

山地城市小流域暴雨径流模型的研发及应用

何强^a, 智悦^a, 颜文涛^{b,c}, 王书敏^a, 李果^a

(重庆大学 a. 三峡库区生态环境教育部重点实验室; b. 建筑城规学院; c. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要:采用 ArcEngine 二次开发包结合水力学基础算法, 建立山地城市暴雨径流模型, 以模拟山地城市降雨径流, 分析山地城市排水系统的排放能力。应用该模型对重庆市北部新区盘溪河流域排水系统进行了预测和评估, 结果表明, 模拟结果与实测数据的效率系数 Nash-Sutcliffe 系数 Ens 为 0.56~0.76, 相对误差 8.82%~11.8%。模型关键参数率定及敏感性分析表明, 最敏感参数为径流宽度、坡度、曼宁系数和不透水面积率。针对排水管道内流量、充满度和溢流检查井个数等方面进行了排水系统排放能力的评估, 结果表明, 一年一遇暴雨下有 0.52% 的排水管道长时间处于满流状态, 五十年和百年一遇的超载排水管道占排水管道总数 5.86% 和 8.20%; 百年一遇暴雨下有 0.72% 的检查井发生溢流, 一年一遇暴雨下有 0.31% 的检查井发生溢流。该模型实现了对山地城市暴雨径流的产汇过程模拟以及内涝点位置和数量的识别, 为城市雨水管网管理提供决策支持。

关键词: 仿真模型; 雨水排水管; 山地城市; 城市小流域

中图分类号: X323

文献标志码: A

文章编号: 1674-4764(2012)S1-0000-00

Development and Application of Small Urban Watershed Storm Runoff Model in Mountain City

HE Qiang^a, ZHI Yue^a, YAN Wentao^{b,c}, WANG Shumin^a

(a. Key Laboratory of Three Gorges Reservoir's Eco-Environment, Ministry of Education; b. College of Architecture and Urban Planning;

c. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: The small urban watershed storm runoff model of mountain city, which bases on the hydrological method and ArcEngine extension programming was developed aim at stimulating the flood situation, locating the flooding area, computing the subsiding time of flood, utilization and management of the stormwater through the rainfall data. The model was used in Panxi basin of Chongqing. The simulated situation showed that the Nash-Sutcliffe coefficient Ens is 0.56-0.76, the relatively error is 8.82%-11.8%. According to the parameter sensitivity analysis the most sensitivity parameters of the model are width of subcatchment, slope, manning coefficient and impermeable area rate. The model had analyzed the flow, full degree and number of overflowed wells to evaluate drainage capability of drainage system. Results showed that 0.52% of the drainage pipes were overload under one-year storm; compared with 5.86% and 8.20% under fifty-year storm and one-hundred-year storm respectively. By comparing the flow depth inside the wells with the placing depth the assessment results showed that 0.72% of the wells had spillover under one-hundred-year storm and 0.31% of the wells had spillover under one-year. Overall the model achieves effective management of storm runoff and assessment of the water drainage system capacity in mountainous city.

Key words: Simulation modeling; Storm sewers; Mountainous city; Small Urban Watershed;

城市化进程使城区流域下垫面属性发生了巨大改变。地表不透水面积的增大改变了流域的正常水循环规律, 使得流域暴雨产汇流时间缩短, 径流峰值增大且出现时间集中^[1-2]。另一方面, 基于大量数据统计分析和模型模拟, 证实近十年来由于气候变化和城市热岛效应, 城区降雨量、降雨强度、降雨概率事件和极端事件的发生频率均有增加, 且未来在世界范围内有递增趋势^[3-8]。因此针对城市降雨径流特点, 正确预测城市的产汇流过程, 及时预知潜在的内涝节点, 对于优化城市排水系统结构以及城市的防洪减灾均有重要

意义。

从 20 世纪 60 年代起欧美国家开始研制城市暴雨径流模型, 其中最具有代表性的城市流域降雨-径流模型有以下八种: HSPF 模型 (hydrological simulation program-for-tran)^[9-10]、SWMM^[11]、DR3M-QUAL^[12]、QQS^[13]、STORM、MIKE-SWMM、Wallingford 和 SWMM level1^[14]。模型对比研究表明, SWMM 模型适用于规划管理或供排水系统设计阶段的事件响应模拟。在城市小流域尺度上能有效模拟暴雨径流水质水量在时空上的变化情况^[14]。国内对暴雨径流

模型的研究起步稍晚,岑国平于 1990 年提出了国内首个自主开发的城市雨水径流计算模型(SSCM)^[15];中国水利水电科学研究院与天津气象局等单位以二维非恒定水力学模型为基础合作开发了城市雨洪模拟系统,该模型将城市复杂下垫面概化为不规则网格,利用气象信息实现了对城区淤涝的仿真模拟^[16];天津市气象科学研究所等单位又在此模型基础上研发了天津、南京、南昌的城市暴雨内涝模型。然而考虑到模拟时间和计算量不能过大,概化网格的尺度难以匹配城市管网的复杂度从而产生模拟结果的误差;徐向阳等提出了平原城市雨洪模型^[17],能够可靠模拟暴雨之后地面积水量、积水深度、滞水面积和灾害历时过程,同时该模型可借助 GIS 进行动态演示。当前基于 GIS、RS 技术平台建立城市雨洪管理模型已成趋势,国外已有相关学者利用 GIS 空间分析能力划分城市子汇水单元^[18],建立城市水务管理基础设施数据库^[19],进行子汇水单元水文分析,基于此思想 Rodriguez 等人建立了城市供水预算模型^[20-21]。然而,上述研究均在平原城市开展,少有针对山地城市复杂地形地貌的雨洪管理模型。山地城市地形复杂,暴雨径流峰短流急,大坡度环境背景使得降雨产流响应较平原城市更为迅疾,雨洪管理压力更加凸显。通过程序开发将 GIS 的空间分析功能和传统城市暴雨径流模型的暴雨管理功能有机耦合,成功研发了山地城市降雨-径流管理系统,旨在寻求适合山地城市暴雨模拟预测的有效手段,以为山地城市暴雨径流的有效管理以及提升排水系统的排放能力提供决策依据。

1 山地城市暴雨径流模型

1.1 系统构建

山地城市暴雨径流模型旨在模拟城区流域每个部分甚至是排水管道每根管道每个节点特征参数在时空上的变化,因而流域尺度相对较小,属于确定性分布式数学物理模型。建模初期,首先将流域按原始的 AutoCAD 数据,通过数据抽取和转换形成 shp 数据,再转换为 GeoDatabase 数据模型,并在 ArcGIS 系统中对管线和检查井数据建立拓扑关系,形成排水管线系统模型。之后依照土地利用类型、数字高程信息,基于 GIS 平台将流域离散划分为汇流子单元,按照街区特点进行修正,最终每个小汇水单元以一组属性值表示其各种下垫面特征。如:面积、坡度、不透水面积率等。每个子汇水区的属性值代表其局部平均值。最后再依据水文水力学定律和每个子汇水流域产汇流规律求解偏微分方程组得到模拟结果。

模型对城市的现实数据进行采集,并以此为基础建立了以雨水管网为主体的信息管理系统,将采集的数据(管网数据、河流数据、用地布局数据等)录入系统中进行统一的管理,结合 SWMM 模型对单场降雨或者连续降雨产生的坡面径流进行动态模拟,进而解决与城市排水系统相关的水量与水质问题。系统构架主要分为客户端、系统平台、数据访问和数据中心 4 个层(如图 1)。

模型可为业务应用者提供数据管理、模型管理、系统管理接口,由于使用角色单一,对部署要求限制也比较低,因此模型界面采用 C/S 方式来提供服务。模型的系统构架(如图 1)采用 ArcEngine 二次开发包和传统排水模型基础算法,建立山地城市暴雨径流模型,以研究模拟山地城市排水系统

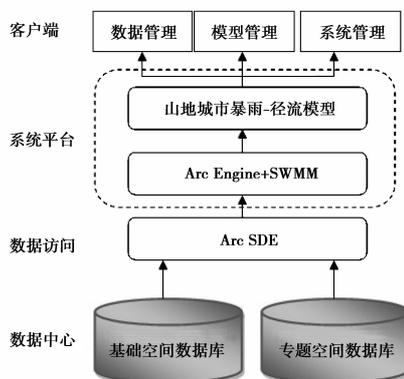


图 1 系统构架

泄洪排涝产汇流规律,评估城市排水系统的排放能力,确定排水系统中长期处于超载的管道和节点,形成泄洪排涝关键节点优化改造方案,为城市雨水管网管理提供决策支持。模型用 SQL Server 2005 作为数据库软件,其中在数据层和应用服务之间封装了数据访问逻辑层对空间数据采用 ArcSDE 引擎来驱动。业务数据引擎提供数据访问服务,它以对象方式对溢流检查井数据对象进行数据建模。结合溢流检查井上下游管道情况和所在地块的属性值,判断应对其采用何种改造方案。

1.2 单元产流模型和流域汇流模型

地表产流过程主要描述降雨落到地面产生有效径流的过程。流域包含多种用地类型,流域中的每个子汇水单元都由不同的用地类型组成。在模型中,将用地类型分为 4 类:没有滞蓄容积的透水表面、有滞蓄容积的透水表面、没有滞蓄容积的不透水表面和有滞蓄容积的不透水表面。对于没有滞蓄容积不透水的地表,降雨扣除蒸发量后成为径流量:产流量 $R_1 = \text{降雨量} - \text{蒸发量}$ 。对于有滞蓄容积不透水的地表降雨扣除蒸发量和滞蓄量后等于径流量:产流量 $R_2 = \text{降雨量} - \text{注蓄量} - \text{蒸发量}$ 。对于透水地面,先扣除填洼损失量和蒸发量后用渗透模型计算下渗损失量:产流量 $R_3 = (\text{降雨强度} - \text{入渗强度}) \Delta t - \text{注蓄量} - \text{蒸发量}$ 。每个子汇水单元的产流量为这三部分的总和: $R = R_1 + R_2 + R_3$ 。对于透水地面,常用的渗透模型有 Horton、Green-Ampt 和 Curve Number models。此次建模采用 Horton 渗透模型。

流域的汇流包括地面汇流部分和管网汇流部分。地面汇流计算是把每个子汇水单元作为一个非线性水库处理,联立求解曼宁方程和连续性方程。

雨水在排水系统内的传输由线(Links)和点(Nodes)组成,任何排水系统可概化为“节点-连接管-出口”。其中检查井、堰、坝、水库、滞留塘等可视作节点;管道、泵站、截流孔等视为连接管其断面形式在模型中可设定为圆形、矩形梯形和马鞍形。管道中的水流模拟计算是采用连续性方程和动量方程联立求解。模型提供 Kinematic Wave Routing 和 Dynamic Wave Routing 两种方式进行模拟计算。Kinematic Wave Routing 是联立求解动量方程和连续性方程并采用简化解,摩擦阻力由曼宁公式计算得到。该方法不能计算管道内回水、有压流,只能计算树状管网。采用较大的时间步长进行模拟。适用于长期的模拟分析。Dynamic Wave Routing

为联立求解动量方程和连续性方程,通过求解完整的一维圣维南方程,得到理论上的精确解。它可以模拟管道内回水、有压流,可计算环状管网。采用短时间步长进行模拟(如表 1 所示)。

表 1 渗透模型算法及特点

模型名称	模型算法	模型特点
Horton	<p>Horton 模型认为下渗率是时间的函数:</p> $f_t = f_c + (f_0 - f_c) \exp(-kt) \quad (1)$ <p>式中 f_0 为初渗率, f_t 为稳渗率, k 为入渗递减率, f_t 为 t 时刻入渗率</p> <p>透水地面产流的计算在扣除填注损失后比较同一时段的暴雨强度和下渗率来计算产流规模。</p>	数据准备相对简单,精度适合中小流域模拟计算
Green-Ampt	<p>其将入渗分为土壤饱和前和土壤饱和后两个阶段来计算下渗量。在饱和前,下渗率等于降雨强度,当降雨强度小于等于土壤水力传导率时,饱和累积下渗量</p> $F_s = \frac{S \cdot \text{IMD}}{i/K_s - 1} \quad (2)$ <p>土壤饱和后,下渗率 f 等于稳渗率。</p> $f_p = K_s \left(1 + \frac{S \cdot \text{IMD}}{F} \right) \quad (3)$ <p>式中 S 为湿润峰处的平均毛细管吸力, IMD 为湿度亏损值, K_s 为土壤水力传导率。</p>	偏物理基础模型,要求详细的土壤资料,数据准备繁杂。
Curve Number models	<p>类似于 SCS 模型,其计算公式如下:</p> $S = 25.4 \left(\frac{1000}{\text{CN}} - 10 \right) Q = \frac{(R - 0.2S)^2}{(R + 0.8S)} \quad (4)$ <p>式中 Q 为径流量, R 为降雨量, S 为水土保持参数, CN 为流域综合特性参数与土地下垫面条件有关。</p>	式中只有一个反应流域综合特征的参数 CN ,方法简单,计算方便。该方法反应的是下垫面条件(主要是土壤前期含水量)对产流的影响,而非考虑到降雨强度对下渗过程的影响。该模型广泛用于大尺度流域模型的下渗计算。

1.3 山地城市排水管网排水能力分析

排水管网的排放能力主要考察场次降雨过程中管道内流态变化情况以及检查井内的水位变化,筛选出长时间处于满流的管道、溢流的检查井。具体说来,管网排水能力评估具体分析以下两方面:

1)排水管道流态评估:在模型内输入降雨数据,通常为单位时间步长下的降雨量(mm)。降雨事件发生后,经过初期损失,暴雨转化为地面的径流。模型通过产汇流模型对暴雨时间序列加以计算得到每个子汇水单元产生的径流量,通过联解曼宁方程和连续性方程得到管内流态。另一方面,模型按照该管段的管径、管材(管壁粗糙系数)、坡度,用流量和流速公式,将管道内的水流简化为均匀流进行计算,得到该管道内最大充满度、最大流速下的流量。该流量也为最大过水能力(Q_{\max})。场次暴雨下,首先计算得到排水管网每段管道内的流态连续变化情况,然后比较管道内流量 Q_i 和管道最大过水能力 Q_{\max} ,甄选出长时段处于超载和满载情况的管道。

从排水管网的全局来看,在暴雨降雨的时间段以及雨停止后期,排水管网会出现一个全局负荷最大时刻。在此时刻,整个大流域的排水系统过流量处在一个峰值。模型以单位时间为步长,将每段排水管道在每个时刻的流量、充满度等数据作为分析结果输出;每段排水管道流量累加的最大值的那个时刻,系统判断为“泄洪峰值”。通过对峰值时刻排水管道负荷的分析,得到排水管网的排水能力评估结果。

2)排水管网检查井溢流个数评估:暴雨径流模型对场次

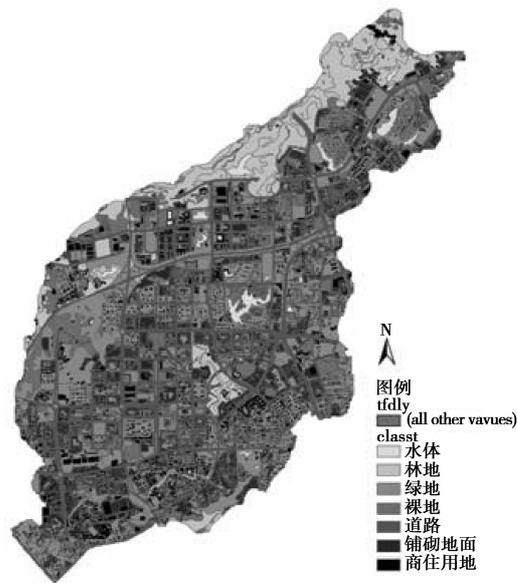


图 2 示范区用地布局图

暴雨进行模拟计算后,通过节点控制方程,基于排水管网的拓扑关系,可依次算出单位步长内每个检查井的节点水头 H_j 。对比每根管道末端检查井内的节点水头和该管道埋深,得到检查井是否向外溢水。在峰值时刻,基于溢水检查井的个数来评价排水系统的排放能力。模型还将分析溢流检查井所处子汇水流域情况,分析给出相应的改造措施。

2 实例研究

2.1 流域概况

研究区位于重庆市江北区盘溪河流域,重庆嘉陵江一级支流,盘溪河流域属低山丘陵地貌,流域略呈长条形,自然地形由东北向西南方向逐级降低,周边高,中心低。周边海拔标高在 270~460 m,河流腹地标高在 230~360 m 之间。流域长向约 10 km,宽约 4.5 km,根据自然山脊线划分,流域总面积 32.01 km²。根据研究区的土地利用类型图(如图 2),统计得到各种土地类型面积及其百分比。主要的下垫面类型有人工绿地(35.78%),铺砌地面(13.89%),道路(13.99%),建筑屋面(14.45%),天然林地(12.62%),待开发用地(6.24%),裸地(0.83%),水体(2.30%)。

2.2 模型建立

对水体数据的处理上,由于盘溪流域内的主要水体为盘溪河,且河道结果整治后,河床全部被混凝土浇筑硬化,在本系统中作为明渠处理,即河道即为排水、泄洪主通道,并考虑一定的旱季背景流量。对流域内分散的水库和湖泊,在系统中用相应蓄水节点定义,视最终实际情况是否接入盘溪河。

模型子汇水单元通过 DEM 自动划分,考虑到城市排水的特点是街坊和小区先收集后再用统一排出,所以对自动识别的汇水单元进行人为的修正。研究区共划分子汇水区 360 个,含检查井 5 125 个,管线 5 024 条,流域总出水口定义在盘溪河总出口。模型降雨时序数据来源于安装在流域内的雨量计实测值。

模型空间数据分为以下四层(如图 3):高程数据(DEM)、水体数据、土地利用数据和排水管网数据。

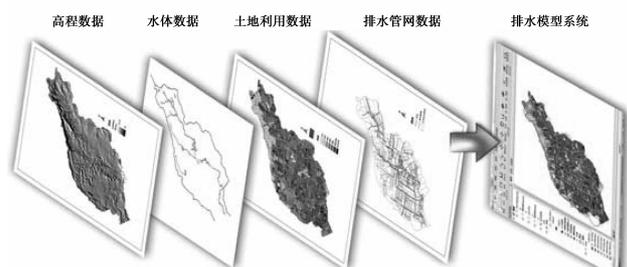


图 3 系统空间数据分层示意图

2.3 模型验证

2.3.1 参数敏感性分析

采用 McCuen 方法以 5% 为步长,最大变幅 10% 对所有输入模型的参数进行敏感性分析。检验结果(如图 4)显示在本模型中汇水区地表径流量、节点水头、节点流量和管道流量受参数波动影响较大。对于地表径流量,最显著的影响参数是汇水区面积,当面积变化 $\pm 5\%$ 时,地表径流量相应变化 $\pm 7.69\%$;当面积变化 $\pm 10\%$ 时,地表径流量相应变化 $\pm 15.38\%$ 。对于节点水头,径流宽度、坡度和不透水面积率对其影响显著,当上述参数在 $\pm 5\%$ 之间变化时,节点水头无相应变化,当参数变化达到 $\pm 10\%$,输出结果会随坡度和不透水面积率同向变化 25%,随径流宽度同向变化 28%;对于节点的流量,径流宽度和坡度为最敏感参数,径流宽度变动

-10%,流量相应变动-9.58%;径流宽度变动-5%,流量相应变动-2.99%。坡度变动-10%,流量相应变动-7.19%;径流宽度变动 10%,流量相应变动 2.5%。径流宽度比坡度更为敏感。对于管道中流量,最显著的影响参数是坡度,坡度变化 $\pm 5\%$,流量同向变化 $\pm 20\%$;坡度变化 $\pm 10\%$,流量同向变化 $\pm 40\%$ 。

综上,对模型输出结果影响最显著的参数是径流宽度、坡度、不透水面积率和曼宁系数。其中又以坡度为最敏感参数。有学者采用 generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE)方法对平原城市降雨径流模型参数的不确定性进行了分析,结果显示汇水区不透水面积率、不透水地表滞水量和不透水区曼宁系数三个参数具有较高的灵敏度^[22],另有学者采用逐步回归法(stepwise regression)对北京某区城市降雨模型进行参数灵敏度分析,分析结果显示在雨强较小(10.5 mm)的情况下,透水区参数灵敏度很小,雨强较大(52.5 mm)情况下,管道曼宁系数是决定峰值流量与峰值发生时间的关键参数^[23]。比之平原模型,本模型流域处在山地城市,汇水区坡度较大,多短时暴雨,坡度对模型输出结果的贡献大于不透水区洼地蓄积量、曼宁系数和不透水区参数。个别大坡度汇水区,地表径流下渗作较少,雨洪径流基本都沿着坡度流入最近的节点。因此在模型建立时候应该对坡度参数进行细致率定。

2.3.2 场次降雨模拟结果

根据 2010 年盘溪河实测数据和资料,选取典型暴雨 2010 年 7 月 4 日和 2010 年 7 月 6 日雨量计记录的两场降雨过程进行模拟。2010/6/7 暴雨降雨历时 23.4 h,平均降雨强度 0.038 mm,最大降雨强度 2.2 mm。2010/7/4 降雨峰值历时约 60 min,平均降雨强度 0.24 mm,最大降雨强度 0.54 mm,为双峰型暴雨。

模型模拟盘溪河出口径流量(如图 5)。采用模型确定性效率系数 Nash-Sutcliffe 系数 Ens 评价模拟结果^[24]。一般认为 Ens 达到 0.90 以上为甲等,表示模拟结果非常准确,0.89~0.70 为乙等,表示模拟结果比较准确;0.69~0.50 为丙等。小于 0.50 则认为模拟结果不可信。

2010/6/7 结果显示由于降雨量小,降雨时间较长,径流量缓慢增加并存在波动,无明显洪峰时刻。模拟结果与实测数据的效率系数 Ens 为 0.56,相对误差 11.8%。2010/7/4 结果显示随着降雨的进行,径流量逐渐增加,洪峰时刻出现在 16:00 和 17:40,滞后于降雨。模拟结果与实测数据的效率系数 Ens 为 0.76,相对误差 8.82%。

2.4 模型应用

分别用一年一遇、二十年一遇、五十年一遇和一百年一遇暴雨数据来模拟排水管道降雨-径流过程。其中降雨数据来自于重庆市气象局资料。

模拟结果显示,对比暴雨下排水管道的流量 Q_i 与管道自身最大排水能力 Q_{max} 得到基于流量评价的评估结果。排水系统全局“泄洪峰值”时刻:一年一遇次暴雨下,有 27 根排水管道长时间处于满流状态,占总数的 0.52%;二十年一遇次暴雨下,超载排水的管道数量达到 152 根(占排水管道总数 3.04%);而相应五十年和百年一遇的超载排水的管道数量为 294 根(占排水管道总数 5.86%)和 412 根(占排水管道总数 8.20%)。超载排水管道的数目随着暴雨重现期的增加

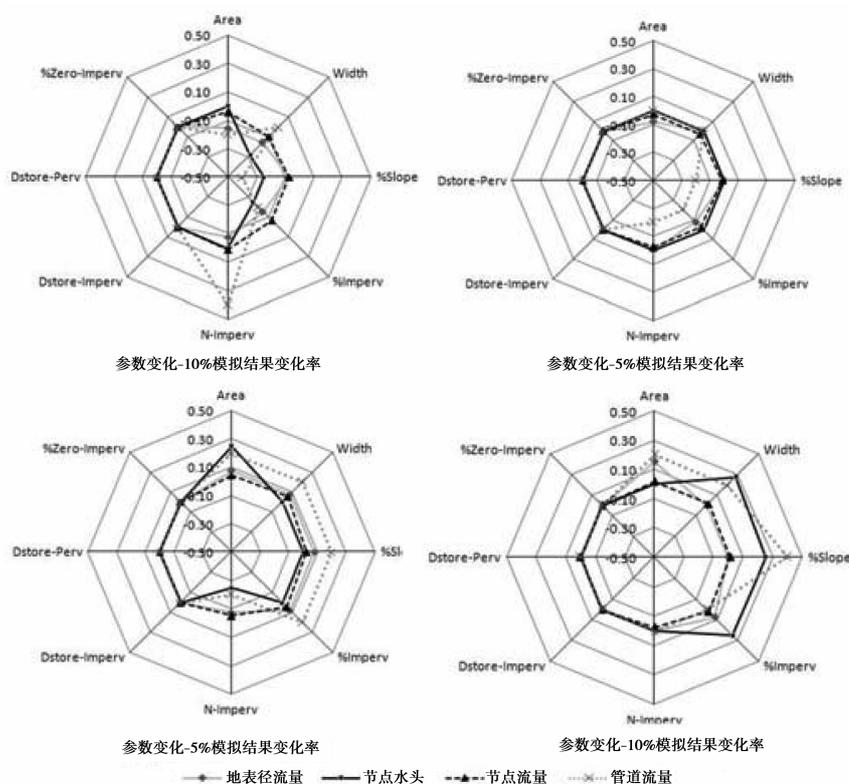


图 4 模型参数敏感性分布玫瑰图

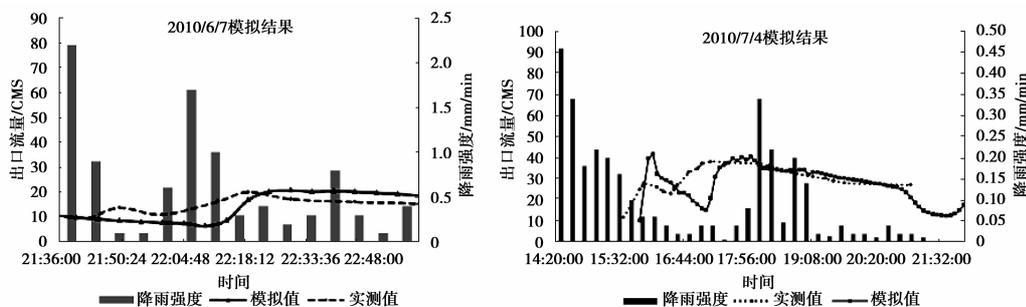


图 5 盘溪河流域径流过程模拟结果

显著加大。百年一遇的暴雨泄洪峰值时刻,77.83%的排水管道充满度小于 20%;五十年一遇暴雨的暴雨泄洪峰值时刻,84.01%的排水管道充满度小于 20%。这是由于重庆的特大暴雨降雨时间短,降雨强度大;且山地城市的地表坡度大,相应排水管道的平均坡度也显著大于平原城市。在大暴雨时刻,管内流速大,排水迅速,故管道充满度较小。结果还显示,百年一遇暴雨的泄洪峰值时刻下有 45.97%的管道充满度小于 5%,这些小充满度的管道大部分是流域上游的排水管道和排水管道系统的前端管道,也就是连接雨水口、小区的前端接入管道。这说明排水系统还有剩余的泄水能力,可以通过模型优化排水管道合理的调峰控峰。在泄洪峰值时刻,排水系统的负荷集中在输送系统的末端管道、流域的下游管道和过长的排水管道。这是由于这类管道的集水面积过大。

比较检查井内水头与检查井埋深,得到基于检查井是否溢流的排水能力评估结果。百年一遇暴雨下有 36 个检查井发生溢流(占检查井总数 0.72%);五十年一遇暴雨和二十年一遇暴雨下均有 32 个检查井发生溢流(占检查井总数

0.62%);一年一遇暴雨下有 16 个检查井发生溢流(占检查井总数 0.31%)。发生溢流的检查井主要位于流域的东南侧商业区。从模型的结果可以看出内涝点的个数与暴雨的重现期无很大的相关性。一年一遇暴雨下,引起检查井内涝的原因是上游排水管道的坡度大于下游排水管道,水力坡度的巨大变化导致检查井壅水,发生内涝。对百年一遇下的 36 个内涝检查井进行分类处理。有 14 个检查井所在的子汇水区域的下垫面类型为“林地”和“绿地”。此类内涝事件对城市日常交通生活影响不造成影响,且绿地、林地等透水性表面能对溢流的雨水起到吸收、隔离、削峰等作用,可进一步强化排水。另外有 22 个内涝点处于商业区,此处由于人口密集,地面硬化率高导致排水管道排水能力不足。针对此类内涝点必须进行改造。

3 结 论

1) 结合 ArcObjects 和水力学基本算法开发了山地城市暴雨径流模型,实现 GIS 数据向 SWMM 的转换,完成区域管网系统概化。即可在给定条件下模拟不同降雨重现期下的

城市流域地表径流情况、排水管网过流情况,并从中找出溢流检查井和泄洪峰值时刻。计算以该溢流检查井为源头,对上下游管线的影响程度,以及对周边环境的影响情况;从而进一步对提出相应的改造方案,如采取管径加大、增加储水池等措施,最终完成整个管网的优化,保证管道系统稳定运行。运用此模型对重庆市盘溪河流域两场暴雨的研究表明,模拟结果与实测数据的效率系数 E_{ns} 为 $0.56 \sim 0.76$,相对误差 $8.82 \sim 11.8\%$ 。

2)对本模型关键参数进行率定及敏感性分析表明,最敏感的参数为径流宽度、坡度、曼宁系数和不透水面积率;受敏感参数影响最大的输出结果为汇水区地表径流量、节点水头、节点流量和管道流量。

3)通过模型对城市排水系统排放能力进行管道流量、管道内充满度和发生溢流检查井个数等方面进行评估,结果显示大部分管道工作良好,能有效排除雨水。一年一遇、二十年一遇、五十年和百年一遇暴雨下,分别有 0.52% 、 3.04% 、 5.86% 和 8.20% 的排水管道长时间处于满流状态百年一遇的暴雨泄洪峰值时刻, 77.83% 的排水管道充满度小于 20% ;五十年一遇暴雨的暴雨泄洪峰值时刻, 84.01% 的排水管道充满度小于 20% 。比较检查井内水头与检查井埋深,得到百年一遇暴雨下有 0.72% 的检查井发生溢流;五十年一遇暴雨和二十年一遇暴雨下均有 0.62% 的检查井发生溢流;一年一遇暴雨下有 0.31% 的检查井发生溢流。

参考文献:

- [1] Giorgio C, Attilio C, et al. Effects of land-use changes on the hydrologic response of reclamation systems[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2005, 30:561-574.
- [2] 刘金星, 邵卫云. 城市区域雨水地面径流模拟方法探讨[J]. *水利学报*, 2006, 37(2): 184-188.
LIU Jinxing, SHAO Weiyun. Simulation of rainfall runoff in urban districts[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(2): 184-188.
- [3] Amaguchi H, Kawamura A, Olsson J, et al. Development and testing of a distributed urban storm runoff event model with a vector-based catchment delineation[J]. *Journal of Hydrology*, 2012: 205-215.
- [4] Bornstein R, Lin Q. Urban heat islands and summertime convective thunderstorms in Atlanta: three case studies[J]. *Atmos. Environ.* 2000;34, 507-516.
- [5] Khon V, Mokhov I I, Roeckner E, et al. Regional changes of precipitation characteristics in Northern Eurasia from simulations with global climate model[J]. *Global and Planetary Change*. 2007;118-123;
- [6] Olsson J, Berggren K, Olofsson M. Applying climate model precipitation scenarios for urban hydrological assessment: A case study in Kalmar City, Sweden[J]. *Atmospheric Research*. 2009;92 364-375.
- [7] 温克刚, 马力. 中国气象灾害大典: 重庆卷[M]. 北京: 气象出版社, 2008. 243-289.
WEN Kegang, MA Li. Ceremony of meteorological disasters in China: Study in Chongqing[M]. Beijing: Meteorological, 2008;243-289.
- [8] 王中, 陈艳英. 触发重庆山洪灾害的典型环流和影响系统分析[J]. *高原气象*, 2007, 26(3): 609-614.
WANG Zhong, CHEN Yanying. Analyses on major effect systems and typical atmospheric circulation triggering mountain torrential disasters in chongqing[J]. *Plateau Meteorology*, 2007, 26(3): 609-614.
- [9] Irina Ribarova, Plamen Ninov, David Cooper. Modeling nutrient pollution during a first flood event using HSPF software: case study Iskar River, Bulgaria[J]. *Ecological Modeling*, 2007, 10:1-6.
- [10] 基于 HSPF 模型的大阁河流域径流量模拟[J]. *环境科学与技术*, 2009, 32(10):103-108.
XUE Yifeng, WANG Xiaoyan, WANG Lifeng, et al. Runoff Simulation on Watershed of Dage River by HSPF Model[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 32(10):103-108.
- [11] Lewis A Rossman. Storm Water Management Model User's Manual, Version 5.0. 2008
- [12] Alley W M, Smith P E. Distributed routing rainfall-runoff model: version II[R]. US Geological Survey, Geological Survey Open File Report, 1982a: 82-344.
- [13] Geiger W P, Dorsch H R. Quantity-Quality Simulation(QQS): a detailed continuous planning model for urban runoff control, Volume 1, Model Description, Testing and Applications. [R]. US Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH. Report, EPA /600/2- 80-011, 1980.
- [14] Christopher Zoppou, Review of urban storm water models[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2001 (16):195-231.
- [15] 岑国平, 詹道江, 洪嘉年. 城市雨水管道计算模型[J]. *中国给水排水*, 1993, 9(1):37-40.
CHEN Guoping, ZHAN Daojiang, HONG Jianian. Urban stormwater system model [J]. *CHINA WATER & WASTEWATER*, 1993, 9(1):37-40.
- [16] 解以扬, 李大鸣, 李培彦, 等. 城市暴雨内涝数学模型的研究与应用[J]. *水科学进展*, 2005, 16(3):384-390.
XIE Yiyang, LI Daming, LI Peiyan, et al. Research and application of the mathematical model for urban rainstorm water logging[J]. *Advances in Water Science*, 2005, 16(3):384-390.
- [17] 徐向阳, 刘俊, 郝庆庆, 等. 城市暴雨积水过程的模拟[J]. *水科学进展*, 2003, 14(2):193-196.
XU Xiangyang, LIU Jun, HAO Qinjin, et al. Simulation of the process about urban stormwater runoff[J]. *Advances in Water Science*, 2003, 14(2):193-196.
- [18] Sample D J, Heaney J P, Wright L T et al. Geographic information systems, decision support systems, and urban stormwater management[J]. *Water Resour. Plan. Manage. ASCE*, 2001;127(3), 155-161.
- [19] Rodriguez F, Andrieu H, Creutin J D. Surface runoff in urban catchments: morphological identification of unit hydrographs from urban databanks[J]. *Journal of Hydrology*, 2003(283): 146-168.
- [20] Rodriguez F, Andrieu H, Morena F. A distributed hydrological model for urbanized areas-model development and application to case studies. [J]. *Journal of Hydrology* 2008 (351), 268-287.
- [21] Amaguchi H, Kawamura A, Olsson J, et al. Development and testing of a distributed urban storm runoff event model with a vector-based catchment delineation[J]. *Journal of Hydrology*, 2012 (420/421):205-215.
- [22] 赵冬泉, 王浩正, 陈吉宁. 城市暴雨径流模拟的参数不确定性研究[J]. *水科学进展*, 2009, 20(1):46-51.
ZHAO Dongquan, WANG Haozheng, CHEN Jining, et al. Parameters uncertainty analysis of urban rainfall runoff simulation [J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20(1):46-51.
- [23] 王浩昌, 杜鹏飞, 赵冬泉, 等. 城市降雨径流模型参数全局灵敏度分析[J]. *中国环境科学*, 2008, 28(8):725~729.
WANG Haochang, DU Pengfei, ZHAO Dongquan, et al. Global sensitivity analysis for urban rainfall-runoff model[J]. *China Environmental Science*, 2008, 28(8):725-729.
- [24] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models, Part 1: A discussion of principles[J]. *Hydrol.* 1970, 10:282-290.