文章编号:1672-3031(2019)03-0211-09

基于SWMM模型的沿海城市内涝模拟研究

徐 冰[1,2], 雷晓辉[1,2], 王 昊[1,2], 康爱卿[1,2]
(1. 中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100038;
2. 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)

摘要: 沿海地区台风过境时的短历时强降雨可迅速形成地表径流, 易导致城市内涝, 造成严重的经济损失和人员伤亡。为缓解该问题, 本文以福州晋安河流域为例, 构建了基于SWMM管网和地面二维积水的城市内涝模拟模型, 以研究该区域城市内涝成因及应对策略。实例研究表明, 上游库湖泄水抬高内河水位, 下游外江涨潮使内河排水不畅, 是形成内涝灾害的主要原因。为此提出库湖闸站联合错峰调度方案, 有效防止下游江水倒灌。以苏迪罗台风降雨为例, 采用该调度方案可减少管网节点溢流量27.44%, 缩小淹没面积29.73%, 降低内涝严重区河道最高水位1.02 m, 有效缓解地表淹没。本研究成果可为福州城市内涝的科学调度提供技术支撑, 同时对其他沿海城市的防洪调度具有参考价值。

关键词: SWMM; 城市内涝; 水资源调度; 管网溢流; 调度规则
中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **doi:** 10.13244/j.cnki.jiwhr.2019.03.007

1 研究背景

受城市大规模建设影响, 内河水系萎缩, 雨水调蓄能力下降, 城区水循环系统和地表径流过程变差, 造成严重的内涝灾害[1-3]。构建内涝防治体系, 提高管网设计标准, 积极推进水力模型新技术应用, 是应对城市内涝的重要举措[4-5]。SWMM[6]可用于城市排涝系统的全过程模拟和规划管理, 在国外已得到广泛应用[7-8]。在国内, 董欣等[9]利用SWMM模型, 验证其在区域排水分析计算方面的有效应用, 结合不确定性分析算法, 研究不透水下垫面区的径流过程和污染负荷[10]。刘俊等[11]基于SWMM模拟上海市区的地面积水全过程, 并引入了防汛决策系统。陈睿星等[12]通过构建SWMM模型, 对城市管网排水能力进行评估, 在分析节点溢流和管道过载的基础上提出了管网优化方案。李彦伟等[13]基于SWMM模拟不同重现期和淤积状态下两种管网优化方案, 发现增大管径比改变节点高程更高效, 缓解溢流量的效果更好。由于SWMM在二维模型方面的局限性, 黄国如等[14]基于英国Wallingford公司开发的Infoworks ICM软件模拟城市暴雨内涝, 研究不同重现期下积水范围和淹水深度的变化。寇殿良等[15]结合SWMM和Infoworks的各自优势建立雨水径流模型, 对三种低影响开发措施的水文效果做出了详细的对比分析。此外, 何嘉莉等[16]通过开发设计监测系统, 对城市内涝实现了数字化管理。来丽芳等[17]基于物联网监测技术, 结合闸站要素提出联合调度方案。对沿海城市而言, 改造管网或整改河道等工程耗时耗力, 而有效利用库湖闸站联合调度的研究更具经济效益, 可与物联网监测系统和智慧水务接轨, 根据洪涝情况及时调整调度方案, 发挥现有工程的价值, 具有较高的灵活性。本文以福州市晋安河流域为例, 同时考虑山区水库泄洪和外江涨潮影响, 利用SWMM模型模拟管网节点溢流情况, 基于Infoworks模拟地表淹没, 结合现有工程, 提出以上游水库调洪和下游闸站调度相结合的方式削减洪峰, 缓解城市内涝, 为当地防洪排涝和水系调度提供借鉴措施。

2 研究区概况

2.1 研究区基本信息 福州位于东南沿海的闽江下游地区, 气候属于海洋性亚热带季风气候, 年降

收稿日期: 2018-12-13
作者简介: 徐冰(1994-), 硕士生, 主要从事水资源调度研究。E-mail: jennyxvbing@163.com

雨量1367.5 mm。每年7—9月是台风活动期，将带来特大暴雨。本文选择福州市内涝最为严重且水系复杂的晋安河流域作为研究区域，研究区西侧为白马河水系，东侧为磨洋河水系，可通过关闭内河水闸切断与晋安河流域的水力联系。研究区面积79.5 km^2，其中城区面积49.3 km^2，上游山区面积30.2 km^2。晋安河主河道自琴亭湖始，经光明港流入闽江，全长6682.7 m，平均河宽38 m。研究区内河网密集，共计24条河流。具有调蓄功能的库湖仅为八一水库、井店湖、琴亭湖。河道基本信息如表1所示，水系分布如图1所示。研究区平均坡度3.86%，以绿地、水系为主的透水地表面积48.2 km^2，占比60.58%，以房屋、道路为主的不透水地表面积31.3 km^2，占比39.41%。研究区地形如图2所示，城区北侧紧靠山地，南侧濒临闽江。

表1　研究区河道基本信息

河道	限制水位/m	边坡高程/m	河宽/m	河长/m	河道	限制水位/m	边坡高程/m	河宽/m	河长/m
晋安河	4–6.55	6–9.8	25–54	6683	茶园河	4.27–6.14	6–7	5.5–14.5	800
新店溪	4.8–24	10–34	10–25	2500	龙峰河	4.5–5.93	5.94–8	11–12.5	752
马沙溪	4.8–23.5	7.8–27.1	5–10	2314	屏东河	4.2–5.79	6.58–8	5.33–10.5	1221
厦坊溪	5.3–25	8.5–28.4	3–9	4126	树兜河	4–5.93	6–8	3–15	1471
汤斜溪	12.8–22.16	15.8–25.5	5–10	1600	五四河	4.02–4.61	5.5–6	4–5	1263
杨廷溪	10–39.02	13–44	4–7	2564	凤坂河	4.02–6	5.58–7	30–36	5210
解放溪	5.8–47	8.8–50.4	9–16	3420	东郊河	4.03–5.57	5–7	5.5–12	1010
桂后溪	5.9–76.9	8.31–89.1	16	3900	安泰河	3.9–4.1	4.3–6.13	50	1601
洋下河	4.43–6.01	6.21–9	12–20	1405	东西河	4.03–4.1	4.1–5.3	6–20	1821
义井溪	6.6–16.8	7–18.77	14	2120	琼东河	4.02–5.3	5–8.11	11–28	1195
湖前河	4.5–6.68	6.38–9.18	11.5	2593	达道河	4–5.4	5–6	55–65	1560
琴亭河	4.27–6.55	6.8–8	12–20	569	光明港	4–5.5	4.97–6	33–330	7131



图1　研究区水系

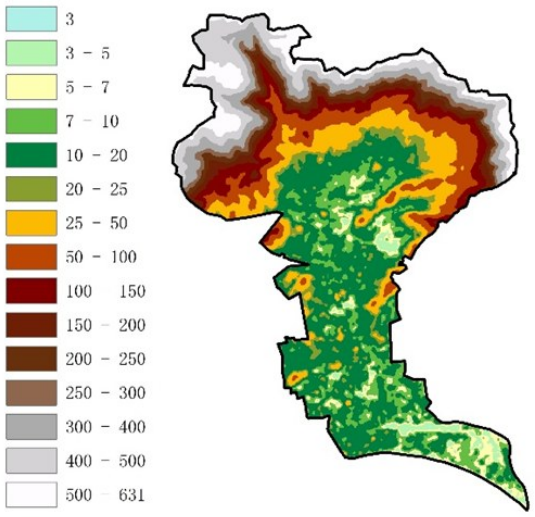


图2　研究区DEM示意

2.2　历史洪涝灾害　2005年以来，共有23场强台风或超强台风登陆福州，造成7次大范围内涝灾害。仅2016年9月，“莫兰蒂”和“鲶鱼”两场台风接连登陆，平均降雨量高达173 mm，远超同期历史极值。2005年10月，强台风“龙王”带来的降雨造成市区重要路段全淹，淹没面积多达14 km^2，历时20 h，全市交通陷入瘫痪。2015年8月，“苏迪罗”台风创下福州市历史单日最大雨量，晋安站最大1 h雨量52.7 mm，最大3 h雨量222.6 mm，最大12 h雨量296.1 mm。受强台风风暴潮影响，闽江高潮水位6.7 m，超过警戒水位0.41 m，城区共出现97处积涝点，受灾人数近48.66万人，造成严重的经济损失。

2.3　现行防涝标准　研究区现行暴雨强度公式根据福建省《城市及部分县城暴雨强度公式》选用。在

重要主干道和下沉广场等易涝区，雨水管网系统设计重现期2～3年，管径0.8～3 m，一般地区重现期为1年，管径0.15～0.5 m。下游闽江防洪堤按200年一遇防洪标准建设，堤顶抢险道宽度大于10 m。江北山洪防治标准为50年一遇，八一水库按50年一遇标准设计，按500年一遇标准校核，防洪库容111万m^3，正常水位48.2 m，汛限水位46.0 m。为降低山洪对城区的压力，修建井店湖和琴亭湖。井店湖最大可调节库容18.4万m^3，常水位12.5 m。琴亭湖最大可调节库容105万m^3，常水位5.0 m。晋安河上游五四北片区的排涝标准可达5年一遇，不满足10年一遇。当前内河建设标准为5年一遇，城区河道宽度约4～48 m。

3　内涝模型构建

本文内涝模型包括一维管网模型和二维地表模型，前者基于SWMM计算管网溢流和河道水位，后者基于Infoworks ICM计算地表淹没。SWMM利用非线性水库模型与Horton模型相结合的方法计算产汇流，利用运动波方程计算管渠间水力关系[18]。Infoworks采用二维有限体积法来求解浅水流方程组，利用Rienmann求解器计算洪水流向和深度。

3.1　模型概化　根据当地相关部门提供的库湖、河道、管网和地形等测绘数据进行内涝模型构建。水库和湖泊统一概化为蓄水节点。中心城区河道断面间隔10～50 m，山区和入江河道断面间隔100～150 m。建模时将河道概化为矩形明渠，根据当地资料，河道综合糙率取0.036，光明港河段取0.029。保留主干道和街区内主要管网，梳理管网平面结构，圆管总长271.8 km，平均管径0.56 m，矩形暗渠总长20.4 km，横截面平均面积0.44 m^2，管道糙率取0.013。管底高程1.51～65.6 m，检查井深度5～12.6 m。汇水区先按河道分区，再通过泰森多边形法创建，可概化为非线性蓄水池。水流路径长度按水流速度0.5 m和地表漫流时长10 min计算，从而推出相应汇水区宽度。依据地表土地利用分布情况提取模型的产、汇流参数，按面积加权平均后，算得不透水百分比58.23%，不渗透表面粗糙系数0.04，渗透表面粗糙系数0.041，不渗透洼地蓄水2.662 mm，渗透洼地蓄水3.041 mm，无洼地蓄水百分比25%，最大下渗75.27 mm/h，最小下渗15.67 mm/h，以上均为研究区平均值。

最终构建SWMM模型包括：河道总长64.4 km；管网节点13 163个，管段13 768条，总长292.2 km；上游包括3座水库和2个人工湖；共划分汇水区13 770个，总面积79.5 km^2。SWMM模型的GIS数据和建成的模型如图3和图4所示，放大部分的节点代表管网节点和河道节点，居中较粗的为河道中心线，其余为管道线，汇水区以小多边形表示。管网模型建立完成后，结合地形构建地表二维漫流模型，用于模拟内涝积水淹没。

3.2　模型率定　依据2016年鲶鱼台风降雨的实测水位数据和实测淹没数据对模型进行率定。该次降雨总量265.5 mm，1:00–8:00为第一个降雨峰值，平均雨强16.7 mm/h，第二个降雨峰值出现在17:00，降雨强度48.4mm/h。管网模型中，不同下垫面的不透水百分比、粗糙系数、洼地蓄水、下渗、衰减

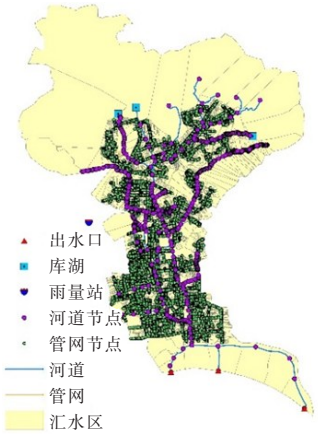


图3　研究区基础数据GIS图



图4　研究区SWMM模型

系数等产汇流参数和管道糙率值，是根据经验值选取，不完全适用于晋安河流域，需在率定过程中调整。本次模拟最大淹没时刻出现于4:15，最大水深2.55 m，淹没面积11.76 km^2。如图5所示，模拟淹没范围和实测淹没点分布基本吻合。河道实测水位取晋安河自琴亭湖以下第3个断面，位置如图4所示。据历史资料统计该断面区域受灾情况最为严重。率定后的实测水位过程与模型模拟的水位过程如图6所示。随着1:00–4:00时高强度降雨，水位在5:00–6:00迎来第一个峰值，峰值误差7.3%，后因降雨减小，水位回落，18:00–19:00出现第二个峰值，峰值误差8.2%。如图7所示，两次峰值的模拟水位和实测水位误差均在10%以内，说明模型拟合度较高，可用于研究区的内涝模拟评估。

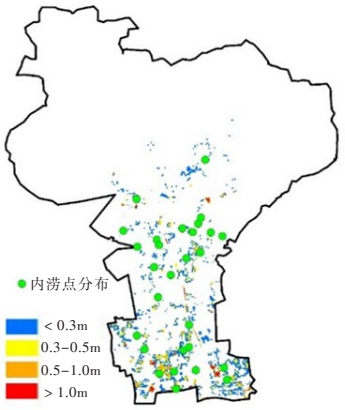


图5　淹没范围与淹没点分布

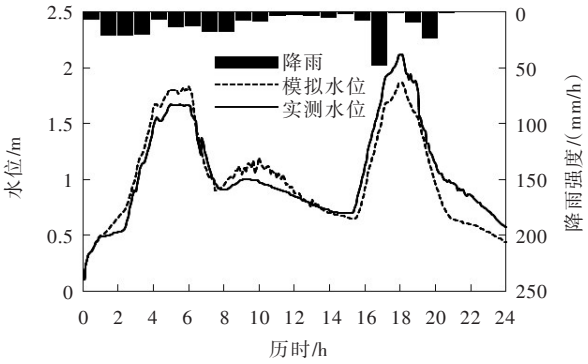


图6　同场降雨时段实测水位与模拟水位过程线

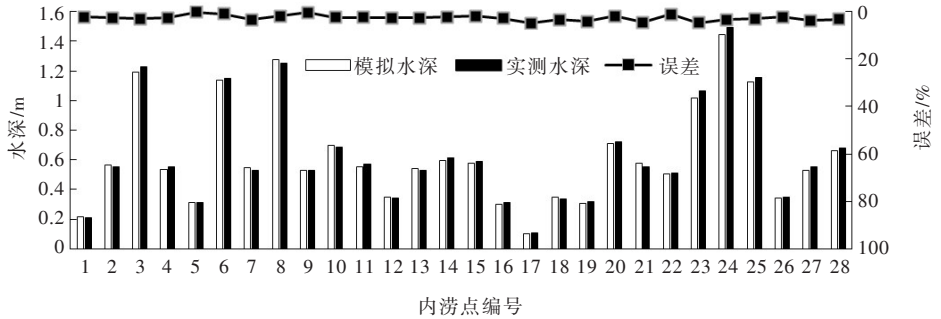


图7　同场降雨模拟淹没水深与实测水深柱状图

4　现状排水系统分析

4.1　降雨及边界条件　经调研，由于缺乏有效的调度措施，研究区在强降雨事件下经常出现内涝，“苏迪罗”台风期间灾害尤为严重，因此，针对“苏迪罗”降雨事件对研究区排水系统进行分析。将台风实测降雨数据作为模型计算的输入条件，为和潮位时间序列保持一致，取2015年8月8日0:00到8月9日0:00期间“苏迪罗”台风降雨数据，总降雨量357.8 mm，峰值雨强70.8 mm/h，最大降雨集中在14:00至20:00，降雨过程线如图8所示。处理下游边界时，选取瀛洲河下游的江四水闸、光明港一支河下游的东风水闸、光明港下游的魁岐水闸作为出水口，将每个水闸的外江潮位过程线作为出水口的水位输入数据，如图9所示。

4.2　模拟分析　未加入调度规则时，模拟研究区在该台风降雨情景下的管网溢流和淹没范围，总溢流量2682.6×$10^3$$m^3$，淹没面积15.84 km^2，最大水深2.76 m，分布如图10所示。北部山区淹没水深普遍在0.1 m以下，考虑到山区防洪标准为50年一遇，管网分布少，河道较深，所以内涝情况并不严重，山洪可及时通过下泄河道汇入琴亭湖。平原区晋安河中上游段，尤其是河两岸出现超过1.0 m的水深，多处在0.1~0.5 m之间，同时管网溢流量较大，表明管道积水无法顺畅地排入河道，以致于

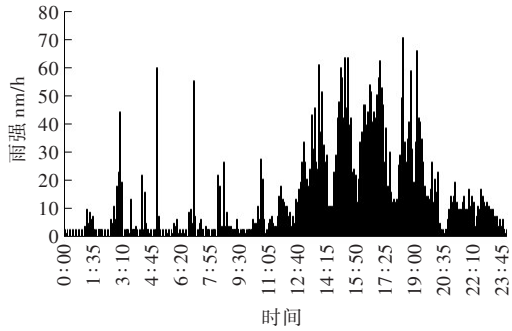


图8　“苏迪罗”台风晋安站实测降雨过程线

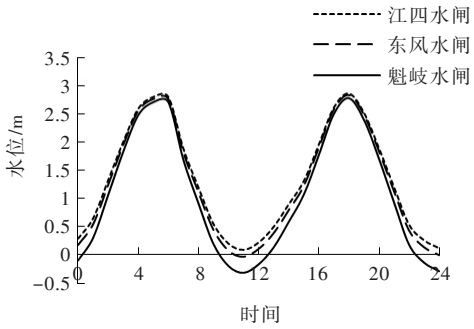


图9　下游水闸外江潮位过程线

大面积溢流，造成内涝灾害。城区下游地势较低，淹没水深普遍大于0.5 m。因集中降雨时间与外江涨潮一致，受潮位顶托影响，内河高水位无法通过光明港排入闽江，只能漫流至地表，成为内涝重灾区。共计1655个管网节点出现溢流，其中1532个节点溢流量小于5000 m^3，3个节点溢流量大于50 000 m^3，统计结果如表2所示。最大节点溢流量85.5×10^3 m^3，位于琴亭湖下游，紧靠晋安河主河道，受河水倒灌影响最为显著。

仍取图4标注的断面位置为例，绘制河道水位变化过程线，如图11所示，排水管出口高程3.1 m。当库湖自由泄流无调度时，河道水位变化与降雨过程线保持一致，初期水位较低，自14:00开始升高，最大淹没时刻较最大降雨时刻有延迟，集中在16:00至20:00之间。最高水位4.03 m，高于排水管出口0.93 m。21:00后降雨量减小，河道水位回落，由于地面积水通过管网汇入河道，水位线发生明显震荡。管网排水结束后，河道水位平稳下降。

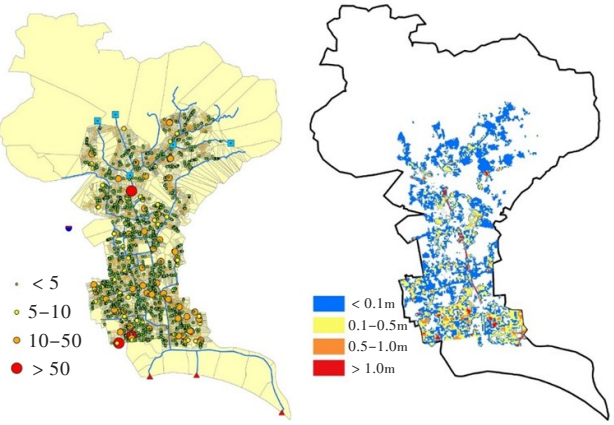


图10　无调度时研究区管网节点溢流与淹没水深

表2　无调度时研究区管网节点溢流量

溢流量×10^3/m^3	溢流节点数	占比/%
0–5	1532	92.57
5–10	71	4.29
10–50	49	2.96
>50	3	0.18
总计	1655	100.00

结合现行防洪标准，研究区内管网设计重现期不足10年一遇，难以承受强降雨。从琴亭湖下游的河道水位变化可以发现，山区洪水几乎在同一时段全部汇集到琴亭湖。由于琴亭湖自由泄流，下游晋安河主河道的水位迅速抬高，高于管道排放口，迫使管网节点发生溢流，形成地表淹没。这一过程中，山区库湖没有发挥有效调蓄作用。同时，受涨潮影响，外江水位抬高，导致城区内河河道排水不畅，形成更严重的内涝灾害。

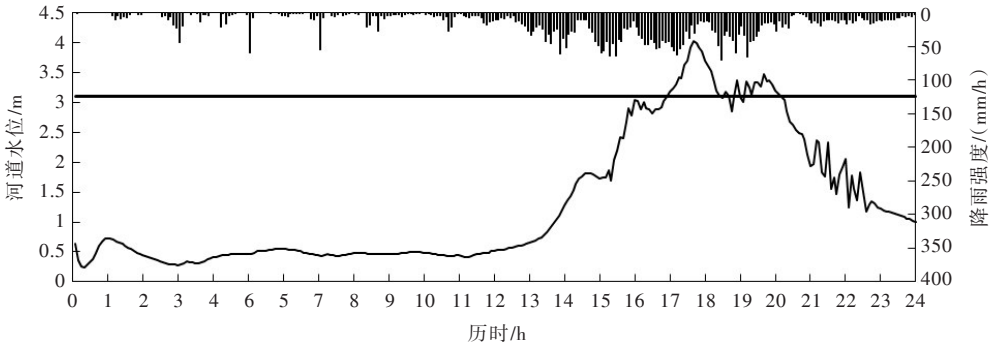


图11　无调度时受灾区河道水位变化过程线

而下游闽江防洪堤的设计标准为200年一遇，可见沿江闸站没有发挥有效作用。

5　库湖闸站调度

经调查，研究区共有上游具备调洪功能的水库1座，人工湖2个，下游沿江泵站2座，沿江水闸3个。为缓解该研究区内涝影响，结合现有工程现状，分别从上游源头和下游排水两个方面拟定调度规则，如表3所示。根据汛限水位、5年一遇和20年一遇入库洪水流量及相应库水位，设定水库的下泄流量。根据10年一遇来水对应的湖泊水位，设定湖泊下泄流量。沿江泵站的起排水位4.0 m，停泵水位3.5 m，东风排涝站抽排流量80 m^3/s，魁岐排涝站抽排流量160 m^3/s。沿江闸站的关闸水位均为5 m，水位高时，关闸开泵，防止江水倒灌入内河，水位低时，开闸关泵，让内河水流自然排入外江中。

表3　湖库调度规则

水库名	控制水位/m	下泄流量/(m^3/s)	湖泊名	控制水位/m	下泄流量/(m^3/s)
八一水库	< 44.5	19.26	井店湖	<14.5	25
	44.5~47.7	30		>14.5	54
	47.7~48.1	70	琴亭湖	<7.8	80
	>48.1	100		>7.8	90.2

保持降雨输入条件不变，加入调度规则后再次模拟管网溢流和淹没范围，总溢流量1946.5×10^3m^3，淹没面积11.13 km^2，最大水深1.83m。共计1664个管网节点出现溢流，其中1584个节点溢流量小于5000 m^3，溢流量大于50 000 m^3的节点数减小至0个，最大节点溢流量48.2×10^3m^3，统计结果如表4所示。

表4　调度后研究区管网节点溢流量

溢流量×$10^3/m^3$	溢流节点数	占比/%
0–5	1584	95.19
5–10	45	2.70
10–50	35	2.10
>50	0	0.00
总计	1664	100.00

在同一个河道节点绘制水位变化过程线，如图12所示。受库湖调蓄影响，降雨初期水位有小幅波动，利于水库腾出库容应对暴雨。最大淹没时刻出现在17:00–21:00，较无调度时整体后移，说明山区库湖发挥了拦截洪水的作用。此时由于闽江涨潮影响，沿江闸门关闭，开启泵站机组排水，河道水位出现明显震荡，但起伏不超过0.8 m。最高水位3.01 m，低于管道排水口高程0.09 m，管网水流可以自然排入河道中。

因为光明港河道宽阔，对晋安河下游分流最大，取光明港汇入闽江的魁岐水闸处，绘制调度前后出水口流量过程线，添加闸前水位辅以分析，如图13所示。降雨初期，闽江处于涨潮阶段，外江水位高于内河水位时发生倒灌，流量值出现负值。调度前倒灌现象较为严重，通过减小闸门开度，外江倒灌得以缓解，出水口流量几乎接近于零。7:00–12:00期间，闽江处于退潮阶段，外江水位低于内河水位，此时开启闸门，出水口流量迅速增大，闸前水位迅速减小，在12:00–15:00时段趋于平缓。自16:00开始，受降雨增强与闽江涨潮共同影响，闸前水位迅速升高，出水口流量逐渐增大，出

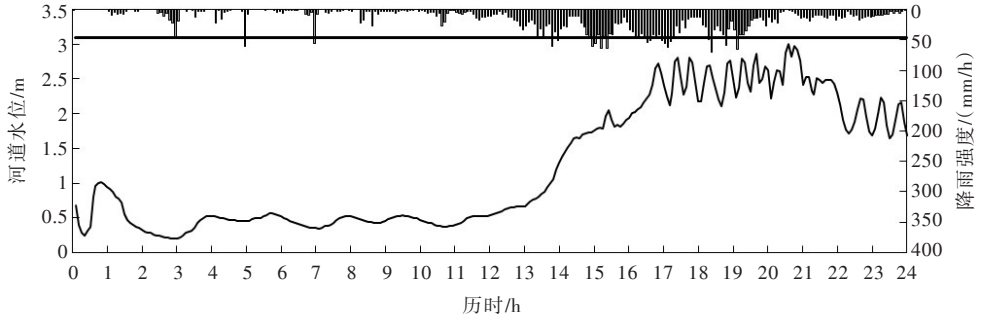


图12　调度后受灾区河道水位变化过程线

现短期震荡。当水位高于4.0 m起排水位时，关闭闸门，开启排涝泵站，出水口保持160 m^3/s排水流量，直到水位降至3.5 m停泵。此后保持闸门全开，闸前水位持续减小，与出水口流量下降保持一致。

分析可知，设置库湖闸泵的调度规则后，总溢流量减少27.44%，节点最大溢流量由85.5×10^3 m^3降为$48.2\times10^3m^3$，减少43.63%，溢流量在5000~5000 m^3之间的管网均有明显减少。淹没面积减少29.73%，最大淹没水深降低0.93 m，地表淹没情况得到有效控制。受灾严重区的河道最高水位降低1.02 m，上游来水和外江顶托对内河水位的抬高效果得到显著改善。

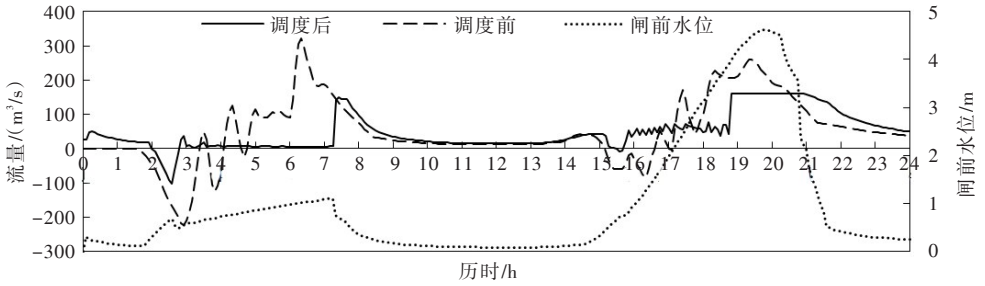


图13　调度前后出水口流量过程线

6　结论

通过构建城市内涝模拟模型，分析晋安河流域内涝成因发现，山区湖库出流汇入城区内河河道，受涨潮影响下游外江水位较高，致使河道水位高涨，高于排水管出口后，地下管网排水不畅，只能通过节点溢流的方式涌向地表。管网设计标准和河道防洪标准滞后于城市发展，难以抵抗近年频发的强台风降雨，现有湖库闸站工程也未发挥拦截洪水和保障排涝畅通的作用，共同造成晋安河流域内涝灾害。针对山区来水量较大问题，根据汛限水位合理控制水库湖泊的下泄流量，发挥水库的调蓄作用和人工湖的滞洪作用，将河道峰值水位降低至管网排水口以下，保障城区河道不溢流。针对下游潮位顶托问题，当外江水位高于内河水位时，及时关闭沿江闸站，防止江水倒灌。该方案实施后，管网节点溢流量降低27.44%，淹没面积缩减29.73%，内涝严重区河道最高水位降低了1.02 m，有效缓解地表淹没情况。

参　考　文　献：

[1] 尹占娥，许世远，殷杰，等．基于小尺度的城市暴雨内涝灾害情景模拟与风险评估[J]．地理学报，2010，65(5)：553-562．

[2] 张悦．关于城市暴雨内涝灾害的若干问题和对策[J]．中国给水排水，2010，26(16)：41-42，47．

[3] HALL M J．Urban Hydrology[M]．London：Thom as Tel-ford Ltd，1984．

[4] 车伍，杨正，赵杨，等．中国城市内涝防治与大小排水系统分析[J]．中国给水排水，2013，29(16)：13-19．

[5] 谢映霞．城市排水与内涝灾害防治规划相关问题研究[J]．中国给水排水，2013，29(17)：105-108．

[6] LEWIS A Rossman．Storm Water Management Model User's Manual Version 5.0 [M]．Cincinnati，OH：Water Supply and Water Resources Division National Risk Management Research Laboratory，2008．

[7] POMEROY C A，POSTEL N A，O'NEILL P A，et al．Develop-ment of storm-water management design criteria to maintain geomorphic stability in Kansas City mettropolitan areastreams[J]．J．Irrig．Drain．Eng．，2008，134(5)：562-566．

[8] GROTTKER M．Runoff quality from a street with mediumtraffic loading[J]．Sci．Total．Environ．，1987，59：457-465．

[9] 董欣，陈吉宁，赵冬泉．SWMM模型在城市排水系统规划中的应用[J]．给水排水，2006(5)：106-109．

[10] 董欣，杜鹏飞，李志一，等．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[J]．环境科学，2008(6)：1495-1501．

[11] 刘俊，郭亮辉，张建涛，等．基于SWMM模拟上海市区排水及地面淹水过程[J]．中国给水排水，2006(21)：64-66，70．
[12] 陈睿星，李卫东，栾慕，等．SWMM模型在城市雨水管网改造中的应用[J]．中国农村水利水电，2017(1)：58-62．
[13] 李彦伟，尤学一，季民，等．基于SWMM模型的雨水管网优化[J]．中国给水排水，2010，26(23)：40-43．
[14] 黄国如，王欣，黄维．基于InfoWorks ICM模型的城市暴雨内涝模拟[J]．水电能源科学，2017，35(2)：66-70，60．
[15] 寇殿良，覃芹，刘非．基于SWMM和InfoWorks的低影响开发技术研究[J]．中国农村水利水电，2018(2)：31-36．
[16] 何嘉莉，陈兵，姜涛，等．城市内涝在线监控与信息服务数字化系统设计[J]．中国给水排水，2014，30(1)：94-98．
[17] 来丽芳，姜元军，李亚丹，等．城市内涝监控预警与联合调度系统设计与开发[J]．地理空间信息，2017，15(5)：88-90，12．
[18] 陈晓燕，张娜，吴芳芳，等．雨洪管理模型SWMM的原理、参数和应用[J]．中国给水排水，2013，29(4)：4-7．

Research on urban flooding simulation in a coastal city based on SWMM model

XU Bing[1,2], LEI Xiaohui[1,2], WANG Hao[1,2], KANG Aiqing[1,2]
(1. *China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing, 100038, China*;
2. *State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing, 100038, China*)

Abstract: When the typhoon passes through the coastal area, the short duration of heavy rainfall quickly forms the surface runoff, resulting in serious economic losses and casualties. Aiming at alleviating the problem, this paper took the Jin'an River Basin in Fuzhou City as an example and established a waterlogging simulation model based on SWMM pipeline network and 2D ground flooding to study the causes and countermeasures of urban waterlogging in that area.Based on the simulation results, the discharge from upper reservoirs raised the river level and the tidal level in lower reaches impeded the drainage of the river, which results in waterlogging disaster. In view of the above causes, a joint peak staggering regulation scheme of the reservoir and lake sluice station was proposed to prevent the backflow of the downstream river water, reducing the total spillover flow of the pipe network nodes by 27.44%, the submerged area by 29.73%, and the maximum water level of the river channel in the serious waterlogging area by 1.02m, and effectively alleviating the surface submergence. The results of this study can provide technical support for the scientific regulation of urban waterlogging in Fuzhou., which has important reference value and guiding significance for flood control and regulation in other coastal cities.

Keywords: SWMM; urban flooding; water resources scheduling; pipe network overflow; operating rule

（责任编辑：王成丽）