

子汇水区的划分对 SWMM 模拟结果的影响研究

■ 赵冬泉 陈吉宁 / 清华大学环境科学与工程系

佟庆远 王浩正 曹尚兵 盛政 / 北京清华城市规划设计研究院环境与市政所

摘要 利用 SWMM 模型可以对城市排水系统进行动态模拟,可以辅助解决与城市排水系统相关的水量与水质问题.在使用 SWMM 进行模拟时,子汇水区划分方式和子汇水区之间流经路径的不同,将对模拟结果的时间过程曲线有很大的影响.本文主要分析在进行子汇水区划分时,考虑汇水区地形数据空间分布不均匀性,子汇水区划分的细致程度以及之间的流经路径对模拟结果中坡面径流总量、坡面径流量峰值以及峰值出现的时间产生的影响.并在此基础上,以简化 SWMM 输入数据并保证模拟结果的精度为原则,对子汇水区的合理划分程度进行了探讨.

关键词 SWMM 子汇水区 坡度 流经路径

由于城市自身的特点以及城市化的发展使城区不透水地面比例增大,城市暴雨径流量随之增加,而随着环境污染防治工作与研究的深入,城市点源污染得到了有效的控制,从而使得径流污染的威胁越来越突出.利用数学模型模拟城市非点源污染的产生和输移规律是研究污染来源和扩散方式的有效手段^[1].

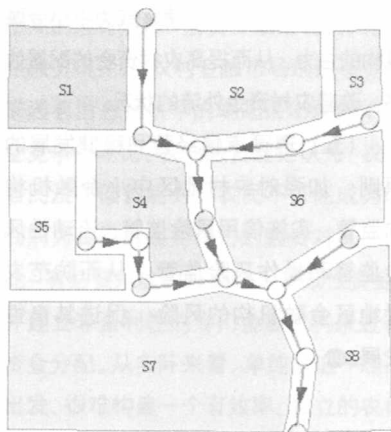


图1 SWMM 范例城市排水系统的结构

SWMM 是美国环保局推出的暴雨径流管理模型,是最早提出的、最广泛应用于城市非点源产生以及在排水系统中迁移转化的模型之一.此模型可以对单场降雨或者连续降雨而产生的坡面径流进行动态模拟,进而解决与城市排水系统相关的水量与水质问题^[2].

在使用 SWMM 进行模拟时首先需要对模型的计算域进行离散,即将整个汇水区划分成若干子汇水区,并对每个子汇水区的水文特征差异性进行概化.由于模型是在概化后的子汇水区的基础上进行模拟,子汇水区的离散程度将对模型结果产生重要影响.很多研究都分析了子汇水区的离散水平对分布式水文模型模拟结果的影响^[3-4].Mazion and Yen (1994) 在同一理想汇水区上测试了子汇水区的细化程度对三种水文模型的影响,研究发现,即使是简单的模型,子汇水区不同程度的划分也会对模型结果

产生影响^[4].由于子汇水区的划分是一项需要消耗大量人力和时间的工作,会直接影响模型的运行成本,因此也有人从模型运行成本的角度讨论了分布式水文模型亚流域的合理划分水平.

和其他分布式水文模型不同的是 SWMM 主要用于对城市水系进行模拟^[5],城市水系统和天然流域有着不同的特征,SWMM 中子汇水区的合理划分方法也与其他模型不同.本文基于 SWMM 模型在城市排水系统模拟中实际应用时遇到的问题,分析了不同地形条件下汇水区不同细化程度以及流经路径对模拟结果的影响,并对 SWMM 中子汇水区的合理划分程度进行了探讨.

1 SWMM 模型计算方法

SWMM 主要通过模拟地面产流过程和地表汇流过程来模拟城市的降雨一

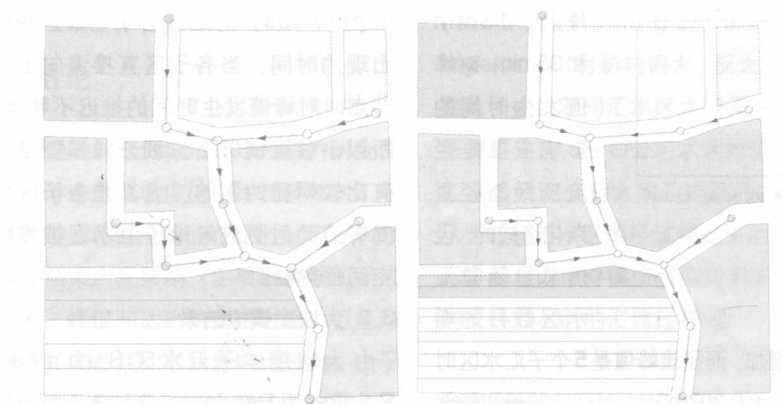


图2 汇水区 S7 的两种不同划分方式

径流特征。

地表产流过程主要描述降雨落到地面产生有效径流的过程。SWMM中有三种可选的渗透模式：Horton 模式，Green-Ampt 模式和 SCS 模式。由于三种模式中，Green-Ampt 模式对土壤资料要求很高，SCS 模式只反映流域下垫面状况不反映降雨过程而只适用于大流域，在城市小流域降雨径流模拟中经常采用 Horton 模式，本文重点介绍 Horton 模式的原理。

$$I_t = f_o + (f_i - f_o)e^{-at} \quad (1)$$

式中， f_o 为起始入渗率， f_i 为最终入渗率， a 为入渗递减率， I_t 为 t 时刻入渗率。

地表汇流过程是指将各个部分降雨汇集到出口节点排入城市河网或雨水管网的过程。SWMM 中地表径流模拟采用非线性水库模型，主要控制方程为连续方程和曼宁方程[9]。

$$\frac{dV}{dt} = A \frac{dd}{dt} = Ai^* - Q \quad (2)$$

$$Q = W \frac{1.49}{n} (d - d_p)^{5/3} S^{1/2} \quad (3)$$

式中， V 为子汇水区集水量； d 为水深； t 为时间； A 为子汇水区面积； i^* 为有效降雨强度； Q 为流量； W 为汇水区域的特征宽度； n 为曼宁粗糙系数； d_p 为洼地蓄积量； S 为坡度。

2 研究方法

地形是管网子汇水区划分中重要的依据之一。在建立 SWMM 模型时，汇入一个节点的单一汇水区往往具有地形特征空间分布的不均匀性，对该汇水区进一步划分，可以获得物理意义更接近实际的子汇水区相关属性参数。本文主要通过对比汇水区的不同划分策略，分析了汇水区坡度分布的空间差异性以及流经

路径对模型结果的影响。

本研究采用 SWMM 中的范例城市排水系统进行研究，如图 1 所示。该排水系统由 8 个子汇水区，13 根管道和 14 个节点组成。其中汇水区 S7 为本研究设定的细分研究区域，在下面的讨论中，分别将 S7 平均划分为 5 个和 10 个汇水区（如图 2 所示）。SWMM 根据地面的透水性性质将汇水区分成可渗透子区和不可渗透子区，并通过 Subarea Routing 参数来标识各子区之间的流经路径^[5]。该参数有三个备选值分别为：Pervious、Impervious 和 Outlet。Pervious 指两个子区之间的坡面径流由不可渗透区流向可渗透区；Impervious 指两个子区之间的坡面径流的流动是由可渗透区流向不可渗透区；Outlet 指所有子区径流都直接流向汇水节点。本研究将比较大小坡度两种坡度情况下 Subarea Routing 参数分别为 Pervious、Impervious 和 Outlet 时的模拟结果，综合分析由于坡度空间差异性导致的子汇水区细分和对流经路径的选择对模拟结果的影响，并讨论子

表 1 研究区 (S7) 在各种情景下模拟结果比较

分类	子汇水区 个数	总坡面径 流量/ m ³	最大坡面径 流量/ m ³ /s	最大径流量 发生时间
%slope=0.3	1	2914.097	0.269	03:15
Subarea	5	3068.898	0.307	03:25
Routing=Pervious	10	3071.211	0.301	03:50
%slope=0.3	1	3139.207	0.275	03:05
Subarea	5	3171.277	0.301	03:15
Routing=Impervious	10	3151.387	0.297	03:40
%slope=0.3	1	3129.956	0.290	03:00
Subarea	5	3182.687	0.325	03:00
Routing=Outlet	10	3175.286	0.320	03:15
%slope=6	1	3183.920	0.359	03:00
Subarea	5	3228.017	0.361	03:00
Routing=Pervious	10	3215.682	0.327	03:20
%slope=6	1	3302.643	0.348	03:00
Subarea	5	3279.823	0.358	03:00
Routing=Impervious	10	3252.995	0.325	03:20
%slope=6	1	3302.643	0.352	03:00
Subarea	5	3285.066	0.363	03:00
Routing=Outlet	10	3268.414	0.361	03:00

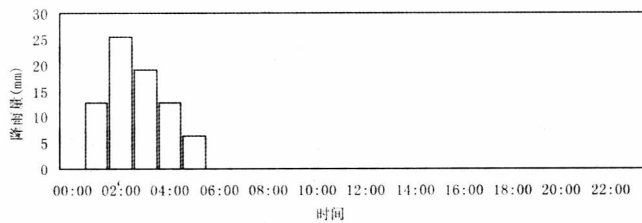


图3 研究区24小时雨量图

汇水区的合理划分水平。

本研究模拟过程采用的降雨历时6小时,总降雨量76.2mm,时间序列如图3所示。为了研究方便,参考SWMM5 user manual^[6]本研究将Horton入渗参数设定为:最大入渗率17.78mm/h,最小入渗率7.62mm/h,入渗递减率为4.14;可渗透区的曼宁粗糙系数设为0.1,不可渗透区曼宁粗糙系数为0.013;可渗透区和不可渗透区洼地蓄积量都为1.27mm。本研究需要比较不同坡度下SWMM运行结果。由于从排除地面径流的要求而言,城市道路纵坡最好在0.3~6%范围内[7],考虑一般城市道路的实际坡度,本研究中小坡度的平均值设为0.3%,大坡度地面平均值为6%。

3 结果分析

模型结果时间序列为每5min读取一个值,各种设计情景下汇水区S7坡面径流结果见表1。汇水区产流总量等于总降雨量减去总损失量(包括总渗透量、总蒸发量和总洼地蓄积量)。由于本研究不考虑蒸发过程,因此,汇水区出水口坡面径流可以综合反映该汇水区的降雨—径流过程。

3.1 小坡度模拟结果

小坡度,子汇水区Subarea Routing为Pervious,3种不同划分程度时S7出水口的流量过程线见图4。从图中可以明显看出,子汇水区数目对径流量曲线的形状影响不大;子汇水区个数的增加会推迟流量峰值发生的时间,从表1可以看出,5个子汇水区和10个子汇水区分

别而增加,而径流峰值是5个子汇水区时最大,为0.307m³/s,对径流总量和峰值的影响主要是坡面径流流经不同坡度地面时的洼地蓄积量和渗透量变化引起的。

小坡度,子汇水区Subarea Routing为Impervious,3种不同划分程度时S7出水节点的流量过程线见图5。汇水区细化对模拟结果最明显的影响是推迟峰值发生的时间,子汇水区数目为5和10时分别推迟了10min和35min,与Subarea Routing为Pervious时影响程度一样,主要是因为两种情况下,细分对流经路径的复杂化程度一样;总坡面径流量和最大坡面径流量都是子汇水区个数为5时最大,与Subarea Routing为Pervious时的差异不大。

小坡度,子汇水区Subarea Routing为Outlet,3种不同划分程度时S7出水节点的流量过程线见图6。汇水区细分对模型的影响与Subarea Routing为Impervious时相似。但是,细分对坡面径流峰值推迟的影响比Impervious时小,子汇水区个数为10时只推迟10min,为5时甚至没有推迟。当各子区内的径流都直接流向出水口时,汇水区细分对径流流经路径的复杂化程度降低,所以对径流峰值发生时间的影响也变小。

对比三种情况下模拟结果可以发现三种情况下子汇水区数目对径流曲线形状的影响差异不大,主要影响及差异表现在以下方面:(1)对汇水区细分会增大研究区坡面径流总量和径流量峰值,但并不是划分越细径流总量增加量越大。(2)当各子区之间有流动(即Subarea Routing为Pervious或

推迟了15min和35min,对峰值发生时间的影响主要是径流流经路径复杂化造成的。径流总量随着汇水区数目的增

Impervious)时细分会明显推迟峰值出现的时间,当各子区直接流向出口节点时对峰值发生时间的推迟不明显。所以小坡度情况下,细分对模型结果有比较明显的影响,尤其是各子区之间有流动时更应考虑子汇水区坡度的空间差异性。

3.2 大坡度模拟结果

大坡度,子汇水区Subarea Routing为Pervious,3种不同划分程度时S7出水节点的流量过程线见图7。从图中可以看出,5个子汇水区的细分程度对径流峰值发生时间没有影响,10个子汇水区时推迟了15min。5个子汇水区时径流峰值和坡面径流总量最高。对峰值时间影响比小坡度时明显减小的原因主要是大坡度下坡面径流速度较快,坡面径流汇集时间短造成的。

大坡度,子汇水区Subarea Routing为Impervious,3种不同划分程度时S7出水节点的流量过程线见图8。汇水区细化程度对径流的影响与Subarea Routing为Pervious时影响差异很小,与大坡度时径流汇集速度快有关。

大坡度,子汇水区Subarea Routing为Outlet,3种不同划分程度时S7出水节点的流量过程线见图9。细分对坡面径流峰值发生时间没有影响。这是由大坡度下地表汇流快和子区之间没有径流从而对径流途径复杂化程度小造成的。

对比大坡度与小坡度时SWMM模拟的结果发现,大坡度与小坡度时子汇水区的划分对汇水区坡面径流的影响都比较复杂。但是大坡度时坡面径流总量和峰值都比小坡度时大,大坡度时子汇水区的细化程度对模型峰值到达时间的影响明显比小坡度时小。由于子汇水区个数对坡面径流总量到达峰值的时间有影响,而峰值发生时间是城市排水管网预测中很重要的结果,所以,如果汇水区的坡度空间分布不均匀,尤其在地面坡度较小时和子汇水区内部流经路径比较复杂时应考虑对子汇水区进行细分。

4 结论

通过对范例城市排水系统的研究发现,考虑地表坡度的空间差异性对汇水区的细分和流经路径的细化会对SWMM模拟结果产生影响,主要影响坡面径流总量、峰值和达到峰值的时间,但是对坡面径流曲线的形状影响比较小。由于SWMM模型是基于物理过程的复杂模型,不同划分方式对SWMM模拟结果的影响很复杂,本文通过对比研究,得出以下2点结论:(1)不同坡度下汇水区细分对模型结果影响差异很大,地面坡度较小时影响较大,因此,对平缓地面进行汇水区划分应更仔细的考虑地面坡度因素。(2)各子汇水区之间流动方式会对模型产生影响,尤其对径流峰值发生时间产生影响,子区之间有径流

(Subarea Routing为Pervious或Impervious)时影响很大,反之则较小。因此,如果不同汇水区之间具有地表坡度的差异性,在划分汇水区时应考虑子汇水区的细分和之间汇流路径的细化,从而使得汇水区的径流特征更加符合实际过程,以使得模型模拟结果更为准确的反映汇水区的汇流过程。

参考文献

- [1] 宫莹, 阮晓红, 胡晓东. 我国城市地表水环境非点源污染的研究进展[J]. 中国给水排水, 2003, 19(3): 21-23.
- [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.
- [3] 郝芳华, 张雪松, 程红光, 赵卫民, 刘虹. 分布式水文模型流域合理划分水平刍议[J]. 水土保持学报, 2003, 17(4): 75-78.

[4] Carpenter T M, Georgakakos. K P. Discretization scale dependencies of the ensemble flow range versus catchment area relationship in distributed hydrologic modeling[J]. Journal of Hydrology, 2006, 328: 242-257.

[5] Mazion E, Yen B C. Computational Discretization Effect on Rainfall-Runoff Simulation[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1994, 120, (5): 715-734.

[6] Huber W C, Dickinson R E. Storm Water Management Model User's Manual, Version 4[R]. Environmental Protection Agency, Georgia, USA, 1992.

[7] Rossman L A. Storm water management model user's manual. Version 5.0[R]. Water Supply and Water Resources Division National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati, USA, 2005.

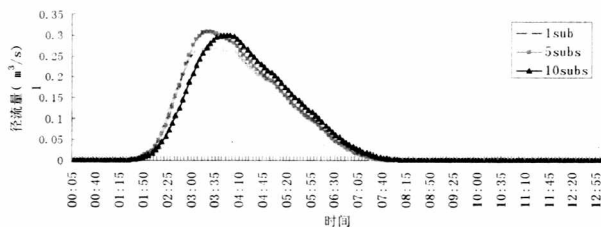


图4子汇水区 Subarea Routing 为 Pervious 时 S7 出水口的流量过程线 (小坡度)

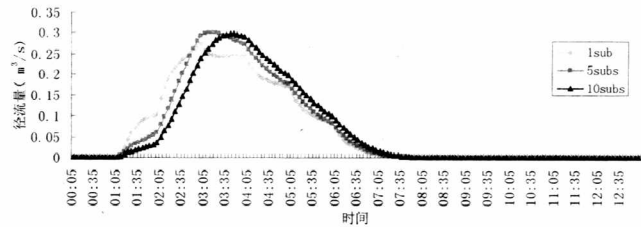


图5子汇水区 Subarea Routing 为 Impervious 时节点 S7 出水口的流量过程线 (小坡度)。

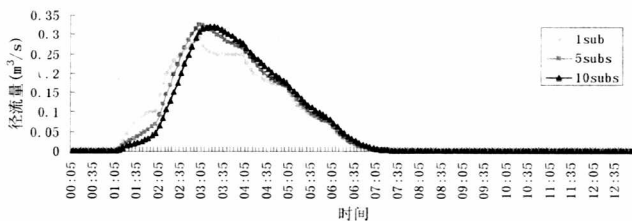


图6子汇水区 Subarea Routing 为 Outlet 时节点 S7 出水口的流量过程线 (小坡度)。

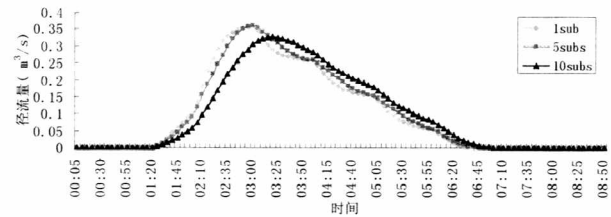


图7子汇水区 Subarea Routing 为 Pervious 时 S7 出水节点的流量过程线 (大坡度)。

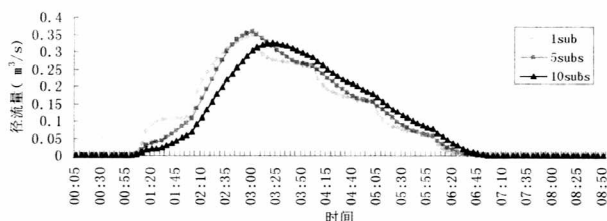


图8子汇水区 Subarea Routing 为 Impervious 时 S7 出水节点的流量过程线 (大坡度)。

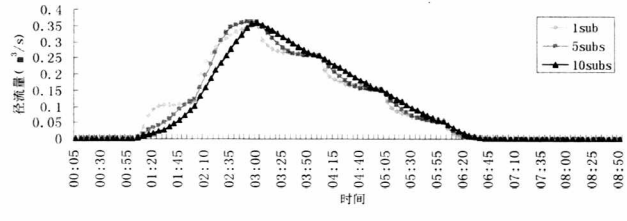


图9子汇水区 Subarea Routing 为 Outlet 时 S7 出水节点的流量过程线 (大坡度)。