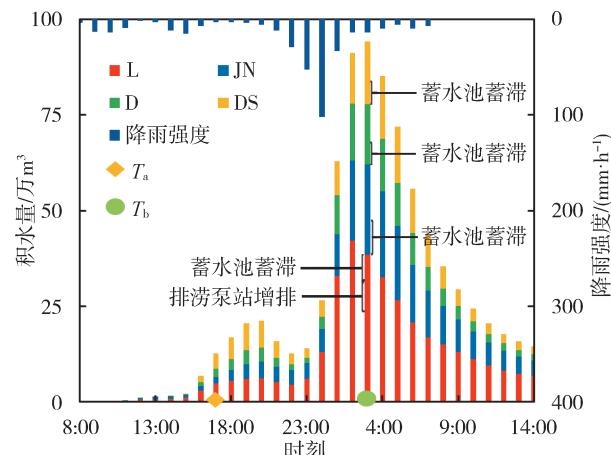


图10 L排水分区內涝积水溯源和各排水分区防灾措施规划方案

Fig. 10 Source tracking of accumulated water in subcatchment L and flood mitigation scheme for each catchment

大同分洪沟的过流能力有限且受高潮位顶托影响,暴雨期间,L排水分区自身积水量和上游关联影响排水分区的传递水量汇合后,无法有效排出,导致河渠水位显著上涨,产生漫溢现象和对排入河渠管网的顶托作用,使得L排水分区发生长时间严重内涝。

## 2.4 防灾措施规划及效果评估

### 2.4.1 防灾措施规划

针对上述情况,以缓解L排水分区內涝灾害为目标,规划L、JN、D、DS排水分区的防灾措施。设定容许积水深度为0.30 m,由模拟结果得出,L排水分区在17:00出现积水深度超过容许积水深度且积水时间大于1 h的内涝点位, $T_a$ 为17:00;在次日3:00,L排水分区积水量达到峰值, $T_b$ 为次日3:00,防灾关注时段为 $T_a \sim T_b$ 。依据容许积水深度计算得出内涝积水应削减总量 $\Delta V$ 为36.4万 $m^3$ ,按照 $T_b$ 时刻L排水分区积水量来源及其组成比例得出L、JN、D及DS排水分区的内涝积水削减量分别为15万 $m^3$ 、9万 $m^3$ 、6.1万 $m^3$ 和6.3万 $m^3$ 。各排水分区防灾措施规划方案如图10和表3所示,L排水分区地势低且排水能力不足(潮位顶托)导致上游排水分区水量的快速汇入,因此选择蓄水池和排涝泵站相结合的内涝防灾措施;其他3个排水分区为上游关联影响排水分区,且在0:00呈现水量突增的现象,因此选择蓄水池作为内涝防灾措施。各防灾措施的启用时段为防灾关注时段,此外,各排水分区防灾措施位置布设时考虑水量传递路径,具体位置如图9所示。

表3 各排水分区防灾措施规模

Table 3 Scales of flood mitigation measures for each subcatchment

排水分区	措施名称	措施类型	措施规模/万 $m^3$
			*
L	PL	泵站	2.08 *
	SU_L1	蓄水池	4.0
	SU_L2	蓄水池	3.5
JN	SU_JN1	蓄水池	5.0
	SU_JN2	蓄水池	4.0
D	SU_D	蓄水池	6.1
DS	SU_DS	蓄水池	6.3

注: \* 表示单位为 $m^3/s$ 。

### 2.4.2 内涝整治效果评估

50年一遇设计降雨和同频率潮位组合情景下,各排水分区防灾措施实施后,内涝整治效果如图11和表4所示。对比结果表明,防灾方案达到了预期内涝整治效果。防灾关注时段末,龙昆沟排水系统的内涝积水面积减少10.31%;平均内涝积水深度从原来的0.33 m下降至0.27 m,降低18.18%;积水量减少36.1万 $m^3$ ,削减幅度为28.20%。4个排水分区的内涝程度均有不同的缓解,但主要集中在关

注的 L 排水分区。L 排水分区在防灾关注时段末的内涝积水面积减少 14.42%；平均内涝积水深度从原来的 0.37 m 下降至 0.28 m，降低 24.32%；积水量减少 33.98 万 m<sup>3</sup>，削减幅度为 36.10%。严重内涝点在措施实施后的最大内涝积水深度基本控制在 0.30 m 以内，但因复杂水流关系和局部凹地等微地形的影响，内涝整治措施的预期作用和效果略有调整，导致防灾关注时段末的积水量的削减量略小于设定的 36.4 万 m<sup>3</sup>，同时仍存在最大内涝积水深度超过 0.30 m 的点位，如海秀东路和盐灶路，应针对性调整和细化局部方案，或将示踪方法与降雨特征相结合，获得更优的措施启用时段。

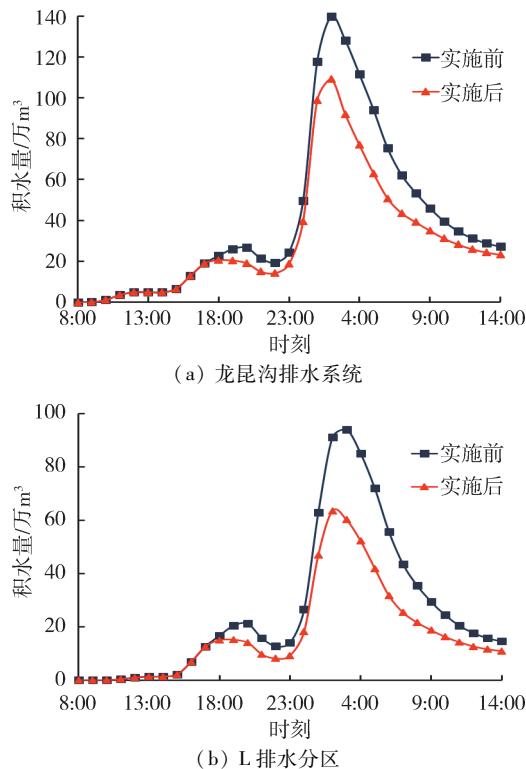


图 11 设计情景下防灾方案实施前后积水量对比

Fig. 11 Comparison of accumulated water amounts before and after implementation of flood mitigation scheme in design scenario

表 4 防灾方案实施前后 L 排水分区严重内涝点位最大积水深度对比

Table 4 Comparison of maximum water depths at serious flooding points in subcatchment L before and after implementation of flood mitigation scheme

编号	位置	最大积水深度/cm		降低幅度/%
		实施前	实施后	
1	海秀东路	50	45	10.0
7	义龙路	58	30	48.3
8	大同路	30	13	56.7
11	龙华路	36	21	41.7
13	新华北路	35	21	40.0
14	盐灶路	59	34	42.4

### 3 结语

本文基于示踪方法的沿海城市内涝防灾方案研究，创新性地提出了将示踪方法与水力计算相耦合，精细模拟城市内涝过程，实现了内涝积水的溯源和过程量化，揭示了城市排水系统排水分区间复杂的水量关联性。基于示踪结果提出了考虑排水分区间水量关联性的防灾措施规划方案，包括确定措施类型、规模和启用时段。

以海口市龙昆沟排水系统为例，采取 PCSWMM 构建耦合示踪方法的城市内涝模型。基于 50 年一遇设计降雨情景模拟示踪结果，分析内涝积水来源及内涝成因，提出各排水分区的防灾措施规划方案。结果表明，防灾方案实施后达到预期减灾效果，防灾关注时段末，龙昆沟排水系统的积水量、内涝积水面积、平均内涝积水深度分别减少 28.20%、10.31% 和 18.18%；减灾效果主要体现在关注的 L 排水分区，其积水量、内涝积水面积、平均内涝积水深度分别减少 36.10%、14.42% 和 24.32%。实例结果验证了所提出示踪方法的可行性和有效性。

示踪方法未来可与降雨预报、城市内涝快速模拟模型等相结合，为防灾措施的实时调控提供技术支撑，以优化考虑排水分区间水量关联性的调控方案，达到更优的城市内涝治理效果。

### 参考文献：

- [1] CHEN Y, SAMUELSON H W, TONG Z. Integrated design workflow and a new tool for urban rainwater management [J]. Journal of Environmental Management, 2016, 180: 45-51.
- [2] LEITAO J P, CARBAJAL J P, RIECKERMANN J, et al. Identifying the best locations to install flow control devices in sewer networks to enable in-sewer storage [J]. Journal of Hydrology, 2018, 556: 371-383.
- [3] 张建云, 王银堂, 刘翠善, 等. 中国城市洪涝及防治标准讨论[J]. 水力发电学报, 2017, 36(1): 1-6. (ZHANG Jianyun, WANG Yintang, LIU Cuishan, et al. Discussion on the standards of urban flood and waterlogging prevention in China [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(1): 1-6. (in Chinese))
- [4] RUBINATO M, NICHOLS A, PENG Y, et al. Urban and river flooding: comparison of flood risk management approaches in the UK and China and an assessment of future knowledge needs [J]. Water Science and Engineering, 2019, 12(4): 274-283.
- [5] WANG Y, MENG F, LIU H, et al. Assessing catchment scale flood resilience of urban areas using a grid cell based

- metric [J]. Water Research, 2019, 163:114852.
- [ 6 ] 郝晓丽, 穆杰, 喻海军, 等. 城市洪涝试验研究进展 [J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(1): 80-86. ( HAO Xiaoli, MU Jie, YU Haijun, et al. Advances in experimental research of urban flooding [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(1), 80-86. (in Chinese))
- [ 7 ] 姜仁贵, 韩浩, 解建仓, 等. 变化环境下城市暴雨洪涝研究进展 [J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(3): 11-17. (JIANG Rengui, HAN Hao, XIE Jianchang, et al. Research progress of urban storm flood under changing environment [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 27(3): 11-17. (in Chinese))
- [ 8 ] BERNDTSSON R, BECKER P, PERSSON A, et al. Drivers of changing urban flood risk: a framework for action [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 240:47-56.
- [ 9 ] WINSEMIUS H, AERTS J, VAN BEEK L, et al. Global drivers of future river flood risk [J]. Nature Climate Change, 2016, 6(4): 381-385.
- [10] 宋利祥, 徐宗学. 城市暴雨内涝水文水动力耦合模型研究进展 [J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2019, 55(5): 581-587. ( SONG Lixiang, XU Zongxue. Coupled hydrologic-hydrodynamic model for urban rainstorm water logging simulation: recent advances [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2019, 55(5): 581-587. (in Chinese))
- [11] 中华人民共和国水利部. 中国水旱灾害公报: 2015 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.
- [12] 中华人民共和国水利部. 中国水旱灾害公报: 2016 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2017.
- [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] 张建云, 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))
- [15] CUNHA M C, ZEFERINO J A, SIMOES N E, et al. Optimal location and sizing of storage units in a drainage system [J]. Environmental Modelling & Software, 2016, 83:155-166.
- [16] HSU N S, HUANG C L, WEI C C. Intelligent real-time operation of a pumping station for an urban drainage system [J]. Journal of Hydrology, 2013, 489:85-97.
- [17] MAHARJAN M, PATHIRANA A, GERSONIUS B, et al. Staged cost optimization of urban storm drainage systems based on hydraulic performance in a changing environment [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2009, 13(4): 481-489.
- [18] DUAN H-F, LI F, TAO T. Multi-objective optimal design of detention tanks in the urban stormwater drainage system: uncertainty and sensitivity analysis [J]. Water Resources Management, 2016, 30(7): 2213-2226.
- [19] MOHAMMADIUN S, YAZDI J, NEYSHABOURI S A A S, et al. Development of a stochastic framework to design/rehabilitate urban stormwater drainage systems based on a resilient approach [J]. Urban Water Journal, 2018, 15(2): 167-176.
- [20] LU W, QIN X, YU J. On comparison of two-level and global optimization schemes for layout design of storage ponds [J]. Journal of Hydrology, 2019, 570:544-554.
- [21] WANG M, SUN Y, SWEETAPPLE C. Optimization of storage tank locations in an urban stormwater drainage system using a two-stage approach [J]. Journal of Environmental Management, 2017, 204:31-38.
- [22] GUO X C, GUO Q Z, ZHOU Z K, et al. Degrees of hydrologic restoration by low impact development practices under different runoff volume capture goals [J]. Journal of Hydrology, 2019, 578:124069.
- [23] AKTER A, TANIM A H, ISLAM M K. Possibilities of urban flood reduction through distributed-scale rainwater harvesting [J]. Water Science and Engineering, 2020, 13(2): 95-105.
- [24] 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))
- [25] 刘洪波, 王真真, 谢玉霞, 等. 雨洪最佳管理措施决策支持系统(BMPDSS)介绍 [J]. 中国给排水, 2014, 30(24): 18-22. ( LIU Hongbo, WANG Zhenzhen, XIE Yuxia, et al. Introduction to best management practice decision support system [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(24): 18-22. (in Chinese))
- [26] 肖娅, 徐骅. 澳大利亚水敏城市设计工作框架内容及其启示 [J]. 规划师, 2019, 35(6): 78-83. ( XIAO Ya, XU Hua. Water sensitive urban design framework of WSUD action in Australia [J]. Planners, 2019, 35(6): 78-83. (in Chinese))
- [27] 杨凤茹, 陈亮, 张雅卓, 等. 低影响开发雨水系统规划研究综述 [J]. 水力发电学报, 2021, 40(6): 62-78. ( YANG Fengru, CHEN Liang, ZHANG Yazhuo, et al. Review of the low impact development rainwater system planning [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(6): 62-78. (in Chinese))
- [28] 赵银兵, 蔡婷婷, 孙然好, 等. 海绵城市研究进展综述:

- 从水文过程到生态恢复 [J]. 生态学报, 2019, 39(13): 4638-4646. ( ZHAO Yinbing, CAI Tingting, SUN Ranhao, et al. Review on sponge city research: from hydrological process to ecological restoration [ J ]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(13) :4638-4646. (in Chinese) )
- [29] ABOU RJEILY Y, ABBAS O, SADEK M, et al. Model predictive control for optimizing the operation of urban drainage systems [ J ]. Journal of Hydrology, 2018, 566: 558-565.
- [30] DI MATTEO M, LIANG R, MAIER H R, et al. Controlling rainwater storage as a system: an opportunity to reduce urban flood peaks for rare, long duration storms [ J ]. Environmental Modelling & Software, 2019, 111:34-41.
- [31] GAROFALO G, GIORDANO A, PIRO P, et al. A distributed real-time approach for mitigating CSO and flooding in urban drainage systems[ J ]. Journal of Network and Computer Applications,2017,78:30-42.
- [32] CHEN J, ZHONG P A, LIU W, et al. A multi-objective risk management model for real-time flood control optimal operation of a parallel reservoir system [ J ]. Journal of Hydrology, 2020, 590:125264.
- [33] YANG S N, CHANG L C, CHANG F J. AI-based design of urban stormwater detention facilities accounting for carryover storage [ J ]. Journal of Hydrology, 2019, 575: 1111-1122.
- [34] BERKHAHN S, FUCHS L, NEUWEILER I. An ensemble neural network model for real-time prediction of urban floods[ J ]. Journal of Hydrology, 2019, 575:743-754.
- [35] MULLAPUDI A, LEWIS M J, GRUDEN C L, et al. Deep reinforcement learning for the real time control of stormwater systems [ J ]. Advances in Water Resources, 2020, 140:103600.
- [36] JIANG J, LIANG Q, XIA X, et al. A coupled hydrodynamic and particle-tracking model for full-process simulation of nonpoint source pollutants[ J ]. Environmental Modelling & Software, 2021, 136:104951.
- [37] 钱睿智,陈静,王永东. 基于氮同位素的通扬运河污染负荷解析 [J]. 水资源保护, 2021, 37 ( 4 ) : 121-126. ( QIAN Ruizhi, CHEN Jing, WANG Yongdong. Analysis of pollution load of Tongyang Canal based on nitrogen isotope [ J ]. Water Resources Protection, 2021, 37 ( 4 ) :121-126. (in Chinese) )
- [38] 张志才,陈喜,程勤波,等. 流域示踪水文模型研究综述 [J]. 水文, 2020, 40 ( 6 ) :1-9. ( ZHANG Zhicai, CHEN Xi, CHENG Qinbo, et al. Catchment-scale tracer-aided hydrological modelling: a review [ J ]. Journal of China Hydrology, 2020,40(6):1-9. (in Chinese) )
- [39] 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 Haichun, HUANG Guoru. Risk assessment of urban waterlogging based on PCSWMM model [ J ]. Water Resources Protection,2016,32(5):11-16. (in Chinese) )
- [40] 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) )
- [41] ROSSMAN L A, HUBER W C. Storm water management model reference manual volume, III. water quality [ R ]. Washington, D. C. : Office of Research and Development, 2016.
- [42] XU H, XU K, BIN L, et al. Joint risk of rainfall and storm surges during typhoons in a coastal city of Haidian Island, China [ J ]. International Journal of Environmental Research and Public Health,2018,15(7):1377.
- [43] XU H, MA C, LIAN J, et al. Urban flooding risk assessment based on an integrated k-means cluster algorithm and improved entropy weight method in the region of Haikou, China[ J ]. Journal of Hydrology, 2018, 563:975-986.
- [44] CHEN W, HUANG G, ZHANG H, 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.
- [45] 张辰,吕永鹏,陈嫣.《城镇内涝防治技术规范》解读 [J]. 给水排水, 2017, 53 ( 8 ) : 55-59. ( ZHANG Chen, LYU Yongpeng, CHEN Yan. Interpretation of Technical Code for Urban Flooding Prevention and Control [ J ]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 53 ( 8 ) : 55-59. (in Chinese) )
- [46] 车伍,葛裕坤,唐磊,等. 我国城市排水(雨水)防涝综合规划剖析[J]. 中国给水排水,2016,32 ( 10 ) :15-21. ( CHE Wu, GE Yushen, TANG Lei, et al. Analysis of integrated plan for urban drainage( stormwater ) and flood control[ J ]. China Water & Wastewater, 2016, 32 ( 10 ) : 15-21. (in Chinese) )

( 收稿日期:2021-08-23 编辑:施业 )

