

城市雨水管理

汇水区划分对 InfoWorks ICM 水力模拟结果的影响

言 铭¹, 魏忠庆^{1,2}, 黄永捷², 黄翔峰¹, 陆丽君¹

(1. 同济大学环境科学与工程学院 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092; 2. 福州城建设计研究院有限公司, 福建 福州 350001)

摘 要: 利用 InfoWorks ICM 模型建立 F 市某建成区的排水管网模型, 基于参数灵敏度分析, 比较泰森多边形、GIS 数字水文和人工绘制这 3 种汇水区划分方式以及高、中高、中、低这 4 种划分精度对模拟结果的影响。结果表明, 不同划分方式和精度主要对模型中的汇水区性状参数造成扰动, 导致模型模拟结果存在差异。在各降雨强度下, 产流表面坡度对峰现时间和积水量均有一定影响, 受其影响较小的平原城市地区宜采用泰森多边形法, 地形起伏较大区域则宜选用 GIS 划分方法; 汇水区面积和汇流宽度对峰值流量、径流总量和积水量均有显著影响, 且对积水量起决定性作用; 以排涝防洪为主导需求时, 宜采用中高或高精度划分汇水区。在模型建立过程中应综合考虑研究目标、区域尺度和降雨特征等合理选取汇水区划分方式与精度。

关键词: 城市雨洪管理模型; InfoWorks ICM; 汇水区划分; 灵敏度分析

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)01-0111-07

Impact of Catchment Division on InfoWorks ICM Hydraulic Simulation

YAN Ming¹, WEI Zhong-qing^{1,2}, HUANG Yong-jie², HUANG Xiang-feng¹, LU Li-jun¹

(1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Fuzhou Urban Construction Design and Research Institute Company Limited, Fuzhou 350001, China)

Abstract: A sewerage system in F city was modeled in InfoWorks ICM. Three methods for the division of the drainage catchments, namely Thiessen polygon, GIS digital hydrological analysis and manual division, and four levels of division precisions, including high, medium high, medium and low, were utilized to conduct a sensitivity analysis on the simulation results. The results showed dependency to division methods and precisions. The Thiessen polygon method and the GIS analysis method were recommended for use in the plain urban area and the undulating terrain respectively, because the catchment slope demonstrated some impacts on the peak time and the flood volume. The catchment area and width showed significant influences on the peak flow, total runoff, and flood volume. High or medium high division precision was recommended when flood control and drainage were the top priorities. Study objectives, regional scales, and rainfall characteristics were critical factors in choosing the division method and precision of catchment in the process of model establishment.

Key words: urban stormwater management model; InfoWorks ICM; catchment division; sensitivity analysis

城市地表和排水系统是一个复杂的体系,在城市雨洪模型建立过程中各要素的不确定性会直接导致其各个计算模块不确定性的积累和传递,最终影响到模型输出结果的准确性^[1]。因此,模型要素的准确性是构建模型时首先需要解决的问题,是保障模拟精度的基础。汇水区是众多模型构建要素中的一个基础要素,目前汇水区划分方式中应用较为广泛的方法有泰森多边形划分^[2]、GIS划分^[3]和人工划分^[4]这3种。有研究表明,汇水区划分方式及划分精度均会对模拟结果产生一定影响^[5-6]。而精细的汇水区划分需要投入大量的时间和人力,直接影响到模型的运行成本。因此,以简化模型输入数据并保证模拟精度为原则的汇水区划分方法需要进一步研究。

笔者选用 InfoWorks ICM 城市雨洪数字模型,结合参数灵敏性分析结果,检验和剖析在 InfoWorks ICM 模型中采用不同子汇水区划分方式和精度对水力模拟结果的影响,探索汇水区划分方式及精度与模拟过程的内在关联,以期合理选择汇水区划分方式及精度提供理论依据。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于 F 市西郊,总面积约为 215 hm²,其东南侧和西北侧各有一座山,地形起伏较大,地面标高在 6.0~123.4 m 之间。产流表面主要有沥青路面、屋面、绿地和山体。根据实际用地情况,将区域服务面积划分为山地、居民区、别墅区、军区、商业区、公共区 6 种用地类型。区域排水主要通过支路收集区域雨水,支路汇入主干渠后排入排涝泵站,最终进入受纳水体。

1.2 模型构建

1.2.1 排水系统

研究区域排水体制为分流制,对区域内实际排水管网进行勘察,明确区域排水设施的拓扑关系,将管网数据等效概化后导入模型,构建完整的排水管网体系。模型中共有检查井 313 个,管道 313 根、总长度为 9 264 m。

1.2.2 参数设置

采用 ArcGIS 监督分类对各用地类型的产流表

面组成比例进行解析。在此基础上,根据文献调研,确定不同下垫面的产汇流模型及其相关参数^[7-9]。对于产流模型,透水面选取 Horton 模型,不透水面选取 Fixed 模型;对于汇流模型,选用 SWMM 非线性水库进行计算。

1.2.3 降雨资料

采用 F 市的暴雨强度公式,如式(1)所示,以芝加哥雨型为降雨时程分布依据,雨峰位置 $r=0.4$,降雨历时为 2 h,模拟重现期为 3、5、10 和 50 年的设计降雨,模拟时长为 3 h。

$$i = \frac{14.715(1 + 0.633 \lg P)}{(t + 11.951)^{0.724}} \quad (1)$$

式中: i 为降雨强度,mm/min; P 为设计重现期,年; t 为降雨历时,min。

1.2.4 模型率定

本研究采用两场实际降雨事件对模型进行率定,从模拟出流量、积水深度和主要积水范围这 3 方面与实际情况进行对比较正,调整相关参数值,直至模拟结果与实际结果相符。

1.3 研究方法

1.3.1 汇水区划分方式

采用 3 种不同的方式进行汇水区划分,具体做法如下:

① 基于 InfoWorks ICM 模型内嵌的泰森多边形划分方式。在确定好排水管网数据与汇水边界的模型中,选择模型工具栏中的“在指定多边形内创建 Thiessen polygons 汇水区”,即可快速生成以检查井为划分单元的泰森多边形子汇水区。

② 根据现场勘测数据进行手工绘制。参照解智强等人^[4]用 InfoWorks ICM 对昆明市主城区进行建模时的做法,对现状管网进行现场勘测,核验主要市政管网接入点,并以此为基础,划分实际收水分区,从而实现手动绘制子汇水区。

③ 基于 GIS 的数字水文分析法进行汇水区划分。在 Duke 等人^[10]提出的 RIDEM 模型的基础上,参照左俊杰等人^[11]在模型中将影响地表径流途径和方向的地物要素叠加到 DEM 中,以提高、细化 DEM 精度的方式,进一步以城市排水设施单体服务面积为分配权重,对汇水区包含多个检查井和管

网的情况进行配流,最终完成汇水区的划分。

1.3.2 汇水区划分精度

采用 GIS 划分汇水区时,可以通过修改 Flow Accumulation 参数值,形成不同划分精度的结果^[11]。本研究中将划分精度分为高、中高、中、低这 4 种。具体做法如下:

① DEM 修正。采用 Arc Hydro Tools 工具,在无洼地 DEM 基础上,将影响地表径流途径和方向的地物要素(道路、建筑物、水系等)叠加到 DEM 中,使 DEM 更接近真实地表信息。

② 流向分析。生成网格流向分析图,每个网格值表示其流向相邻像元的方向。

③ 汇流能力计算。采用水文分析功能计算汇流累积量,再使用地图代数中的栅格计数器提取汇流网络,通过变化计数表达式中的 Flow Accumulation 阈值(本研究中设置 4 000、8 000、16 000、32 000 这 4 个梯度),达到提取不同精度汇流网络的目的。

④ 子汇流区域划分。通过分水岭工具提取汇流区域边线,生成各精度子汇水区矢量数据。

1.3.3 汇水区性状参数灵敏度分析

Moris 筛选法是目前应用较广泛的一种局部灵敏度分析方法,由于其计算量小、易于操作而被广泛用于模型的校核及参数识别中^[12]。本研究采用 Moris 法进行参数敏感性分析。计算时,对于目标参数,分别以基准值的 50%、75%、100%、150% 和 200% 对其进行扰动,其他参数保持初始值不变。然后计算 Moris 系数的多个平均值,求得敏感性判别因子 S 。根据敏感性判别因子的大小,将参数的敏感性分为 4 类: $|S| \geq 1$ 为高敏感性参数; $0.2 \leq |S| < 1$ 为敏感参数; $0.05 \leq |S| < 0.2$ 为中敏感参数; $0 \leq |S| < 0.05$ 为不敏感参数。参数敏感性判别因子的符号代表了其对目标函数影响的正负。当 S 为负值时,说明该参数与目标函数负相关;当 S 为正值时,说明该参数与目标函数正相关。

2 结果与讨论

2.1 参数灵敏性分析结果

参数灵敏性分析可以检验参数变化对模型结果的影响情况。对模拟结果影响不大的低敏感参数,可以选取经验值;而对模拟结果影响较大的高敏感参数则需要精确校准,这样既可以保证模拟的准确性,又可以在很大程度上减少模型参数率定和验证的工作量^[13]。

InfoWorks ICM 模型中涉及的主要水文水力参数有 14 个,而汇水区划分方式及精度主要影响的是其中的汇水区性状参数^[14],即汇水区面积(Area)、产流表面坡度(% slope)和汇流宽度(Dimension)。其中,汇流宽度与汇水区面积和坡度均有关系,对计算结果有一定影响。InfoWorks ICM 模型中子汇水区特征宽度的计算方法如下:

$$W = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (2)$$

式中: W 为汇流宽度, m; A 为汇水区面积, m^2 。

本研究中这 3 个参数的具体取值范围及取值方法见表 1。

表 1 汇水区性状参数取值范围

Tab. 1 Characteristic parameters range of catchment

| 项 目 | 实际取值 | 模型取值 | 来源 |
|-------------------------------|----------------|----------------|--------|
| 表面坡度/ ($m \cdot m^{-1}$) | 0.002 ~ 0.058 | 0.002 ~ 0.058 | 现场勘查 |
| 汇水区面积/ hm^2 | 0.013 ~ 24.189 | 0.020 ~ 18.888 | GIS 测量 |
| 汇流宽度/m | 0.4 ~ 277.5 | 5.5 ~ 245.2 | 模型手册 |

2.1.1 不同雨强下汇水区性状参数灵敏性分析

参数的灵敏度与模型的应用条件紧密相关。相关研究显示,雨强对参数灵敏度有较大影响^[15]。为此,采用 F 市 4 场不同重现期、雨峰位置 $r = 0.4$ 的设计降雨作为多雨强降雨事件,模拟不同雨强条件下汇水区性状参数对峰现时间、峰值流量、径流总量和积水量灵敏性的变化,计算得出的灵敏性判别因子 S 值见表 2。

表 2 不同雨强下汇水区性状参数的敏感性判别因子

Tab. 2 Sensitivity parameters of catchment under different rain intensity

| 项 目 | | $P=3$ 年 | $P=5$ 年 | $P=10$ 年 | $P=50$ 年 |
|------------|------|---------|---------|----------|----------|
| 汇水区 面积 | 峰现时间 | 0.064 | 0.109 | 0.154 | 0.201 |
| | 峰值流量 | 0.701 | 0.298 | 0.237 | 0.227 |
| | 径流总量 | 0.958 | 0.953 | 0.941 | 0.911 |
| | 积水量 | 7.778 | 6.139 | 4.380 | 3.433 |
| 汇流宽度 | 峰现时间 | 0.056 | 0.045 | 0.064 | 0.109 |
| | 峰值流量 | 0.148 | 0.075 | 0.074 | 0.063 |
| | 径流总量 | 0.073 | 0.094 | 0.094 | 0.093 |
| | 积水量 | 1.118 | 0.538 | 0.433 | 0.392 |
| 产流表面 坡度 | 峰现时间 | -0.098 | -0.119 | -0.124 | -0.310 |
| | 峰值流量 | 0.053 | 0.019 | 0.008 | 0.007 |
| | 径流总量 | 0.029 | 0.037 | 0.038 | 0.038 |
| | 积水量 | 0.344 | 0.217 | 0.179 | 0.159 |

由表2可知,针对不同目标函数,汇水区性状参数的灵敏性存在差异。在各个降雨强度下,各性状参数对目标函数的影响整体上呈现出相同的规律。其对峰值流量、径流总量和积水量影响的次序均为:汇水区面积>汇流宽度>产流表面坡度;对峰现时间的影响次序为:产流表面坡度>汇水区面积>汇流宽度。

结合灵敏性判别因子 S 可知,随雨强的增大,汇水区面积对峰值流量、径流总量和积水量的影响逐渐减弱。但在各雨强下汇水区面积对峰值流量和径流总量仍为敏感参数,对积水量仍为高敏感参数, S 值最高达到7.778,远高于其他参数,说明面积参数对积水量起决定性的影响。面积参数对峰现时间的影响随雨强的增大而逐渐增强, $P \leq 10$ 年时为中敏感参数, $P = 50$ 年时成为敏感参数。

随雨强的增大,汇流宽度对峰现时间和径流总量的影响呈增强趋势,而对积水量和峰值流量的影响则逐渐减弱。其中,汇流宽度对积水量的影响最大,由小降雨条件下的高敏感参数逐渐下降为敏感参数,而对其他目标函数的影响均在中敏感范围内变化。

随雨强的增大,产流表面坡度对峰现时间的影响逐渐增强,对峰值流量和积水量的影响逐渐减弱,对径流总量基本无影响。产流表面坡度对峰值流量为不敏感参数,对峰现时间由中敏感参数上升为敏感参数,且与之呈负相关,即峰现时间随产流表面坡度的增大而提前。

2.1.2 不同雨型下汇水区性状参数灵敏性分析

本研究采用F市3年一遇的设计降雨,分别设置了雨峰位置 $r=0.4, 0.6, 0.8$ 这3种雨型,考察不同雨型下汇水区性状参数对峰值流量、径流总量和积水量目标函数的灵敏性变化。结果表明,在不同雨型背景下,各汇水区性状参数对目标函数的灵敏性受干扰程度较小。以汇水区面积参数为例进行具体说明,如图1所示,横坐标为参数变化倍数,对应得到的目标函数变化值与初始值的比值为纵坐标,其斜率变化即反映目标函数对该参数的灵敏性的改变。图中 V_{\max} 为峰值流量, V_{total} 为径流总量, V_a 为积水量, T_{\max} 为峰现时间, A 为汇水区面积, A_0 为汇水区面积初始取值。由图1可知,在不同雨型条件下,各目标函数随汇水区面积参数变化的回归线斜率基本一致,变化幅度较小。

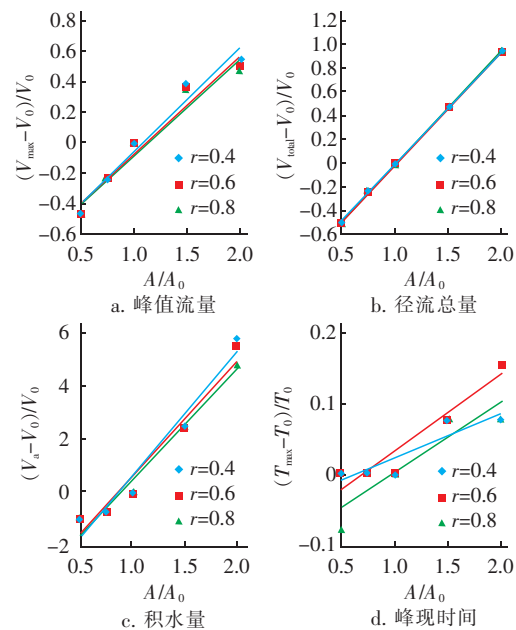


图1 不同雨型下汇水区面积的灵敏性分析结果

Fig.1 Sensitivity analysis results of catchment area under different rain patterns

2.2 汇水区划分方式对模拟结果的影响

基于前文雨型对汇水区性状参数灵敏性影响不大的结论,后续研究仅在多雨强背景下开展。采取重现期分别为3、5、10、50年,雨峰位置 $r=0.4$ 的4场设计降雨作为水量边界条件,对不同划分方式下的InfoWorks ICM模拟结果进行统计,主要包括出水口的峰现时间、峰值流量、径流总量和积水量数据,结果见表3。

表3 不同汇水区划分方式下的模拟结果

Tab.3 Simulation results of InfoWorks ICM under different division methods for catchment

| 重现期/年 | 划分方式 | 峰现时间/min | 峰值流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ | 径流总量/ m^3 | 积水量/ m^3 |
|-------|------|----------|--|--------------------|-------------------|
| 3 | 泰森 | 65 | 17.20 | 69 892 | 6 225 |
| | 人工 | 65 | 16.64 | 65 838 | 2 106 |
| | GIS | 70 | 14.82 | 61 879 | 1 993 |
| 5 | 泰森 | 65 | 17.66 | 78 994 | 11 139 |
| | 人工 | 65 | 17.63 | 75 015 | 5 468 |
| | GIS | 70 | 16.34 | 70 668 | 4 140 |
| 10 | 泰森 | 65 | 18.19 | 91 820 | 19 962 |
| | 人工 | 65 | 18.34 | 87 247 | 11 996 |
| | GIS | 70 | 17.29 | 82 396 | 9 387 |
| 50 | 泰森 | 60 | 19.26 | 122 674 | 55 177 |
| | 人工 | 60 | 19.57 | 116 833 | 38 842 |
| | GIS | 65 | 18.63 | 111 372 | 30 349 |

3 种汇水区划分方式的根本差异在于划分的依据,泰森多边形划分和人工划分的依据为检查井服务面积的均分,而 GIS 划分的依据则是地形的起伏变化。各方式尽量保证精度近似时,因依据不同,子汇水区形状存在差异,导致对汇水区面积和汇流宽度产生一定扰动,对产流表面坡度产生的扰动比较显著。

2.2.1 对峰现时间的影响

由表 3 可以看出,不同雨强条件下,3 种划分方式中,泰森多边形划分和人工划分的峰现时间相同,而 GIS 划分的峰现时间相对延后,且在大降雨强度下峰现时间提前出现。据前文敏感性分析可知,产流表面坡度参数在重现期为 3、5、10 年一遇的降雨条件下,对峰现时间为中敏感参数,在重现期为 50 年一遇的降雨条件下,转变为敏感参数,其变化在较大程度上影响峰现时间。

在泰森多边形划分和人工划分中,某一汇区内产生的径流均汇入其区域内某一个检查井,而不存在集水区之间的层级汇流,其对产流表面坡度的影响不大。而 GIS 划分方式对产流表面坡度参数的扰动较大,产生的径流先由不包含检查井的汇水区的倾泻点逐级流入与之相邻最近的包含检查井的汇水区,再经由此汇水区的检查井最终汇入管网,其汇流路径相对复杂,最终致使峰现时间的延后。

2.2.2 对峰值流量和径流总量的影响

各划分方式下模拟得到的峰值流量和径流总量略有差异。如表 3 所示,泰森多边形划分和人工划分在峰值流量与径流总量指标上均较为接近,而 GIS 划分下峰值流量与径流总量略低于另两种划分方式。由敏感性分析可知,随着雨强的增大,汇水区面积对径流总量的敏感性基本不变,对峰值流量的敏感性逐渐减弱,但是总体上仍为影响二者的敏感参数。前文指出,3 种划分方式因划分依据不同,汇水区面积参数必然产生扰动,因而出现了各划分方式下目标函数的差异,而且随着雨强的增大,呈现趋同趋势。

2.2.3 对积水量的影响

汇水区划分方式对积水量模拟结果的影响较大。如表 3 所示,不同重现期下积水量指标均呈现 GIS 划分 < 人工划分 < 泰森划分的规律,差异显著,此结果与径流总量结果相符。积水量的最大值和最小值差异率按重现期增大顺序依次为 67.98%、

62.83%、52.98%、44.99%。分析原因:第一,据敏感性分析可知,随着雨强的增大,各性状参数对积水量的影响均减弱,但汇水区面积参数仍对其起决定性影响,汇流宽度为敏感参数,坡度为中敏感参数;不同划分方式对 3 个参数均产生不同程度的扰动,使得积水量差异显著。第二,GIS 划分较其他方式对坡度参数扰动较大,部分积水量差异来源于此;此外,GIS 划分方式主要依据地形划分汇水区,存在大量汇水区间间的层级串联,造成汇流路径增长,地表径流下渗与蒸发占比增加,导致溢流减少。

2.3 汇水区划分精度对模拟结果的影响

采用与 2.2 节相同的降雨条件作为水量边界条件,在 GIS 划分方式下,研究汇水区划分精度对 InfoWorks ICM 模拟结果的影响,结果见表 4。相同划分方式下,划分精度越高,汇水区面积就越小,因此,划分精度变化对汇水区性状参数中的汇水区面积和汇流宽度参数扰动较大,对产流表面坡度参数略有扰动,但相对较小。

表 4 不同汇水区划分精度下的模拟结果

Tab. 4 Simulation results of InfoWorks ICM under different division precision for catchment

| 重现期/年 | 划分精度 | 峰现时间/min | 峰值流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ | 径流总量/ m^3 | 积水量/ m^3 |
|-------|------|----------|--|--------------------|-------------------|
| 3 | 低 | 65 | 14.08 | 61 428 | 3 996 |
| | 中 | 65 | 16.44 | 72 133 | 8 507 |
| | 中高 | 70 | 17.28 | 77 513 | 11 640 |
| | 高 | 70 | 17.39 | 78 768 | 12 506 |
| 5 | 低 | 60 | 15.35 | 69 713 | 9 181 |
| | 中 | 65 | 17.09 | 82 029 | 16 975 |
| | 中高 | 70 | 17.68 | 88 134 | 20 435 |
| | 高 | 70 | 17.78 | 89 944 | 22 204 |
| 10 | 低 | 60 | 16.64 | 81 437 | 19 548 |
| | 中 | 65 | 17.78 | 95 738 | 30 020 |
| | 中高 | 70 | 18.16 | 103 020 | 35 145 |
| | 高 | 75 | 18.25 | 105 072 | 37 695 |
| 50 | 低 | 60 | 17.99 | 109 449 | 44 487 |
| | 中 | 60 | 18.89 | 128 651 | 64 250 |
| | 中高 | 75 | 19.82 | 138 075 | 75 701 |
| | 高 | 75 | 20.00 | 140 910 | 85 230 |

2.3.1 对峰现时间的影响

由表 4 可知,不同雨强下,峰现时间随划分精度的提高而延后,分析其原因:第一,划分精度提高,使汇水区面积和汇流宽度参数均显著减小,由前述敏感性分析可知,对峰现时间影响最大的为产流表面

坡度,且随着雨强增大参数敏感性渐强,而汇水区面积和汇流宽度仅为中敏感参数,因此随划分精度的提高,峰现时间出现延迟;第二,随划分精度的提高,汇流路径愈发复杂化,这使得降雨产生的径流汇入管网的时间增长,进而延迟了峰现时间。

2.3.2 对峰值流量和径流总量的影响

由表4可知,改变划分精度对峰值流量和径流总量影响较大,两者均随划分精度的提高而增加。由灵敏性分析可知,汇水区面积参数对峰值流量和径流总量影响较大,在各雨强下均为敏感参数。基于不同划分精度对汇水区面积扰动较大,不同划分精度下峰值流量和径流总量呈现明显差异,低精度与中精度的峰值流量差异率在不同重现期下的平均值为10.1%,而中高精度与高精度的则为1.9%;低精度与中精度的径流总量差异率在不同重现期下的平均值为17.5%;而中高精度与高精度的则为0.65%。因此,在各降雨重现期条件下,峰值流量和径流总量的差异性随精度的增加呈现减小趋势。

同时,高精度与中高精度的差异在各重现期下均非常接近,远小于其与中、低精度的差异。因此,峰值流量和径流总量并不会随精度的提高而无限增大,存在一个划分精度阈值,当精度达到或超过这一阈值时,继续提高精度对峰值流量和径流总量模拟结果的影响较小。

2.3.3 对积水量的影响

划分精度对积水量的影响较大,如表4所示,随着精度的提高,积水量明显增加。由灵敏性分析可知,在各雨强下,汇水区面积参数都对其起决定性影响,汇流宽度也为其敏感参数,不同划分精度下对汇水区面积和汇流宽度参数产生较大扰动,使得积水量产生显著差异。

随重现期的增大,高精度与低精度的积水量差异率分别为68.05%、58.65%、48.14%、47.80%,呈减小趋势,因此在小雨强条件下,划分精度对积水量的影响比大雨强更显著,敏感度更高,这也与灵敏度分析结论相符。

3 结论

① 降雨强度对汇水区性状参数的灵敏度有显著影响,而雨型对各汇水区性状参数的灵敏性干扰较小。在各降雨强度下,各性状参数对目标函数的影响整体呈现相同的规律,对峰值流量、径流总量和积水量的影响次序均为:汇水区面积>汇流宽度>

产流表面坡度;对峰现时间的影响次序为:产流表面坡度>汇水区面积>汇流宽度。随着雨强的增大,汇水区面积参数对峰值流量、径流总量和积水量的影响逐渐减弱;汇流宽度参数对峰现时间的影响增强,而对其他目标函数的影响则逐渐减弱;产流表面坡度参数对峰现时间的影响增强,对峰值流量和积水量的影响减弱,对径流总量基本无影响。

② 汇水区划分方式对InfoWorks ICM水力模拟结果有一定影响。在各降雨强度下,泰森多边形划分与人工划分的模拟结果相差较小,在径流总量与积水量上存在一定差异;与GIS划分方式在峰现时间和积水量指标上差距较大,由于划分依据不同,产流表面坡度参数的扰动是主要差异来源。因此,地形较平坦、坡度变化较小的平原城市区域宜采用操作快捷、划分效率高的泰森多边形划分;而地形变化较大的区域采用GIS划分方式更能反映实际汇水范围,不过该方式对物探资料的需求较高,适用于对精度要求相对较高且资料较完备的小区域研究;相比较而言,人工划分方式繁琐复杂、划分效率低、对研究人员的经验和物探资料要求高,该方式在研究范围不大、项目精度要求较高时,可作为另两种方式的局部补充。

③ 汇水区划分精度对InfoWorks ICM水力模拟结果有一定影响。随着划分精度的提高,峰现时间延后,峰值流量、径流总量和积水量增加。区域积水量对汇水区划分精度变化的敏感度最高,在以排涝防洪为主导需求的相关研究中,宜采用高精度或中高精度划分方案。

参考文献:

- [1] Willems P. Quantification and relative comparison of different types of uncertainties in sewer water quality modeling [J]. Water Res, 2008, 42(13): 3539-3551.
- [2] 李文涛,王广华,周建华,等. 深层隧道排水系统规划设计中降雨点面关系研究[J]. 中国给水排水, 2017, 33(2): 1-4.
Li Wentao, Wang Guanghua, Zhou Jianhua, et al. Study on relationship between point rainfall and areal rainfall in planning and design of deep tunnel drainage system [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(2): 1-4 (in Chinese).
- [3] 刘德儿,袁显贵,沈敬伟,等. 基于GIS的新城区水文参数自动提取及应用[J]. 工程设计学报, 2015, 22

- (6):552-561.
- Liu Deer, Yuan Xiangui, Shen Jingwei, *et al.* Automatic extraction and application of hydrologic parameters in new town based on GIS[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2015, 22(6):552-561 (in Chinese).
- [4] 解智强, 何江龙, 高忠, 等. 地下排水管线地理信息水力建模与城市内涝防治应用[J]. 办公自动化, 2014(S1):12-16.
- Xie Zhiqiang, He Jianglong, Gao Zhong, *et al.* Hydraulic modeling of underground drainage pipeline based on GIS and its application of urban waterlogging control[J]. Office Informatization, 2014(S1):12-16 (in Chinese).
- [5] 赵冬泉, 陈吉宁, 佟庆远, 等. 子汇水区的划分对 SWMM 模拟结果的影响研究[J]. 环境保护, 2008(8):56-59.
- Zhao Dongquan, Chen Jining, Tong Qingyuan, *et al.* Influence of sub-catchment division on SWMM simulation results[J]. Environmental Protection, 2008(8):56-59 (in Chinese).
- [6] 秦攀, 雷坤, 乔飞, 等. 子汇水区划分精度对 SWMM 模拟城市非点源的影响[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(6):179-186.
- Qin Pan, Lei Kun, Qiao Fei, *et al.* Impact of sub-catchment size delineation on urban non-point source pollution simulation using SWMM[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39(6):179-186 (in Chinese).
- [7] 马姗姗, 庄宝玉, 张新波, 等. 绿色屋顶与下凹式绿地串联对洪峰的削减效应分析[J]. 中国给水排水, 2014, 30(3):101-105.
- Ma Shanshan, Zhuang Baoyu, Zhang Xinbo, *et al.* Analysis of peak flow reduction with green roof and sunken lawn applied in series[J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(3):101-105 (in Chinese).
- [8] Mannina G, Viviani G. Separate and combined sewer systems: a long-term modelling approach[J]. Water Sci Technol, 2009, 60(3):555-565.
- [9] Park S Y, Lee K W, Park I H. Effect of the aggregation level of surface runoff fields and sewer network for a SWMM simulation[J]. Desalination, 2008, 226(1/3):328-337.
- [10] Duke G D, Kienzle S W, Johnson D L. Improving overland flow routing by incorporating ancillary road data into digital elevation models[J]. J Spat Hydrol, 2003, 3(2):1-27.
- [11] 左俊杰, 蔡永立. 平原河网地区汇水区的划分方法——以上海市为例[J]. 水科学进展, 2011, 22(3):337-343.
- Zuo Junjie, Cai Yongli. An automated watershed delineations approach for plain river network regions: A case study in Shanghai[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(3):337-343 (in Chinese).
- [12] Zádor J, Zsély I, Turányi T. Local and global uncertainty analysis of complex chemical kinetic systems[J]. Reliab Eng Syst Safe, 2006, 91(10/11):1232-1240.
- [13] 刘非, 方正, 唐智. ICM 模型的水文参数局部灵敏度及其稳定性分析[J]. 中国农村水利水电, 2015(11):73-76.
- Liu Fei, Fang Zheng, Tang Zhi. An analysis of ICM local sensitivity of hydrological parameters and its stationarity[J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(11):73-76 (in Chinese).
- [14] 蒋元勇, 丰锴斌, 刘学文, 等. 城市雨洪 SWMM 模型的敏感参数研究综述[J]. 生态科学, 2015, 34(2):194-200.
- Jiang Yuanyong, Feng Kaibin, Liu Xuewen, *et al.* Summary of sensitive parameters SWMM model of urban stormwater[J]. Ecological Science, 2015, 34(2):194-200 (in Chinese).
- [15] 王浩昌, 杜鹏飞, 赵冬泉, 等. 城市降雨径流模型参数全局灵敏度分析[J]. 中国环境科学, 2008, 28(8):725-729.
- Wang Haochang, Du Pengfei, Zhao Dongquan, *et al.* Global sensitivity analysis for urban rainfall-runoff model[J]. China Environmental Science, 2008, 28(8):725-729 (in Chinese).



作者简介: 言铭(1994-), 男, 湖南株洲人, 硕士研究生, 研究方向为城市雨洪管理、海绵城市。

E-mail: ym247@qq.com

收稿日期: 2018-06-04