

SWMM 模型河道及明满流模拟能力分析研究

范玉燕¹, 汪诚文¹, 喻海军^{2,3}

(1. 清华大学 环境学院, 北京 100084; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 3. 水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心, 北京 100038)

摘要: SWMM 模型是当前国内外使用最为广泛的城市雨洪模型,对其模拟能力进行研究具有重要意义。在简要介绍 SWMM 模型的基础上,对模型处理城区河道和管道明满流等方面的能力进行了研究和分析。通过将 SWMM 模型模拟城区河道的结果与通用一维河网模型进行对比,对 SWMM 模型在处理 and 概化城区河道时存在的问题进行了分析,并论证了采用 SWMM 模型处理城区河道的可行性。采用具有复杂流态的经典环状排水管网算例对 SWMM 模型处理明满流的能力以及管道概化策略进行了研究和分析。研究结果表明:SWMM 模型在保证合适的断面间距的情况下完全能够应用于城区河道水流计算,模拟结果与一般河网模型差别较小,同时 SWMM 模型具备模拟一维明满流的能力,在管道较长时,适当增加中间节点,可以在一定程度上改善模拟效果。

关键词: SWMM 模型; 城市雨洪模型; 明满流; 河道; 管道概化

中图分类号: TU992

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)01-0001-06

Research on simulation ability to deal with the rivers and the free-surface-pressure flow of SWMM

FAN Yuyan¹, WANG Chengwen¹, YU Haijun^{2,3}

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Research Center on Flood and Drought Disaster Reduction of the Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China)

Abstract: The SWMM model is the most widely used urban storm water management model in the world. It is of great significance to study the simulation capabilities of the SWMM model. Based on a brief introduction to the SWMM model, its simulation ability to deal with the rivers in the urban area and the free-surface-pressure flow was studied and analyzed. The problems existing in processing and generalizing urban rivers when using SWMM model were analyzed by comparing the results of the SWMM model with a common river network model, and the feasibility of using the SWMM model to deal with urban river channels was verified. The classical circular drainage network with complex flow patterns was used to study and analyze the SWMM model's ability to deal with the full flow and the pipeline generalization strategy. It is proved that the SWMM model can be applied to the calculation of the water flow in urban river with proper section spacing, there is no significant differences from the results of the general river network model, and the results show that SWMM has the ability to simulate the free surface-pressurized flow. In the presence of very long pipes, to add intermediate nodes properly can improve the simulation results to a certain degree.

Key words: SWMM; urban rainstorm model; free-surface-pressure flow; river; pipe generalization

收稿日期:2018-08-30; 修回日期:2018-09-30

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC1502706);北京市自然科学基金重点项目(8181001);水体污染控制与治理科技重大专项(2018zx07110008)

作者简介:范玉燕(1985-),女,河南南阳人,博士后,研究方向为水环境和城市给排水。

通讯作者:喻海军(1988-),男,湖北大悟人,博士,高级工程师,研究方向为计算水力学和城市水文。

1 研究背景

城市暴雨内涝是当前城市水文学研究的热点问题,城市雨洪模型是必不可少的研究工具之一^[1]。在众多的城市雨洪模型当中,SWMM(Storm Water Management Model)模型^[2]是使用最为广泛的模型之一,其一系列建模理念对后续其它城市雨洪模型产生深远的影响^[3],并被广泛地应用于世界各地不同城市地区的暴雨洪水管理、排水系统分析和设计、低影响开发模拟评估、城市地区非点源污染评估等方面的问题^[4-6]。黄国如等^[7]和韩璐遥等^[8]分别针对深圳民治流域和龙岩市中心城区的不同LID措施和方案,采用SWMM模型对雨洪控制效果进行了分析研究。朱呈浩等^[9]基于SWMM模型对西安市沣西新城区洪涝过程进行了模拟分析。由于模型代码完全免费和开源,将SWMM模型与GIS技术或者其它模型进行集成耦合是研究城市雨洪问题的重要技术路线^[10-13]。经过近50年的发展,SWMM模型从功能和算法上已经相对比较成熟,但在城区河道处理、模型稳定性等部分问题还有待深入研究。

河道作为城市排水系统的重要组成部分,是暴雨内涝模拟分析中不可回避的问题,河道水流的模拟精度对城市排水模型整体的精度有着较大的影响。在构建城市排水模型时,考虑到构建管网和河网耦合模型的复杂性,部分研究者往往会直接采用SWMM模型同时模拟城区河网和排水管道^[7, 14]。SWMM模型可以处理压力流和明渠流,从理论上讲是具备模拟城区河道能力的,但在SWMM模型中模拟河道时,需要将一条河道划分成若干个小的河段,每个河段类似于一根管道,只可以设置一个断面形状,通过两端节点高程来反映河道比降。河道断面(如河宽和河深)一般是变化的,这一点与排水管道截面形状一般沿程不变的情形完全不同,如果一个河段只能设置一个截面形状,相当于假定这一河段形状沿程不变,与实际情况有所差别,而传统河网模型,一般是一个河段用上下游两个断面来反映河道地形变化。SWMM模型能否用于城区河道模拟以及采用类似管道的方式来模拟河道产生的误差为多少有必要进行深入研究。

除上述问题之外,SWMM模型一维水动力学模块基于“LINK - NODE”的思想,采用显式有限差分格式离散求解一维圣维南方程组,即在LINK(管道)中满足动量方程,在NODE(节点)中满足连续方程^[2],这种数值处理方式从模型稳定性的角度来说是有欠缺的,特别是在处理明满流这类复杂流

态时尤为突出。城市排水系统中管道水流可能是满流(压力流),也可能是明流(明渠流),两种流态可能会交替出现或者共存,这种明流和满流两种不同流态共存或者交替出现的水流称之为明满流^[15]。从模型模拟能力方面来看,对排水系统中明满流的模拟是排水管网模型必须具备的能力,也是重要的研究方向之一,目前对SWMM模型模拟明满流的能力,特别是建模策略等方面研究还相对较少。

本文以SWMM模型为研究对象,重点分析和验证了SWMM模型水动力学模块处理城区不规则断面河道和处理管道明满流方面的能力,以期实际应用SWMM模型提供科学支撑和依据。

2 SWMM模型简介

SWMM模型是在美国环境保护署的资助下,由美国3家知名科研机构和公司联合研发的城市雨洪管理模型,最新版本(5.1)已经具备水文、水力和水质等过程的模拟分析功能。

2.1 模型结构

SWMM模型总体上可以分为图形界面引擎和模型计算引擎两大主要模块,两个模块之间通过文件系统进行数据交互(如图1所示)。图形界面引擎主要功能是进行模型要素(管网、泵、闸、堰等)的图形编辑、属性输入和参数设置,并生成相应格式的输入文件,供计算引擎调用。计算引擎调用输入文件进行计算,主要包括地表产汇流、管网汇流和水质模拟等过程,计算完成后生成相应格式的结果文件和报告文件(即统计分析文件),可在图形界面上进行多种形式的展示和查询。

2.2 模型功能

SWMM模型在降雨产汇流方面的功能相对比较完善,能够模拟计算城市地区降雨、地表蒸发、积雪和融雪、土壤动态下渗、坡面汇流、地下水交互、各类LID设施产流等在内的多种水文过程。在管网汇流方面,SWMM模型可以提供恒定流、运动波和动力波等多种数值方法供用户选择,能够模拟计算雨水径流或其它形式外部入流在排水管网、河道、蓄水单元以及排水建筑物等排水系统中的传输和流动过程,另外模型还提供了比较完善和灵活的排水建筑物(泵站、堰、分流器等)的调度和控制功能。除了各类水文和水力过程的模拟之外,SWMM模型还提供了多种数学方法计算城市区域污染物累积冲刷和污染物在排水系统中输运降解等水质过程。SWMM模型产汇流主要计算流程如图2所示。

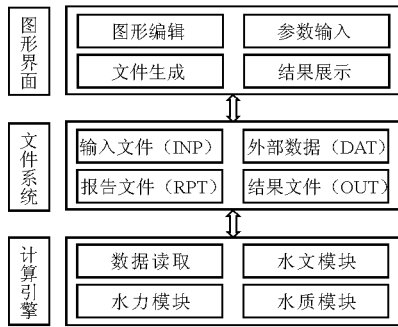


图 1 SWMM 模型结构示意图

2.3 模型原理

(1)产汇流计算。SWMM 模型在计算地表产流量时,一般需要将计算区域划分成若干个子汇水区(或子流域),每个子汇水区根据地表是否存在洼蓄损失和土壤下渗作用按不同比例划分为透水区、无洼蓄不透水区和有洼蓄不透水区等 3 个内部组成部分,各部分均概化成一个非线性水库单独进行产流计算,子汇水区总的出流量等于 3 个内部子区域出流量之和。非线性水库的入流项主要包括降雨和来自其他子汇水区的出流量,损失和流出项包括地表蒸发、土壤下渗和出流量。非线性水库的实时水深根据子汇水区的流入流出和损失项之间的水量平衡计算得出。子汇水区的最大洼蓄量相当于非线性水库的死库容,只有当水库水深超过洼蓄深度时才会产生地表径流,出流量的大小通过曼宁公式计算得出:

$$Q = W \frac{(d - d_p)^{5/3} S^{1/2}}{n} \quad (1)$$

式中: Q 为出流量, m^3/s ; W 为子汇水区的概化宽度, m ; S 为子汇水区的坡度; n 为曼宁粗率系数。

(2)一维管网。SWMM 模型中一维排水管网模型控制方程分为连续方程和动量方程,分别如式(2)和式(3)所示。

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

$$gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial t} + gAS_f = 0 \quad (3)$$

式中: Q 为管段流量, m^3/s ; A 为管段过水断面面积, m^2 ; t 为时间, s ; x 为距离, m ; H 为水头, m ; g 为重力加速度,取 $9.8 m/s^2$; S_f 为摩阻项,可以采用曼宁公式求得:

$$S_f = \frac{K}{gAR^{4/3}}Q|V| \quad (4)$$

式中: $K = gn^2$, n 为管道的曼宁系数; R 为过水断面

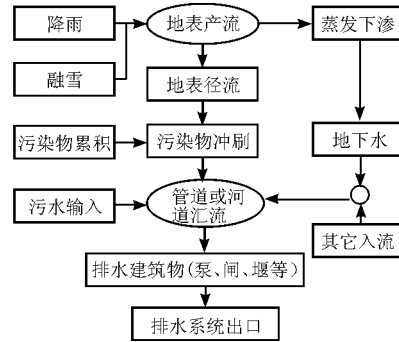


图 2 SWMM 模型计算流程

的水力半径, m ; V 为断面平均流速, m/s 。

3 河道模拟能力验证

为了对 SWMM 模型中以管道的方式考虑城区河道造成的模拟误差进行评估,以证明 SWMM 模型是否能够应用于城区河道的模拟分析计算,采用 SWMM 模型模拟计算了一条断面尺寸沿程变化的河道,并将模拟计算结果与采用常规概化方式的 MIKE11 河网模型的计算结果进行对比。

3.1 算例

本次模拟计算案例采用的河道总长为 3 km,由于城区河道一般是矩形或者梯形,本案例断面形状也统一采用对称梯形断面(如图 3 所示),梯形坡度比为 2(图 3 中 h 与 a 的比值)。如图 4 中所示,在里程为 0、1 000、2 000 和 3 000 m 处,河道底宽(即图 3 和图 4 中 w 的取值)分别为 30、40、40 和 60 m,河道底高程分别为 4、2、1 和 0.5 m。

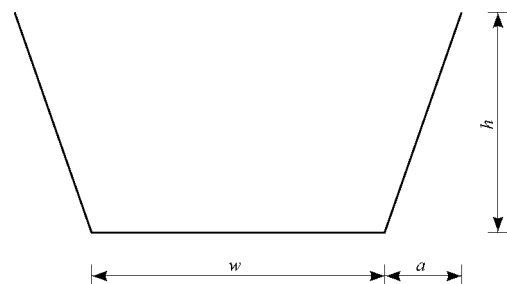


图 3 河道断面示意图

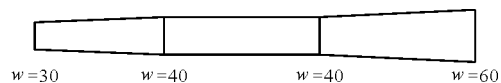


图 4 河道沿程底宽变化示意图(单位:m)

3.2 结果分析

分别采用 SWMM 模型与 MIKE11 软件构建了一维河道模型,模拟计算了不同入流流量和水位边界条件下河道沿程的水位。在模型构建时,两个模

型均采用 250 m 的断面间隔,其中 SWMM 模型中河段的形状采用两端处断面形状的平均,整条河道糙率系数均采用 0.025。

图 5 给出了不同量级的入流流量 ($Q = 50, 250$ 和 $500 \text{ m}^3/\text{s}$) 和下游水位条件 ($H = 1.8, 2.6, 3.0$ 和 5.0 m) 下,SWMM 模型和 MIKE11 软件河道沿程水位计算结果的对比情况。从图 5 可以看出,两个模型的计算结果总体上非常接近,在里程 1 500 m 以内的断面计算结果基本一致,下游水位差异略有增

大,但水位差总体上均未超过 15 cm,实际上如果将断面进行适当加密,两个模型计算结果差异将会进一步减少。从结果差异的原因来看,一部分可能是由于断面概化方式导致的,另一部分可能是模型在下游边界处理方式上不同造成的,但差别总体上控制在较小的范围内。上述案例的计算结果表明采用 SWMM 模型中河道概化方式造成的误差在可以接受的范围内,SWMM 模型可以用来模拟计算实际城区河道水流。

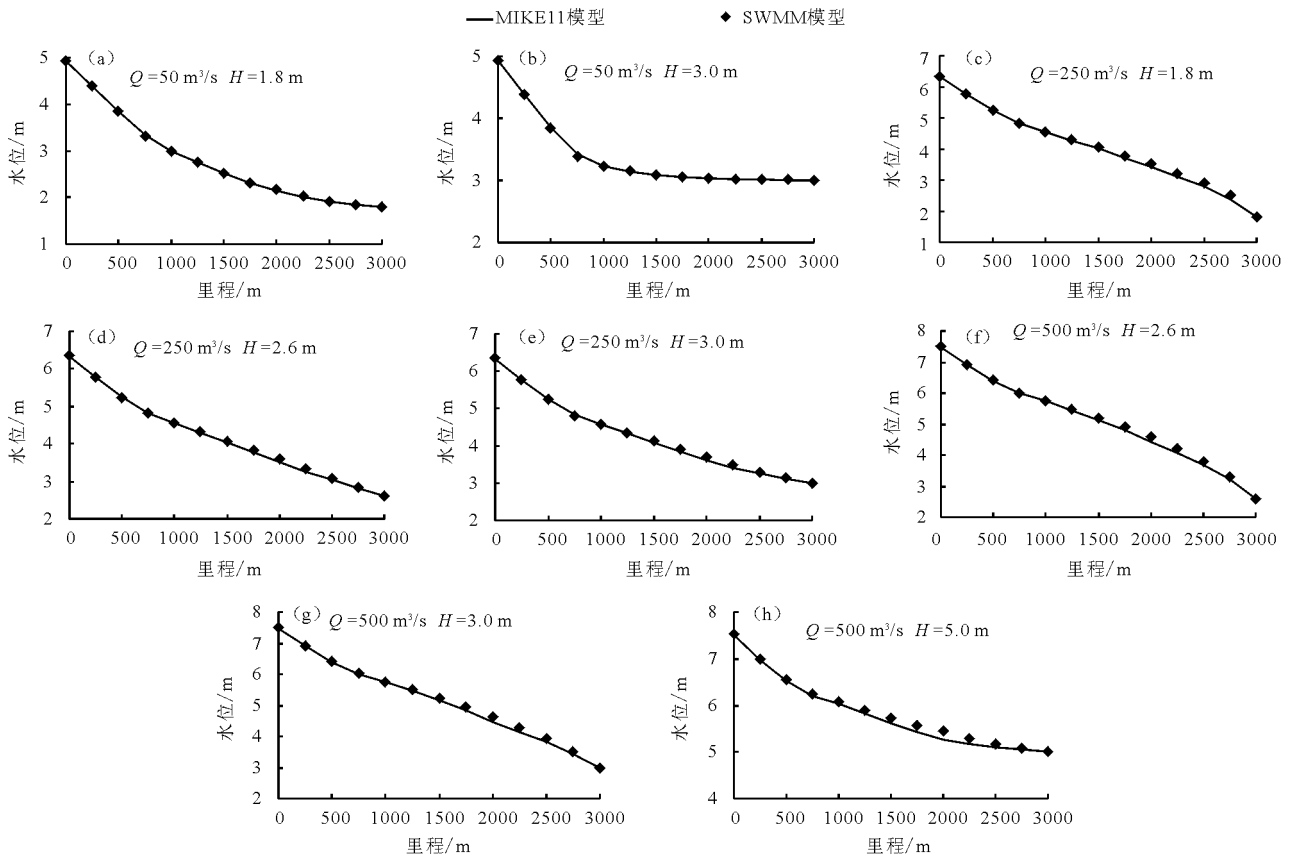


图 5 不同边界条件下河道沿程水位对比图

4 明满流模拟能力验证

为了对 SWMM 模型处理明满流的能力进行检验,将 SWMM 模型应用于由 Zhong Ji^[16] 提出的一个环状算例,该算例被普遍应用于验证模型处理明满流的能力^[17-18]。如图 6 所示,该算例采用的排水管网系统由 6 根管道和 6 个节点组成,其中 C2、C3 和 C4 组成了一个封闭的环,各个管道的长度、管径以及两端的底高程均已在图中标识,所有管道糙率统一采用 0.01429。

在节点 1 和节点 3 处分别给定流量过程作为上边界条件,节点 5 和节点 6 处分别给定水位过程作为下边界条件,流量过程和水位过程如图 7 所示。按图 7 中给定的边界条件,所有管道水流均从最初

的全干状态变为明渠流,随着流量的不断增大,管道中水流逐渐变为压力流,最后当流量变小时,水流又会变回明渠流,也就是说本算例存在着明显的明满流交替过程,可以检验模型处理明渠流、压力流和明满流的能力。另外,由于下游水位边界较高,在最初上游尚无来水时,C5 和 C6 会出现逆流现象,因而还可以检验模型处理逆流的能力。

采用 SWMM 模型中动力波方法模拟计算了本算例,总的模拟时长为 10 h,时间步长采用 10 s,管道 C2、C4、C5 和 C6 中的流量过程计算结果如图 8 所示。作为对比,图 8 中也给出了文献[16]中的模型计算值。从这些图中可以看出,除局部有一些小的波动外,SWMM 模型的计算结果与文献中模型计

算结果基本一致,表明 SWMM 模型能够较好地处理明满流的过渡,具备模拟明满流的能力。

在上述的模拟计算中,所有管道(C1 至 C6)在建模时均被当作一根管道,相当于模型的空间步长

为管道的长度,为了进一步评估 SWMM 模型处理明满流的能力,在建模时,将每根管道中间位置设置一个虚拟的节点,再次进行了模拟计算,图 9 给出了 C2、C4、C5 和 C6 管道中的流量过程。

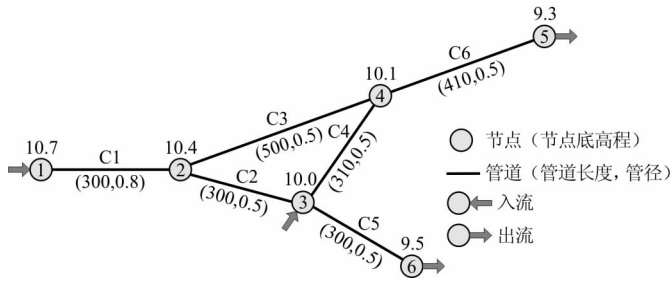


图 6 算例管网示意图(单位:m)

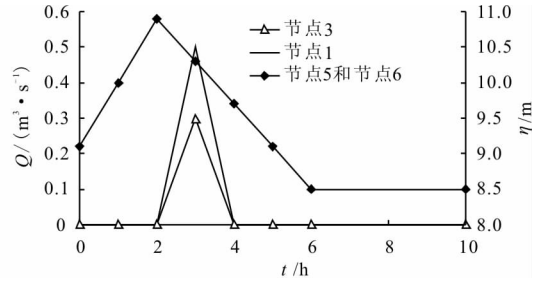


图 7 入流和出流边界条件

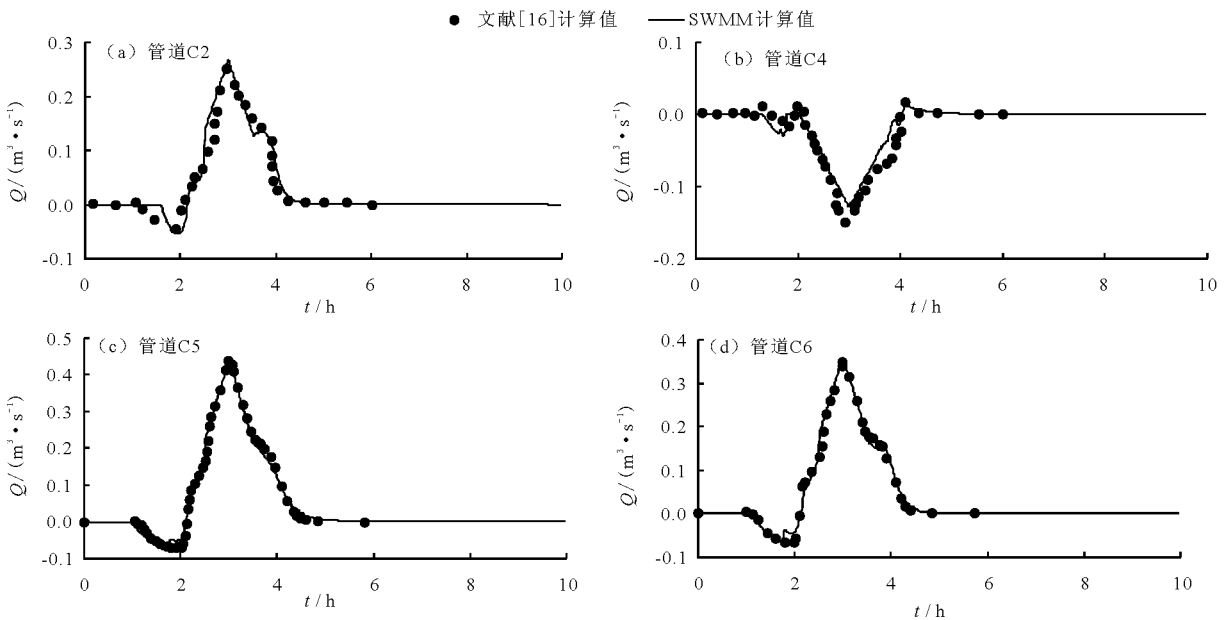


图 8 各管道流量过程

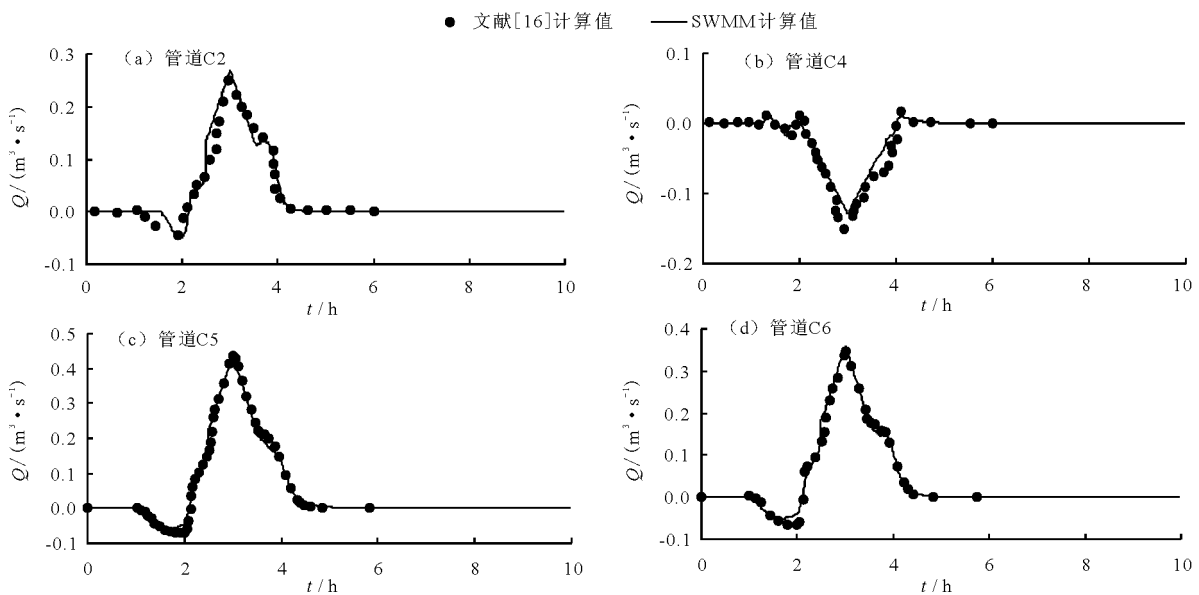


图 9 各管道流量过程

对比和分析图 8 与图 9 中的计算结果,可以发现,两种概化方式下 SWMM 模型的计算结果总体上区别比较小,但采用后一种方式,流量过程更为平滑,与文献中的结果也更为接近,表明采用 SWMM 模型时,在管道较长的情况下,适当增加节点的数量,可以在一定程度上改善模型的模拟效果。

5 结 论

(1)采用与常规一维河网模型 MIKE11 的计算结果进行对比的方式,验证了 SWMM 模型中河道概化方式的计算精度,结果表明 SWMM 模型在保证合适断面间距的情况下是可以用来城区实际河道的。

(2)采用环状排水管网算例对 SWMM 模型处理明满流的能力进行了验证,结果表明 SWMM 具备模拟明满流的能力,在管道较长时,适当增加中间节点,可以在一定程度上改善 SWMM 的模拟效果。

参考文献:

- [1] 夏 军,张 印,梁昌梅,等. 城市雨洪模型研究综述[J]. 武汉大学学报(工学版),2018,51(2):95-105.
- [2] ROSSMAN L A. Storm water management model user's manual, version 5.0[M]. Cincinnati: National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, 2010.
- [3] 喻海军. 城市洪涝数值模拟技术研究[D]. 广州:华南理工大学,2015.
- [4] 胡 莎,徐向阳,周 宏,等. 基于 SWMM 模型的山前平原城市水系排涝规划[J]. 水电能源科学,2016,34(10):106-109.
- [5] 马建明,喻海军,张大伟,等. 洪水分析软件在洪水风险图编制中的应用[J]. 中国水利,2017(5):17-20.
- [6] 张灵敏. 排水管网水力计算及暴雨积水模拟方法研究[D]. 广州:华南理工大学,2015.
- [7] 黄国如,李碧琦. 深圳民治河流域低影响开发措施水文效应评估[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(3):1-6.
- [8] 韩璐遥,叶兴成,王 飞,等. 基于不同排水片区的低影响开发措施优化方案选取[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(1):160-165.
- [9] 朱呈浩,夏军强,陈 倩,等. 基于 SWMM 模型的城市洪涝过程模拟及风险评估[J]. 灾害学,2018,33(2):224-230.
- [10] RAI P K, DHANYA C T, CHAHAR B R. Coupling of 1D models (SWAT and SWMM) with 2D model (iRIC) for mapping inundation in Brahmani and Baitarani river delta [J]. Natural Hazards, 2018, 92(3):1821-1840.
- [11] 喻海军,马建明,张大伟,等. IFMS Urban 软件在城市洪水风险图编制中的应用[J]. 中国防汛抗旱,2018,28(7):13-17.
- [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 and Technology, 2016, 73(12):3017-3026.
- [13] RAI P K, CHAHAR B R, DHANYA C T. GIS-based SWMM model for simulating the catchment response to flood events[J]. Hydrology Research, 2017, 48(2):384-394.
- [14] 黄子千,庞 博,赵 刚,等. SWMM 在北京市乐家花园排水区的雨洪模拟研究[J]. 中国农村水利水电,2018(5):89-94.
- [15] 陈 杨,俞国青. 明满流过渡及跨临界流一维数值模拟[J]. 水利水电科技进展,2010,30(1):80-84+94.
- [16] ZHONG Ji. General hydrodynamic model for sewer/channel network systems[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 124(3):307-315.
- [17] 冯良记,张明亮. 城市排水管网明满过渡流模型的研究及应用[J]. 中国给水排水,2009,25(23):131-134+137.
- [18] NOTO L, TUCCIARELLI T. DORA algorithm for network flow models with improved stability and convergence properties[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 127(5):380-391.