

基于非结构化网格的地表水流和管网水流双向动态耦合模型开发

陈同庆^{1,2}, 陈家宇^{1,2}, 王明娜^{1,2}, 张庆河^{1,2}

(1. 天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室; 2. 天津大学建筑工程学院)

摘要:针对当前地表水流和管网水流耦合模型多基于结构化网格、难以适配复杂岸线与城区边界的问题,基于开源非结构化网格水动力模型 FVCOM 与管渠水动力模型 SWMM,构建了实时双向动态耦合模型 FVCOM-SWMM。通过与商业软件和物理模型试验结果的对比,验证了该模型的可靠性;具有曲折海岸线和复杂建筑轮廓的海滨城区雨潮遭遇情景的模拟结果表明,该模型可以用于风暴潮影响下具有复杂边界城区的洪涝过程模拟。

关键词:地表水流;管网水流;潮流;非结构化网格;FVCOM;SWMM;动态耦合

Development of a bidirectional dynamic coupled surface water flow and pipe network flow model based on unstructured grids//Chen Tongqing^{1,2}, Chen Jiayu^{1,2}, Wang Mingna^{1,2}, Zhang Qinghe^{1,2} (1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University)

Abstract: To address the issue that current coupled surface water flow and pipe network flow models are mostly based on structured grids, making it difficult to adapt to complex coastlines and urban boundaries, a real-time bidirectional dynamic coupling model, FVCOM-SWMM, was developed based on the open-source unstructured-grid hydrodynamic model FVCOM and the pipe network hydrodynamic model SWMM. The reliability of the proposed model was verified by comparing its results with those from commercial software and physical model experiments. The simulated results of a rain-tide coincident event in a coastal urban area with tortuous coastlines and complex building layouts show that the model can be used to simulate flooding processes in urban areas with complex boundaries under storm surge conditions.

Key words: surface flow; pipe network flow; tidal current; unstructured grids; FVCOM; SWMM; dynamic coupling

在全球气候变化加剧的背景下,城区容易发生内涝灾害,城区内涝的相关研究一直广受关注^[1-4]。城区的排水管网是防洪排涝系统的重要组成部分^[3],在内涝过程中,地表水形成的水流和地下管网中的水流存在显著的交互影响。一方面,地表水流通过检查井等位置进入地下管网从而降低了地表水的局部深度,另一方面,当排水管网承载能力不足时,管网中的水体会从某些检查井向上流出从而影响地表水流。二者的相互作用是防洪减灾分析系统中需体现的重要物理过程^[5]。

除理论分析、模型试验外,数值模拟是研究城区泛洪过程中地表水流与管网水流耦合作用的重要手段^[6]。数值模型中的地表水流与管网水流的耦合作用主要采用离线单向耦合和动态双向耦合两种方式模拟。离线单向耦合通常只考虑管网水流对地表

水流的单向作用,即水流可从检查井处溢流到地表,而不能重新回流到管网^[5-11]。随着数值模拟技术的进步,采用动态双向耦合模型已成为模拟地表水流与管网水流耦合作用的发展趋势^[10]。在动态双向耦合方法中,为了准确模拟出地表水流和管网水流的耦合作用,模型中地表水流和管网水流两模块在计算过程中通过交换相关数据实现双向耦合^[12]。

动态耦合模型所采用的网格可分为规则排列的结构化网格和不规则排列的非结构化网格两类,其中结构化网格模型对街区形状规则、排列整齐的城区具有较好的模拟效果^[11-17]。曾照洋等^[11]将 SWMM(storm water management model)与 LISFLOOD 模型耦合,取得了较好的城区泛洪过程模拟效果。Jamali 等^[14]提出了一种基于元胞自动机方法的快速洪水淹没模型,曾照洋等^[15]耦合了 SWMM 和

WCA2D(water cellular automata 2D)模型,在特定的区域均取得了不错的模拟效果。以往的研究主要采用结构化网格模型,但当建筑物边界排列不规则,城区边界曲折变化时,规则网格较难描述复杂变化的边界。例如,海岸附近的城区由于曲折变化的海岸线,城区边界通常较为复杂。对于地表水流计算边界较复杂的情况,采用非结构化的网格可以较好地刻画边界的变化,因此采用非结构化网格模型对地表水流与管网水流的耦合作用进行模拟更具优势^[1]。

目前基于非结构化网格的地表水流和管网水流耦合模型较少,主要是部分商业软件^[18-20],如 MIKE FLOOD、Info Works ICM、PCSWMM 等,有必要基于开源程序开发基于非结构化网格的地表水流与管网水流的动态耦合模型。为此,本文基于开源海岸与海洋水动力模型 FVCOM(finite-volume coastal ocean model)和水文水动力模型 SWMM,开发了地表水流和管网水流双向动态耦合模型 FVCOM-SWMM,并利用已有资料对模型的合理性进行了验证与分析。

1 耦合模型的建立

1.1 SWMM 管网水动力模型及产汇流模型

管网水动力模型基于 SWMM 开发,SWMM 采用一维圣维南方程构建,控制方程包括连续性方程和动量方程。

采用 SWMM 地表产汇流模块对产汇流进行计算。在实际城区的计算中将区域划分为子汇水区,依其特性单独计算净雨与地表汇流,并假定子汇水区产流量流入特定管网节点。各子汇水区可分为透水、有注蓄量不透水、无注蓄量不透水三部分计算产汇流。

1.2 FVCOM 地表水动力模型

地表水流模型基于 FVCOM 构建。FVCOM 最早由麻省大学陈长胜博士与伍兹霍尔海洋研究所的 Beardsley 博士合作开发,源代码开源至今仍在不断升级中。FVCOM 在近岸水动力与城市内涝方面有较好的应用^[21-22]。FVCOM 采用有限体积法离散求解控制方程,利用 MPI 实现高效的并行计算。在求解时,垂向采用 σ 坐标以实现底部地形的平滑处理。

1.3 动态耦合方法

关于地表水流和管网水流交换过程的计算,目前已有多种交换计算方法^[1,23],如常用的检查井简化法、雨水口法、雨水口-检查井法。检查井简化法^[23]不用考虑雨水口的具体位置、数量以及水流在雨水口的详细流动过程,通过检查井将地表水流和管网水流联系起来,大大降低了计算的复杂性^[23]。相比于其他方法,检查井简化法不需要详细的雨水口尺寸、形状、连接方式等数据,只关注检查井之间

的管道连接和基本参数(如管径、管长、坡度等)。本文采用检查井简化法表征地表水流和管网水流的交换过程,耦合物理过程如图 1 所示。管网内水头较小时,地表水流从检查井处流入管网,管网内水头较大时,水流从检查井流出汇入地表水流。首先需对 FVCOM 和 SWMM 两个模型的控制方程进行修改。为考虑地下管网对地表水流的影响,需在 FVCOM 连续性方程中增加质量源项,连续性方程改为如下形式:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}H)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v}H)}{\partial y} = Q_{sur} \delta_{sur} \quad (1)$$

式中: \bar{u} 、 \bar{v} 分别为 x 、 y 方向的垂向平均速度分量; η 为水位; H 为考虑水位变化的总水深; t 为时间; Q_{sur} 为从地下管网检查井节点溢流的流量; δ_{sur} 为狄利克雷函数,节点溢流状态下取值为 1,泄流状态下取值为-1,既不溢流也不泄流状态下取值为 0。

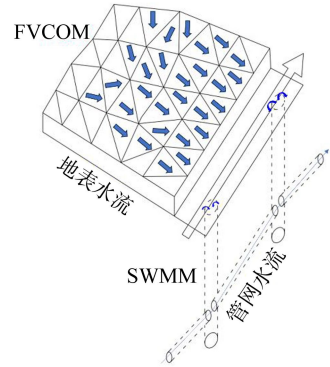


图 1 FVCOM 和 SWMM 耦合物理过程

为体现管网水流与地表水流的流量交换,SWMM 中节点处的流量守恒方程改写为:

$$A_j \frac{\partial \eta_j}{\partial t} = \sum_k Q_{pk} + Q_1 - \delta_{sur} Q_{sur} \quad (2)$$

式中: A_j 为检查井节点 j 的截面面积; η_j 为检查井节点 j 的当前水位; Q_{pk} 为连接该检查井节点的第 k 条管渠入流的流量; Q_1 为外部自定义添加的入流量。

对于地表水流与管网水流的交换流量,目前相关研究主要采用堰流或孔口出流公式进行计算。根据 Shi 等^[1]的计算方法,对于检查井处的交换流量,通过比较管网检查井位置处的水头和该检查井处地表水流的水头进行计算:

$$Q_{exc} = c_0 A_c \sqrt{2g |H_1 - H_2|} \quad (3)$$

其中 $H_1 = D_1 + Z$ $H_2 = D_2$
式中: Q_{exc} 为检查井处的交换流量; c_0 为流量系数; A_c 为检查井有效过流面积; H_1 、 H_2 分别为网格单元平均水头和检查井节点水头; D_1 、 D_2 分别为地表水深和检查井内水深; Z 为地表高程。

在程序实现上,将经过改写的 FVCOM 作为主

程序,将 SWMM 作为子程序供主程序调用,形成耦合模型 FVCOM-SWMM。在需要耦合的时间步,两个模型交换数据实现动态实时耦合。FVCOM 将计算得到的流量 Q_{exc} 传递给 SWMM,SWMM 将当前时间步长的检查井节点水头 H_2 传递给 FVCOM,如图 2 所示(图中 T_{C_n} 代表第 n 个耦合时间步, Δt_s 为 SWMM 计算时间步长, Δt_f 为 FVCOM 计算时间步长)。因为 SWMM 的管网水动力计算时间步长一般均大于 FVCOM 的地表水动力计算时间步长,所以可选取二者计算时间步长的公倍数作为耦合时间间隔。

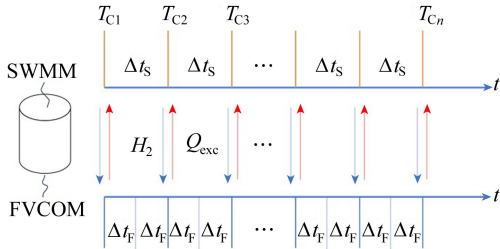


图 2 FVCOM 和 SWMM 耦合中的数据交互

根据地表水流与管网水流的不同状态,将地表水流与管网水流交互的状态分为如图 3 所示的 6 种,水流交互状态如下:①当 $D_1 > 0$ 时,若 $H_2 > Z$ 且 $H_2 > Z + D_1$,则交互状态为检查井出流;若 $H_2 > Z$ 且 $H_2 = Z + D_1$,则交互状态为既不入流也不出流;若 $H_2 > Z$ 且 $H_2 < Z + D_1$,则交互状态为检查井入流;若 $H_2 \leq Z$,则交互状态为检查井入流。②当 $D_1 = 0$ 时,若 $H_2 \leq Z$,则交互状态为既不入流也不出流;若 $H_2 > Z$,则交互状态为检查井出流。耦合程序实现的计算流程如图 4 所示。

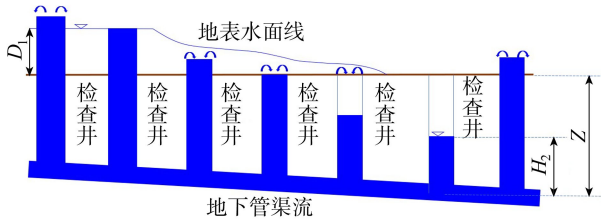


图 3 地表水流与管网水流交互状态示意图

2 模型验证与应用

2.1 理想案例验证

采用某理想的管网系统^[24]对本文构建的 FVCOM-SWMM 耦合模型进行验证。如图 5 所示(图中 D 为直径; L 为长度; n 为地表曼宁系数; H_0 为初始水深),管网系统由 6 个节点和 6 根管道组成,地表区域为边长为 200 m 的闭合方形区域,该区域覆盖管网的节点 J2、J3、J4、J5,在这 4 个节点处地表水流与管网水流存在交互耦合,即管网通过这 4 个节点与地表进行水流交换。J1 为管网的入流节

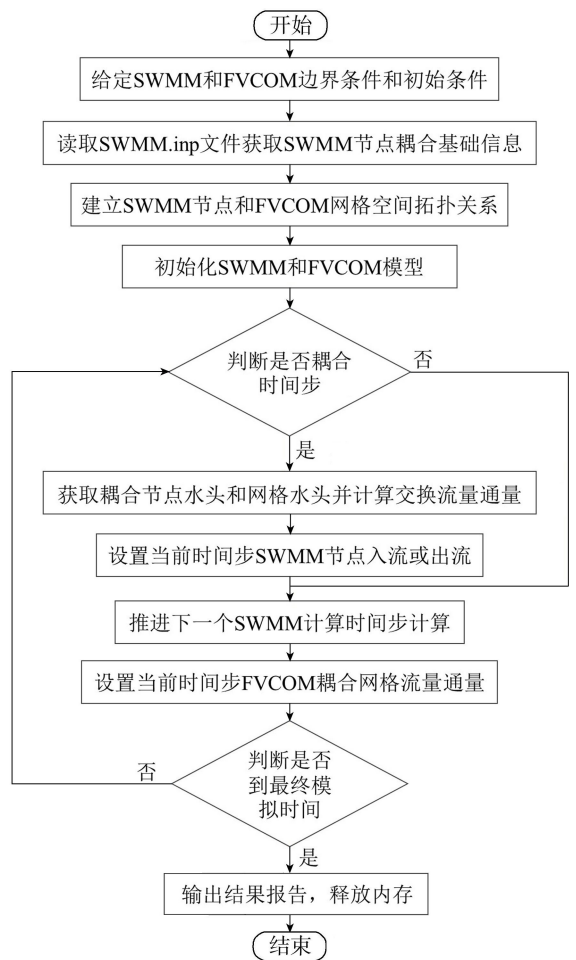


图 4 FVCOM 和 SWMM 耦合程序实现的计算流程

点, J6 为出流节点,地表高程统一为 0 m,地表曼宁系数取值为 0.025,管道的曼宁系数取为 0.013,地表网格大小为 4 m。管道底端与检查井的底端平齐。SWMM 中不设置子汇水区。水流通过节点 J1 进入管网系统,在 J2 处发生溢流,溢流到地表的水从 J3、J4、J5 回流到管网系统。模拟开始的 10 min 之内,节点 J1 的流量从 $0 \text{ m}^3/\text{s}$ 增加到 $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 。系统初始设置为无水,即管网内部和地表水体在初始时刻水深均为零。

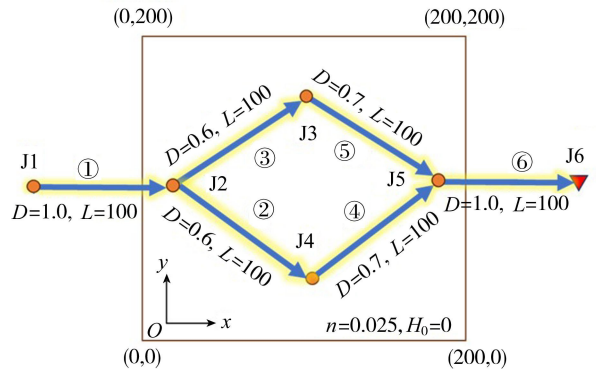


图 5 算例设置示意图(单位:m)

采用 FVCOM-SWMM 耦合模型对该算例进行计算,总模拟时长为 48 h,将模拟稳定后的结果与文

献[24]采用 Info Works ICM 商业软件模拟的结果进行对比,结果如表 1 和表 2 所示,两者的误差均在 10%以内,该差异可能是由于不同的网格划分以及模型算法之间的差异引起的,同时采用的流量公式的经验系数取值也会导致不同模型之间的差异。图 6 为排放口流量过程曲线,可以看出排放口流量在初期急速上升,而后缓慢上升,最后会稳定在 $1\text{ m}^3/\text{s}$ 。

表 1 稳定状态时节点水位

节点编号	模拟水位/m		绝对差值/m	相对误差/%
	Info Works ICM	FVCOM-SWMM		
J1	1.500	1.590	0.090	5.66
J2	1.396	1.416	0.020	1.41
J3	0.991	1.061	0.070	6.60
J4	0.990	1.061	0.071	6.70
J5	0.779	0.860	0.081	9.42

表 2 稳定状态时管道流量

节点编号	模拟流量/(m^3/s)		绝对差值/(m^3/s)	相对误差/%
	Info Works ICM	FVCOM-SWMM		
J1	1.000	1.000	0.000	0.00
J2	0.413	0.445	0.032	7.19
J3	0.413	0.445	0.032	7.19
J4	0.471	0.478	0.007	1.46
J5	0.472	0.478	0.006	1.26
J6	1.000	0.990	-0.010	-1.01

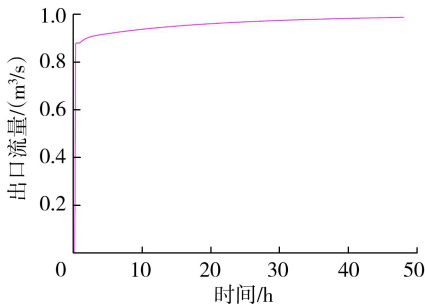


图 6 排放口流量过程线

图 7 为 45 min 和 105 min 时的地表水流流场,在模拟的初期阶段,J2 节点开始在地表发生溢流,地表水流经过一段时间后到达节点 J3、J4 和 J5 位置处,此时地表水位较检查井水位高,故而发生入流,初期阶段 J2 节点的溢流量大于 J3、J4 和 J5 节点入流量,地表水位缓慢上升。流场约到 24 h 后达到动

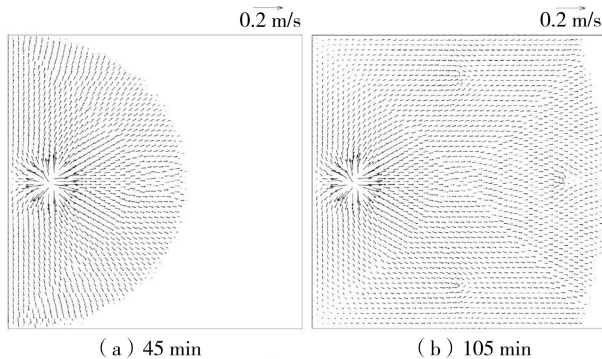


图 7 不同时刻地表水流流场

态平衡,即在每一个时间步计算中 J2 节点的出流量等于 J3、J4 和 J5 节点入流量之和。综上所述,FVCOM-SWMM 耦合模型可合理地反映地表水流与管网水流交互的物理过程。

2.2 物理模型验证

采用 Rubinato 等^[25]地表水流与管网水流交互的物理试验数据对 FVCOM-SWMM 耦合模型进行验证。模型布置示意图见图 8,试验水槽长宽分别为 8 m 和 4 m,坡度为 1 : 1 000,距离上游边界中点 2.5 m 处有一开放的检查井,截面形状为圆形,内径为 240 mm,检查井下连接内径为 75 mm 的圆形管渠,水槽底部距离管渠底部 478 mm,距离检查井中心 480 mm 的上游位置处布置了水头压力计,试验的具体布置形式见文献^[25]。水槽的糙率取为 0.02,管渠糙率为 0.009。水槽和管渠内初始水深为零。数值模拟中,地表水流下游边界和排水系统下游出口边界为自由出流边界,上游为恒定入流边界。

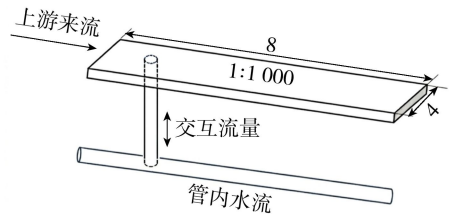


图 8 物理模型布置示意图(单位:m)

通过计算不同上游来流流量的情况,将地表水流的水深和地表水流与管内水流交互流量的模拟值与试验值进行了比较,结果如表 3 所示。从表 3 可知,测点水深和交互流量的模拟值与试验值误差均在 $\pm 4.5\%$ 以内。随着上游来流流量逐渐增大,水槽水流稳定时,测点水深逐渐增大,交互流量也随之增大。上述结果表明,FVCOM-SWMM 耦合模型模拟结果与试验结果吻合较好。

表 3 稳定状态时物理试验与数值模拟结果对比

弗劳德数	测点水深/mm		交互流量/(L/s)	
	试验值	模拟值	试验值	模拟值
0.666	7.7	7.7	0.69	0.67
0.674	8.8	8.9	0.88	0.84
0.685	9.7	9.8	1.06	1.03
0.691	10.4	10.1	1.15	1.11
0.691	11.0	11.1	1.25	1.23

2.3 海滨城区实例验证

2.3.1 研究区概况

以典型海滨城区琅岐岛山语城区洪涝模拟为例来验证 FVCOM-SWMM 耦合模型在实际海滨城区雨潮遭遇情景下的性能。如图 9 所示,琅岐岛位于闽江入海口处,闽江口属于强潮河口,该地区的潮汐类型为正规半日潮,平均潮差约为 4.1 m,潮差大,历

史上水文灾害较严重,尤其是洪水和风暴潮给琅岐岛地区带来了巨大的灾害损失。

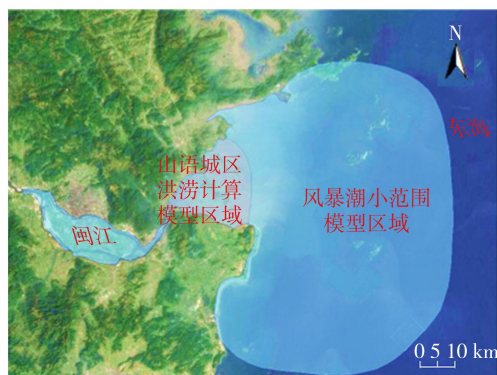


图9 山语城区示意图

2.3.2 模型构建

将 FVCOM-SWMM 耦合模型应用于具有曲折海岸线和建筑物排列较为不规则的琅岐岛山语城区,对特大风暴潮和极端降雨条件下城区的洪涝进行模拟分析。9608 台风经过研究区域附近时,福建当地验潮站出现千年一遇极值潮位,选取此次风暴潮作为计算条件。降雨选择 100 年一遇设计降雨条件,采用《城市暴雨强度公式编制和设计暴雨雨型确定技术导则》中历时降雨强度公式进行计算。

采用大小模型嵌套的方式对风暴潮和城区洪涝进行模拟。风暴潮计算的大范围与小范围模型网格如图 10 所示,大范围模型的开边界潮位从全球潮汐模型获取,小范围模型水位边界条件从大范围模型计算结果中获取,两个模型水平方向网格采用单元为三角形的非结构化网格。山语城区洪涝地表水流模拟计算网格也采用单元为三角形的非结构化网格,如图 11 所示,最小网格单元的边长为 2m。山语城区洪涝计算的水位边界条件从风暴潮模拟的小范围模型模拟结果中获取。山语城区洪涝模拟计算时,右侧为高程较高的区域,计算中设置为固边界(图 11(b))。计算中台风采用 ERA5 再分析风场叠加 Jelesnianski 经验风场进行模拟^[1]

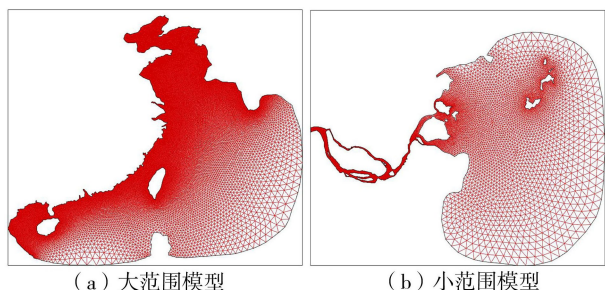


图10 风暴潮计算模型网格

模型水平和垂直方向的耗散系数分别取值为 0.4 和 10^{-6} ,底部的粗糙特征长度为 0.5 mm。首先对该城区附近水域的风暴潮进行模拟,风暴潮模型

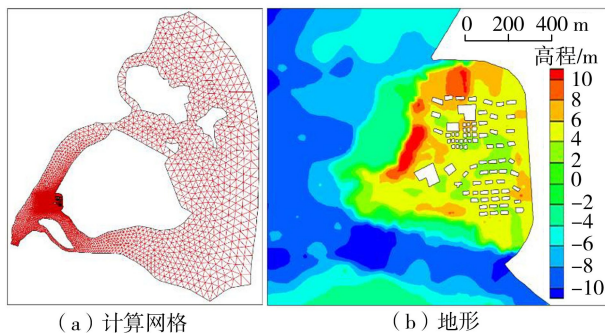


图11 山语城区洪涝计算模型网格与地形

计算时间段为 1996 年 7 月 26 日 8 时至 1996 年 8 月 3 日 8 时^[26],选取两个不同潮位观测站实测水位对风暴潮模型进行验证。

为分析风暴潮模拟的准确性,采用模型模拟结果的纳什效率系数(NSE)和标准化均方根误差(NRMSE)进行评价。水位验证结果如图 12 所示,经计算梅花和埕头两个潮位观测站处模拟水位的 NRMSE 均为 0.12, NSE 分别为 0.85 和 0.84,风暴潮模型水位模拟结果与实测数据吻合良好,可将该水位模拟结果作为山语城区洪涝模拟的边界条件。

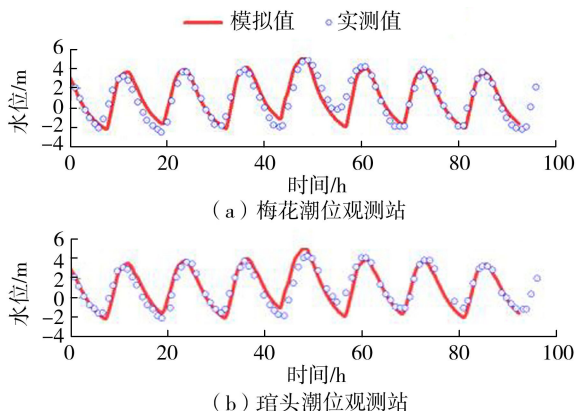


图12 风暴潮期间水位验证结果

由于缺少山语城区的详细管网数据,根据文献[27-29]和 GB 50014—2021《室外排水设计标准》,在城区主要道路中间添加检查井,检查井之间的间隔不超过 90 m,相邻两个检查井之间添加直径 1 m 的圆管,管道糙率为 0.013。按土地利用类型基本分类原则将研究区土地利用分为草地、道路、建筑用地 3 类,不同土地利用类型地块产汇流的洼蓄、下渗等参数按 SWMM 手册取值。山语城区土地利用类型和管网系统分布如图 13 所示。子汇水区划分采用泰森多边形方法,通过 GIS 处理计算得到不同子汇水区的 SWMM 模型参数如下:管道曼宁参数 0.013,不透水区曼宁系数 0.018,透水区曼宁系数 0.100,不透水区洼地蓄水深度 2 mm,透水区洼地蓄水深度 5 mm,无洼蓄不透水区占比 25%,最大下渗率 68 mm/h,最小下渗率 0.5 mm/h,衰减系数 4 h^{-1} 。

根据风暴潮模型模拟的潮位及风暴潮增水过程,台风登陆期间的风暴潮增水幅度达到最大,故选取台风登陆时段作为山语城区洪涝模拟时段,即 1996 年 8 月 1 日 8 时至 1996 年 8 月 1 日 20 时。

可以看出,降雨峰值到来后,受降雨影响,管道内充满水,降雨减弱后,管道内水量减少。

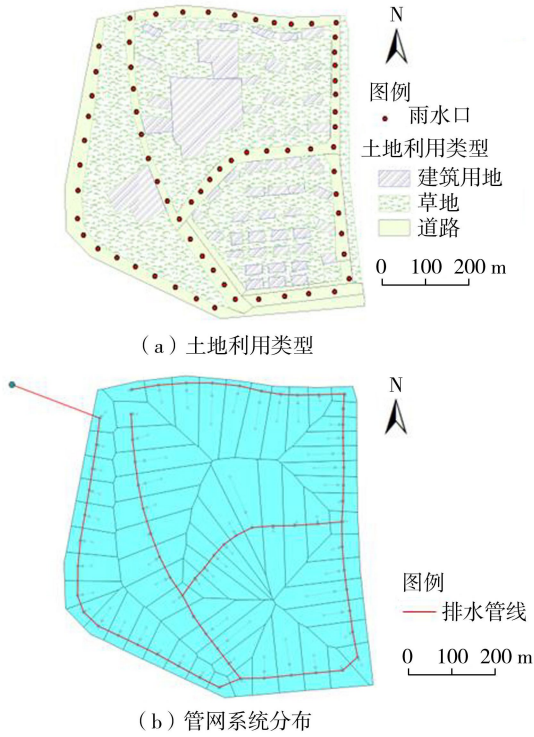


图 13 山语城区土地利用类型与管网系统分布

2.3.3 结果与分析

在特大风暴潮和 100 年一遇降雨条件下,降雨历时及近岸潮位变化过程如图 14 所示,山语城区不同时刻水深如图 15 所示(图中白色代表该区域此时没有地表水)。模拟开始后的 3 h 内,随着近岸潮位的上升,山语城区产生大量的积水,积水最大深度可达 2 m 以上。由于风暴增水较大,潮水漫滩进入城区,叠加极端降雨的影响,地势较低的城区出现了大面积的洪涝灾害。随着台风过境,产生漫滩的水量逐渐减少,城区积水深度和积水面积逐渐减小。由图 14 可知,降雨的峰值出现在 8 h 左右,而城区未出现明显的管网溢流,可能是由于 FVCOM-SWMM 耦合模型计算中采用的管径较大,管网的排水能力较大。由管道内水深变化结果(图 16(b))

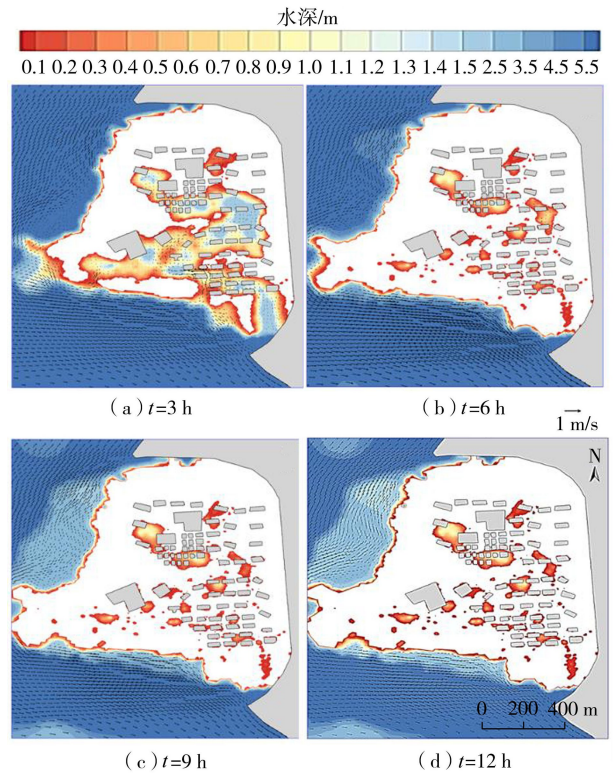


图 15 山语城区水深模拟结果

为分析不同位置处的洪涝淹没水深过程,选取城区内部测点 A、近海岸测点 B 对水深进行模拟分析。测点 A、B 位置如图 16(a) 所示,测点 A 位于城区的道路内,测点 B 位于沿海堤的公路中。

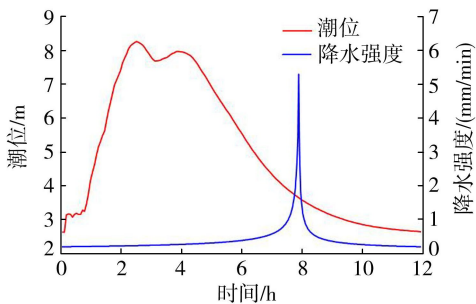
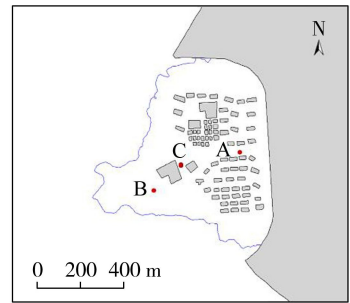
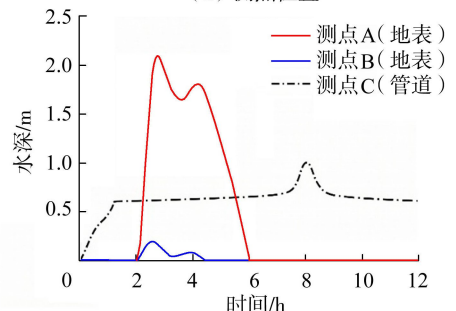


图 14 降雨历时及近岸潮位变化过程



(a) 测点位置



(b) 水深历程曲线

图 16 测点水深模拟结果

图 17 为测点 A、B 处排水系统地面水流入流量变化过程曲线。测点 A 处地势较低,测点四周比测

点位置地势高。从图 16(b)和图 17 可以看出,测点 A 处水深从 2h 时开始上升,且随着风暴潮漫滩及降雨的影响,该处积水不断累积,最大水深可达 2.1 m,对城区影响较大;6h 时由于城区排水系统的作用,测点 A 处水深下降到 0。测点 A 水深变化过程出现两个峰值,这与风暴潮潮位的变化特性相关。测点 A 处积水过程持续约 4 h。

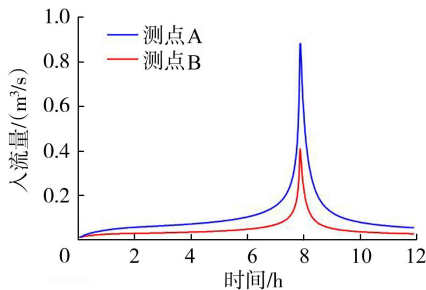


图 17 排水系统地面水流入流量变化曲线

测点 B 位于海岸附近,该地区高程从外海向内陆地区逐渐增大,地势的影响加上地下排水系统的作用,该处排涝较为顺畅,如图 16(b)所示,测点 B 处积水水深最大仅为 0.18 m,且积水持续时间相比于测点 A 处缩短了近一半。

通过以上分析可以看出,FVCOM-SWMM 耦合模型模拟结果可以合理地反映风暴潮和降雨影响下的城区洪涝过程。

3 结 语

利用开源海洋水动力模型 FVCOM 和管网水动力模型 SWMM 开发了基于非结构化网格的地表水流和管网水流双向动态耦合模型 FVCOM-SWMM,该模型基于非结构化网格,通过修改 FVCOM 和 SWMM 的控制方程,增加右端源项,采用双向实时耦合的方式,实现了地表水动力模型和管渠水动力模型的实时动态双向数据交换。理想案例中,FVCOM-SWMM 耦合模型计算稳定后的节点水位和管道流量结果与商业软件 Info Works ICM 模拟结果相对误差在 10%以内;对于物理模型试验,FVCOM-SWMM 耦合模型的计算结果与测点水深及交互流量试验结果误差均在 $\pm 4.5\%$ 范围之内,表明 FVCOM-SWMM 耦合模型能够准确模拟排水管网与地表水流的耦合作用。对具有曲折海岸线和复杂建筑轮廓的海滨城区特大风暴潮和 100 年一遇降雨条件下的城区洪涝模拟结果表明,FVCOM-SWMM 耦合模型能够合理模拟风暴潮影响下具有复杂边界城区的洪涝过程。

本文主要工作为基于非结构化网格开发地表水流与地下管网水流双向动态耦合模型,算例验证未

考虑风暴潮潮位峰值与降雨峰值同时出现的情况,也未深入探讨管网排水能力对城区内涝的影响,可在后续的研究中进一步探讨。

参考文献:

- [1] Shi Shaoyu, Yang Bo, Jiang Wensheng. Numerical simulations of compound flooding caused by storm surge and heavy rain with the presence of urban drainage system, coastal dam and tide gates: a case study of Xiangshan, China [J]. Coastal Engineering, 2022, 172: 104064.
- [2] Geng Yanfen, Mao Jiandong, Wang Zhili, et al. Analysis of interaction between surface and sewer pipe system based on computational fluid dynamics [J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2020, 36(2): 198-205.
- [3] 侯俊,陈诚,郑玉磊,等.基于 MIKE FLOOD 模型的平原水网地区内涝治理效果模拟研究 [J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(6): 41-47. (Hou Jun, Chen Cheng, Zheng Yulei, et al. Simulation study on effectiveness of waterlogging control in plain water network areas based on MIKE FLOOD model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(6): 41-47. (in Chinese))
- [4] 宋耘,李琼芳,牛铭媛,等.基于 SWMM 模型的南京典型易涝区暴雨内涝模拟 [J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(6): 56-61. (Song Yun, Li Qiongfang, Niu Mingyuan, et al. Rainstorm and waterlogging simulation in typical inundated districts of Nanjing based on SWMM [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(6): 56-61. (in Chinese))
- [5] Seyoum S D, Vojinovic Z, Price R K, et al. Coupled 1D and noninertia 2D flood inundation model for simulation of urban flooding [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 138(1): 23-34.
- [6] Mignot E, Li Xuefang, Dewals B. Experimental modelling of urban flooding: a review [J]. Journal of Hydrology, 2019, 568: 334-342.
- [7] 徐宗学,卢兴超,施奇妙.城市暴雨洪涝灾害特征与风险评估研究进展 [J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(1): 1-9. (Xu Zongxue, Lu Xingchao, Shi Qimiao. Research progress on urban flooding disaster characteristics and risk assessment [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(1): 1-9. (in Chinese))
- [8] 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))

- [9] 张弘强. 暴雨积水水动力耦合模型研究及应用[D]. 天津:天津大学,2019.
- [10] 胡伟贤,何文华,黄国如,等. 城市雨洪模拟技术研究进展[J]. 水科学进展, 2010, 21(1): 137-144. (Hu Weixian, He Wenhua, Huang Guoru, et al. Review of urban storm water simulation techniques[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(1): 137-144. (in Chinese))
- [11] 曾照洋,王兆礼,吴旭树,等. 基于 SWMM 和 LISFLOOD 模型的暴雨内涝模拟研究[J]. 水力发电学报, 2017, 36(5): 68-77. (Zeng Zhaoyang, Wang Zhaoli, Wu Xushu, et al. Rainstorm waterlogging simulations based on SWMM and LISFLOOD models [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(5): 68-77. (in Chinese))
- [12] Leandro J, Martins R. A methodology for linking 2D overland flow models with the sewer network model SWMM 5. 1 based on dynamic link libraries [J]. Water Science & Technology, 2016, 73(12): 3017-3026.
- [13] 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))
- [14] Jamali B, Bach P M, Cunningham L, et al. A cellular automata fast flood evaluation (CA-ffé) model[J]. Water Resources Research, 2019, 55(6): 4936-4953.
- [15] 曾照洋,赖成光,王兆礼,等. 基于 WCA2D 与 SWMM 模型的城市暴雨洪涝快速模拟[J]. 水科学进展, 2020, 31(1): 29-38. (Zeng Zhaoyang, Lai Chengguang, Wang Zhaoli, et al. Rapid simulation of urban rainstorm flood based on WCA2D and SWMM model [J]. Advances in Water Science, 2020, 31(1): 29-38. (in Chinese))
- [16] Liang Dongfang, Falconer R A, Lin Bingliang. Coupling surface and subsurface flows in a depth averaged flood wave model[J]. Journal of Hydrology, 2007, 337(1/2): 147-158.
- [17] Hsu M H, Chen S H, Chang T J. Inundation simulation for urban drainage basin with storm sewer system[J]. Journal of Hydrology, 2000, 234(1/2): 21-37.
- [18] Bisht D S, Chatterjee C, Kalakoti S, et al. Modeling urban floods and drainage using SWMM and MIKE URBAN: a case study[J]. Natural Hazards, 2016, 84(2): 749-776.
- [19] 封天雨,雷晓辉,王家彪,等. 基于 Infoworks ICM 模型的沿海城市暴雨内涝分析[J]. 水电能源科学, 2023, 41(6): 64-68. (Feng Tianyu, Lei Xiaohui, Wang Jiabiao, et al. Analysis of rainstorm waterlogging in coastal cities based on Infoworks ICM model [J]. Water Resources and Power, 2023, 41(6): 64-68. (in Chinese))
- [20] 傅春,付耀宗,肖存艳,等. 基于 MIKE FLOOD 模型的鹰潭市内涝弹性分析[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(1): 33-39. (Fu Chun, Fu Yaozong, Xiao Cunyan, et al. Analysis of urban waterlogging resilience based on MIKE FLOOD Model in Yingtan City [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(1): 33-39. (in Chinese))
- [21] Tan Yuqing, Cheng Qiming, Lyu Fengwei, et al. Hydrological reduction and control effect evaluation of sponge city construction based on one-way coupling model of SWMM-FVCOM: a case in university campus [J]. Journal of Environmental Management, 2024, 349: 119599.
- [22] 魏书仪,刘非,袁绍春,等. 基于 SWMM 和 FVCOM 模型的城市多级排水系统改造模拟研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(12): 29-39. (Wei Shuyi, Liu Fei, Yuan Shaochun, et al. Simulation study of urban multistage drainage system modification based on SWMM and FVCOM model [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(12): 29-39. (in Chinese))
- [23] 王小杰,夏军强,李启杰,等. 考虑不同水流交换模式的城市洪涝一维二维双向耦合模型[J]. 水科学进展, 2024, 35(2): 244-255. (Wang Xiaojie, Xia Junqiang, Li Qijie, et al. Study on the bidirectional coupling 1-D and 2-D model of urban flood based on different flow exchange modes [J]. Advances in Water Science, 2024, 35(2): 244-255. (in Chinese))
- [24] 陈文杰. 城市洪涝水文水动力模型构建与洪涝管理关键问题研究[D]. 广州:华南理工大学, 2019.
- [25] Rubinato M, Martins R, Kesserwani G, et al. Experimental calibration and validation of sewer/surface flow exchange equations in steady and unsteady flow conditions [J]. Journal of Hydrology, 2017, 552: 421-432.
- [26] 孙永钊. 闽江口台风风暴潮危险性分析研究[D]. 舟山:浙江海洋大学, 2022.
- [27] Jang J H, Chang T H, Chen Weibo. Effect of inlet modelling on surface drainage in coupled urban flood simulation [J]. Journal of Hydrology, 2018, 562: 168-180.
- [28] Bazin P H, Nakagawa H, Kawaike K, et al. Modeling flow exchanges between a street and an underground drainage pipe during urban floods [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 140(10): 04014051.
- [29] Dong Boliang, Xia Junqiang, Zhou Meirong, et al. Integrated modeling of 2D urban surface and 1D sewer hydrodynamic processes and flood risk assessment of people and vehicles [J]. Science of the Total Environment, 2022, 827: 154098.

(收稿日期:2025-02-23 编辑:熊水斌)