

文章编号:0559-9350(2017)05-0526-09

城市洪涝仿真模型地下排水计算方法的改进

张念强^{1, 2, 3}, 李娜^{1, 3}, 甘泓¹, 王静^{1, 3}

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 河海大学, 江苏 南京 210098;

3. 水利部 防洪抗旱减灾研究中心, 北京 100038)

摘要: 为了增强对城市地下排水的模拟能力, 获取更为详细的计算结果信息, 提高城市洪涝分析水平, 对现有洪涝仿真模型的地下排水计算进行了改进, 提出在同一模型中对排水管网采用简化和细化相结合的计算方式。简化计算采用等效体积法实现, 细化计算采用建立真实管网的一维动力波方程实现, 并在特殊道路通道和网格上实现地上、地下水流交换。同时, 在降雨产流计算中考虑地面透水性, 形成了面向城市降雨产、汇流和排水的洪涝全过程模拟模型。改进后的模型对地下排水的模拟适用性更强, 计算结果更为丰富, 提高了区间暴雨导致的城市洪涝模拟能力。文中以上海市蕴南控制片洪涝分析计算为例, 说明改进模型可获得较好的应用效果。

关键词: 城市洪水; 洪水模型; 管网; 排水系统; 洪涝模拟;

中图分类号: TV877; S276

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20160463

1 研究背景

随着城市的扩张与立体化发展, 城市下垫面因人工改造发生了显著变化, 不透水地面增多, 导致降雨产流量增大, 汇流加快, 低洼点更易积涝成灾。另外, 受全球气候温暖化与城市“热岛效应”和“雨岛效应”影响, 极端暴雨天气发生得更为频繁, 区域洪水导致的积水内涝已经成为城市洪涝的新形式^[1]。城市洪涝特点的这种变化, 使城市排水系统的作用更为凸显。在城市洪涝仿真模型中开展排水系统的精细化模拟, 能够更为真实地反映区域洪涝情况, 对于提高模型的模拟精度具有重要帮助。

当前针对城市洪涝分析模型中, 已有较多成果围绕地下排水开展研究, 但针对地下排水处理及与地表连接的方式不同, 主要分为两种: (1) 建立地下排水管网的概念性模型, 并与地表洪水模型建立整体连接。如 Krzhizhanovskaya 等^[2]将地面假设为多孔透水性介质, 基于达西定律建立下渗模型模拟地下排水系统, 并与地表二维模型耦合, 实现了对洪水的快速评估。张念强等^[3-4]利用等效体积法模拟地下排水系统, 并耦合降雨下渗和地表二维模型, 分析了蚌埠市洪水风险。采用概化的方式模拟地下排水管网能够整体上反映城市的排水能力, 对资料的需求不高, 但不能详细反映各区域的排水差异性, 也不能提供排水系统的详细模拟结果数据; (2) 建立排水管网的一维模型, 并在出、入水口与地表洪水模拟模型建立连接, 这种方式与简化计算相比对管网资料的需求较高, 计算更为复杂。为此, 部分研究对建立的管网一维模型或地表洪水模型做了简化, 如 Ole Mark 等^[5]建立了地下管道和街道的一维模型, 以及二者的水量交换关系, 并将模拟的街道水深与 DEM 叠加分析城市积水; Schmitt 等^[6]建立地下管网一维模型, 并在三角网格上耦合简化的地表二维模型; 岑国平^[7]利用扩散波方式, 徐向阳^[8]、周玉文等^[9]利用运动波方式计算管网汇流, 并耦合非物理机制的地表汇流模型。对模型的简化降低了计算复杂度, 提高了计算速度, 但对管网的部分流态不能模拟, 或者不能提供详

收稿日期: 2016-05-03; 网络出版日期: 2017-05-16

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20170516.1057.003.html>

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目(1261430110037); 中国水利水电科学研究院基本科研业务费专项项目(J20145B04217)

作者简介: 张念强(1980-), 男, 山东日照人, 高级工程师, 博士生, 主要从事防洪减灾研究。E-mail: zhangnq@iwhr.com

细的洪涝发展过程数据。除对模型简化外，程晓陶等^[10-15]按排水分区将相关网格内的管道概化为等效管网的一维模型，并在不规则多边形网格上耦合降雨、地表二维模型建立城市洪涝仿真模型，这种方式能够反映网格间排水能力的影响与差异，但与实际情况仍有区别。另外，也有研究建立真实管网的动力波模型，如耿艳芬^[16]基于圣维南方程和 Preissmann 窄缝法建立了河道和管网的一维模型，将雨水口或人工口设置在四边形网格上，与地表二维模型耦合；又如 SWMM^[17]、MIKE Urban^[18]等商业软件也能够对管网进行较好的模拟，但 SWMM 对地表采取了水文汇流的计算方式，MIKE Urban 地下排水与地表计算不同步，采取先计算管网排水，得出暴雨积水分布情况，再开展地表洪水演进计算^[19]。

综上所述，当前针对城市洪涝分析模型的地下排水计算中，采用简化方式时，无法给出排水系统的详细计算结果，也不能模拟实际管道内的流态；建立真实管网的水动力学模型时，对管网资料要求高，但模拟效果更好，结果更为丰富。程晓陶等^[10-15]研发的城市洪涝仿真模型已在多个城市应用，模型对城市道路和河道模拟单独处理，能够较好地反映城市洪水特性，本文以此模型为基础对地下排水系统的模拟方法等进行改进，以建立降雨产流、地表汇流和地下排水同步计算的城市洪涝综合分析模型。

2 模型原理

2.1 结构与方法 根据城市洪涝形成过程的模拟需求，本文对模型的改进仍按照降雨产流、地表洪水演进和地下排水 3 个模块组织建模，各模块的关系与模拟流程如图 1 所示。考虑区域暴雨和过境洪水两种洪水源，发生降雨后，利用产流模块计算净雨量，利用地面洪水演进模块计算净雨的汇流和行洪过程，地表洪水通过进水口、排水井等与地下排水系统交换，利用地下排水计算模块，模拟洪水在排水系统内的演进及转移，最终排至内河或直接排至外河水系。利用地面洪水演进模型模拟洪水在内、外河水系的演进，当河道洪水不能及时排出时，经漫溢或溃决造成地表淹没。

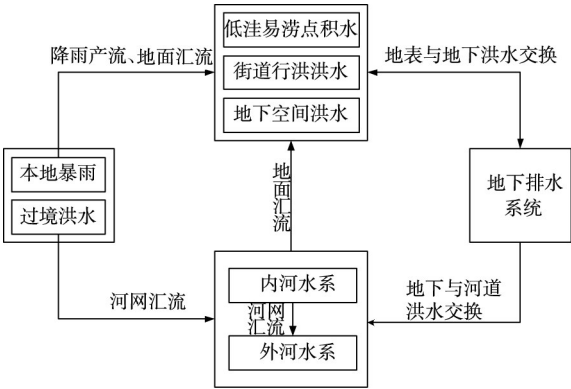


图 1 模型结构与模拟流程示意

2.2 降雨产流模块 降雨产流模块用于模拟降雨形成净雨的过程。国内外针对降雨产流已有多种成熟模型，并被应用于城市洪涝模拟中，如 SWMM 软件中集成了 SCS 模型、HORTON 模型、改进的 HORTON 模型和 Green-Ampt 模型等，国内如岑国平^[7]、徐向阳^[8]和周玉文^[9]等采用了 HORTON 模型，程晓陶等^[11-14]采用了径流系数法，张念强等^[3-4]采用了 SCS 模型。本文对模型的改进仍选用 SCS 模型，但建模时根据土地利用类型将城市地面按不透水地面(如屋面、沥青、不透水路面)和透水地面分别模拟，不透水地面只扣除其填注量，透水地面则按照 SCS 模型计算产流量。

2.3 地表洪水演进模块 针对城市地表洪水，除需模拟普通地面净雨等汇流或洪水造成的淹没外，一般还需模拟道路积水行洪和洪水在河网中的演进过程。当前针对城市的洪水演进模拟多采用二维洪水演进方式，将模拟区域沿河道、道路等剖分成网格，由于大部分道路和河道的宽度较小，常在

几十米甚至十米以内，欲达到较好的模拟效果，需要采用较小的网格尺寸^[20-21]，但随着网格尺寸的减小，网格数量大大增加，对计算方式和计算机硬件要求较高，还需要高分辨率的基础数据予以支撑；针对这类问题可通过对重点道路或河道局部加密^[3]解决，但网格剖分较为繁琐，计算时间也受较小网格的影响。当前也有研究采用一、二维耦合的洪水演进模型，如商业软件 MIKE FLOOD 平台等，已被广泛应用，但对道路采取了整体降低高程的方式解决，并未考虑道路高程和宽度变化^[19]；国内耿艳芬^[16]利用建立的排水管网计算模型与二维模型耦合，建立了城市地面雨洪模型，但未针对城市道路单独建模。程晓陶等^[10-15]研发的城市洪涝仿真模型对普通地面和较宽河道采用二维浅水方程计算，对较窄河道和道路提出了特殊河道通道和特殊道路通道的计算方式，本文对地表洪水的建模采用这种方式。

2.4 地下排水模块

2.4.1 排水系统的概化 对地下管网排水进行简化计算的方式对资料需求低，计算简单、速度快。建立实际管网的一维动力波模型能够反映管道流态、进出水口的水量交换等详细结果信息，但对资料需求高，计算复杂、速度慢。为解决数据收集难度和模型计算效率问题，本文采用简化管网和实际管网计算相结合的方式开展地下排水计算。简化管网计算采用等效体积法^[3-4]，将每个排水分区概化为地下水库，按照排水分区的排水能力计算地下水库的蓄水和排水，主要面向资料不全或重要程度稍低的区域；实际管网计算采用建立一维管道和附属设施动力波方程的方式，主要面向资料齐全的城市中心等重点区域。假设排水系统由结点、管道、地下水库、排涝泵站和蓄水池等组件构成。结点为排水系统的出、入水口和管道的连接点，通过结点实现管道之间、地表和地下管网之间的水流交换。管道用于实现水流的传输转移，蓄水池和排涝泵站用于实现排水系统的“强排”调度。地下水库用于按等效体积法计算的区域。系统概化如图2所示。

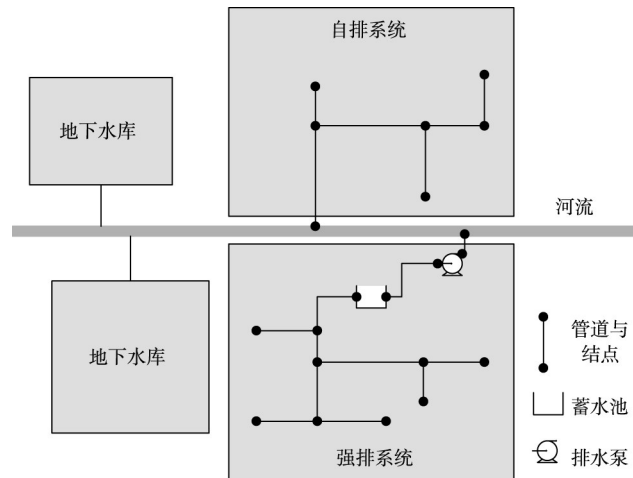


图2 地下排水系统概化示意

2.4.2 计算原理 等效体积法^[3-4]的计算方式采用前期研究，不再赘述。对于实际管网，需要建立管道和结点的控制方程。由于管道中的水流状态复杂，选用动力波方式计算：

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f + gAh_L = 0 \quad (2)$$

式中： A 为管道断面面积， m^2 ； Q 为管道流量， m^3/s ； x 为沿管道距离， m ； H 为管道中的水头， m ； S_f 为摩阻坡降； h_L 为管道局部损失项。

针对结点，建立附加控制方程，按照结点水位是否发生超载采用两种形式，未发生超载时，利用式(3)计算^[17]，发生超载时，利用式(4)计算^[17]。

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\sum Q}{A_{\text{store}} + \sum A_s} \quad (3)$$

$$\sum \left[Q + \frac{\partial Q}{\partial H} \Delta H \right] = 0 \quad (4)$$

式中： H 为结点水头，m； A_{store} 为结点的水流表面积， m^2 ； A_s 为结点所连接管道对结点贡献的水流表面积， m^2 。

2.4.3 地表与地下水流交换 地表与地下排水系统通过雨篦子、检查井等入水口进行水流交换。当前计算方式有宽顶堰方程^[5,16,18]、孔口方程^[18]和指数方程^[18]等，其他如SWMM软件通过比较结点所连接管道的排水能力和结点的入流量确定^[17]。本文选用宽顶堰方程计算，见下式：

$$Q = m\sigma A \sqrt{2gh} \quad (5)$$

式中： Q 为交换流量， m^3/s ； m 为流量系数； σ 为淹没系数； h 为交换位置与节点的水位差。

针对地表与地下模型的耦合位置，Mark等^[5]和耿艳芳^[16]将入水口布置在三角或矩形网格上，通过比较管道节点与网格上的水位大小，按交换关系计算。城市排水管道一般沿道路布置，排水结点位于道路上；住宅小区虽布置有管道，但多为排水支管，建模时常因资料不全或网格尺寸较大而被概化。因此本次建模时将入水口优先布置在特殊道路通道上，当道路未被概化为特殊道路通道时，则布置在网格上。

2.5 方程离散 地表洪水演进模块采用前期研究^[10-15]的离散方式，选用非结构不规则网格，在网格形心计算水深，在网格通道(边)上计算流量。

连续方程在任一网格上显式离散为：

$$H_i^{T+\Delta T} = H_i^T + \frac{\Delta T}{A_i} \sum_{j=1}^n Q_{ij}^{T+\frac{\Delta T}{2}} L_{ij} + \Delta T q_i^{T+\Delta T} \quad (6)$$

式中： H_i 、 A_i 分别为*i*网格的水深和面积，m、 m^2 ； T 为当前计算时刻，s； ΔT 为时间步长，s； Q_{ij} 为*i*网格*j*通道(边)的单宽流量， m^2/s ； n 为*i*网格的通道数； L_{ij} 为*i*网格*j*通道的长度，m； $q_i^{T+\Delta T}$ 为源汇项， m^3/s 。

$$q_i^{T+\Delta T} = q_{i,\text{rain}} + \frac{\sum Q_{\text{drain}}}{A_i} \quad (7)$$

式中： $q_{i,\text{rain}}$ 为*i*网格的降雨产流， m^3/s ，由降雨产流模块计算； $\sum Q_{\text{drain}}$ 为网格与排水系统入水口的交换流量， m^3/s ，由地下排水模块计算。

动量方程按照一般通道和阻水型通道考虑。一般通道指普通陆面通道和剖分为二维网格的河道通道，忽略对流项，只保留局地加速度项、重力项和阻力项，离散为：

$$Q_j^{T+\frac{\Delta T}{2}} = Q_j^{T-\frac{\Delta T}{2}} - \Delta T g H_j^T \frac{Z_{j2}^T - Z_{j1}^T}{\Delta L_j} - \Delta T g \frac{n^2 Q_j^{T+\frac{\Delta T}{2}} \left| Q_j^{T-\frac{\Delta T}{2}} \right|}{(H_j^T)^{\frac{7}{3}}} \quad (8)$$

式中： Q_j 为*j*通道的单宽流量， m^2/s ； Z_{j1} 、 Z_{j2} 为*j*通道两侧网格的水位，m； H_j 为*j*通道的平均水深，m； ΔL_j 为空间步长，m。

对于阻水型通道，如铁路、堤防等，采用堰流公式，即：

$$Q_j^{T+\frac{\Delta T}{2}} = m\sigma \sqrt{2g} H_j^{\frac{3}{2}} \quad (9)$$

式中： m 为流量系数； σ 为淹没系数。

对于特殊河道和道路通道，需要计算洪水沿特殊通道方向的流动，以及特殊通道与两侧网格的水流交换，连续方程离散形式为：

$$H_{dk}^{T+\Delta T} = H_{dk}^T + \frac{\Delta T}{A_{dk}} \left(\sum_j^n Q_{kj}^{T+\frac{\Delta T}{2}} b_{kj} + \sum_j^{2n} Q_{kj}^{T+\frac{\Delta T}{2}} L_{kj}/2 \right) + \Delta T q_{dk}^{T+\Delta T} \quad (10)$$

式中： H_{dk} 、 A_{dk} 分别为特殊通道计算单元的平均水深和面积，m， m^2 ； $\sum_j^n Q_{k_j}^{T+\frac{\Delta T}{2}} b_{k_j}$ 为与特殊通道结点 k 相连的 n 条特殊通道沿通道方向的流量之和， m^3/s ； $\sum_j^{2n} Q_{k_j}^{T+\frac{\Delta T}{2}} L_{k_j}/2$ 为与特殊通道结点 k 相连的 n 条特殊通道与两侧网格的流量之和， m^3/s ； $q_{dk}^{T+\Delta T}$ 为特殊通道计算单元的源汇项，m； b_{k_j} 、 L_{k_j} 分别为特殊通道 j 的宽度和长度，m。

对于特殊通道计算单元，源汇项计算采用下式：

$$q_{dk}^{T+\Delta T} = q_{dk_rain} + \frac{\sum Q_{drain}}{A_{dk}} \quad (11)$$

式中： q_{dk_rain} 为特殊通道计算单元的产流， m^3/s ，由降雨产流模块计算； $\sum Q_{drain}$ 为特殊通道计算单元与排水系统入水口的交换流量， m^3/s ，由地下排水模块计算。

按等效体积法计算排水时，各单元(网格和特殊通道)的计算公式^[3]为：

$$Q_{drain_j} = K_{region_i} A_j \frac{Q_{region_i}}{A_{region_i}} \quad (12)$$

式中： Q_{drain_j} 为 i 排水分区 j 单元的排水能力， m^3/s ； A_j 为 j 单元的面积， m^2 ； Q_{region_i} 为 i 排水分区的排水能力， m^3/s ； A_{region_i} 为 i 排水分区的面积， m^2 ； K_{region_i} 为 i 排水分区的排涝系数。

按实际管网计算排水时，针对管道采用显式有限差分格式，省略局部损失项，将连续方程和动量方程离散后，管道的流量计算公式为：

$$Q_i^{T+\Delta T} = \frac{\left(Q_i^T - g \bar{A} \Delta H \Delta T / L_i + 2 \bar{V}_i \Delta A_i + (\bar{V}_i^2 (A_2 - A_1) \Delta T) / L_i \right)}{1 + \frac{g n^2 |\bar{V}_i| \Delta T}{\bar{R}_i^{1.3333}}} \quad (13)$$

式中： Q_i^T 为 i 管道在 T 时刻的流量， m^3/s ； ΔT 为时间步长，s； $\bar{A}$ 为 i 管道水流的平均横断面面积， m^2 ； $\bar{V}_i$ 为 i 管道水流的平均流速， m^3/s ； L_i 为 i 管道的长度，m； $\bar{R}_i$ 为 i 管道的平均水力半径，m； A_1 和 A_2 分别为 i 管道上下游结点的横断面面积， m^2 。

针对管道结点，当结点水位未超载时，利用式(3)计算，离散形式为：

$$H_i^{T+\Delta T} = H_i^T + \left((\sum Q)_T + (\sum Q)_{T+\Delta T} \right) \Delta T / \left(2(A_{store} + \sum A_s)_{T+\Delta T} \right) \quad (14)$$

当结点水位超载时，利用式(4)计算，离散形式为：

$$H_i^{T+\Delta T} = H_i^T - \frac{(\sum Q)_{T+\Delta T}}{\sum \left[g \bar{A}_{i_j} \Delta T / \left(L_{i_j} \left(1 + \frac{g n^2 |\bar{V}_{i_j}| \Delta T}{\bar{R}_{i_j}^{1.3333}} \right) \right) \right]} \quad (15)$$

式中： H_i^T 为 i 结点在 T 时刻的水头，m； $(\sum Q)_T$ 为 i 结点在 T 时刻的入流或出流之和， m^3/s ； i_j 表示 i 结点所连接的 j 管道。

3 应用实例

3.1 建立模型 以上海市蕴南水利控制片(蕴南片)为例，蕴南片位于蕴藻浜以南，苏州河以北，桃浦河以东，黄浦江以西，是由外围堤防组成的封闭圈，通过闸、泵控制实现与片外河道水流的双向交换。蕴南片涉及宝山、普陀、闸北、虹口和杨浦区，为上海高度城市化区域，总面积约为173 km²，

位置见图3。

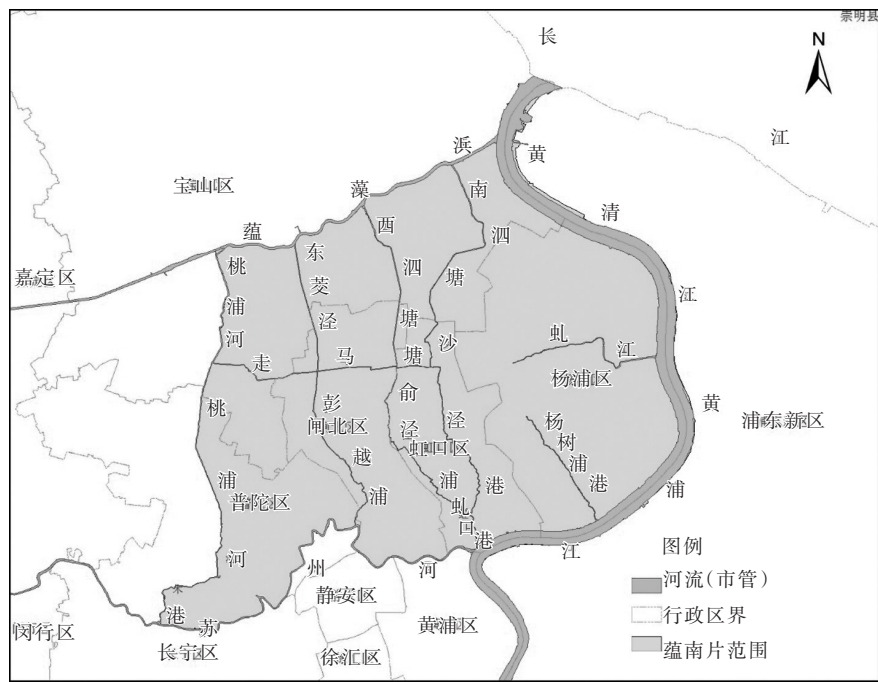


图3 蕴南片位置

黄浦江对蕴南片防洪排涝具有重要影响，因此将其纳入建模范围。以阻水道路、铁路、堤防等为内部边界控制剖分网格，总计20 856个。将黄浦江剖分为二维网格，其他河流按特殊河道通道处理，总计1 351条。将一、二、三级道路按特殊道路通道处理，总计6 202条。

蕴南片共有70个排水分区，在模型中设置为70个排水子系统，不模拟排水分区未覆盖区域的排水。对于管道、结点等信息不足的排水分区按等效体积法计算，其他排水分区按实际管网计算，并设为强排系统。研究区内有20个水闸和108个泵站，按照《上海市水利控制片水资源调度实施细则》，在模型中设置控制规则，模拟工程调度，见图4。

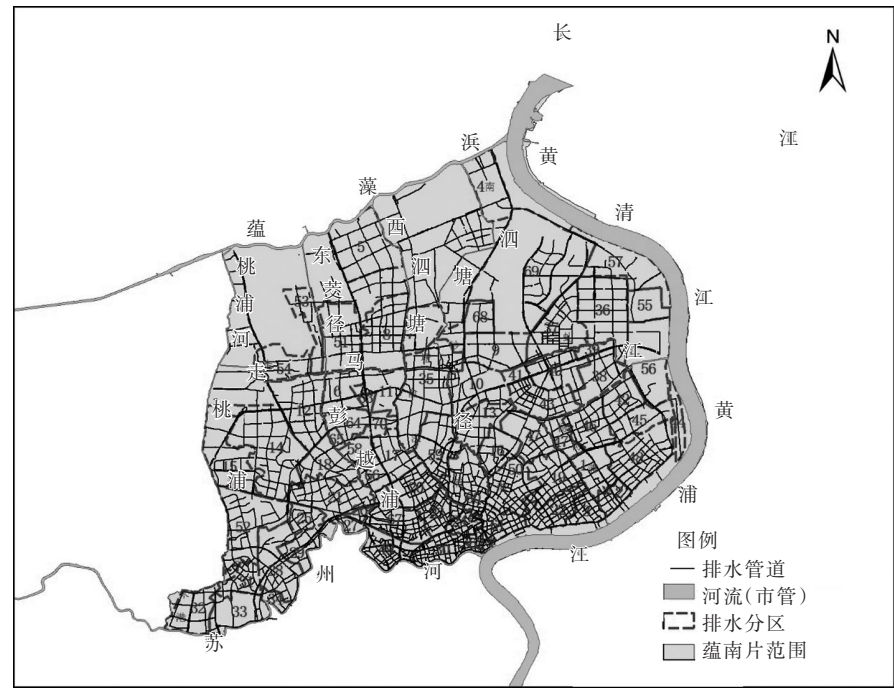
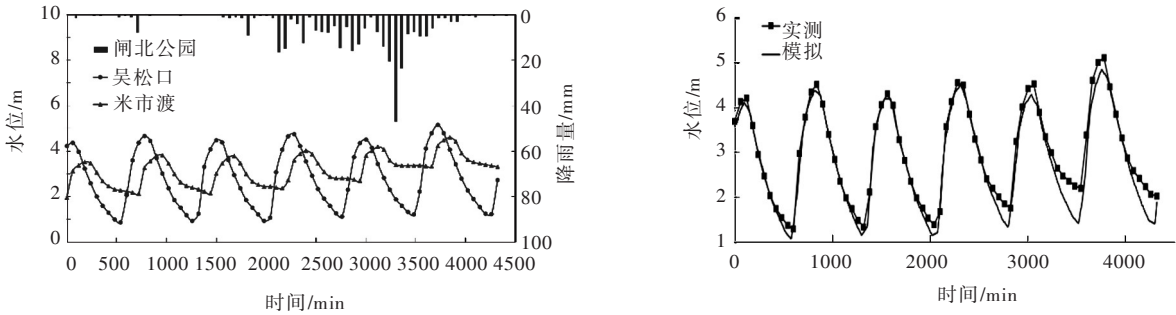


图4 排水分区与管道示意

选择2013年10月发生的“菲特”台风暴雨对模型测试，模拟时段为降雨较集中的6~9日3天。模型的边界条件包括降雨和河流边界。降雨通过区域内及周边30个雨量站设置，输入实测降雨过程。河流边界设置为潮(水)位过程，选择的站点包括：黄浦江上游米市渡站，下游吴淞口站，蕴藻浜蕴东闸(内)站，苏州河曹家渡站。黄浦江初始水位根据潮(水)位站点的实测值确定，特殊河道通道水位取非汛期河道控制水位。

3.2 结果分析 黄浦江、蕴藻浜、苏州河为蕴南片的排洪(涝)片外河道，按照上海市防洪排涝工程调度规则，3条河流的水位直接影响了蕴南片的防洪排涝工程控制，开展模拟时需要重点率定。不考虑蕴藻片外其他河流的汇流时，3条河流的水位模拟效果可由黄浦江反映。以黄浦公园站为验证站，对比实测与模拟水位过程，二者较为一致，如图5所示，模拟最高水位为5.12 m，实测最高潮水位4.94 m，误差仅为0.18 m。



(a)典型站点实测潮(水)位和降雨过程 (b)黄浦公园站模拟和实测水位过程

图5 “菲特”台风期间典型站点潮(水)位和降雨过程

“菲特”台风暴雨期间蕴南片有多处道路出现积水，将实测的34处积水点淹没最大水深与模拟结果对比，15处绝对误差在0.10 m以下，占总积水道路的44%，28处绝对误差在0.20 m以下，占积水道路对比总数的82%，见表1。误差的原因主要为模型对地形的概化与实际不完全一致，网格、道路

表1 “菲特”台风期间的道路积水实测与模拟值对比

序号	路名	实测最大水深	模拟最大水深	绝对误差	序号	路名	实测最大水深	模拟最大水深	绝对误差
1	阳曲路	15	31.2	16.2	18	延长西路	25	12.5	-12.5
2	阳泉路	15	12.4	-2.6	19	黄陵路	25	31.5	6.5
3	国权北路	15	0	-15	20	中山北路	25	9	-16
4	百联购物中心 南门	15	2.7	-12.3	21	杨树浦路	30	19.8	-10.2
5	哈尔滨路	50	20.7	-29.3	22	隆昌路	25	20.7	-4.3
6	东长治路	18	40.7	22.7	23	平凉路	35	15.2	-19.8
7	舟山路	15	35.8	20.8	24	临青路	45	21.3	-23.7
8	东大名路	15	12.6	-2.4	25	中山北二路	15	13.6	-1.4
9	骊山路	25	20.7	-4.3	26	周家嘴路	20	12.1	-7.9
10	甘泉路	25	19	-6	27	长阳路	15	27.8	12.8
11	子长路	25	30.1	5.1	28	双阳北路	15	40.3	25.3
12	华阴路	25	16.8	-8.2	29	杨树浦路	25	14.6	-10.4
13	西乡路	25	12.6	-12.4	30	平凉路	15	4.2	-10.8
14	宜川路	25	13.2	-11.8	31	嫩江路	35	42.2	7.2
15	平利路	25	32.5	7.5	32	军工路	15	20.7	5.7
16	曹杨路	25	74.9	49.9	33	场中路	20	23.8	3.8
17	武威东路	30	16.2	-13.8	34	海宁路	20	45.8	25.8

高程存在误差,如哈尔滨路,采用沿道路高程点的均值作为特殊通道高程,模型中高程偏高;闸、泵等工程调度及管网排水与实际存在偏差,如曹杨路,位于铜川西排水系统,根据《上海市防汛能力调查与评估——城市镇排水系统防汛能力调查评估研究报告》,建模时按“不完善”系统处理,采用的排水能力偏低。

针对地下排水系统,以对道路和管网概化较好的惠民排水系统为例,对比任意选择的管道结点水深过程,如图6所示,地表形成径流并与地下交换后,结点出现水流,水深过程与降雨过程基本保持一致,能够反映降雨强度的变化,其中结点2在降雨后期水深基本恒定,说明结点所在道路出现淹没。鉴于地上、地下整体模拟效果已由地面积水模拟对比确定,认为地下排水模拟有效可信。

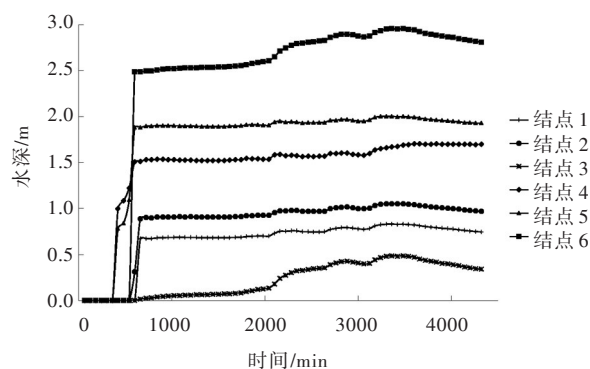


图6 管道结点水深过程

4 结论

本文以城市洪涝仿真模型为基础,主要对城市地下排水计算做了改进,采用了等效体积法和排水管网一维洪水演进模型相结合的方式,同时在降雨产流SCS模型中考虑了地面透水性的区别,并利用改进后的模型模拟了上海市蕴南片在台风暴雨、高潮位和上游洪水综合影响下的洪涝情况,经与实测数据对比分析,模型对黄浦江等河道洪水、地面积水的模拟效果较好,能够模拟出管网的排水情况,具有较好的实用性。改进后的模型具有以下特点:(1)可以对城市外洪、区间暴雨、暴雨等多洪水源及其组合影响下的洪涝情况进行模拟,实现了洪涝形成各过程的同步计算,便于分析降雨产流、汇流和地下排水等过程的相互影响;(2)改进后的地下排水计算模式缓解了因局部资料收集不全而难以开展地下排水详细模拟的问题,以及大范围开展管网详细模拟而造成的计算时间消耗过大或效率降低等问题;优先将排水管道布置在特殊道路通道上,这种方式更符合实际情况,有利于提高模拟精度;(3)模拟功能更强,结果输出更为详细,符合当前城市洪涝研究需求。如通过耦合SCS降雨产流模型,以不同土地利用类型为输入,能够分析城市化后因地面人工改造对区域产、汇流的影响;基于地下排水模型,除可分析各排水系统的排水效果外,还能够详细模拟参与建模管网的排水过程,检查井等入水口的进水、溢流等情况,以及与地表的水流交换,并输出排水管道和入水口的水位、流量等特征参数。

参 考 文 献:

- [1] 张建云,宋晓猛,王国庆,等.变化环境下城市水文学的发展与挑战——I.城市水文效应[J].水科学进展,2014,25(4):594-605.
- [2] KRZHIZHANOVSKAYA V V, MELNIKOVA N B, CHIRKIN A M, et al. Distributed simulation of city inundation by coupled surface and subsurface porous flow for urban flood decision support system[J]. Procedia Computer Science, 2013, 18: 1046-1056.
- [3] 张念强,马建明,陆吉康,等.基于多类模型耦合的城市洪水风险分析技术研究[J].水利水电技术,2013,44(7):31-35.
- [4] 张念强,马建明,邱沛炯,等.安徽蚌埠市城区洪水风险分析研究[J].中国防汛抗旱,2015,25(4):21-24.
- [5] OLE Mark, SUTAT Weesakul, Surajate Boonya-aroonnet, et al. Potential and limitations of 1D modeling of urban flooding[J]. Journal of Hydrology, 2004, 299: 284-299.
- [6] THEO G Schmitt, MARTIN Thomas, NORMAN Ettrich. Analysis and modeling of flooding in urban drainage sys-

- tems[J]. Journal of Hydrology, 2004, 299: 300–311.
- [7] 岑国平. 城市雨水径流计算模型[J]. 水利学报, 1990(10): 68–75.
- [8] 徐向阳, 平原城市雨洪过程模拟[J]. 水利学报, 1998(8): 34–37.
- [9] 周玉文, 赵洪宾. 城市雨水径流模型研究[J]. 中国给水排水, 1997, 13(4): 4–6.
- [10] 程晓陶, 仇劲卫, 陈喜军, 等. 深圳市洪涝灾害的数值模拟与分析[J]. 自然灾害学报, 1995(S1): 202–209.
- [11] 程晓陶, 仇劲卫, 李娜, 等. 城市洪涝仿真模型开发研究总结报告[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 1997.
- [12] 仇劲卫, 李娜, 程晓陶, 等. 天津市城区暴雨沥涝仿真模拟系统[J]. 水利学报, 2000(11): 34–42.
- [13] 李娜, 仇劲卫, 程晓陶, 等. 天津市城区暴雨沥涝仿真模拟系统的研究[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(2): 112–118.
- [14] CHENG Xiaotao. Urban Flood Prediction and Its Risk Analysis in The Coastal Areas of China[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [15] 王静, 李娜, 程晓陶. 城市洪涝仿真模型的改进与应用[J]. 水利学报, 2010, 41(12): 1393–1400.
- [16] 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.
- [17] LEVIS A. Rossman. Storm water management model quality assurance report: dynamic wave flow routing[M/CD]. United States Environment Protection Agency, 2006.
- [18] Danish Hydraulic Institute (DHI), Mike flood 1D–2D modelling user manual[M/CD]. 2012.
- [19] 李娜, 张念强, 夏军强, 等. 面向不同对象的洪水风险分析技术与开发总报告[R]. 2016.
- [20] CHEN Albert S, BARRY Evans, SLOBODAN Djordjević, et al. Multi-layered coarse grid modelling in 2D urban flood simulations[J]. Journal of Hydrology, 2012, 470–471: 1–11.
- [21] LIANG Qiuhua. A GPU–Accelerated hydrodynamic model for urban flood inundation[C]//Proceedings of 35th IAHR World Congress, 2013.

Improvement of underground drainage computation method for urban flood simulation model

ZHANG Nianqiang^{1, 2, 3}, LI Na^{1, 3}, GAN Hong¹, WANG Jing^{1, 3}

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Research Center on Flood and Drought Disaster Reduction of MWR, Beijing 100038, China)

Abstract: In order to strengthen the simulation capacity of urban underground drainage, acquiring more detailed results and improving analysis level on urban flooding, this paper describes an improved method for underground drainage computation based on the Urban Flood Simulation Model. A sub module combining both simplified and detailed pipe network compute is proposed, which adopts equivalent volume approach and 1D hydrodynamic equation of actual pipe network respectively for computing underground drainage, and the flow exchange position of overland and underground is set at special road passages and grids. For rainfall–runoff, surface water permeability of each land use type is considered in hydrologic module. Through coupling these sub compute modules, the improved model is capable to simulate the whole process of urban flooding, including rainfall–runoff, flowing concentration and drainage, which is more suitable to simulate urban flooding caused by local storms. Yunnan control region in Shanghai Municipality is taken as an example to carry out demonstration research, which shows that a satisfactory simulation effect and more abundant results can be achieved.

Keywords: urban flood; flood model; pipe network; drainage system; flood and waterlogging simulation

(责任编辑: 王成丽)