

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtk.2022.0035

杨佳利,徐拥军,梁藉,等.雨水管网模型子汇水区划分与模拟精度[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(2):338-351.
YANG J L, XU Y J, LIANG J, et al. Subcatchment division and simulation precision of rainwater pipe network model[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(2): 338-351. (in Chinese)

雨水管网模型子汇水区划分与模拟精度

杨佳利¹, 徐拥军², 梁藉¹, 唐颖³, 刘子龙⁴

(1. 华中科技大学土木与水利工程学院, 武汉 4730074; 2. 中国电建华东勘测设计研究院有限公司 东南区域总部, 杭州 311100;
3. 北京城市学院城市建设学部, 北京 100083; 4. 北京城市规划设计研究院, 北京 100045)

摘要:为提升城市雨水管网模型精度,基于DEM城市地表水文分析原理,针对城市子汇水区划分不精确问题,提出一种基于盆域分析的泰森多边形子汇水区划分方法(basin analysis based Thiessen polygon subcatchment division method, BAP)。该方法综合考虑地形对雨水管网模型模拟精度的影响,利用数字高程模型数据进行盆域分析获得初级子汇水区,并进一步运用泰森多边形法划分出模型子汇水区。将BAP方法分别与人工绘制法、传统泰森多边形法进行对比,分析不同汇水区划分方法的模拟精度。实例研究表明:BAP方法的模拟结果与实测数据拟合度最佳,井下液位的峰值、流量峰值和总流量偏差分别为1.115%、1.301%、6.796%。所提出的子汇水区划分方法能获得更高模拟精度的城市雨水管网模型。研究成果可为城市排水防涝模拟提供更加合理的建模方法。

关键词:雨水管网模型;子汇水区划分;盆域分析;泰森多边形法

中图分类号:TV213.4 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



目前,随着国内城市化进程加快,道路硬化建设致使地表不透水面积增大,加之极端暴雨事件频发,城市内涝灾害激增^[1-2]。内涝分析是解决城市积水问题的基础手段,高精度城市雨水管网模型是分析城市内涝的必要前提^[3]。城市雨水管网模型利用城市降雨、地形、管线工程等基础数据,模拟城市产汇流过程,分析城市管网排水能力及地表淹没状况。在水文模型中,子汇水区划分通过影响管网节点处的雨水入流过程和管道内的雨水汇流过程,引起模型管段出水口流量峰值、峰现时间等重要模型精度评价指标变化,子汇水区划分合理性是管网模型与实测拟合程度的决定性因素之一^[4]。因此,要提高城市雨水管网模型精度,就需要合理划分子汇水区。

对于子汇水区划分方法,国内外已有大量相关研究^[5-18],但主要针对山区、流域水文模型的子流域汇水区划分。Rouhani等^[10]结合Shuffled Complex

Evolution (SCE) 优化算法,制定多自动校准方案(MACS)划分流域子汇水区,研究了不同降雨空间分布情景下子汇水区划分对径流预测的影响。Lei等^[11]提出了一种适用于区域尺度的流域汇水区划分方法,成功应用于中国南水北调中线工程。Choi等^[12]开发了一种基于Web的实时流域地理信息系统,利用双种子数组替换算法(double-seed array-replacement algorithm)从点坐标获得分水岭边界,并利用印第安纳州的Wildcat Creek流域数据进行了模拟,其精度较高。Luo等^[13]改进ArcGIS和ArcSWAT默认DEM的预定义流域划定方法,创新一种基于DEM和DCN划定河流子流域方法,子流域划分结果与圩田地区的实际水文过程吻合较好。Liao等^[14]提出了一种基于六边形网格空间离散化流域划分方法,据此构建模型,分别应用于美国西部陡峭和平坦两种地形情景的分水岭划分,结果

收稿日期:2021-09-22 修回日期:2022-01-07 网络出版时间:2022-01-18

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.tv.20220117.1318.002.html

基金项目:国家自然科学基金项目(51979112);黔科合重大科技专项计划项目([2018]3010)

作者简介:杨佳利(1998—),女,湖南常德人,主要从事水利信息化研究。E-mail:yangjiali@hust.edu.cn

通信作者:唐颖(1988—),女,湖北黄冈人,博士,主要从事城市排水管网系统优化研究。E-mail:sugar201806035@bcu.edu.cn

比传统空间离散方法在重现流域轮廓方面更具优势。Lai 等^[15]提出了一种基于水文特征和 DEM 的流域划分方法,依据矢量水文特征数据模型提取河流节点,根据水流方向矩阵和河流节点的位置完成流域划分,并应用于构建中国西部太湖流域水文模型,与传统方法相比,它可同时考虑不同类型流域和多个入口出口的情景,有利于 PRNR 分布式水文模型的开发。Castronova 等^[16]使用数学图论来识别流域边界,提出了基于层次网络的开源划定方法,与传统仅从数字高程模型导出流域栅格算法相比表现出更大的灵活性、可扩展性,并有效提高了模型精度。

然而,针对城市子汇水区划分方法的研究略少^[19-29]。1911 年荷兰气候学家 A. H. Thiessen 提出了一种依据离散分布的降雨气象站位置划分汇水区的方法——泰森多边形法^[19]。泰森多边形法广泛运用于城市子汇水区划分,一般采用管网节点或者出水口作为泰森多边形法划分子汇水区据点。李若男等^[20]依据泰森多边形法构建上海黄浦区北部区域的 ICM 水动力模型,较好地模拟了不同重现期降雨情景下的一维地表洪水过程及地表淹没深度和二维地形条件下的城市内涝积水深度及流速,为该城市制定防洪排涝方案提供了理论依据。然而泰森多边形法划分子汇水区未考虑地形因素的局限性,导致汇水区等距均分,划分结果与实际汇水区存在一定的偏差,且易出现汇水边界切割建筑物等不符合实际地表汇流的情况,不确定性显著^[21-22]。Warsta 等^[23]使用统一的计算网格划分研究区域子汇水区,为城市雨水管网模型 SWMM 开发了一个子汇水区生成程序。Wu 等^[24]提出了一种基于坡度和坡向的精细化划分 SWMM 模型子汇水区的新方法,该方法准确设置模型参数和水力交换条件,在一定程度上提高了模型的精度,但该方法对坡度数据精度要求高,不适用大面积城市区域管网建模。Back 等^[25]提出了一种基于 GIS 的自动划分城市子流域方法,该方法考虑了自然地表倾角,将实际的管网节点与雨水算共同作为节点,以此作为子汇水区出口,分别使用数字表面模型(DSM)和数字高程模型(DEM)自动划分城市子汇水区,并将 SWMM 的水力模拟结果与实测流量数据进行比较。Ji 等^[26]提出了一种新的 SWMM 子汇水区划分方法,该方法依据城市子汇水区地形和水文信息的空间变异性特征,利用流域分区方法从 DEM 中提取道路和管网,并在划分方法中引入 GIS 技术,基于空间分析方法根据道路、管道和建筑物的分布特征调整原始 DEM 数据,从而进一步提高 SWMM 的模拟结果。Döring 等^[27]提出了从土地利用数据计算子集

水区面积和从街道地形计算雨水排水网络的算法,以区域尺度的 SWMM 排水管网模型为研究对象,建立了测试案例,在小型测试区域中所提出算法表现良好,但由于不透水地表覆盖百分比推导方面不完善,无法适用于大型研究区域。Li 等^[28]提出了一种兼顾土地利用类型和流向的子汇水区划分方法,将研究区划分为一级汇水区和二级汇水区(FL 和 SL),并利用修正的 DEM(数字高程模型)和流向数据,将 SL 汇水区划分为三级基于方向的(D-B) 汇水区,提出了一种基于土地利用的 D-B 子汇水区划分算法,并在新算法中引入自适应阈值调整,该方法适用于大城市。Bai 等^[29]研究利用无人机传感器来检查地形和土地使用覆盖变化,通过测量数字地表模型和正射影像图,获得城市子汇水区,利用最小累积阻力模型模拟了 166 个城市子汇水区径流,得到了多条连接城市上下水系的径流路径,地表径流分配与实际匹配度高。

以上研究中,泰森多边形法划分子汇水区未能考虑地形因素,且山区流域水文模型子汇水区划分无法直接用于管网模型中的子汇水区划分。因此,本文提出一种基于盆域分析的泰森多边形子汇水区划分方法(basin analysis based Thiessen polygon subcatchment division method, B ATP),通过此方法将地形因素和管网系统综合考虑。同时以北京某区域为例,将 B ATP 方法分别与人工绘制法、传统泰森多边形法进行对比,以井下液位峰值、峰现时间及流量峰值、峰现时间、总流量等模拟结果为依据验证方法,评估 B ATP 方法的优势。

1 基于盆域分析的泰森多边形子汇水区划分方法

只有子汇水区地表径流通过唯一管网节点汇入管段,才能满足雨水管网模型构建要求。子汇水区划分通过界定汇水范围影响管网节点处的雨水入流过程以及管道内的雨水汇流过程,进而改变模型管段出水口流量峰值、峰现时间等精度评价指标数据,所以划分子汇水区范围并确定合理的管网入流节点会对管网模型的精确度产生较大影响。城市子汇水区划分主要考虑两大问题:城市下垫面类型多且不同用地类型分布零散,地形因素对子汇水区划分影响较大;城市管网密布且错综复杂,汇水范围难以界定。因此,提出 B ATP 方法,以地形为基础合理划分子汇水区。首先依据城市地形数据进行盆域分析,划分出汇流范围集中的径流单元,将该径流单元定义为初级子汇水区;其次修定初级子汇水区,对不存在管网节点的初级子汇水区,寻求周围公共边界高程最小值对应

的初级子汇水区与之合并,以保证每个初级子汇水区内均存在管网节点;最后采用泰森多边形法细分初级子汇水区,得到与管网节点一一对应的子汇水区。由此准确模拟子汇水区内径流顺自然地表流入管网节点、按城市水文路径输入雨水管道系统至出水口排出的全过程,从而提高模型精度。

1.1 划分初级子汇水区

使用高分辨率的数字高程模型栅格数据进行流域分析,划分得到汇流集中且高程变幅小的初级子汇水区。初级子汇水区划分过程见图 1,具体步骤如下:

地形填洼处理^[30]:避免人为因素导致的地形误差而形成不合理水流方向的情况发生,需对错误的低洼点进行填洼处理。

流向分析:根据每个 DEM 栅格的最陡坡度方向,运用 D8 流向原理连通各像元流向栅格,完成区域的流向分析。

流量分析:基于流向分析后,统计每个像元栅格的累计汇流流量值。

地表径流分级处理:基于汇流累积量数据设定阈值生成城市栅格径流网络,提取地表径流分布。

地表径流网矢量化:将分级后的边界栅格网络转换为线状边界,准确界定地表径流范围,划定地表径流网络边界线。

生成流域:依据流量、流向、径流网确定栅格的上游汇流区域,将城市地表划分为若干流域,即初级子汇水区。

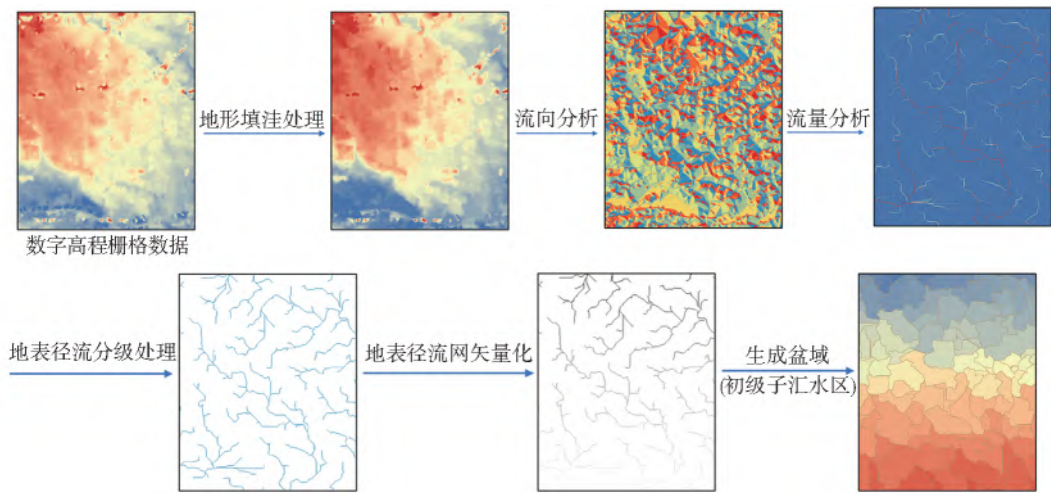


图 1 初级子汇水区划分

Fig. 1 Primary subcatchment area division schematic diagram

1.2 初级子汇水区的修定

流域分析是直接的地形分析方法,未考虑城市管网分布,所以划分得到的初级子汇水区未必均存在管网节点,不存在管网节点的子汇水区无法满足雨水管网模型建设需求,因而对不存在管网节点的初级汇水区采用就近合并方法。选择与该

初级汇水区最邻近且公共边界高程最小的一个初级子汇水区,合并生成一个新初级子汇水区。依据地形 DEM 数据,找出不存在管网节点初级子汇水区周围公共边界高程最小的初级子汇水区即其下方子汇水区,两者合并成为一个新初级子汇水区,见图 2。

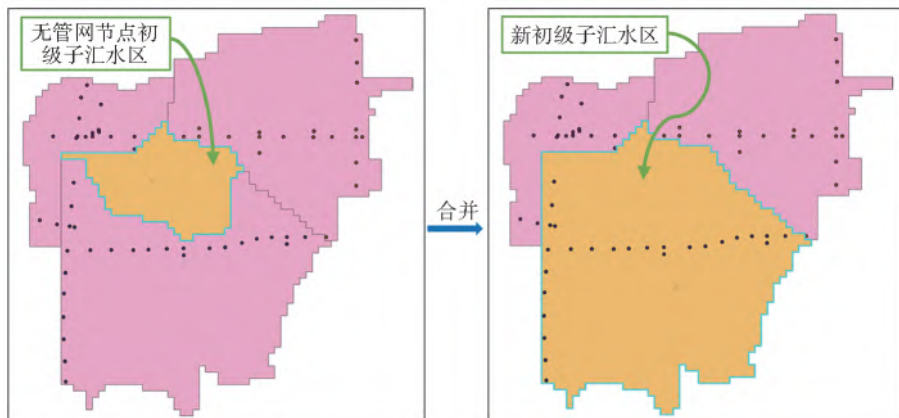


图 2 初级子汇水区修正

Fig. 2 Primary subcatchment area correction diagram

1.3 子汇水区的确定

修定后的初级子汇水区存在一个或多个管网节点,仅存在唯一管网节点的初级子汇水区即为该管网节点的子汇水区。存在多个管网节点的初级子汇

水区,需进一步采用泰森多边形法细化管网节点汇水范围,界定与管网节点一一对应的子汇水区。以管网节点为据点采用泰森多边形法划分得到子汇水区,见图 3。

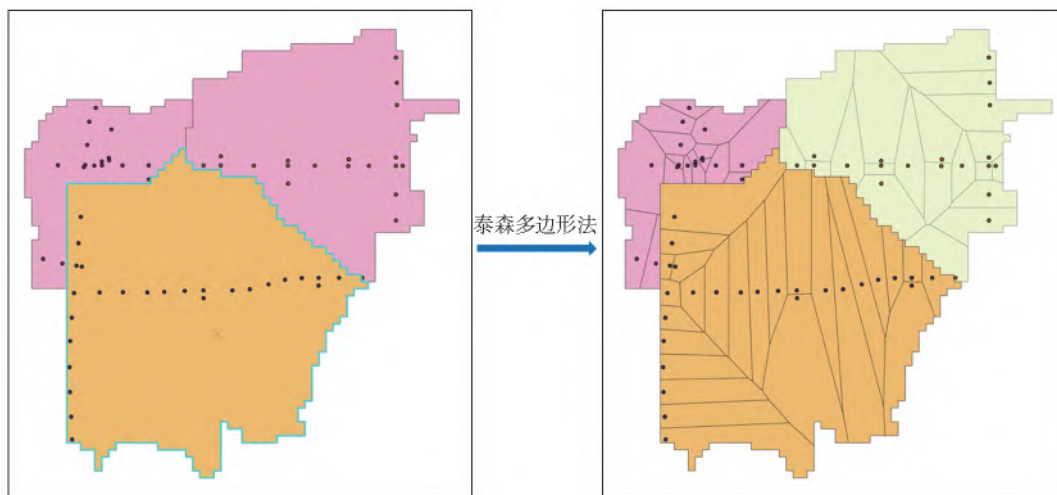


图 3 初级子汇水区生成子汇水区

Fig. 3 Primary subcatchment generates subcatchments diagram

BATP 划分方法全过程见图 4,最终得到与城市管网节点唯一匹配的子汇水区。

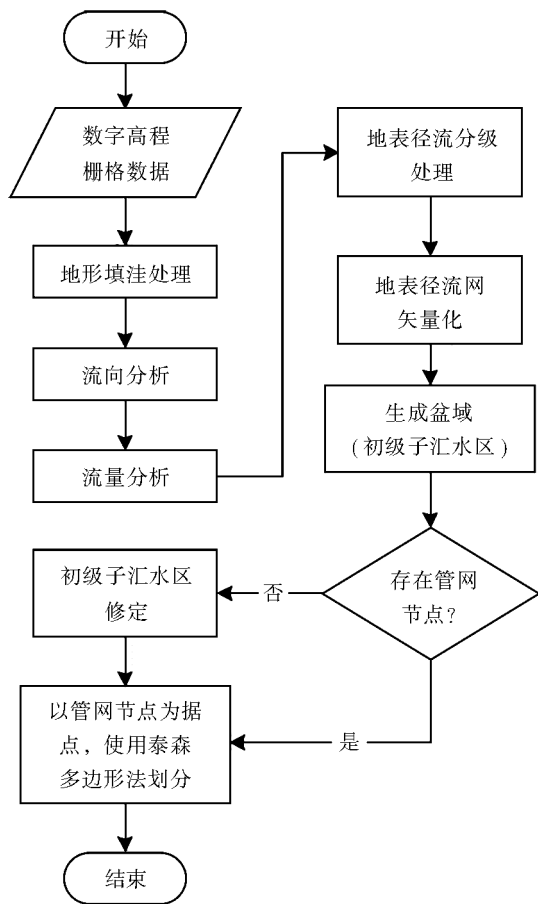


图 4 BATP 划分方法流程

Fig. 4 Flow chart of BATP

2 研究实例

2.1 实例概况

选择北京市某区域作为研究实例,研究区域面积 4.244 58 km²,不透水地表面积占比为 72.534%,用地类型主要包含道路、房屋、硬化铺装、植被和裸土。研究区域覆盖 907 条主干管,管段总长 29.687 km,最长管 131.8 m;存在 902 个管网节点、1 个雨量计及 1 个出水口。采用分辨率为 10 m×10 m 的数字高程模型栅格数据。研究区域用地类型、高程及管网布局见图 5。

2.2 研究区模型构建与参数率定

子汇水区划分完成后,才能建立雨水管网模型进行参数率定。为了得到一组客观的汇水区产汇流参数,并在后续评价中较为真实地对比不同子汇水区划分方法对于雨水管网模型精度的影响,需先拟定一种子汇水区划分方法建模率定参数。人工绘制法划分子汇水区是专业人员依据 DEM 高程栅格数据、卫星影像图和研究区不同用地类型数据,精细化地物高程数据后,手动勾画每个管网节点对应子汇水区的方法。该方法的划分工作过程繁琐、工作量大,但能准确吻合实际管网节点所服务的汇水区范围。因此,以人工绘制法划分子汇水区进行参数率定,统一汇水区参数设置。采用人工绘制法划分汇水区构建雨水管网 SWMM 模型见图 6、图 7。

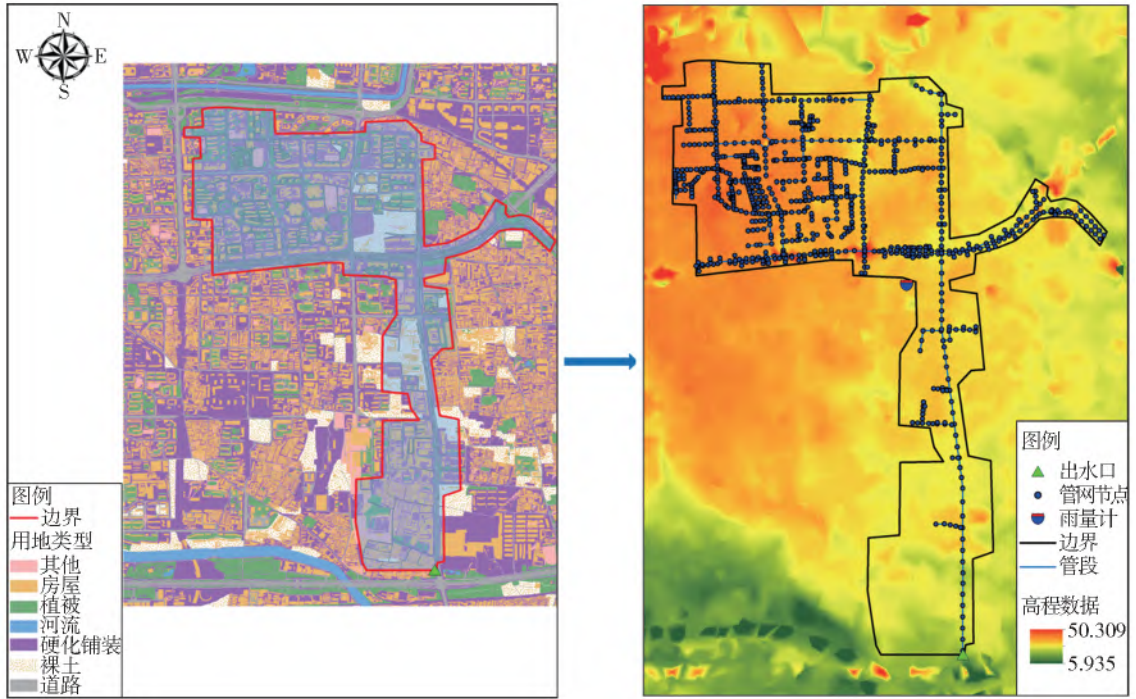


图 5 研究区用地类型、高程及管网布局

Fig. 5 Study area's land-use type, elevation and pipe network layout



图 6 人工绘制法划分研究区域汇水区

Fig. 6 The catchment area map of the study area divided by manual drawing method

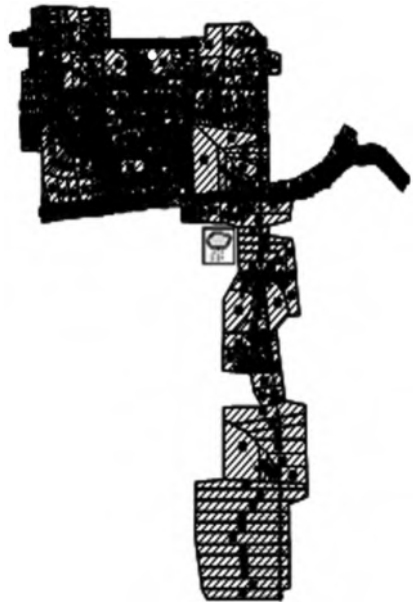


图 7 人工绘制法构建的 SWMM 管网模型

Fig. 7 SWMM pipe network model diagram constructed by manual drawing method

模型率定选取 2020 年汛期实测数据:采用实测降雨(一)率定参数,该降雨历时 20.5 h,总降雨量 342 mm;采用实测降雨(二)验证参数率定结果,该降雨历时 20.5 h,总降雨量 551 mm。监测点位于该研究区域出水口的上游管渠,监测指标包括液位和流速数据,实测雨量、液位及流量数据见图 8、图 9。

《城市内涝防治系统数学模型构建和应用规程》^[31]中模型率定的相关要求:模拟及实测峰值流

量和液位时间偏差均应小于 1 h;峰值流量和峰值液位数值偏差不应大于 25%;模拟和实测的总流量偏差不应大于 20%。采用率定参数建模获得的各项指标数据与实测数据对比见表 1,实测降雨(一)流量及液位峰现时间与实测峰现时间间隔仅差距 2 min,拟合效果好;管道流量、液位峰值偏差分别为 17.044%、6.981%,总水量偏差为 17.000%,均满足《城市内涝防治系统数学模型构建和应用规程》对

于模型率定的相关要求,率定结果见图 10、图 11。综上所述,采用此次率定的参数构建模型精度较好,最终确定的不同产汇流表面降雨径流模型参数,见表 2。将参数率定结果用于构建实测降雨(二)管网模型,结果显示:流量及液位峰现时间与实测峰现时

间间隔仅差距 1 min;管道流量、液位峰值偏差分别为 3.708%、8.039%,总流量偏差为 16.650%,各项管网指标与实测值偏差较小,满足规范要求,结果见图 12、图 13。因此,此次模型参数率定取值合理,适用性较好。

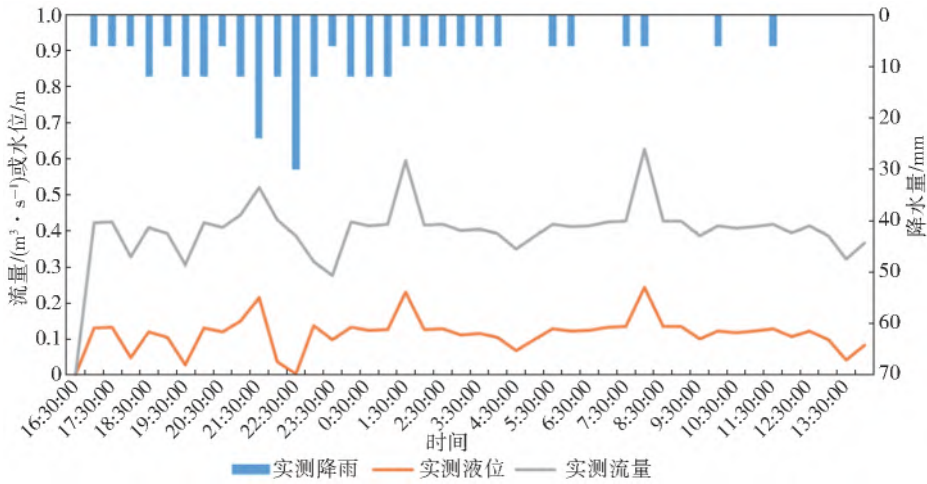


图 8 实测降雨(一)及其对应液位、流量曲线

Fig. 8 Measured rainfall 1 and its corresponding liquid level and flow curve

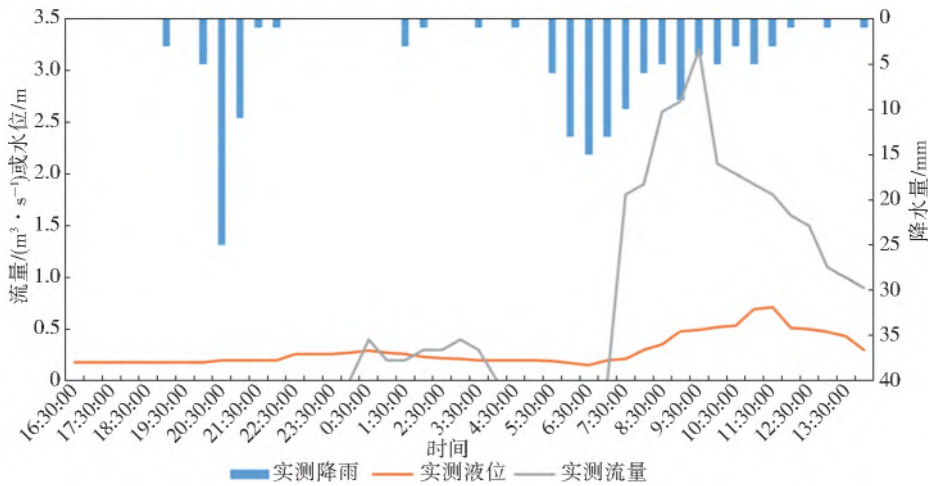


图 9 实测降雨(二)及其对应液位、流量曲线

Fig. 9 Measured rainfall 2 and its corresponding liquid level and flow curve

表 1 参数率定模型结果与实测对比

Tab. 1 Comparison between the results of parameter calibration model and the measured data

参数	流量峰现时间	液位峰现时间	流量峰值	液位峰值	总水量
模拟降雨(一)	08:13	08:13	0.520 m ³	0.225 m	26.321 × 10 ³ m ³
实测降雨(一)	08:15	08:15	0.627 m ³	0.242 m	31.712 × 10 ³ m ³
偏差	2 min	2 min	17.044%	6.981%	17.000%
模拟降雨(二)	09:28	11:29	3.090 m ³	0.652 m	32.907 × 10 ³ m ³
实测降雨(二)	09:29	11:30	3.209 m ³	0.709 m	28.210 × 10 ³ m ³
偏差	1 min	1 min	3.708%	8.039%	16.650%
标准	≤60 min	≤60 min	≤25%	≤25%	≤20%

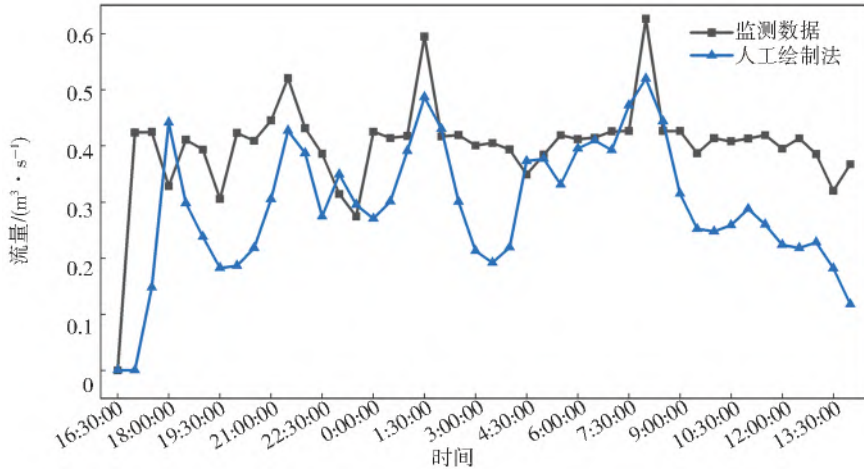


图 10 实测降雨(一)监测点模型流量率定结果

Fig. 10 Results of flow rate calibration of model at actual rainfall 1 monitoring point

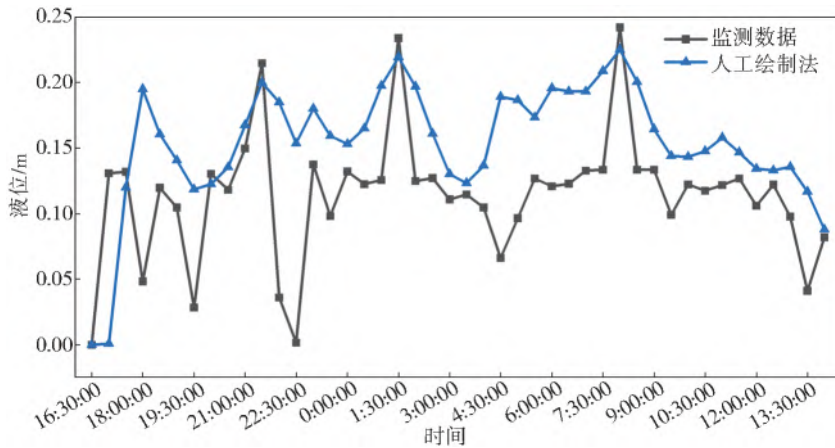


图 11 实测降雨(一)监测点模型液位率定结果

Fig. 11 Results of liquid level calibration of model at actual rainfall 1 monitoring point

表 2 汇水区降雨径流模型参数率定值

Tab. 2 Parameter calibration of rainfall-runoff model in catchment area

用地类型	固定径流系数	地表曼宁系数	初损/mm	最大填注量	后损		
					初始入渗率 f_0 (mm · h ⁻¹)	稳定入渗率 f_c (mm · h ⁻¹)	衰减系数 k
道路		0.020	2.00	2			
房屋		0.020	1.50	2			
硬化铺装		0.025	3.00	2			
植被		0.150	6.00	7	76.0	20	2.28
裸土		0.040	4.00	5	34.8	6	3.30
其他	0.65	0.020	3.00	2			

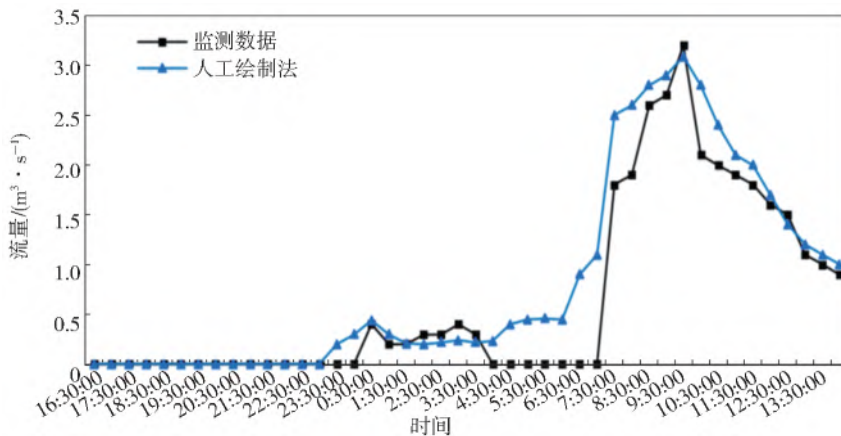


图 12 实测降雨(二)监测点模型流量率定结果

Fig. 12 Results of flow rate calibration of model at actual rainfall 2 monitoring point

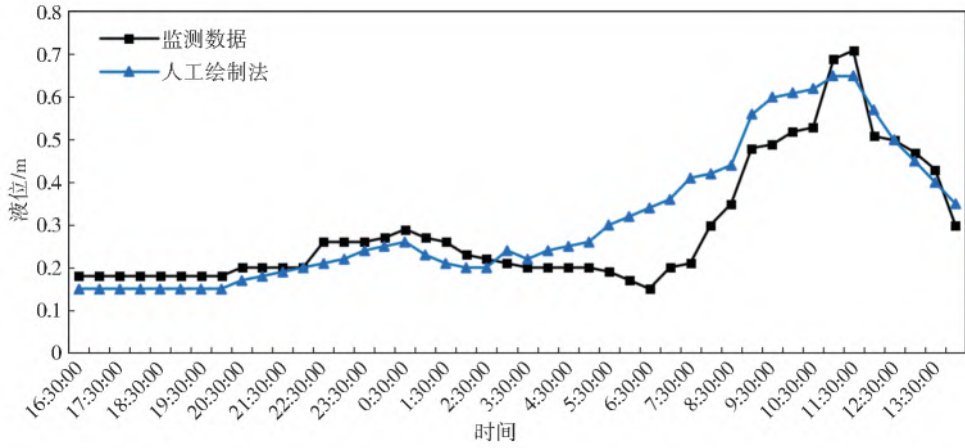


图 13 实测降雨(二)监测点模型液位率定结果

Fig. 13 Results of liquid level calibration of model at actual rainfall 2 monitoring point

2.3 子汇水区划分

利用研究区域管网节点、管段、出水口、雨量计相关基础数据,运用 B ATP 方法划分子汇水区,得到基于盆域分析获得的初级子汇水区和最终划分的子汇水区结果见图 14、图 15。为验证 B ATP 方法划分子汇水区优越性,选取人工绘制法和传统泰森多边形法与其进行对比。传统泰森多边形法划分子

汇水区快速简便,操作易行。人工绘制法划分子汇水区与实际管网节点所服务的汇水区范围拟合度高。以人工绘制法模型结果作为参照,分别比较 B ATP 方法、泰森多边形法划分子汇水区模型结果差异,从而评估 3 种方法对模型精度的影响。传统泰森多边形法划分结果见图 16。人工绘制法构建的管网模型见图 7。



图 14 基于盆域分析划分的初级子汇水区
Fig. 14 The primary subcatchment based on basin analysis

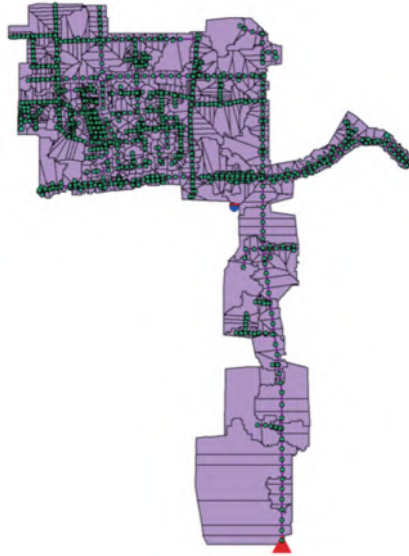


图 15 最终划分的子汇水区
Fig. 15 The subcatchment are obtained based on basin analysis

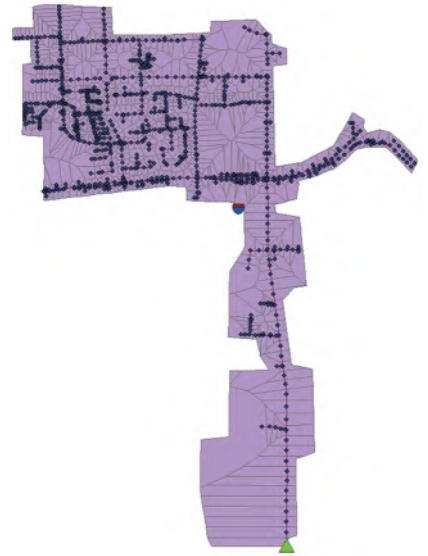


图 16 泰森多边形方法划分的子汇水区
Fig. 16 A subcatchment plot divided by Thiessen polygon method

3 模拟结果比较

在实测降雨(一)和设计降雨两种情景下,分别运用 B ATP 方法、人工绘制法和泰森多边形法构建雨水管网模型,对比模拟结果并分析指标差异。

3.1 实测降雨模拟对比

将图 8 实测降雨(一)数据分别导入依据 3 种子汇水区划分方法构建的管网模型,比较模拟结果。

监测点模型与实测液位、流量曲线分别见图 17、图 18。3 种方法模型评估指标对比见表 3。计算结果表明:B ATP 方法、人工绘制法和泰森多边形法模拟的液位流量峰现时间间隔分别为 3、2、7 min,均满足小于 1 h 的标准;模型液位峰值偏差分别为 1.115%、6.981%、17.059%,流量峰值偏差为 1.301%、17.044%、23.330%,均满足不大于 25% 的标准;模型总流量偏差分别为 6.796%、17.000%、

40.343%, 仅泰森多边形法模型结果不满足 20% 的标准^[31]。综上可见: B ATP 方法、人工绘制法模型

与实测拟合度好, 模型精度高; 泰森多边形法模型与实测拟合不佳, 模型精度低。

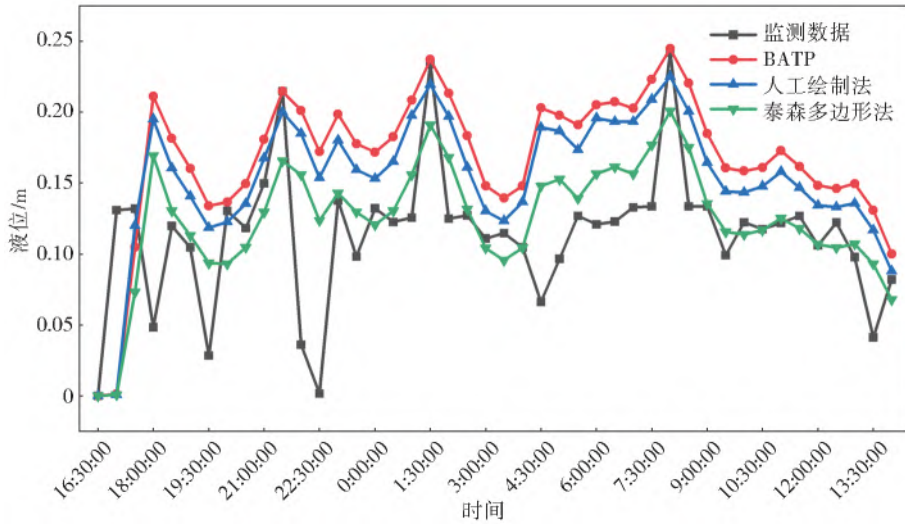


图 17 实测与模型液位对比曲线

Fig. 17 Comparison curves of measured and model liquid level

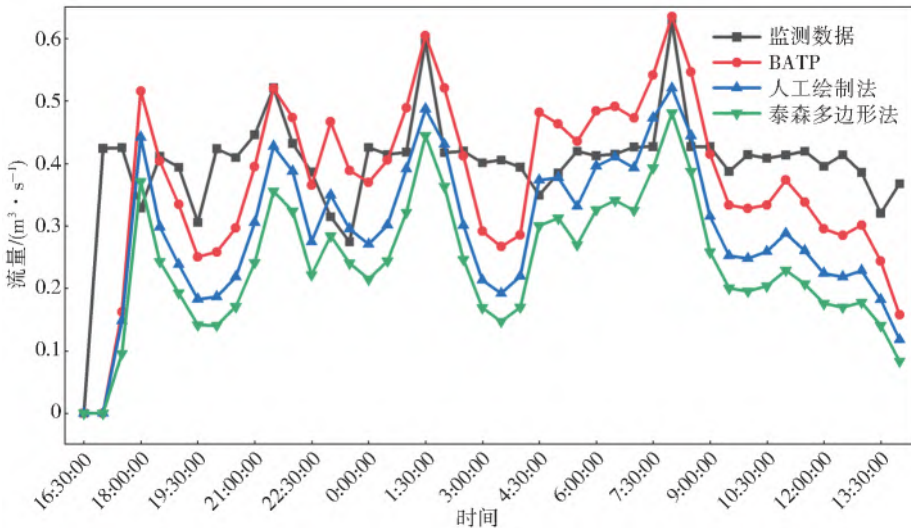


图 18 实测与模型流量对比曲线

Fig. 18 Comparison curves of measured and model flow

表 3 3 种方法模型指标对比

Tab. 3 Comparison of indicators of the three methods

方法	管道液位				管道流量				总水量/ m ³	与监测总水量 偏差/%
	峰值/ m	与监测 峰值偏差/%	峰现 时间	与监测峰现 时间偏差/min	峰值/ (m ³ · s ⁻¹)	与监测 峰值偏差/%	峰现 时间	峰现时间 偏差/min		
B ATP	0.244	1.115	08:12	3	0.635	1.301	08:12	3	29 556	6.796
人工绘制法	0.225	6.981	08:13	2	0.520	17.044	08:13	2	26 321	17.000
泰森多边形法	0.201	17.059	08:22	-7	0.480	23.330	08:22	-7	18 918	40.343

3.2 设计降雨情景下方法差异度分析

为进一步对比 B ATP 方法、人工绘制法和泰森多边形法的差异, 将 3 种方法运用于设计降雨情景进行模拟, 采用成对比较检验法来分析实测数据与模型结果相似程度。设计降雨采用北京市重现期为 1、2、3、5、10、20、30、50、100 a 的 9 种芝加哥雨型, 见图 19。

出水口液位及流量由汇水区范围及面积决定, 按重现期顺序分别绘制出水口流量随时间的变化过程线。降雨重现期不断增大时, 出水口液位及流量峰值增幅均上升。为了便于比较, 表 4、表 5 分别列出了不同重现期下 3 种方法模拟的出水口液位及流量峰值。人工绘制法是人工依据实况划分的, 因而

汇水区范围划定较准确。以人工绘制法模型出水口流量过程线为参照曲线,运用成对比较检验法,对 3

种方法划分子汇水区得到的出水口液位及流量峰值分别进行成对样本检验,检验结果见表 6、表 7。

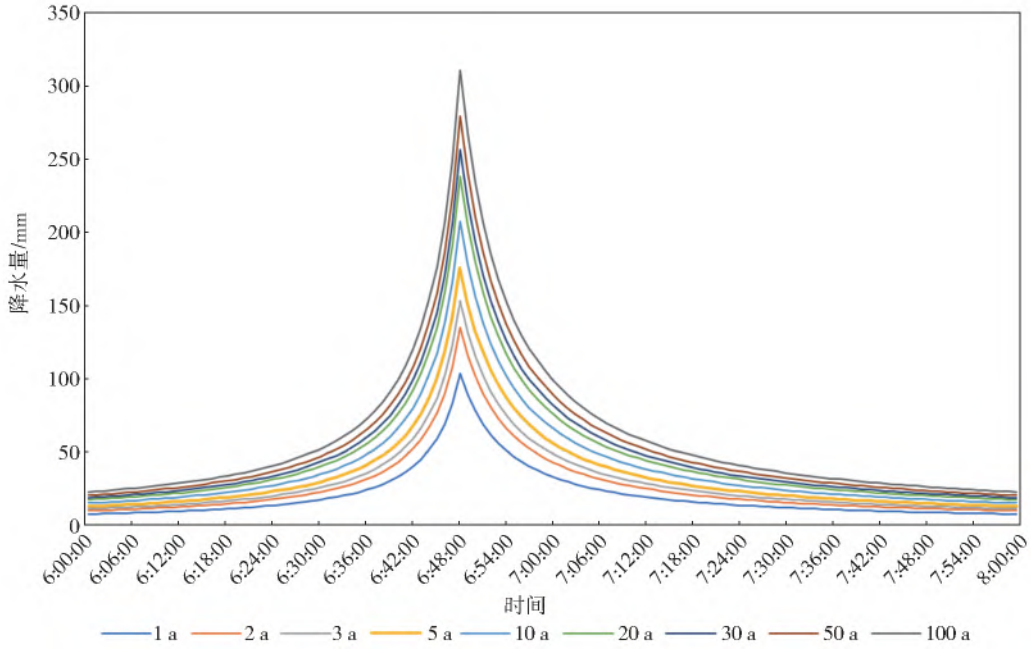


图 19 设计降雨雨型

Fig. 19 Design rainfall patterns

表 4 在不同重现期下 3 种方法模拟的液位峰值

Tab. 4 Peak liquid levels of different methods

重现期/a	单位:m		
	BATP	人工绘制法	泰森多边形法
1	1.815	1.766	1.624
2	2.219	2.225	2.031
3	2.355	2.385	2.174
5	2.538	2.579	2.337
10	2.607	2.644	2.548
20	2.857	2.879	2.738
30	2.904	2.910	2.790
50	2.910	2.910	2.795
100	2.910	2.910	2.813

表 5 在不同重现期下 3 种方法模拟的流量峰值

Tab. 5 Peak flows of different methods

重现期/a	单位:m ³ /s		
	BATP	人工绘制法	泰森多边形法
1	27.03	26.56	23.73
2	35.80	35.92	31.91
3	38.63	39.26	34.86
5	43.06	44.11	38.26
10	44.83	45.80	43.32
20	51.45	52.04	48.26
30	52.71	53.21	50.48
50	54.47	55.30	51.97
100	57.17	57.34	54.16

表 6 出水口液位峰值不同方法成对样本检验

Tab. 6 Paired sample tests of water outlet liquid level peak value by different methods

方法	成对差分					t	df	Sig(双侧)
	峰值差	峰值差	峰值差	差分的 95% 置信区间				
	均值/m	标准差/m	标准误差/m	下限	上限			
BATP-人工绘制法	-0.010	0.0273	0.009	-0.031	0.011	-1.137	8	0.288
泰森多边形法-人工绘制法	-0.151	0.0526	0.018	-0.191	-0.110	-8.611	8	0

表 7 出水口流量峰值不同方法成对样本检验

Tab. 7 Paired sample test of water outlet flow peak value by different methods

方法	成对差分					t	df	Sig(双侧)
	峰值差	峰值差	峰值差	差分的 95% 置信区间				
	均值/(m ³ ·s ⁻¹)	标准差/(m ³ ·s ⁻¹)	标准误差/(m ³ ·s ⁻¹)	下限	上限			
BATP-人工绘制法	-0.432	0.615	0.205	-0.905	0.041	-2.107	8	0.068
泰森多边形法-人工绘制法	-3.621	1.045	0.348	-4.425	-2.817	-10.380	8	0

采用成对样本检验的数学分析方法,求出 3 种方法两两对比的 Sig 值,进而评估指标显著性差异。Sig 计算公式为

$$\text{Sig} = P\{\chi^2 \geq \chi_{\text{Sig}}^2(n)\} = \frac{1}{2^{\frac{n}{2}} \Gamma(\frac{n}{2})} \int_{\chi_{\text{Sig}}^2}^{+\infty} x^{\frac{n}{2}-1} e^{-\frac{x}{2}} dx$$

式中: n 为自由度; $\Gamma(n)$ 为伽马函数; $\chi^2(n)$ 为卡方分布函数。

数学分析中,以 $\text{Sig}0 = 0.05$ 作为显著性临界值。由表 6、表 7 可以得出:BATP 方法与人工绘制法液位及流量成对样本检验的 Sig 分别为 0.288 和 0.068,均大于 $\text{Sig}0$,未达到显著性水平;而泰森多边形法与人工绘制法液位及流量成对样本检验的 Sig 均为 0,远小于 $\text{Sig}0$,在显著性范围内。综上所述

述,泰森多边形法未考虑地形因素,SWMM 模型精度低,而 BATP 方法较泰森多边形法在划分子汇水区时加入了地形盆地分析,汇水区范围划定结果更接近人工实况汇水区,所以模拟结果更准确,模型精度高。

计算得出,泰森多边形法、BATP 方法与人工绘制法的液位及流量峰值偏差,分析结果(表 8、表 9)显示,各重现期下泰森多边形法与人工绘制法液位及流量峰值偏差均为负值。以 $\pm 3\%$ 为偏差指标,所有设计降雨情景下,泰森多边形法的模型液位及流量峰值偏差率均小于 -3% ,BATP 方法与人工绘制法液位及流量峰值偏差均在 $\pm 3\%$ 范围内。因此,泰森多边形法构建的雨水管网模型结果液位峰值、流量峰值均偏低,模型精度不佳。

表 8 泰森多边形法液位偏差分析

Tab. 8 Thiessen method liquid level bias analysis

重现期/a	泰森多边形法 液位峰值/m	人工绘制法 液位峰值/m	BATP 液位峰值/m	泰森多边形法与人工绘制法 液位峰值偏差/%	BATP 与人工绘制法 液位峰值偏差/%	泰森多边形法与 BATP 液位峰值偏差/%
1	1.624	1.766	1.815	-8.74	2.70	-10.52
2	2.031	2.225	2.219	-9.55	-0.27	-8.47
3	2.174	2.385	2.355	-9.71	-1.27	-7.69
5	2.337	2.579	2.538	-10.36	-1.62	-7.92
10	2.548	2.644	2.607	-3.77	-1.42	-2.26
20	2.738	2.879	2.857	-5.15	-0.77	-4.17
30	2.790	2.910	2.904	-4.30	-0.21	-3.93
50	2.795	2.910	2.910	-4.11	0	-3.95
100	2.813	2.910	2.910	-3.45	0	-3.33

表 9 泰森多边形法流量偏差分析

Tab. 9 Thiessen method flow bias analysis

重现期/a	泰森多边形法流量 峰值/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	人工绘制法流量 峰值/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	BATP 流量 峰值/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	泰森多边形法与人工 绘制法流量峰值偏差/%	BATP 与人工绘制法 流量峰值偏差/%	泰森多边形法与 BATP 流量峰值偏差/%
1	23.73	26.56	27.03	-11.93	1.74	-13.80
2	31.91	35.92	35.80	-12.57	-0.34	-10.87
3	34.86	39.26	38.63	-12.62	-1.63	-9.76
5	38.26	44.11	43.06	-15.29	-2.44	-11.15
10	43.32	45.80	44.83	-5.72	-2.16	-3.37
20	48.26	52.04	51.45	-7.83	-1.15	-6.20
30	50.48	53.21	52.71	-5.41	-0.95	-4.23
50	51.97	55.30	54.47	-6.41	-1.52	-4.59
100	54.16	57.34	57.17	-5.87	-0.30	-5.26

4 结 论

人工绘制法划分子汇水区的模拟结果与实测数据偏差较小,满足规范要求,精度较高。

BATP 方法划分子汇水区的模拟结果与人工绘

制法模拟结果较为接近,且与实测值偏差小,模型精度较高。

泰森多边形法由于缺少地形因素考虑,划分的子汇水区得到的模型结果与实测值均偏差较大。因此,考虑地形因素可有效提高雨水管网模

型精度。

人工绘制法对绘制人员的专业程度要求较高,且划分过程繁琐复杂,而 BATP 方法可结合计算机技术自动划分子汇水区,操作简单,节省时间和精力,并可以获得较高精度的模型结果。

参考文献(References):

[1] 徐宗学,叶陈雷. 城市暴雨洪涝模拟:原理,模型与展望[J]. 水利学报,2021,52(4):381-392. (XU Z X, YE C L. Simulation of urban flooding/waterlogging processes; Principle, models and prospects[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52 (4): 381-392. (in Chinese)) DOI:10.13243/j.cnki.slx.20200515.

[2] 侯精明,郭凯华,王志力,等. 设计暴雨雨型对城市内涝影响数值模拟[J]. 水科学进展,2017,28(6):820-828. (HOU J M, GUO K H, WANG Z L, et al. Numerical simulation of design storm pattern effects on urban flood inundation [J]. Advances in Water Science, 2017, 28 (6):820-828. (in Chinese)) DOI:10.14042/j.cnki.32.1309.2017.06.003.

[3] TANG X, HONG H, SHU Y, et al. Urban waterlogging susceptibility assessment based on a PSO-SVM method using a novel repeatedly random sampling idea to select negative samples[J]. Journal of Hydrology, 2019,576:583-595. DOI:10.1016/j.jhydrol.2019.06.058.

[4] DONGQUAN Z, JINING C, HAOZHENG W, et al. GIS-based urban rainfall-runoff modeling using an automatic catchment-discretization approach; a case study in Macao[J]. Environmental Earth Sciences, 2009, 59 (2):465-472. DOI:10.1007/s12665-009-0045-1.

[5] 麻德明,丁绍昆,谢宜欣. 基于 DEM 的北部湾入海河流汇水区及子流域划分[J]. 海洋开发与管理,2016,33(9):99-103. (MA D M, DING S K, XIE Y X. Division of river catchment and sub-catchment in Beibu Gulf based on DEM [J]. Marine development and management, 2016, 33 (9):99-103. (in Chinese))

[6] 叶爱中,夏军,王纲胜,等. 基于数字高程模型的河网提取及子流域生成[J]. 水利学报,2005(5):531-537. (YE A Z, XIA J, WANG G S, et al. Drainage network extraction and subcatchment delineation elevation model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005(5):531-537. (in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn:0559-9350.2005.05.004.

[7] 李曼曼,韩会玲,刘晓英,等. SWAT 模型最佳子流域划分方案研究:以云南洱海流域为例[J]. 中国农业气象,2012,33(2):185. (LI M M, HAN H L, LIU X Y, et al. Study on optimal sub-division scheme of watershed using SWAT model; A case study in Rrhai basin, Yunnan Province [J]. Chinese Journal of Agrometeo-

rology, 2012, 33 (2): 185. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-6362.2012.02.005.

[8] 王艳君,吕宏军,姜彤. 子流域划分和 DEM 分辨率对 SWAT 径流模拟的影响研究[J]. 水文,2008,28(3):22-25. (WANG Y J, LYU H J, JIANG T. Influence of watershed subdivision and DEM resolution on SWAT runoff simulation [J]. Journal of China Hydrology, 2008, 28 (3):22-25. (in Chinese))

[9] 何毅,蔺彬彬. 基于 DEM 的流域分割及子流域分类[J]. 人民黄河,2014,36(7):25-28. (HE Y, LIN B B. Study on basin segmentation and sub-basin classification based on DEM[J]. Yellow River, 2014, 36 (7):25-28. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-1379.2014.07.008.

[10] ROUHANI H, WILLEMS P, FEYEN J. Effect of watershed delineation and areal rainfall distribution on runoff prediction using the SWAT model[J]. Hydrology Research, 2009, 40 (6): 505-519. DOI: 10.2166/nh.2009.042.

[11] LEI X H, TIAN Y, JIANG Y Z, et al. General catchment delineation method and its application into the Middle Route Project of China's South-to-North Water Diversion [J]. HKIE Transactions, 2010, 17 (2):27-33. DOI:10.1080/1023697X.2010.10668193.

[12] CHOI J Y, ENGEL B A. Real-time watershed delineation system using Web-GIS[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2003, 17 (3): 189-196. DOI: 10.1061/(ASCE)0887-3801(2003)17:3(189).

[13] LUO Y, SU B, YUAN J, et al. GIS techniques for watershed delineation of SWAT model in plain polders [J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 10:2050-2057. DOI:10.1016/j.proenv.2011.09.321.

[14] LIAO C, TESFA T, DUAN Z, et al. Watershed delineation on a hexagonal mesh grid[J]. Environmental Modelling & Software, 2020, 128: 104702. DOI: 10.1016/j.envsoft.2020.104702.

[15] LAI Z, LI S, LYU G, et al. Watershed delineation using hydrographic features and a DEM in plain river network region[J]. Hydrological Processes, 2016, 30 (2):276-288. DOI:10.1002/hyp.10612.

[16] CASTRONOVA A M, GOODALL J L. A hierarchical network-based algorithm for multi-scale watershed delineation[J]. Computers & Geosciences, 2014, 72: 156-166. DOI:10.1016/j.cageo.2014.07.014.

[17] JONES N L, WRIGHT S G, MAIDMENT D R. Watershed delineation with triangle-based terrain models [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1990, 116 (10): 1232-1251. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1990)116:10(1232).

[18] COMAIR G F, MCKINNEY D C, SIEGEL D. Hy-

- drology of the Jordan River basin; Watershed delineation, precipitation and evapotranspiration[J]. *Water Resources Management*, 2012, 26 (14): 4281-4293. DOI: 10.1007/s11269-012-0144-8.
- [19] BRASSEL K E, REIF D. A procedure to generate Thiessen polygons[J]. *Geographical Analysis*, 1979, 11(3): 289-303. DOI: 10.1111/j.1538-4632.1979.tb00695.x.
- [20] 李若男, 王军, 胡恒智, 黄浦区北部子汇水区划分方法及暴雨内涝情景模拟[J]. *水电能源科学*, 2019, 37(7): 50-53. (LI R N, WANG J, HU H Z. Sub-catchment division method and rainstorm waterlogging scenario modeling in north Huangpu district[J]. *Water Resources and Power*, 2019, 37(7): 50-53. (in Chinese))
- [21] 朱治州, 张书亮, 王一梅, 等. 基于多要素的城市汇水区分级划分研究[J]. *南京师大学报(自然科学版)*, 2020, 43(3): 71-77. (ZHU Z Z, ZHANG S L, WANG Y M, et al. Research on hierarchical partition of urban catchment area based on multiple factors[J]. *Journal of Nanjing Normal University(Natural Science Edition)*, 2020, 43(3): 71-77. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-4616.2020.03.012.
- [22] 沈黎达, 李瑶, 李东臣, 等. 复杂下垫面城市暴雨内涝汇水区划分方法研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(6): 50-58, 67. (SHEN L D, LI Y, LI D C, et al. Study on dividing method of rainstorm waterlogging catchment area in urban area with complex underlying surface[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2019, 30(6): 50-58, 67. (in Chinese))
- [23] WARSTA L, NIEMI T J, TAKA M, et al. Development and application of an automated subcatchment generator for SWMM using open data[J]. *Urban Water Journal*, 2017, 14(9): 954-963. DOI: 10.1080/1573062X.2017.1325496.
- [24] WU Z, MA B, WANG H, et al. Study on the improved method of urban subcatchments division based on aspect and slope-taking SWMM model as example[J]. *Hydrology*, 2020, 7(2): 26. DOI: 10.3390/hydrology7020026.
- [25] BACK Y, FUNKE F, BACH P M, et al. Comparing urban sub-catchment delineation approaches for dynamic hydrological modelling[C]//EGU General Assembly Conference Abstracts, 2021; EGU21-12004. DOI: 10.5194/egusphere-egu21-12004.
- [26] JI S, QIUWEM Z. A GIS-based subcatchments division approach for SWMM[J]. *The Open Civil Engineering Journal*, 2015, 9(1): 515-521. DOI: 10.2174/1874149501509010515.
- [27] DÖRING A, NEUWEILER I. Generation of stormwater drainage networks using spatial data[C]//International Conference on Urban Drainage Modelling. Springer, Cham, 2018: 576-581. DOI: 10.1007/978-3-319-99867-1_99.
- [28] LI C, FAN Z, WU Z, et al. Methodology of sub-catchment division considering land uses and flow directions[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2020, 9(11): 634. DOI: 10.3390/ijgi9110634.
- [29] BAI T, BOROWIAK K, WU Y, et al. Highly resolved runoff path simulation based on urban surface landscape layout for sub-catchment scale[J]. *Water*, 2021, 13(10): 1345. DOI: 10.3390/w13101345.
- [30] DU C, YE A, GAN Y, et al. Drainage network extraction from a high-resolution DEM using parallel programming in the .NET framework[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 555: 506-517.
- [31] 中国工程建设标准化协会. 城市内涝防治系统数学模型构建和应用规程: T/CECS 647—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020. (China Engineering Construction Standardization Association. Technical specification for construction and application of mathematical model of urban flooding prevention and control system; T/CECS 647-2019[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2020. (in Chinese))

Subcatchment division and simulation precision of rainwater pipe network model

YANG Jiali¹, XU Yongjun², LIANG Ji¹, TANG Ying³, LIU Zilong⁴

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 4730074, China;

2. Huadong Engineering Corporation Limited, Southeast Regional Headquarters, Power Construction

Corporation of China, Hangzhou 311100, China; 3. Department of Urban Construction, Beijing City University,

Beijing 100083, China; 4. Beijing Municipal Institute of City Planning and Design, Beijing 100045, China)

Abstract: In recent years, it is common for cities to accumulate rain and flood during rainstorm. On the one hand, due to the negative impact of human activities on the environment, extreme rainstorm events occur frequently. On the other hand, with the acceleration of urbanization, urban hardening road surface increases, green space decreases, urban rainwater infiltration capacity is insufficient, easy to form waterlogging water. To solve urban waterlogging problem, urban waterlogging model needs to be built. An important part of urban waterlogging model is urban stormwater pipe network model. The key step of urban rainwater pipe network model construction is the division of sub-catchment area, and the division result has great influence on the simula-

tion accuracy of urban rainwater pipe network.

Based on the theory of surface hydrological analysis of urban DEM, a basin analysis based Thiessen polygon subcatchment division method was proposed to solve the problem of inaccurate division of urban subcatchment area. This method took into account the effect of topography on the simulation accuracy of stormwater pipe network model. Basin analysis was carried out based on the raster data of the high resolution urban digital elevation model, and the runoff unit with concentrated catchment area was divided. The elevation variation in the runoff unit was small, and the runoff unit was defined as the primary sub-catchment area. The primary catchment area was revised to ensure that there are pipe network nodes in each primary catchment area. The primary catchment area was subdivided by Thiessen polygon method and the corresponding sub-catchment area was obtained.

Taking a certain area in Beijing as an example, the basin analysis based Thiessen polygon subcatchment division method was compared with the two most commonly used subcatchment partitioning methods; manual drawing method and traditional Thiessen polygon method. The manual drawing method is a method for professionals to manually delineate the sub-catchment area corresponding to each pipe network node according to DEM elevation raster data, satellite image and data of different land use types in the study area, and then refine ground object elevation data. The classification process of this method is tedious and the workload is heavy, but it can accurately match the catchment area served by the actual pipe network nodes. Thiessen polygon method uses geographic information system software to delimit molecular catchment area based on inspection well, which is quick, simple and easy to operate. Based on the simulation results of downhole liquid level peak, peak emergence time, flow peak, peak emergence time and total runoff, the simulation accuracy of different catchment division methods was analyzed and the advantages of basin analysis based Thiessen polygon subcatchment division method were evaluated. The case study showed that the error between basin analysis based Thiessen polygon subcatchment division method and measured data was the smallest, and the deviation of the peak value of underground liquid level, peak flow value and total water amount were 1.115%, 1.301% and 6.796%, respectively.

The indexes of the model obtained by the Thiessen polygon method to divide the molecular catchment area had great deviations from the measured values, among which the total water amount deviation is 40.343%, showing a poor fitting degree. Moreover, the model flow peak value of Thiessen polygon method was significantly smaller than that of manual drawing method, resulting in low accuracy of simulation results. The deviation between the manual drawing method results and the measured data was small, which met the requirements of the specification and had high precision. The basin analysis based Thiessen polygon subcatchment division method had a small deviation between the simulated results of molecular catchment and the measured values, which met the specification requirements. Compared with the manual drawing method, the index error was smaller and the model accuracy was higher. Therefore, the urban stormwater network model constructed by the method proposed to divide the molecular catchment area had high precision, and the method proposed was simpler to operate than manual drawing method, which can reduce the workload and improve the drawing efficiency.

Key words: rainwater pipe network model; subcatchment division; basin analysis; Thiessen polygons method