

# 地表径流与地下管流耦合的城市暴雨洪涝动力学模型

董柏良<sup>1,2</sup>, 夏军强<sup>1</sup>, 王小杰<sup>1</sup>, 李启杰<sup>1</sup>

(1. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510635)

**摘要:**为准确模拟城市暴雨洪涝过程,建立了地表径流与地下管流耦合的城市暴雨洪涝动力学模型,该模型主要包括二维地表径流模块、一维地下管流模块、地表径流与地下管流交互模块以及重点基础设施受淹模块。二维地表径流模块采用二维浅水方程和 Horton 下渗公式模拟地表产汇流过程,地下管流模块采用 TPA 法与 Godunov 格式有限体积法求解一维管流方程模拟城市排水管网内复杂流态的水流运动,两模块采用基于雨水口泄流及溢流能力的交互模块进行耦合。将模型应用于武汉市青山区港西排水片区,利用港西排水片区 5 年一遇降雨渍水风险图验证了模型的精度,同时模拟了 100 年一遇降雨条件下的城市暴雨洪涝过程。结果表明:该模型计算精度良好,超过 88.8% 的渍水点模拟水深与官方发布成果一致;100 年一遇降雨条件下港西排水片区中度积水和重度积水的面积分别占研究区面积的 12.52% 和 1.16%。

**关键词:**城市暴雨洪涝;地表径流;地下管流;水动力模型;武汉市

中图分类号:TV213.4

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2024)06-0095-09

**Urban rainstorm flood dynamic model coupled with surface runoff and sewer flow//DONG Boliang<sup>1,2</sup>, XIA Junqiang<sup>1</sup>, WANG Xiaojie<sup>1</sup>, LI Qijie<sup>1</sup>** (1. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510635, China)

**Abstract:** In order to accurately simulate urban rainstorm flood process, an urban rainstorm flood dynamic model coupled with surface runoff and sewer flow was established. The model mainly includes two-dimensional surface runoff module, one-dimensional sewer flow module, surface runoff and sewer flow interaction module and key infrastructure inundation module. The two-dimensional surface runoff module used the two-dimensional shallow water equation and Horton infiltration formula to simulate the surface runoff process. The sewer flow module used TPA method and Godunov finite volume method to solve one-dimensional pipe flow equations and simulate complex flow patterns in urban drainage networks. The two modules were coupled using formulas based on the discharge and overflow capacity of street inlets. The model was applied to Gangxi drainage area in Qingshan District, Wuhan City. The accuracy of the model was verified by using the 5 a return period rainfall waterlogging risk map of Gangxi drainage area, and the urban rainstorm flood process under the 100a return period rainfall was simulated. The results show that the model has good calculation accuracy, and the simulated water depth of over 88.8% of waterlogging points is consistent with the official published results. Under the condition of the 100a return period rainfall, the areas of moderate and severe waterlogging in the Gangxi drainage area account for 12.52% and 1.16% of the study area, respectively.

**Key words:** urban rainstorm flood; surface runoff; sewer flow; hydrodynamic model; Wuhan City

城市洪涝涉及降雨产流、地表汇流、地下管网泄流在内的复杂水文、水动力过程(图 1)。根据产汇流模拟方式不同,可以将现有的城市洪涝模型分为

水文模型、水动力模型、水文与水动力耦合模型三大类<sup>[1]</sup>。城市水文模型以美国国家环境保护局开发的暴雨洪水管理模型(storm water management

**基金项目:**国家自然科学基金项目(51725902,41890823);广东省基础与应用基础研究基金项目(23A1515110612);广东省水利科技创新项目(2023-05)

**作者简介:**董柏良(1996—),男,博士,主要从事城市洪涝水动力模拟研究。E-mail: dongboliang@whu.edu.cn

**通信作者:**夏军强(1973—),男,教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: xiajq@whu.edu.cn

model, SWMM)为典型代表。SWMM 采用非线性水库法进行汇流计算,结合地下管网水动力学模块和水环境模块,被广泛应用于城市洪涝分析、市政管网设计、海绵城市评估等工作中。应用 SWMM 时需将研究区划分为多个排水片区,因此难以模拟淹没水深等关键致灾水力要素<sup>[2]</sup>。针对此不足一些学者引入了概化蓄水池法或将 SWMM 中的管网模块与二维地表径流模型相结合以模拟地表淹没水深<sup>[3-4]</sup>。梅超<sup>[5]</sup>以 SWMM 中的 EXTRAN 管网模块和开源的 TELEMAC-2D 二维水动力学模型为基础,构建了城市水文水动力耦合模型。黄国如等<sup>[6]</sup>概化了城市雨洪模型中涉及的垂向以及水平方向的两种耦合方式,采用动态链接库(dynamic link library, DLL)将一维 SWMM 中的产汇流模块和管网模块与二维水动力学模型进行耦合,构建了城市洪涝水文水动力学耦合模型。王兆礼等<sup>[7]</sup>耦合 TELEMAC-2D 模型与 SWMM 构建了 TSWM 耦合模型。需要指出的是,水文水动力耦合模型多假定降雨产流后完全流入地下排水管网,管网泄流能力不足时管流溢流至地表造成淹没。但事实上,地表径流与地下管流是一个双向的交互过程,雨水口泄流能力不足是造成地表内涝的一个重要原因<sup>[8]</sup>。为了弥补该不足,王船海等<sup>[9]</sup>提出了利用雨算子耦合地表与管网的太湖流域模型,并将其应用于模拟常州市某小区的暴雨洪涝过程。

了基于 Preissmann 窄缝法的城市地下排水管网模型以及非结构网格二维地表径流模型,将两部分模型采用雨水口过流公式进行结合,提出城市洪涝全过程模型。Nania 等<sup>[14]</sup>以街道为基本单元构建了城市路网和地下排水管网耦合的城市洪涝模型。银雅伦等<sup>[15]</sup>将 GAST 二维水动力模型与 SWMM 中的管网计算模块进行耦合,构建 GAST-SWMM 水动力模型,并应用于大尺度城区的洪涝过程模拟。但是现有洪涝水动力模型普遍存在以下问题:水文水动力耦合模型无法完全体现实际城市洪涝灾害中地表径流与地下管流的双向交互过程;目前最常用的 SWMM 的管网模块空间分辨率低,无法模拟管道内的复杂瞬变流态。针对以上不足,迫切需要建立具有明确物理机制,能够耦合模拟地表径流与地下管流并实现双向交互的水动力模型。本文基于二维地表径流模块、地表径流与地下管流交互模块、一维地下排水管网模块以及重点基础设施受淹模块,提出考虑水文学产流机理的城市暴雨洪涝水动力学模型,并以武汉市青山区港西排水片区为对象进行模型的验证及应用。

## 1 模型构建

### 1.1 地表径流模块

#### 1.1.1 控制方程

浅水方程由纳维-斯托克斯方程基于静压假定沿水深垂向平均而得到,被广泛用于描述海啸、河湖、溃坝水流及地表径流等具有自由表面且水深尺度远小于平面尺度的水流<sup>[16-17]</sup>。相较于采用其他控制方程的模型,浅水方程模型在计算效率与计算精度等方面取得了较好的平衡,因此成为城市洪涝模拟的主流方法<sup>[18-19]</sup>。二维浅水方程由质量守恒方程与  $x, y$  方向的动量守恒方程构成,表达式为

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} = \mathbf{S} \quad (1)$$

$$\text{其中 } \mathbf{U} = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix} \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} hu \\ hu^2 + \frac{1}{2}gh^2 \\ huv \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 + \frac{1}{2}gh^2 \end{bmatrix} \quad \mathbf{S} = \mathbf{S}_e + \mathbf{S}_b + \mathbf{S}_f = \begin{bmatrix} q_e \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ ghS_{0x} \\ ghS_{0y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -ghS_{fx} \\ -ghS_{fy} \end{bmatrix}$$

式中: $\mathbf{U}$  为守恒变量构成的矢量; $t$  为时间; $\mathbf{F}$ 、 $\mathbf{G}$  分

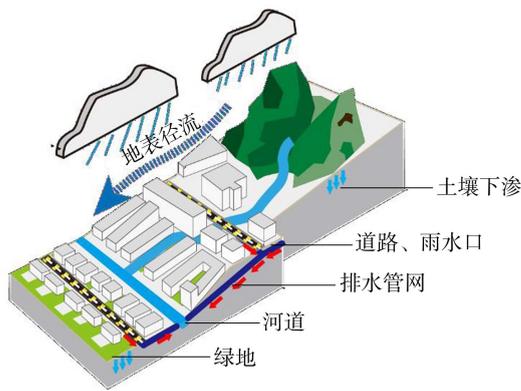


图1 城市洪涝过程示意图

Fig. 1 Sketch of urban flood process

近些年来城市洪涝水动力模型蓬勃发展,在计算精度、计算效率上取得了长足的进步。城市洪涝水动力模型假定降雨产流后地表径流沿地形演进,并通过雨水口流入地下排水管网。城市洪涝水动力模型可以较为准确地反映城市暴雨洪涝灾害中水流的实际运动情况,因此在城市洪涝模拟领域具有显著优势<sup>[10]</sup>。目前众多学者将地表径流水动力模型与地下管流模型进行耦合,构建城市洪涝耦合水动力模型<sup>[11-12]</sup>。耿艳芬<sup>[13]</sup>针对城市雨洪的特点,构建

别为  $x$  和  $y$  方向的通量;  $\mathbf{S}$  为源项, 主要包括质量源项  $\mathbf{S}_e$  以及底坡项  $\mathbf{S}_b$ 、摩擦阻项  $\mathbf{S}_f$  等动量源项;  $h$  为水深;  $u$ 、 $v$  分别为  $x$ 、 $y$  方向沿水深平均的流速;  $q_e$  为单位面积上的质量源项, 主要包含降雨、下渗、雨水口泄流、溢流等;  $g$  为重力加速度; 底坡项  $S_{0x}$ 、 $S_{0y}$  分别反映了  $x$  和  $y$  方向的地形变化;  $S_{fx}$ 、 $S_{fy}$  分别为  $x$  和  $y$  方向上的摩擦阻坡度, 通过曼宁公式计算。

对于短历时城市洪涝过程, 土壤下渗的影响不可忽略<sup>[20]</sup>。本模型没有采用子汇水区计算产流, 而是在水动力计算网格中基于 Horton 公式计算土壤下渗<sup>[21]</sup>:

$$f_p = f_\infty + (f_0 - f_\infty) e^{-k_d t} \quad (2)$$

式中:  $f_p$  为下渗强度;  $f_\infty$  为稳定下渗强度;  $f_0$  最大下渗强度;  $k_d$  为衰减系数;  $t$  为时间。

### 1.1.2 数值方法

浅水方程属于双曲型偏微分方程, 仅针对特定问题存在解析解, 求解浅水方程时通常需要采用的数值方法。本模型基于非结构网格有限体积法求解二维浅水方程, 采用非结构三角形网格离散计算区域。相较于结构网格, 非结构网格生成较为复杂, 但非结构网格具有更高的灵活性, 能够适用于各种复杂地形及边界的研究区域并大幅地减少网格数量<sup>[22]</sup>。根据浅水方程的旋转不变性, 可以引入旋转矩阵将界面通量的计算转化为一维问题, 本文采用 HLLC (Harten-Lax-Van Leer contact) 近似黎曼算子求解通过界面的数值通量。

二维浅水方程中的动量源项主要包含底坡项与摩擦阻项<sup>[23]</sup>。对于底坡变化较大的情况, 若底坡源项处理不当则会导致出现数值震荡甚至导致模型的崩溃。因此对底坡源项的离散必须满足和谐性原则, 即在静水条件下底坡项需要与动量通量抵消<sup>[24]</sup>。本模型中采用 Xia 等<sup>[25]</sup> 提出的 SRM (surface reconstruction method) 法重构计算网格边界两侧的状态变量。在实际城市暴雨径流模拟过程中, 受较大坡度的影响会出现小水深、大流速的水流流态, 继而造成摩擦阻项的“刚性”问题<sup>[16]</sup>。常规的显式摩擦阻项处理方法在这种情况下会出现虚假流动, 因此一般采用隐式或半隐式方法处理摩擦阻项, 本模型采用半隐式摩擦阻项计算方法<sup>[22]</sup>。Horton 下渗公式计算下渗速率受到时间和土壤含水量的共同控制, 需要采用迭代法进行求解, 本模型参考 SWMM 的水文模块, 采用 Newton-Raphson 迭代法求解 Horton 下渗公式。

## 1.2 地表径流与地下管流交互模块

雨水口作为地表径流与地下管流之间交互的关键节点, 直接影响城市洪涝模拟的准确性。地表径流与地下管流主要存在下泄和溢流两种交互流态,

对于地表水深较小、管网超载程度较低的工况, 雨水口的过流能力仅与雨水口的几何特性以及地表水流条件有关。地表水深较大或管网严重超载的条件下雨水口过流能力受连接管影响, 过流能力不仅与排水系统的几何特征相关, 还与地表与地下水之间的水头差相关。本模型参考 Guo 等<sup>[26]</sup> 的研究, 选取堰流公式和孔口流公式计算结果的相对较小值作为雨水口的过流流量:

$$Q_d = \min\{C_w P_s \sqrt{2g} h^{1.5}, C_n A_s \sqrt{2g [H_s - \max(H_j, d_{ij})]}\} \quad (3)$$

式中:  $Q_d$  为雨水口过流流量;  $H_s$ 、 $H_j$  分别为地表径流水位和检查井水头;  $d_{ij}$  为连接管底部与检查井底部的高差;  $P_s$  为雨水口周长;  $C_w$ 、 $C_n$  分别为堰流和孔口流的过流系数;  $A_s$  为连接管面积。

当管道内水头大于地表水位时, 假定管道内水流经由检查井溢流至地表:

$$Q_o = C_n A_j \sqrt{2g (H_j - H_s)} \quad (4)$$

式中:  $Q_o$  为溢流流量;  $A_j$  为检查井面积。

## 1.3 地下管流模块

### 1.3.1 控制方程

地下排水管网由排水管道与雨水检查井 (节点) 两类基本单元构成, 地下排水管道内水流流态复杂, 常出现明渠流与有压流之间的复杂过渡流态, 断面平均的管流方程可写为如下守恒形式:

$$\frac{\partial U_p}{\partial t} + \frac{\partial F_p}{\partial x} = S_{bp} + S_{fp} \quad (5)$$

$$\text{其中 } U_p = \begin{bmatrix} A \\ Q \end{bmatrix} \quad F_p = \begin{bmatrix} Q \\ \frac{Q^2}{A} + I \end{bmatrix}$$

$$S_{bp} = \begin{bmatrix} 0 \\ -gA \frac{dz}{dx} \end{bmatrix} \quad S_{fp} = \begin{bmatrix} 0 \\ -C_D \frac{PQ|Q|}{A^2} \end{bmatrix} \quad C_D = gn^2 R_h^{-1/3}$$

式中:  $U_p$  为管流方程守恒变量;  $F_p$  为数值通量;  $S_{bp}$  为底坡项;  $S_{fp}$  为摩擦阻项;  $A$  为过水断面面积;  $Q$  为流量;  $I$  为压力项;  $z$  为管道底部高程;  $P$  为湿周;  $C_D$  为无量纲摩擦阻参数;  $R_h$  为水力半径;  $n$  为曼宁糙率系数。

明渠流与有压流条件下压力项和波速的计算具有显著不同。明渠流流态下管流波速为重力波波速, 有压流流态下管流波速等于压力波波速。明渠流的压力项作用位置为过水断面的形心, 计算公式见式(6); 有压流的压力项与压力水头有关, 计算公式见式(7)。

$$I(\theta) = \frac{1}{24} g d^3 \left( 3 \sin \frac{\theta}{2} - \sin^3 \frac{\theta}{2} - \frac{3\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \right) \quad (6)$$

$$I(H) = \frac{\pi}{4} g d^2 \left( H + \frac{d}{2} \right) \quad (7)$$

式中:  $\theta$  为过水断面的角度;  $d$  为管道直径;  $H$  为压力水头。

为了便于数值模拟, 引入 TPA (two-component pressure approach) 法对明渠流与有压流两种流态下的控制方程进行统一化处理<sup>[27]</sup>。TPA 法假定处于有压流流态时模拟的过水断面面积可以不等于管道横截面面积, 当过水断面大于管道横截面时管流处于正压状态, 小于时处于负压状态。管流的压力水头可通过压力波波速、过水断面面积以及管道横截面面积计算:

$$H = \frac{a^2}{g} \left( \frac{A - A_p}{A_p} \right) \quad (8)$$

式中:  $a$  为压力波波速;  $A_p$  为管道横截面面积。

### 1.3.2 数值方法

为克服 SWMM 管网计算模块“管道-节点”空间离散方式及有限差分算法无法模拟管道内复杂瞬变流态的不足<sup>[28]</sup>。本模型中管流模块基于 Godunov 格式有限体积法进行求解, 排水管道被离散为一系列均匀的一维计算单元, 单元与单元间的数值通量采用 HLL 近似黎曼解计算。由于 Godunov 格式有限体积法具有良好的跨临界流模拟能力, 本模型能够模拟管道内复杂的瞬变流动过程。管流摩擦阻项计算方法与地表径流模块一致, 同样采用半隐式算法进行求解。

### 1.3.3 管网节点处理

图 2 为典型管网节点结构, 图中  $u_p$  为管流流速,  $c$  为波速。实际排水管网中节点的类型以及节点中的水流流态复杂多样, 因此节点的求解是排水管网模拟的关键问题之一。雨水检查井是排水管网最常见的节点, Sanders 等<sup>[29]</sup>总结了管网与检查井交界处可能存在的 16 种水流流态, 并根据水流流态

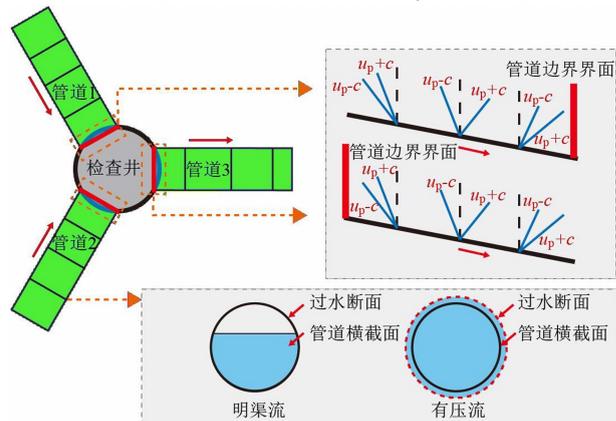


图 2 典型管网节点结构

Fig. 2 Typical sewer network junction structure

采用经验公式计算管网进出口界面的质量和动量通量。虽然该方法较为符合物理本质, 但是其应用较为烦琐, 某些经验公式还存在多个数值解, 因此采用该方法计算管网内的洪水演进过程存在较大的不确定性。本模型采用 León 等<sup>[30]</sup>提出的管网复杂流态节点计算方法, 基于黎曼不变量、质量守恒方程、动量守恒方程构造非线性方程组迭代求解管网节点。

### 1.4 重点基础设施受淹模块

现有的城市洪涝水动力模型往往没有考虑建筑和地下空间等城市重要基础设施的受淹过程。Dong 等<sup>[31]</sup>的研究表明, 当发生极端洪水时建筑内的积水水量可能占洪涝总水量的 20% 以上, 因此必须考虑地表建筑的受淹过程。当积水水位大于挡水墙的高程时, 水流以宽顶堰流的形式流入地表建筑和地下空间。因此单位时间流入建筑或地下的流量为:

$$Q_{uw} = C_{uw} w_u (h - h_e - h_d)^{3/2} \quad (9)$$

式中:  $Q_{uw}$  流入的流量;  $w_u$  为入口的宽度;  $C_{uw}$  为堰流系数;  $h_e$  为入口处的高度;  $h_d$  为挡水设施的高度。

### 1.5 MPI-OpenMP 混合同行方法

模型采用 MPI 与 OpenMP 相结合的混合同行方法。程序运行后由主进程负责读入计算网格, 并建立网格之间的邻域关系。基于 Metis 图分割方法将整个计算域划分为  $m$  个相互独立的计算分区, 每个计算分区内的数据相互独立, 分别由 MPI 环境开启的  $m$  个进程进行计算。为了实现不同计算分区间的数据交互, 设置边界虚网格并构造相应的数据结构, 便于通过 MPI 的非阻塞发送与接收函数进行数据交互。有限体积法模型的计算瓶颈往往在于求解通过网格界面的数值通量以及对计算网格进行守恒积分, 因此在每个进程中需要采用 OpenMP 指令对相应的计算循环进行并行, 以加快计算速度。单个计算时间步内首先求解边界网格, 计算完成后采用 MPI 非阻塞通讯函数对边界网格的数据进行通信, 随后求解内部计算网格完成该时间步的所有计算。

## 2 模型验证

### 2.1 验证区概况

选择武汉市港西排水片区作为模型验证区, 概况如图 3 所示。该片区位于青山区西北部, 北临长江, 东临青山港, 面积约 9.5 km<sup>2</sup>。片区内管网汇水主要通过港西一期、二期泵站抽排至长江, 两泵站最大排水能力约为 77.6 m<sup>3</sup>/s, 另有少部分雨水通过管道排入楠姆河及武丰河。验证中采用的地形数据由第三方测绘公司通过无人机三维倾斜摄影获得,

DEM 数据的空间分辨率为 1 m, 数据测量时间为 2019 年。整个验证区的地形呈现出南侧高中北部低的特征, 最大高程 31.63 m, 平均海拔约为 22 m。港西排水片区的城市化程度较高, 建筑、人行道、道路等不透水面占城区总面积的 50.4%, 林地、公园、绿化带等透水面占比为 47.1%, 其余面积为池塘、湖泊、河渠等水体。



图 3 验证区概况

Fig. 3 Overview of verification area

## 2.2 验证区模型构建

图 4 为港西排水片区典型区域的计算网格。为了体现城市复杂的街区布置以及微地形特征, 本模型设定网格的空间分辨率约为 5 m, 整个验证区共包含 569 194 个网格节点以及 1 055 992 个计算单元。根据无人机航测的多光谱下垫面成像数据提取了 12 类下垫面, 并在模拟过程中针对不同下垫面类型分别给定糙率、下渗能力等计算参数。验证区内共 3 014 栋建筑采用 BH (building hole) 方法进行概化, 以模拟建筑对地表洪水演进过程的影响<sup>[32-33]</sup>。



图 4 港西排水片区典型区域计算网格

Fig. 4 Computational mesh for typical area of Gangxi drainage area

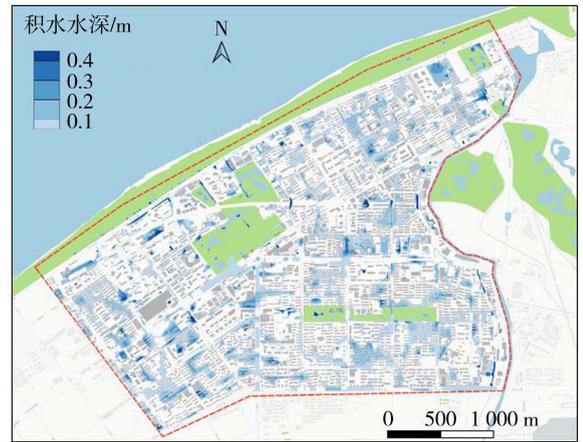
此外, 本模型对传统 BH 方法进行了一定的改进, 考虑了地表建筑和地下空间通过入口与地表积水之间的交互, 从而模拟建筑内的受淹过程。建筑物入口高度是模拟建筑受淹情况最重要的参数, 会直接影响建筑内的淹没水深。本模型根据现场调研情况, 将地表建筑物的入口高度设定为 0.2 m, 地下空间的入口高度设定为 0.4 m。基于有限体积法将地下排水管道划分为长度约为 5 m 的一维均匀计算单元, 管道与管道之间通过检查井连接。

## 2.3 验证区模型模拟结果

由于城市洪涝灾害普遍具有受灾范围广、持续时间长、过程复杂等特征, 难以获得充足数据支撑模型的率定验证<sup>[34]</sup>。武汉市水务局通过收集排水管网、防汛排涝点的信息, 结合大数据技术计算, 发布了中心城区 5 年一遇 3 h (累积雨强 88 mm) 降雨渍水风险图。图 5 (a) 为验证区的降雨渍水风险图, 根据积水水深进行积水等级划分: 0~0.15 m 为轻度积水, >0.15~0.4 m 为中度积水, >0.4 m 为重度积水。由图 5 (a) 可见, 验证区内共存在工人村三街沿线、



(a) 降雨渍水风险图



(b) 模型模拟结果

图 5 5 年一遇降雨条件下降雨渍水风险图与模型模拟结果  
Fig. 5 Rainfall waterlogging risk map and simulation results under 5 a return period rainfall condition

和平大道与建设四路交叉口、沿港路与红钢四街交汇处等9处影响交通的渍水点。图5(b)为模型模拟的5年一遇降雨条件下渍水分布情况,在模型率定过程中主要调整雨水口过流系数、不同下垫面类型的霍顿下渗公式参数,从而控制淹没范围和水深分布与验证区降雨渍水风险图保持一致。由图5(b)可见,吉林街、荆州街、随州街、沿港路等区域渍水严重,最大水深达0.4 m。对比结果表明模型模拟结果与渍水风险图基本一致,但渍水点范围和数量略大于官方渍水风险图,主要原因可能是:模拟结果呈现的是模拟过程中的最大水深,而降雨渍水风险图未给出测量的具体时间;降雨渍水风险图可能未充分调研非主干道路上的渍水点,导致图中的渍水范围小于实际渍水范围。表1为渍水点降雨渍水风险图积水等级与模型模拟结果的积水水深,除渍水点P2外其余所有渍水点模拟的淹没水深与降雨渍水风险图符合程度良好,表明模型具有较高的模拟精度,能满足港西排水片区暴雨洪涝过程模拟的需求。

表1 渍水点降雨渍水风险图积水等级与模型模拟结果的积水水深

Table 1 Inundation degrees on rainfall waterlogging risk map and model simulated depth at waterlogging points

渍水点	降雨渍水风险图积水等级	模型模拟结果/m
P1	中度积水	0.31
P2	重度积水	0.15
P3	中度积水	0.21
P4	重度积水	0.70
P5	重度积水	0.59
P6	重度积水	0.55
P7	重度积水	0.44
P8	轻度积水	0.14
P9	轻度积水	0.08

## 2.4 验证区模型应用

将所建模型在100年一遇降雨条件下进行应用,不同时刻地表和建筑淹没水深的空间分布情况如图6所示。模拟时间 $t$ 为0~0.5 h时,降雨强度较小,土壤的下渗能力较强,验证区仅有少数位置存在渍水, $t=0.5$  h时积水水深超过0.15 m的面积仅占总面积的0.3%。 $t=47$  min时,降雨强度达到最大值,此时降雨强度远超排水系统的过流能力,验证

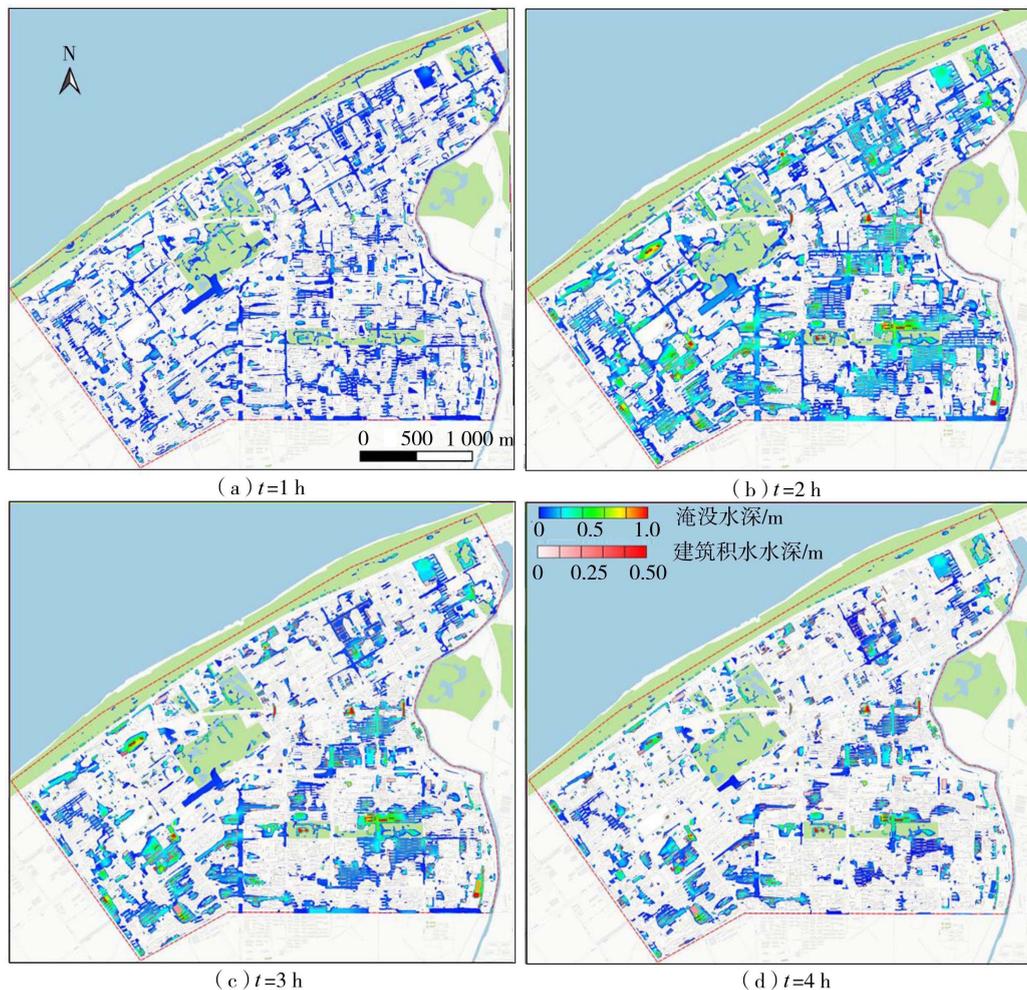


图6 100年一遇降雨条件下不同时刻地表与建筑淹没水深空间分布

Fig.6 Spatial distribution of surface and building inundation depth at different times under 100a return period rainfall condition

区内渍水现象逐渐严重。街区内部相较于道路的积水水深较小,  $t=1\text{ h}$  时, 几乎所有街道的积水水深都在  $10\text{ cm}$  以上, 中度积水、重度积水的面积分别占验证区面积的  $12.52\%$  和  $1.16\%$ 。  $t$  为  $1\sim 1.5\text{ h}$  时, 街区内部的积水水深和淹没范围均随着降雨强度的降低而下降, 道路上的积水水深增加。  $2\text{ h}$  后, 降雨停止, 在排水系统的作用下, 验证区内绝大多数位置的积水水深和淹没范围均显著下降,  $t=3\text{ h}$  时, 中度积水和重度积水的面积分别占验证区面积的  $8.01\%$  和  $1.59\%$ , 中度积水的面积占比相较于  $t=1\text{ h}$  时下降了  $36\%$ , 而重度积水面积占比上升了  $37\%$ 。重度积水面积占比上升反映了验证区内地势低洼地区还存在水流汇入现象, 进一步加剧了洪涝风险。  $t=4\text{ h}$  时, 除工业大道、荆州街、随州街、建设六路、建设九路等道路及其周边区域外, 整个港西排水片区范围内的渍水基本排除, 中度积水的面积占比为  $4.7\%$ 。受淹建筑的空间分布与地表渍水的位置密切相关, 但建筑内的淹没水深随时间的变化过程相比地表积水水深存在一定的滞后性。地表约在  $t=2\text{ h}$  时达到了最大淹没范围, 而验证区内的建筑在  $t=3\text{ h}$  时淹没程度最为严重。在  $t=1\text{ h}$  时, 发生淹没的房屋仅占房屋总数的  $5.4\%$ , 在  $t$  为  $1\sim 2\text{ h}$  时由于地表积水深度较大, 受淹的房屋所占的比例上升为  $17.9\%$ , 该时刻验证区建筑内的总积水量为  $76747\text{ m}^3$ , 占该时刻总降水量的  $5.5\%$ 。因此, 在城市洪涝模拟过程中有必要考虑建筑内部的受淹过程, 常规的建筑概化方法无法考虑建筑与地表之间的水流交互, 可能高估街道上的积水水深, 继而降低模拟结果的可靠性。

图 7 为 100 年一遇降雨条件下地表积水、泵站抽排水量、雨水口下泄、地表下渗、建筑积水和地下空间水量等不同特征水量随时间变化情况。在计算初始时刻, 由于降雨强度较低, 初期降雨几乎完全经由地表下渗。雨水口的下泄流量随地表积水水深的增加而增加, 在降雨持续  $2000\text{ s}$  后经由雨水口下泄, 地下排水管网的水量显著上升, 并在  $t=9420\text{ s}$  时超过下渗量。地表积水量随时间变化情况呈现出 3 个较为显著的阶段:  $3600\text{ s}$  之前, 地表积水量随着降雨强度的增加而迅速上升;  $3600\sim 7200\text{ s}$ , 降雨强度与排水系统的泄流能力相当, 地表积水量基本保持不变;  $7200\sim 15000\text{ s}$ , 在排水系统的泄流作用下地表积水量缓慢下降。地表积水量在  $4000\sim 5000\text{ s}$  迅速上升, 在  $6600\text{ s}$  时达到最大值, 为  $559267\text{ m}^3$ , 该时刻地表积水量占总降水量的  $41.65\%$ 。在  $10800\text{ s}$  时, 地表积水量、雨水口下泄量、地表下渗量分别占总降水量的  $18.83\%$ 、 $34.83\%$ 、 $27.23\%$ 。可

见, 城市排水系统显著降低了地表积水量, 直接降低了城市的洪涝风险, 因此采用地表与地下管道耦合的模拟方法对城市洪涝过程模拟与洪涝风险评估至关重要。

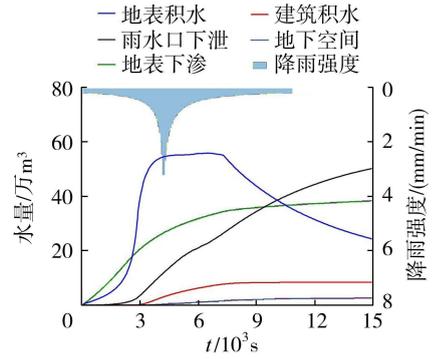


图 7 100 年一遇降雨条件下不同特征水量随时间变化情况  
Fig. 7 Variation of different characteristic water quantities over time under 100 a return period rainfall condition

将超载程度  $S_D$  定义为管道的充满度, 即管流水头与管道直径的比值。管流计算模块中, 当管道处于有压流流态时, 管道内水头将大于管道顶部高程, 因此  $S_D > 1$  表明管道发生了严重的超载。图 8 为 100 年一遇降雨条件下不同时刻管道超载情况, 根据  $S_D$  值将超载程度划分为 6 个等级。由图 8 可见, 降雨的前  $0.5\text{ h}$  内, 由于城市地表上没有形成大范围的渍水, 通过雨水口流入排水管网的水量很少, 整个排水管网处于完全明渠流流态,  $S_D < 0.5$  的管道占所有管道的  $88.4\%$ 。随着降雨强度的增加, 雨水口的泄流量随着地表积水深度的增加而上升, 大量积水经由雨水口下泄至地下排水管网导致管网发生超载。  $t=1\text{ h}$  时, 有  $50.0\%$  的管道处于完全超载状态, 发生超载的管道基本位于排水管网的末端。  $t$  为  $1\sim 2\text{ h}$  时, 验证区地表渍水严重, 排水系统的泄流压力较大, 管道的超载比例在  $80\%$  以上。  $2\text{ h}$  后, 降雨停止导致地表积水的深度下降, 经由雨水口流入排水管网的水流减少, 管网的泄流压力降低, 排水系统超载情况得到改善。  $t$  为  $3, 4\text{ h}$  时, 处于完全超载状态的管道占所有管道的比例分别下降为  $66.5\%$  和  $12.1\%$ 。

### 3 结论

a. 基于有限体积法构建了地表径流与地下管流耦合的城市暴雨洪涝动力学模型。采用基于非结构网格有限体积法的浅水方程模型模拟地表径流, 使用地形与水面重构的 SRM 方法求解底坡项, 基于半隐式方法求解摩阻项。利用 TPA 方法模拟管道内明渠流与有压流间的流态过渡, 并基于 Godunov 格式有限体积法进行求解。使用基于过流能力计算

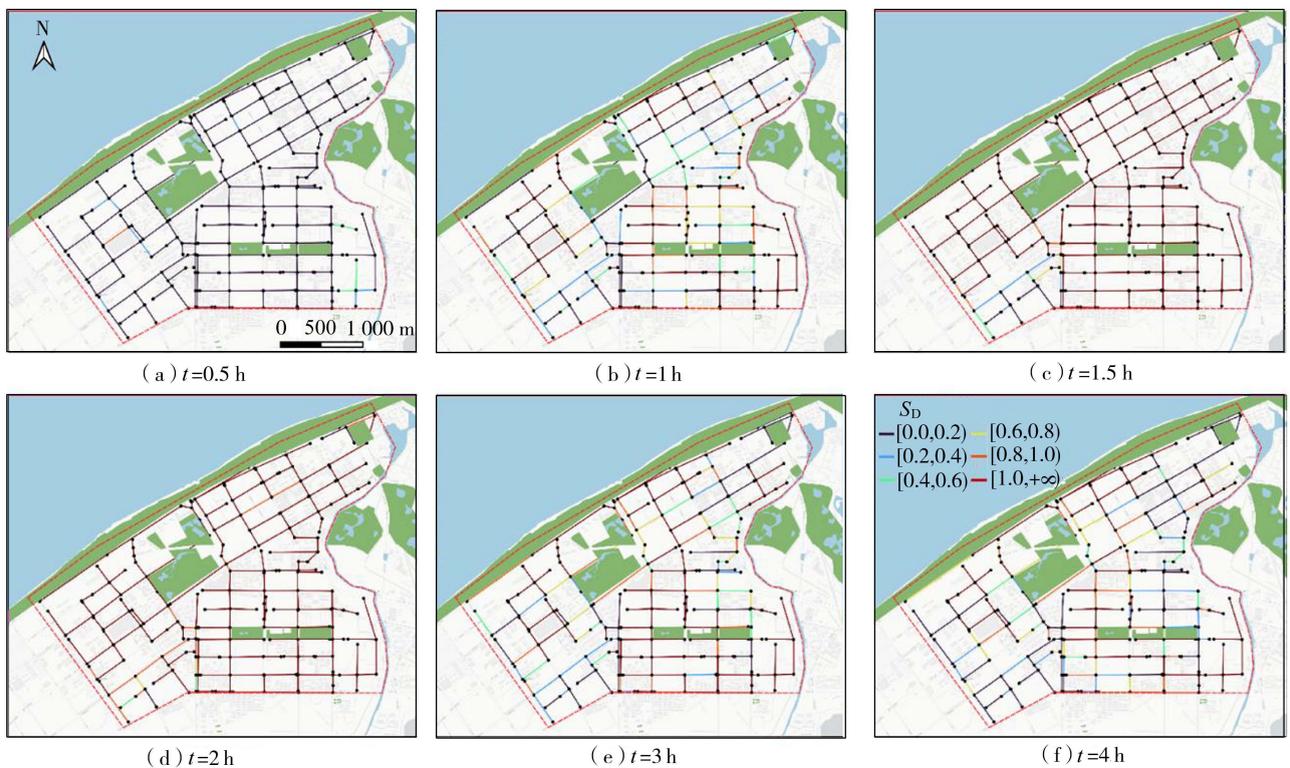


图 8 100 年一遇降雨条件下不同时刻管道超载程度情况

Fig. 8 Surcharge situation of pipelines at different times under 100 a return period rainfall condition

公式的地表径流与地下管流交互模块,实现地表洪涝过程与地下管网泄流过程的耦合模拟。

**b.** 以武汉市港西排水片区为验证区,基于高精度 DEM、下垫面类型、排水管网等数据构建了港西排水片区城市暴雨洪涝模型。利用武汉市水务局发布的 5 年一遇降雨渍水风险图验证模型的精度,结果表明所建立的模型计算精度较高,模拟的渍水范围和积水水深与降雨渍水风险图相符程度良好,超过 88% 的渍水点积水水深一致。

**c.** 利用 100 年一遇降雨进行模型应用,分析了淹没范围、积水水深等关键致灾要素和管道超载程度的时空变化特征。模拟结果表明,模拟时间为 1 h 时,验证区内渍水严重,中度积水和重度积水的面积分别占验证区面积的 12.52% 和 1.16%,地势较低的道路是渍水最为严重的区域。管道超载情况相较于降雨强度随时间变化的过程存在一定的滞后性,排水管网在模拟时间为 1~2 h 时达到最大超载程度,该时刻超过 80% 的排水管道处于有压流流态。建筑内积水水量占洪涝过程总水量的 5.5%,因此在模拟建筑密集城区的暴雨洪涝灾害时需要考虑建筑的受淹过程。

#### 参考文献:

[1] 徐宗学,叶陈雷. 城市暴雨洪涝模拟:原理、模型与展望[J]. 水利学报,2021,52(4):381-392. (XU Zongxue, YE

Chenlei. Simulation of urban flooding/waterlogging processes: principle, models and prospects[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(4): 381-392. (in Chinese))

[2] 马勇,顾正华,王庭辉,等. 基于 SWMM 的山丘城区防洪排涝能力分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021,49(6):499-505. (MA Yong, GU Zhenghua, WANG Tinghui, et al. Analysis of flood control and drainage capacity of hilly city based on SWMM[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(6): 499-505. (in Chinese))

[3] 王小杰,夏军强,董柏良,等. 基于汇水区分级划分的城市洪涝模拟[J]. 水科学进展,2022,33(2):196-207. (WANG Xiaojie, XIA Junqiang, DONG Boliang, et al. Simulation of urban flood using the SWMM with the hierarchical catchment partition method[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(2): 196-207. (in Chinese))

[4] 叶陈雷,徐宗学,雷晓辉,等. 基于 SWMM 和 InfoWorks ICM 的城市街区洪涝模拟与分析[J]. 水资源保护, 2023,39(2):87-94. (YE Chenlei, XU Zongxue, LEI Xiaohui, et al. Flood simulation and risk analysis on urban block scale based on SWMM and InfoWorks ICM[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 87-94. (in Chinese))

[5] 梅超. 城市水文水动力耦合模型及其应用研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院,2019.

[6] 黄国如,陈文杰,喻海军. 城市洪涝水文水动力耦合模

- 型构建与评估[J]. 水科学进展,2021,32(3):334-344. (HUANG Guoru, CHEN Wenjie, YU Haijun. Construction and evaluation of an integrated hydrological and hydrodynamics urban flood model[J]. Advances in Water Science,2021,32(3):334-344. (in Chinese))
- [7] 王兆礼,陈昱宏,赖成光. 基于 TELEMAC-2D 和 SWMM 模型的城市内涝数值模拟[J]. 水资源保护,2022,38(1):117-124. (WANG Zhaoli, CHEN Yuhong, LAI Chengguang. Numerical simulation of urban waterlogging based on TELEMAC-2D and SWMM model[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1):117-124. (in Chinese))
- [8] 夏军强,陈倩,董柏良,等. 雨水口堵塞程度对其泄流能力影响的试验研究[J]. 水科学进展,2020,31(6):843-851. (XIA Junqiang, CHEN Qian, DONG Bailiang, et al. Experimental study on the effect of clogging on the inlet discharge capacity[J]. Advances in Water Science,2020,31(6):843-851. (in Chinese))
- [9] 王船海,郑世威,李小宁,等. 基于太湖流域模型的城市内涝过程高效模拟[J]. 水科学进展,2022,33(3):462-473. (WANG Chuanhai, ZHENG Shiwei, LI Xiaoning, et al. Efficient simulation of urban flood inundation based on Taihu Lake basin model[J]. Advances in Water Science, 2022,33(3):462-473. (in Chinese))
- [10] DJORDJEVIĆ S, PRODANOVIĆ D, MAKSIMOVIĆ Č, et al. SIPSON: simulation of interaction between pipe flow and surface overland flow in networks[J]. Water Science & Technology,2005,52(5):275-283.
- [11] NOH S J, LEE S, AN H, et al. Ensemble urban flood simulation in comparison with laboratory-scale experiments; impact of interaction models for manhole, sewer pipe, and surface flow [J]. Advances in Water Resources,2016,97:25-37.
- [12] FRAGA I, CEA L, PUERTAS J. Validation of a 1D-2D dual drainage model under unsteady part-full and surcharged sewer conditions [J]. Urban Water Journal, 2017,14(1):74-84.
- [13] 耿艳芬. 城市雨洪的水动力耦合模型研究[D]. 大连:大连理工大学,2006.
- [14] NANÍA L S, LEÓN A S, GARCÍA M H. Hydrologic-hydraulic model for simulating dual drainage and flooding in urban areas; application to a catchment in the metropolitan area of Chicago [J]. Journal of Hydrologic Engineering,2015,20(5):04014071.
- [15] 银雅伦,侯精明,李欣怡,等. GAST-SWMM 耦合数值模型在大尺度城区致涝风险评估中的应用[J]. 环境工程,2024,42(4):82-90. (YIN Yalun, HOU Jingming, LI Xinyi, et al. Application of GAST-SWMM coupled numerical model in large-scale urban inundation risk assessment[J]. Environmental Engineering,2024,42(4):82-90. (in Chinese))
- [16] 许仁义,汪凌翔,王远见,等. 浅水方程源项处理的研究进展[J]. 人民黄河,2021,43(7):35-40. (XU Renyi, WANG Lingxiang, WANG Yuanjian, et al. Research progress on source term treatment of shallow water equation [J]. Yellow River, 2021, 43(7):35-40. (in Chinese))
- [17] 侯精明,张兆安,马利平,等. 基于 GPU 加速技术的非结构流域雨洪数值模型[J]. 水科学进展,2021,32(4):567-576. (HOU Jingming, ZHANG Zhaoan, MA Liping, et al. Unstructured numerical model for rainfall-runoff process in watershed based on GPU acceleration technology[J]. Advances in Water Science,2021,32(4):567-576. (in Chinese))
- [18] FERNÁNDEZ-PATO J, CAVIEDES-VOULLÈME D, GARCÍA-NAVARRO P. Rainfall/runoff simulation with 2D full shallow water equations; sensitivity analysis and calibration of infiltration parameters [J]. Journal of Hydrology,2016,536:496-513.
- [19] 张金良,罗秋实,王冰洁,等. 城市极端暴雨洪涝灾害成因及对策研究进展[J]. 水资源保护,2024,40(1):6-15. (ZHANG Jinliang, LUO Qiushi, WANG Bingjie, et al. Research progress on causes and countermeasures for extreme rainstorm-induced urban flood disasters [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(1):6-15. (in Chinese))
- [20] 刘璐,孙健,袁冰,等. 城市暴雨地表积水过程研究:以清华大学校园为例[J]. 水力发电学报,2019,38(8):98-109. (LIU Lu, SUN Jian, YUAN Bing, et al. Surface flooding in urban areas under heavy downpours; case study of Tsinghua University campus [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(8):98-109. (in Chinese))
- [21] HORTON R E. An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity [J]. Soil science Society of America Journal,1941,5(C):399-417.
- [22] 夏军强,王光谦, LIN Binliang, 等. 复杂边界及实际地形上溃坝洪水流动过程模拟[J]. 水科学进展,2010,21(3):289-298. (XIA Junqiang, WANG Guangqian, LIN Binliang, et al. Two-dimensional modelling of dam-break floods over actual terrain with complex geometries using a finite volume method [J]. Advances in Water Science, 2010,21(3):289-298. (in Chinese))
- [23] BENKHALDOUN F,ELMAHI I,SEAID M. Well-balanced finite volume schemes for pollutant transport by shallow water equations on unstructured meshes [J]. Journal of Computational Physics,2007,226(1):180-203.

(下转第 172 页)

440. (WANG Guoqing, JIN Junliang, WANG Jinxing, et al. Study on hydrological characteristics of Liaohe River Basin in response to climate change [J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(4): 433-440. (in Chinese))
- [31] 李秋菊, 李占玲, 王杰. 黑河流域上游径流变化及其归因分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(3): 31-39. (LI Qiuju, LI Zhanling, WANG Jie. Variation and attribution of runoff over the upper reaches of Heihe River Basin [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2019, 17(3): 31-39. (in Chinese))
- [32] 陈慧敏, 赵宇, 付晓, 等. 西辽河上游生境质量时空演变特征与影响机制[J]. *生态学报*, 2023, 43(3): 948-961. (CHEN Huimin, ZHAO Yu, FU Xiao, et al. Characteristics of spatio-temporal evolution and influence mechanism of habitat quality in the upper reaches of the West Liaohe River [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(3): 948-961. (in Chinese))
- [33] 王志春, 张治楠, 辛岩, 等. 近 35 年来老哈河流域湿地关键区景观格局演变及其驱动力[J]. *干旱区资源与环境*, 2021, 35(11): 143-148. (WANG Zhichun, ZHANG Zhinan, XIN Yan, et al. Landscape pattern evolution of wetland critical areas in Laoha River Basin and driving forces in recent 35 years [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021, 35(11): 143-148. (in Chinese))
- [34] 谢平, 刘媛, 杨桂莲, 等. 乌力吉木仁河三级区水资源变异及归因分析[J]. *水文*, 2012, 32(2): 39-43. (XIE Ping, LIU Yuan, YANG Guilian, et al. Attribution analysis of water resources alteration in the Third Grade Wulijimurenhe [J]. *Journal of China Hydrology*, 2012, 32(2): 39-43. (in Chinese))
- [35] 王卫光, 邹佳成, 邓超. 赣江流域多种数据同化方案的径流模拟比较[J]. *湖泊科学*, 2023, 35(3): 1047-1056. (WANG Weiguang, ZOU Jiacheng, DENG Chao. Comparison of data assimilation based approach for daily streamflow simulation under multiple scenarios in Ganjiang River Basin [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(3): 1047-1056. (in Chinese))
- [36] 李秀军. 赤峰市水土保持在抗灾防灾中的效果[J]. *海峡科技与产业*, 2018(3): 47-48. (LI Xiujun. The effectiveness of soil and water conservation in disaster resistance and prevention in Chifeng City [J]. *Technology and Industry Across the Straits*, 2018(3): 47-48. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-01-22 编辑: 施业)

(上接第 103 页)

- [24] 魏红艳, 梁艳洁, 陈萌, 等. 基于 Roe 格式的不规则地形上浅水模拟[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2019, 52(1): 7-12. (WEI Hongyan, LIANG Yanjie, CHEN Meng, et al. Simulation of shallow water on irregular topographies based on approximate Riemann solver of Roe [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2019, 52(1): 7-12. (in Chinese))
- [25] XIA Xilin, LIANG Qihua, MING Xiaodong, et al. An efficient and stable hydrodynamic model with novel source term discretization schemes for overland flow and flood simulations [J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(5): 3730-3759.
- [26] GUO J C Y, MACKENZIE K A, MOMMANDI A. Design of street sump inlet [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 135(11): 1000-1004.
- [27] VASCONCELOS J G, WRIGHT S J, ROE P L. Improved simulation of flow regime transition in sewers: two-component pressure approach [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 132(6): 553-562.
- [28] 张大伟, 向立云, 姜晓明, 等. 基于 Godunov 格式的排水管网水流数值模拟[J]. *水科学进展*, 2021, 32(6): 911-921. (ZHANG Dawei, XIANG Liyun, JIANG Xiaoming, et al. Numerical simulation of drainage network flows based on Godunov scheme [J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(6): 911-921. (in Chinese))
- [29] SANDERS B F, BRADFORD S F. Network implementation of the two-component pressure approach for transient flow in storm sewers [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 137(2): 158-172.
- [30] LEÓN A S, LIU X F, GHIDAoui M S, et al. Junction and drop-shaft boundary conditions for modeling free-surface, pressurized, and mixed free-surface pressurized transient flows [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 136(10): 705-715.
- [31] DONG Boliang, XIA Junqiang, LI Qijie, et al. Risk assessment for people and vehicles in an extreme urban flood: case study of the "7 · 20" flood event in Zhengzhou, China [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2022, 80: 103205.
- [32] SCHUBERT J E, SANDERS B F. Building treatments for urban flood inundation models and implications for predictive skill and modeling efficiency [J]. *Advances in Water Resources*, 2012, 41: 49-64.
- [33] LEE S, NAKAGAWA H, KAWAIKE K, et al. Urban inundation simulation considering road network and building configurations [J]. *Journal of Flood Risk Management*, 2016, 9(3): 224-233.
- [34] MIGNOT E, LI X F, DEWALS B J. Experimental modelling of urban flooding: a review [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 568: 334-342.

(收稿日期: 2024-03-02 编辑: 王芳)