

SWMM 模型模拟雨洪原理剖析及应用建议

芮孝芳¹, 蒋成煜², 陈清锦², 丁小燕²

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098;

2. 北京世纪千府国际工程设计有限公司江苏分公司, 江苏 南京 210029)

摘要:通过对 SWMM 模型结构和参数的剖析,证明其对城市雨洪形成过程的描述是符合迄今为止人们对城市产汇流规律的认知的。采用的产流分析方法以水文学为基础,汇流分析方法以水力学为基础,其物理概念清晰。包含的参数大多具有几何意义或物理意义,但有些参数之间存在互补性或相依性,这就要求在率定这些参数时应设法减少“异参同效”的影响。汇水区出口的雨洪过程的复合采用同时刻叠加的方法,表明来自不同部分洪水的相互干扰是被忽略的。

关键词:SWMM 模型;城市雨洪;产汇流理论;参数率定

中图分类号:TV122;P333

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2015)04-0001-05

Principle analysis and application of storm water management model on stimulating rainfall-runoff//RUI Xiaofang¹, JIANG Chengyu², CHEN Qingjin², DING Xiaoyan² (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Jiangsu Branch, Century Chief International Architecture Design Limited Company, Nanjing 210029, China)

Abstract: Through the analysis of parameters and structure, it was found that the description of storm water management model (SWMM) on the process of rainfall-runoff formation in urban areas is consistent with urban runoff yield and concentration rule. The physical concept of SWMM is clear because the runoff yield analytical methods are based on hydrology, and concentration analytical methods are based on hydraulics. The parameters of SWMM almost have geometric or physical meanings, but there are some complementary (or dependency) relationships among some parameters. Therefore, it is necessary to reduce the influence of the equifinality for different parameters on parameter calibration. The composition of the process of rainfall-runoff formation in catchment area exit using the method of simultaneous summation shows that the interference between stormflows from different areas is neglected.

Key words: storm water management model (SWMM); rainfall-runoff in urban areas; theories of runoff yield and concentration; parameter calibration

SWMM 是雨洪管理模型英文名称 Storm Water Management Model 的缩略语,它是 1969—1971 年间由美国环境保护署 (Environmental Protection Agency) 资助研制的主要用于城市排水、防涝工程规划、设计、管理的雨洪模型,在全世界有较为广泛的应用^[1-2]。SWMM 模型是一个商业化程度很高的模型,它几乎做到了不了解其原理也能应用它来规划、设计、管理城市排水防涝工程,就像不懂得电视机原理和结构也能操作它收视各种节目一样。但 SWMM 模型毕竟是一个模拟自然界客观存在的雨洪形成机理的模型,雨洪形成机理的复杂性不仅来自复杂多变的气候、气象条件,而且来自复杂多变的下垫面条件和人类经济社会活动对下垫面的影响。现代水文学对这种复杂的雨洪形成机理认识和揭示

的不够完善,使得任何一个雨洪模型都是在一定的气候、气象和下垫面条件下研制而成的,具有明显的个性,而难具有普适性。这种现实就要求人们在使用雨洪模型时,不能仅停留在使用“商品”这样的层面上,而应该重视剖析模型结构的合理性和采用方法的适用性。SWMM 模型是怎样描述城市雨洪形成过程的呢?它选择了什么样的产汇流分析方法?这些方法适用条件是什么?模型包含了哪些参数?这些参数的物理意义是什么?应该怎样来客观评价 SWMM 模型?本文试图通过剖析 SWMM 模型的雨洪模拟部分来回答这些问题,目的是让使用者能更正确、更顺利地使用这种作为“商品”的雨洪模型,或者为使用者进一步修改、完善这样的模型提供必要的水文科学依据。

1 对城市雨洪形成的认识

笔者认为,水文模型结构的正确或合理程度,主要取决于模型研制者对水文现象认识和揭示的深入程度。SWMM 模型的研制者对城市雨洪形成的认识和描述可归纳如图 1 所示,由地形起伏、路网、建筑物布局等联结而成的分水线将城市区域分隔成许多汇水区;根据土地利用情况、产汇流特点和管网布局又可将每个汇水区划分成若干个排水区;每一排水区又划分为透水地面和不透水地面;不透水地面被分成有低洼蓄量的不透水地面和无低洼蓄量的不透水地面;排水区承受的具有一定时空分布的降雨,经由产流和汇流两个阶段转换为排水区的洪水过程;各排水区的洪水过程进入管道和河道后,再通过流量演算至汇水区的出口,叠加即得该汇水区出口的洪水过程。这种对城市雨洪形成的认识和描述,是符合迄今为止人们对降雨径流形成的认识的^[3-4]。

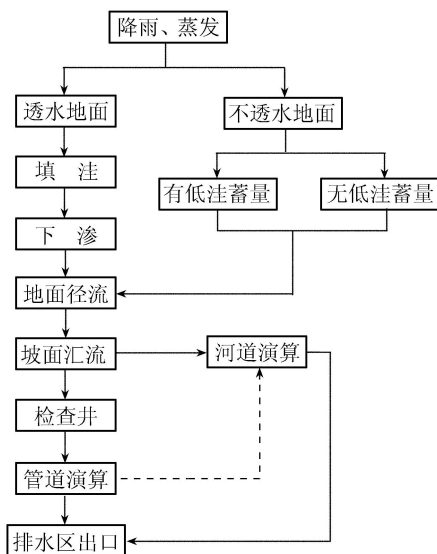


图 1 SWMM 模型对城市排水区雨洪形成的描述

2 产汇流原理

2.1 产流原理

城市之所以产生地面积水和洼地内涝,主要原因是暴雨形成了不能及时排出的地面径流。因此,在城市雨洪模型中重点要解决地面径流的模拟问题。水文学已揭示,自然界形成地面径流有两种机制^[5]:一是超渗机制;二是饱和机制。根据城市区域下垫面特点,产生饱和机制的地面径流并不多见,超渗机制才是城市地区地面径流形成的主要机制。超渗机制的理论基础是由著名水文学家 Horton 于 20 世纪 30 年代奠定的。Horton 提出了下渗能力的概念,并指出,对同一种土壤下渗能力是随土壤湿度的增加而递减的,而对不同种土壤这种下渗能力随

土壤湿度的增加而递减的规律是各不相同的。基于下渗能力的概念,Horton 创建了一个下渗模式:当降雨强度小于或等于地面下渗能力时,全部降雨渗入地面以下的土壤中,无地面径流产生;当降雨强度大于地面下渗能力时,下渗率即为下渗能力,超过下渗能力那部分降雨就成为地面径流。因此,根据 Horton 下渗模式就可得到确定超渗地面径流的公式为

$$r_s = i - f_p \quad (i > f_p) \quad (1)$$

式中: r_s 为地面径流率; i 为降雨强度; f_p 为地面下渗能力。

应用式(1)分析地面径流,关键在于如何确定下渗能力 f_p 。确定下渗能力有理论和经验两条途径。基于 Richards 方程或下渗锋面运动得到的确定下渗能力 f_p 的方法属于理论途径;基于实验或实测资料通过统计综合得到的确定下渗能力 f_p 的方法属于经验途径。在 SWMM 模型中常用以下 Horton 下渗公式确定下渗能力:

$$f_p = f_c + (f_0 - f_c) e^{-kt} \quad (2)$$

式中: f_0 为与初始土壤含水量相应的下渗能力; f_c 为下渗能力的稳定值,是土壤达到田间持水量时的下渗能力,称为稳定下渗率,其值即为饱和水力传导度或渗透系数; k 为下渗能力随时间的递减系数。

式(2)虽为经验性下渗公式,但使用效果一般较好,现在已经证明它是 Richards 方程的一个解。

在 SWMM 模型产流的分析中,除推荐 Horton 下渗曲线法外,还给出了 Green-Ampt 下渗曲线法和 SCS 径流曲线数法,以供选择。

如果要考虑蒸发,则可将式(1)改为

$$r_s = (i - e) - f_p \quad (i - e > f_p) \quad (3)$$

式中 e 为蒸发率。

城市汇水区面积一般很小,其洪水过程一般为短历时暴雨所致,一次洪水经历的时间一般较短,蒸发常常可以忽略不计。因此,一般情况下都是使用式(1)计算地面径流。

2.2 坡面汇流原理

根据 SWMM 模型对雨洪形成的解释^[1],由暴雨产生的地面径流必须先后经过坡面汇流和管道(或河道)汇流两阶段才能成为排水出口的流量过程。坡面汇流分析的目的是将由产流分析得到的地面径流过程转换成为坡面排入管道或河道的洪水过程。这种转换显然必须遵循坡面水流的运动规律。坡面水流可近似作为一维水流运动。坡面的运动流数几乎都大于 $10^{[4]}$,因此,坡面水流就可视作运动波,其运动规律可由以下水量平衡方程和曼宁公式来描写(图 2):

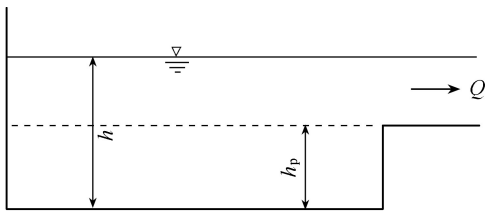


图2 具有洼地蓄水的坡面汇流

$$\frac{dV}{dt} = F \frac{dh}{dt} = Fr_s - Q \quad (4)$$

$$Q = W \frac{1.49}{n} (h - h_p)^{5/3} s^{1/2} \quad (5)$$

其中 $V = Fh$

式中: F 为汇水区面积, m^2 ; V 为汇水区蓄量, m^3 ; h 为汇水区蓄水深, mm ; r_s 为产流分析得到的地面径流率, m/s ; Q 为坡面出流量, m^3/s , 是坡面排入管道或河道的流量; h_p 为汇水区中低洼地积水深, mm , 这部分积水一般不能直接参与坡面汇流排入管道或河道; W 为汇水区特征宽度, m ; s 为汇水区坡度; n 为汇水区综合糙率。

将式(5)代入式(4), 有

$$\frac{dh}{dt} = r_s - \frac{1.49W}{Fn} (h - h_p)^{5/3} s^{1/2} \quad (6)$$

令 $K = \frac{1.49Ws^{1/2}}{Fn}$, 对一个具体的汇水区来说, K

显然可认为是常数, 称 K 为坡面汇流系数。引入 K 后, 式(6)变为

$$\frac{dh}{dt} = r_s - K(h - h_p)^{5/3} \quad (7)$$

式(7)为非线性常微分方程, 在数学上至今仍不能求得其解析解。但式(7)的有限差分形式为

$$\frac{h_2 - h_1}{\Delta t} = \bar{r}_s - K \left(\frac{h_1 + h_2}{2} - h_p \right)^{5/3}$$

也可以写成:

$$\frac{h_2 - h_1}{\Delta t} = \bar{r}_s - K \left(h_1 + \frac{h_2 - h_1}{2} - h_p \right)^{5/3} \quad (8)$$

式(8)是一个非线性代数方程, 在数学上至今虽不能求得其精确解, 但可求得令人满意的近似解。Newton-Raphson 迭代法就是求解式(8)的优良方法。

先由式(8)解出水深过程, 再代入式(5)就可得到流量过程。

2.3 管道(河道)汇流原理

坡面形成的雨洪进入管道或河道就转入管道或河道汇流阶段。这阶段的水流运动可视作为无旁流情况下洪水波的传输, SWMM 模型对于这种传输提供了3种供选择的方法^[1], 即恒定流法、运动波法和动力波法, 其中恒定流法和运动波法都是对真实现象的简化, 唯有动力波法才是能适合复杂水流计算

的方法。动力波的控制方程为下列连续性方程和动力方程构成的完全 St. Venant 方程组:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (9)$$

$$gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial t} + gAS_f = 0 \quad (10)$$

式中: Q 为流量, m^3/s ; A 为过水断面面积, m^2 ; H 为水深, m ; g 为重力加速度, $9.8 m/s^2$; S_f 为摩阻比降, 可由曼宁公式确定:

$$S_f = \frac{J}{gAR^{4/3}} Q |v| \quad (11)$$

其中

$$J = gn^2$$

式中: n 为管道(或河道)的综合糙率; R 为水力半径, m ; v 为断面平均流速, m/s , 取绝对值表示摩阻力方向与水流方向相反。

因为 $\frac{Q^2}{A} = v^2 A$, 故将其代入式(10), 得

$$gA \frac{\partial H}{\partial x} + 2Av \frac{\partial v}{\partial x} + v^2 \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial t} + gAS_f = 0 \quad (12)$$

将 $Q = Av$ 代入式(9), 再两边同时乘以 v , 移项后得

$$Av \frac{\partial v}{\partial x} = -v \frac{\partial A}{\partial t} - v^2 \frac{\partial A}{\partial x} \quad (13)$$

将式(13)代入式(12), 有

$$gA \frac{\partial H}{\partial x} - 2v \frac{\partial A}{\partial t} - v^2 \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial t} + gAS_f = 0 \quad (14)$$

式(14)的有限差分形式为

$$Q_{t+\Delta t} = Q_t - \frac{J\Delta t}{R^{4/3}} |\bar{v}| Q_{t+\Delta t} + 2\bar{v}\Delta A + \bar{v}^2 \frac{A_2 - A_1}{L} \Delta t - g\bar{A} \frac{H_2 - H_1}{L} \Delta t \quad (15)$$

式中: 下标 1 和 2 分别表示管段和河段上、下节点; 上横线表示 Δt 时段的平均值; L 为管段和河道长, m 。

由式(15)可得 $Q_{t+\Delta t}$ 的表达式为

$$Q_{t+\Delta t} = \frac{1}{1 + (J\Delta t/R^{4/3}) |\bar{v}|} \cdot \left(Q_t + 2\bar{A}\Delta A + \bar{v}^2 \frac{A_2 - A_1}{L} \Delta t - g\bar{A} \frac{H_2 - H_1}{L} \Delta t \right) \quad (16)$$

此外, 在管道或河道的节点, 水流还必须满足下列连续性条件:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\sum Q_i}{\omega} \quad (17)$$

式中: H 为节点水位(或水头), m ; Q_i 为进或出节点的流量, m^3/s ; ω 为节点处的自由水面面积, m^2 。式(17)的有限差分形式为

$$H_{t+\Delta t} = H_t + \frac{\sum Q_i \Delta t}{\omega} \quad (18)$$

将式(16)和式(18)联立,即可求得每个管段或河段的流量和节点水位(或水头)。

3 应用中的几个主要问题

3.1 下垫面及管网信息的提取

根据数字高程模型提取汇水区域的范围,计算汇水区域的面积、平均坡度等,并在汇水区域内找出各排水区坡面水流流入的最合理检查井(图3)。

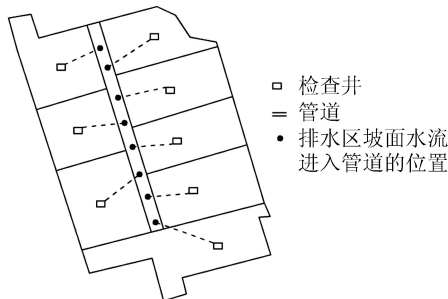


图3 某汇水区划分的排水区

利用卫星遥感地图,提取研究区域内的不透水面积比例、不透水面积中无低洼蓄量的面积比例等。普通屋顶、沥青道路等属于不透水地面;绿地、花园等属于透水地面。

收集研究区域排水系统的资料及有关图表,提取管道或河道的长度、形状、管径或断面、糙率、检查井井底标高、检查井与管道的空间位置等,结合数字高程模型将雨水管网的平面布设和有关下垫面情况绘制在 Arcgis 软件中^[6]。

3.2 模型参数的设定

SWMM 模型包含有 12 个参数(表 1)。这些参数按确定方法的不同可分为几何参数和率定参数两类。几何参数包括汇水区面积、特征宽度、平均坡度、不透水地面比例等,率定参数包括不透水地面低洼蓄量、透水面积低洼蓄量、初始下渗能力、稳定下渗率、下渗能力衰减系数、土壤从饱和到干燥所需的时间、不透水地面糙率、透水地面糙率等。

表 1 SWMM 模型参数及建议取值范围

参数名称	符号	单位	建议取值范围
汇水区面积	F	m^2	
特征宽度	W	m	
平均地面坡度	S	$\%$	
不透水地面比例	N	$\%$	
不透水地面低洼蓄量	h_p	mm	1 ~ 3
透水地面低洼蓄量	h_q	mm	3 ~ 10
初始下渗能力	f_0	mm/h	76.2
稳定下渗率	f_c	mm/h	3.81
下渗能力衰减系数	k	L/h	2 ~ 7
土壤从饱和到干燥所需时间	t	d	2 ~ 7
不透水地面糙率	n_2		0.01 ~ 0.015
透水地面糙率	n_1		0.1 ~ 0.3

特征宽度 W 是 SWMM 模型的一个重要参数,

对计算结果可能有较大影响,一般按下式确定:

$$W = C\sqrt{A} \quad (19)$$

式中: A 为汇水面积, m^2 ; C 为形状系数,根据经验,建议其取值范围为 $0.2 < C < 5$ 。

对于需通过率定确定的参数,根据前人经验在表 1 中列出了建议取值范围,供参考。

实践表明, n_1 、 n_2 、 h_q 、 h_p 、 k 和 t 是 SWMM 模型的敏感性参数。

3.3 误差评定

评定 SWMM 模型模拟城市雨洪效果的指标是模拟误差。洪水径流量的模拟误差一般用相对误差 δ_v 表示,计算公式为

$$\delta_v = \frac{R_0 - R_c}{R_c} \times 100\% \quad (20)$$

式中 R_0 和 R_c 分别为汇水区一次暴雨的实测径流深和模拟计算的径流深。

洪峰流量的模拟误差一般也用相对误差 δ_m 表示,计算公式为

$$\delta_m = \frac{Q_{m0} - Q_{mc}}{Q_{m0}} \times 100\% \quad (21)$$

式中 Q_{m0} 和 Q_{mc} 分别为汇水区实测洪峰流量和模拟计算的洪峰流量。

雨洪过程模拟精度一般采用 Nash-Sutcliffe 确定性系数 N_s 表示,计算公式为

$$N_s = 1 - \sum_{i=1}^N \frac{(Q_{oi} - Q_{ci})^2}{(Q_{oi} - \bar{Q}_0)^2} \quad (22)$$

式中 Q_{oi} 和 Q_{ci} 分别为汇水区第 i 时刻实测洪水流量和模拟计算的洪水流量; \bar{Q}_0 为汇水区不同时刻 i 实测洪水流量的均值; n 为雨洪过程的时段数。 N_s 值越接近 1, 模拟计算精度就越高。

我国国家规范^[7]规定,若 $\delta_v \leq 10\%$ 、 $\delta_m \leq 20\%$ 、 $N_s \geq 0.7$, 则率定所得模型参数才是有效的,模型模拟计算结果才可用于规划设计或预报。

4 结论及建议

SWMM 模型基本计算单元的尺度为排水区尺度,一般每个排水区面积仅为几公顷到几十公顷不等。虽然从客观上说,这就为 SWMM 模型通向分布式水文模型提供了条件,但目前所使用的商业化的 SWMM 模型却不能称之为分布式雨洪模型,因为分布式雨洪模型必须能考虑输入空间分布和模型参数空间变化对雨洪形成的影响。商用的 SWMM 模型现在还达不到这样的要求。

SWMM 模型所选用的产汇流分析方法,大多数物理概念是清晰的,理论根据是合理的,但都有其各自的适用条件。在使用中,如果发现这些分析方法

不太适用于所要解决的问题,可以酌情更换其他更合适的分析方法或对原模型结构作必要的改进。

SWMM 模型包含的参数有些是互补的或者是具有较强相依性的,这就使得在率定模型参数时不可避免出现“异参同效”问题^[8]。因此,为不使率定所得的参数值背离物理意义,根据参数物理意义或前人经验对参数值设定合理的取值范围,以及对率定结果进行去伪存真的分析,就显得十分必要。

SWMM 模型对城市雨洪形成的描写是建立在线性系统思维基础上的,与现有的绝大多数雨洪模型一样,它只能适用于符合线性系统特征的雨洪形成问题,对于非线性作用强烈的雨洪形成问题,它的使用效果将不可能理想。

现行用于城市排水工程规划、设计、管理的合理化公式,只能给出雨洪的峰值,而不能确定雨洪过程。随着城市排水、防涝标准的提高,以及对城市化和低影响开发的水文效应和环境效应进行评价的日益迫切的要求,合理化公式已无法完全满足要求。推求符合设计标准的雨型及相应的设计雨洪过程,越来越显得迫切,越来越显得重要^[9]。笔者认为,SWMM 模型不失为一个可以选择的由暴雨过程推求雨洪过程的城市雨洪模型。

参考文献:

[1] ROSSMAN L A. Storm water management model: User's manual version 5.1 [EB/OL]. (2009-02-15). http://www.epa.gov/ednrmrmed/models/sum/epaswmm5_manual.pdf.

[2] 董欣,陈吉宁,赵冬泉. SWMM 模型在城市排水系统规划中的应用[J]. 给水排水, 2006, 32(5): 106-109.

(DONG XIN, CHEN Jining, ZHAO Dongquan. Application of swmm model on urban sewer system planning[J]. Water & Wastewater Engineering, 2006, 32(5): 106-109. (in Chinese))

[3] 芮孝芳. 流域水文模型研究中的若干问题[J]. 水科学进展, 1997, 8(1): 94-98. (RUI Xiaofang. Some problems in research of watershed hydrological model[J]. Advances in Water Science, 1997, 8(1): 94-98. (in Chinese))

[4] 芮孝芳. 产汇流理论[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.

[5] 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013.

[6] 赵冬泉, 陈吉宁, 佟庆远, 等. 基于 GIS 的城市排水管网模型拓扑规则检查和处理[J]. 给水排水, 2008, 34(5): 106-109. (ZHAO Dongquan, CHEN Jining, TONG Qingyuan, et al. Inspection and modification of GIS based topological relationships in urban drainage modeling[J]. Water & Wastewater Engineering, 2008, 34(5): 106-109. (in Chinese)).

[7] GB/T 22482—2008 水文情报预报规范[S].

[8] 赵冬泉, 王浩正, 陈吉宁, 等. 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): 45-51. (ZHAO Dongquan, WANG Haozheng, CHEN Jining, et al. Parameters uncertainty analysis of urban rainfall-runoff simulation[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(1): 45-51. (in Chinese)).

[9] 芮孝芳, 蒋成煜, 陈清锦. 论城市排水防涝工程水文问题[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(1): 42-48. (RUI Xiaofang, JIANG Chengyu, CHEN Qingjin. Hydrological problems for engineering of drainage and water log prevention in urban areas [J]. Advances in Sciences and Technology of Water Resources, 2015, 35(1): 42-48. (in Chinese)).

(收稿日期: 2015-03-13 编辑: 熊水斌)

· 简讯 ·

中国水利学会 2015 学术年会将于 2015 年 10 月下旬在南京召开

由中国水利学会主办, 河海大学、南京水利科学研究所、江苏省水利学会承办的中国水利学会 2015 学术年会将于 2015 年 10 月 26—28 日在南京召开。本次年会主题为水安全与水科技, 拟邀请有关领导作主旨报告, 邀请水利部、中国科学院、中国工程院等有关方面的知名专家、院士围绕防洪安全、供水安全以及水与粮食安全、经济安全、生态安全等方面作大会特邀报告。

年会拟设中国原水论坛、跨流域调水、地下水、疏浚与淤泥处理利用 4 个分会场及 1 个国际分会场, 主要围绕饮用水安全、跨流域调水、地下水资源安全、河湖水环境治理、变化环境下的水科学与水安全等方面开展学术研讨。年会将正式出版论文集。

(本刊编辑部供稿)