

城市雨水管理

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.01.018

山地丘陵城市汇水区划分方法及内涝模拟分析

李德师¹, 徐连军², 陶涛¹, 信昆仑¹

(1. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120)

摘要: 构建山地丘陵城市排水管网模型时,山岭大面积的雨水汇水区成为研究者必须考虑的问题。针对山岭汇水特点和非线性水库汇流模型的缺陷,提出基于等流时线的山岭汇水区划分方法,将山岭雨水通过虚拟节点和管段排入管网系统。以Z市某辖区排水管网的InfoWorks ICM模拟过程为例,研究了基于等流时线的汇水区划分方法和常规泰森多边形汇水区划分方法对模拟结果的影响。结果表明,采用基于等流时线的山岭汇水区划分方法时,模拟结果与山岭地区雨水汇流过程更为吻合,对该类区域排水管网的排水能力评估和内涝模拟具有一定的借鉴意义。

关键词: 山地丘陵城市; 山岭汇水区; 等流时线; 内涝; InfoWorks ICM

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)01-0109-05

Catchment Division Method and Flooding Simulation Analysis of Mountainous and Hilly Cities

LI De-shi¹, XU Lian-jun², TAO Tao¹, XIN Kun-lun¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co. Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: When establishing drainage pipe network model in a mountainous and hilly city, researchers must take into account the problem of large rainwater catchments in the mountainous areas. Aiming at the characteristics of stormwater confluence in the mountain and the defects of non-linear reservoir conflux model, a catchment division method for the mountain based on isochrones was proposed, and stormwater in the mountain was discharged into the pipe network system through virtual nodes and pipes. An example of a drainage system in a district of Z city simulated by InfoWorks ICM software was given, and the effect of catchment division methods based on isochrones and conventional Thiessen polygon on the simulation results were explored. The simulation results were more consistent with the stormwater conflux process in the mountain area when the method based on isochrones was adopted, which had certain reference significance for the drainage capacity evaluation and urban flooding simulation of drainage pipe network in similar regions.

Key words: mountainous and hilly city; mountain catchment; isochrones; urban flooding; InfoWorks ICM

雨洪模型是城市雨水管理的重要手段,目前国内学者已开发出多种雨洪模型,应用较广泛的有SWMM、MIKE Urban 和 InfoWorks 等^[1]。构建山地丘陵城市排水模型时,针对大面积的山岭汇水区划分,常规泰森多边形法在地势起伏大的区域存在缺陷,适用性不强,因为在非线性水库汇流模型中,用某时刻单位面积径流量乘以汇水区总面积得到总径流量,而山岭坡度较大,汇水较急,在泰森多边形法绘制的山岭汇水区内,汇流时间不尽相同,并非汇流区内的雨水都同时到达排水出口,直接利用泰森多边形法绘制山岭汇水区,峰值流量会偏大,尤其对山地丘陵城市内涝模拟时,带有误差的峰值流量给防洪排涝规划带来诸多不确定性。因此,对山地丘陵城市建模时,需要妥善处理山岭汇水区的划分。

笔者针对常规泰森多边形法存在的缺陷,提出基于等流时线的山岭汇水区划分方法,并通过山岭虚拟节点和管段输送雨水,构建山地丘陵城市Z市某辖区的InfoWorks ICM 排水管网模型,对该辖区的一维和二维模拟情况进行分析,评估研究区域的管网排水能力和淹没情况。

1 研究区域概况

Z市某辖区陆地面积为300 km²,海岸线较长,山区主要分布在北部和南部,城区分布在中部,属于典型的沿海山地丘陵城市。区域内最高海拔近500 m,山地丘陵面积占陆地面积的近40%,山岭有较大的汇水面积,年平均降雨量为1 700~2 300 mm,区域内水系发达,河道相连,承担着城市排水任务,是主要的防洪排涝通道。山地丘陵城市的山岭面积较大,坡度较陡,汇水较快,汇流时间不等,因此,山岭汇水不容忽视,其汇水区的划分应得到重视。

2 排水模型构建

2.1 ICM 模型

InfoWorks ICM 模型由英国 Wallingford 公司开发,可完整模拟雨水循环过程,实现管网系统模型和河道模型的耦合,具有强大的数据接口和模型构建检查工具,包含排水管网水力模型、河道水力模型和二维城市/流域洪涝淹没模型。本研究涉及的主要模块有水文模块、管道水力模块和二维城市洪涝淹没模块,其中水文模块中的产流计算选用固定比例径流模型,汇流计算选用SWMM 径流模型,管道水力计算选用圣维南方程组的动态波模型,二维城市淹没采用二维有限体积法求解浅水流方程组,生成

三角网格,并计算网格内的积水深度和流速,最终得到地面积水深度和积水漫流路径。

2.2 降雨数据

本研究采用设计降雨作为降雨数据输入模型,Z市的暴雨强度公式如下:

$$q = \frac{847.172(1 + 0.659 \ln P)}{(t + 5.373)^{0.391}} \quad (1)$$

式中: q 为暴雨强度,L/(s·hm²); P 为暴雨重现期,年; t 为降雨历时,min。

选取重现期 P 为3、5、10、30年的暴雨过程进行分析,采用芝加哥雨型进行降雨过程分配,降雨历时设为120 min,雨峰位置系数 r 取0.4,降雨过程线如图1所示。

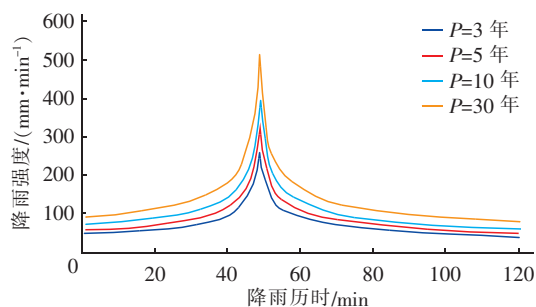


图1 芝加哥雨型降雨过程线

Fig. 1 Hydrograph of Chicago rainfall pattern

2.3 管网数据

管网的基础数据从GIS导入InfoWorks ICM后,经InfoWorks ICM工程性检验,找出原始管网数据存在的问题,这些问题包括管道埋深、坡度、排放口标识等,根据管网复核资料,修正管道埋深和检查井标高,并标识出排放口;概化后的排水管网共有9 980条沟渠,13 712条管道,24 354个检查井,其中排放口有730个,总管长约642 km。

2.4 地形数据

地形数据包含高程数据和土地类型。通过BIGEMAP下载研究区域16级精度的高程数据和遥感影像,高程数据和遥感影像的分辨率均为2.21 m。将研究区域的土地类型分为城市建成区、混合区和绿地三类,三类地表的径流系数分别设为0.7、0.4和0.15。

3 汇水区划分方法

汇水区的划分通常采用泰森多边形法、基于数字高程模型(DEM)划分、人工绘制等方法,人工绘制方法精度虽然高,但比较繁琐。在InfoWorks ICM

模型中,划分汇水区通常的做法是人工划定小排水区,在该区内用泰森多边形法生成汇水区。该方法在地势较为平坦的地区比较适用,故在 InfoWorks ICM 建模过程中研究区域的平原地区采用此方法划分汇水区。

3.1 基于等流时线的山岭汇水区划分方法

雨水经过汇水区产汇流阶段后方能进入到排水管网,SWMM 汇流模型采用非线性水库模型。文献[2]指出,非线性水库模型方法本身存在缺陷,以某时刻单位面积径流量乘以总面积得到总径流量,忽略了区域汇流时间,导致峰值流量偏大,且汇水区面积越大,误差越大。

研究区域山岭地形较陡、面积较大,不同区域的汇流时间不同,为减小非线性水库模型本身的误差,划分山岭汇水区时需要考虑汇流时间。针对该问题,本研究提出基于等流时线法划分山岭汇水区的方法,等流时线定义为流域上汇流至出水断面所需时间相等的地点连线,两条相邻等流时线间的面积为等流时面积,在等流时面积上同时产生的径流将在同一时段(相邻两条等流时线汇流时间差)内到达出口断面^[3]。熊立华等人^[4]提出了基于 DEM 的等流时线推求方法,该方法考虑了坡度对汇流时间的影响,反映流速空间分布的不均匀性,该法绘制等流时线的步骤如下:

① 假设 DEM 中总共有 N 个栅格,将它们按高程从小到大排列,栅格汇流时间的计算遵循高程从小到大的顺序。

② 对于第 i 个栅格,计算其净雨流经时间 τ_i ,直至算完所有栅格:

$$\tau_i = \frac{\Delta l}{a \cdot S_i^b} \quad (2)$$

式中: Δl 为栅格尺寸,m; S_i 为某个水流方向上的坡度; a 为参数,具有速度量纲; b 为参数,反映坡度对流速的影响。

③ 计算汇流时间。对于流域出口断面的栅格(即序号 $i=1$),汇流时间 t_1 即为流经时间 τ_1 。循着高程从小至大的计算顺序,对于第 i 个栅格,其周围 8 个栅格中,高程较低的栅格 j 汇流时间 t_j 已计算出,则其汇流时间为:

$$t_i = \tau_i + t_j \quad (3)$$

④ 将所有汇流时间相同的栅格集合,绘制出等流时线分布。

以研究区域面积较大的三座山岭为例,等流时线绘制结果如图 2 所示,其中 1[#]、2[#]、3[#] 山岭的面积分别为 1 500、450、1 370 hm^2 。

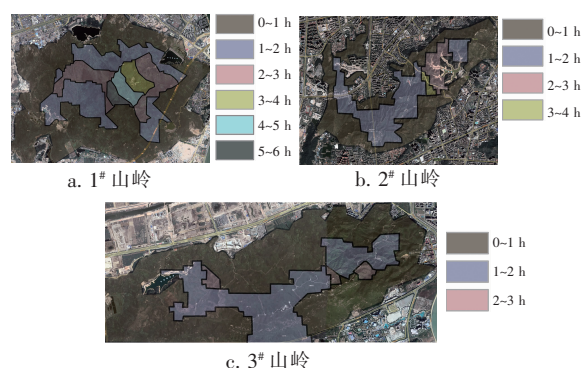


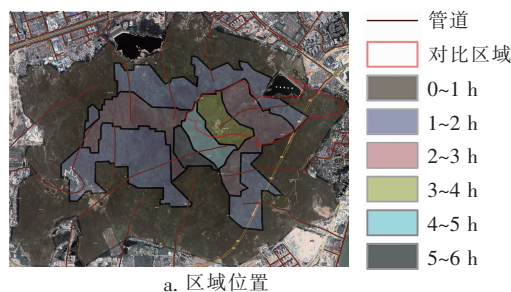
图2 等流时线空间分布

Fig. 2 Isochrones spatial distribution of three mountains

等流时线空间分布绘制结束后,在等流时面积内用 InfoWorks ICM 内嵌的泰森多边形法划分汇水区,此方法考虑到非线性水库模型计算总径流量时存在的缺陷,降低了由于忽略汇流时间而带来的峰值流量误差。

3.2 两种山岭汇水区划分方法的比较

常规泰森多边形和基于等流时线划分汇水区本质区别在于前者考虑检查井的位置进行泰森多边形划分,后者则考虑了汇流时间。为了比较两种方法的结果合理性,选择 1[#] 山岭一块总汇水面积约 200 hm^2 的排水区域,见图 3(a) 中的红色边线所含区域,虚拟管道分布见图 3(a),该区域最大汇流时间范围在 4~5 h 之间,在降雨重现期 $P=10$ 年的条件下,首先将该区域分成 5 块大汇水区,得到出口管段流量,然后基于等流时线进一步细分汇水区,比较出口管段的流量,结果见图 3(b)。基于等流时线的汇水区划分方法的出口管段在 4 h 后仍有出流,而常规泰森多边形划分方法则在 4 h 后几乎无出流,基于等流时线划分山岭汇水区符合该排水区域的汇流情况,管段峰值流量削减 20%。



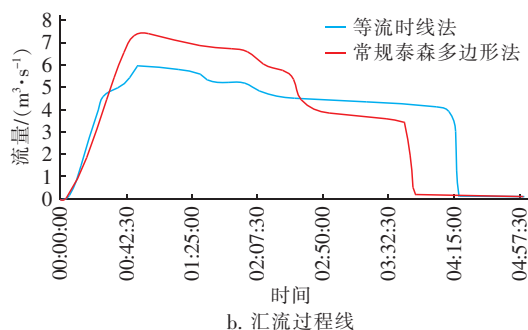


图3 两种山岭汇水区划分方法的比较

Fig. 3 Contrast between two catchment division methods

4 模拟结果分析

4.1 管网排水能力评估

在4场重现期设计降雨条件下,采用最不利时刻的超负荷状态来评价研究区域管网的排水能力。本研究将排水管网超负荷状态分为以下三种:①超负荷状态 <1 ,此时管道未处于超负荷状态,管道内水深小于管径;②超负荷状态 $=1$,此时管道处于超负荷状态,水力坡度小于管道坡度;③超负荷状态 $=2$,此时管道处于超负荷状态,水力坡度大于管道坡度。统计结果见表1。

表1 雨水管道超负荷状态统计

Tab. 1 Statistical results of overload condition of pipe network

重现期/年	超负荷状态 <1		超负荷状态 $=1$		超负荷状态 $=2$	
	管长/km	占比/%	管长/km	占比/%	管长/km	占比/%
3	150.58	23.5	370.37	57.7	120.92	18.8
5	124.48	19.4	381.09	59.4	136.30	21.2
10	100.03	15.6	390.08	60.8	151.76	23.6
30	75.65	11.8	394.67	61.5	171.55	26.7

表1反映了管道运行状态受总降雨量和最大雨强的影响,随着降雨重现期的增大,管道超负荷状态运行的比例随之增加,依据表1可评估研究区域的管道排水能力:①排水能力 <3 年一遇的管长为491.29 km,占比为76.5%;②排水能力为3~5年一遇的管长为26.10 km,占比为4.1%;③排水能力为5~10年一遇的管长为24.45 km,占比为3.8%;④排水能力为10~30年一遇的管长为24.38 km,占比为3.8%;⑤排水能力 >30 年一遇的管长为75.65 km,占比为11.8%。

研究区域约80%的管道排水能力不超过3年一遇标准,研究区域一般地区的雨水排水重现期采用3年一遇标准,重要地区采用5年一遇标准,由此可见,现有管网总体排水能力不足。在暴雨发生时,

由于研究区域的地形特点,山岭的雨水汇流至排水管网,管网设计标准偏低导致无法及时将雨水排走,引发城市内涝。

4.2 二维模拟内涝情况评估

在一维模拟对管网排水能力评估结束后,分别在4场重现期设计降雨条件下对研究区域内涝情况进行模拟评估,统计溢流节点数,结果显示,在3年设计降雨重现期条件下,溢流节点数为5 618个,占比为23.1%;在5年设计降雨重现期条件下,溢流节点数为6 890个,占比为28.3%;在10年设计降雨重现期条件下,溢流节点数为8 444个,占比为34.7%;在30年设计降雨重现期条件下,溢流节点数为10 502个,占比为43.1%。研究区域发生内涝积水的地点多分布在山脚下以及地势低洼区域,选择5个积水较严重的内涝点(均分布在山脚下,易受到内涝灾害)进行积水深度对比,结果见表2。可以看出,随着降雨重现期的增加,发生内涝的区域和积水深度增加,内涝情况最严重的是5[#]内涝点,该内涝点所在区域排水管网密度较低,又处于地势低洼处,故积水深度最大。

表2 不同重现期下的最大内涝积水深度

Tab. 2 Maximum waterlogging depth under different return periods m

内涝点	积水深度			
	3年一遇	5年一遇	10年一遇	30年一遇
1 [#]	0.6	0.7	0.9	1.2
2 [#]	0.5	0.8	1.3	2.0
3 [#]	1.1	1.2	1.4	1.5
4 [#]	1.2	1.4	1.5	1.6
5 [#]	1.9	2.2	2.6	3.1

5 结论

① 在InfoWorks ICM软件的SWMM汇流模型中,非线性水库模型计算总径流量时忽略了区域汇流时间,导致峰值流量偏大,且汇水区面积越大,误差越大,因此汇流计算需要考虑汇流时间的影响。针对山地丘陵城市山岭汇水面积较大、坡度较陡的特点,提出一种基于等流时线的山岭汇水区划分方法,并与常规泰森多边形划分方法进行比较,结果表明,前者的管道出流更符合排水区域的汇流情况,峰值流量削减20%,说明本研究提出的山岭汇水区划分方法具有一定借鉴意义。通过虚拟节点和管段解决了山岭雨水排放问题,避免山脚下的节点汇水区太大导致InfoWorks ICM模型不稳定,为划分山岭汇

水区和山地丘陵城市建模提供了一种新思路。

② 构建了研究区域的 InfoWorks ICM 排水模型,选用 $P=3、5、10、30$ 年的设计降雨对研究区域内涝进行模拟,通过模型一维和二维模拟,评估管网排水能力、分析内涝积水情况,结果显示,约 80% 的雨水管道排水能力不足 3 年一遇,研究区域内涝积水点多分布在山脚下和地势低洼处,且随着设计降雨重现期的增加,超负荷状态管道比例增加,内涝积水情况加重,选取的内涝点积水深度在 0.5 ~ 3.1 m 不等,较符合山地丘陵城市的内涝情况。

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.
XIA Jun, ZHANG Yin, LIANG Changmei, et al. Review on urban storm water models[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2018, 51(2):95-105(in Chinese).
- [2] 陶涛,颜合想,李树平,等. 城市雨水管理模型关键问题探讨(一)——汇流模型[J]. 给水排水,2017,43(3):36-40.

TAO Tao, YAN Hexiang, LI Shuping, et al. Discussion on key issues of urban rainwater management model (I)—confluence model[J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 43(3):36-40(in Chinese).

- [3] 陶涛,信昆仑,颜合想. 水文学和水文地质[M]. 上海:同济大学出版社,2017.
TAO Tao, XIN Kunlun, YAN Hexiang. Hydrology and Hydrogeology [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2017(in Chinese).
- [4] 熊立华,彭定志. 基于数字高程模型的等流时线推求与应用[J]. 武汉大学学报(工学版),2003,36(3):1-3,12.
XIONG Lihua, PENG Dingzhi. Derivation of DEM-based isochrones of watersheds [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2003, 36(3):1-3,12(in Chinese).

作者简介:李德师(1995-),男,海南海口人,硕士研究生,主要研究方向为排水管网系统运行最优化。

E-mail: leedeshi@163.com

收稿日期:2020-03-31

修回日期:2020-06-17

(编辑:刘贵春)

(上接第108页)

- [15] 于会彬,宋永会,杨楠,等. 三维荧光与神经网络研究城市河流沉积物孔隙水有机物组成与结构特征[J]. 光谱学与光谱分析,2015,35(4):934-939.
YU Huibin, SONG Yonghui, YANG Nan, et al. Characterizing structural composition of dissolved and particulate organic matter from sediment pore water in a urban river using excitation-emission matrix fluorescence with self-organizing map[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(4):934-939(in Chinese).
- [16] MIAO L, ZHANG Q, WANG S Y, et al. Characterization of EPS compositions and microbial community in an Anammox SBBR system treating landfill leachate [J]. Bioresource Technology, 2018, 249:108-116.
- [17] ZHAO Y, LU Q, WEI Y, et al. Effect of actinobacteria agent inoculation methods on cellulose degradation

during composting based on redundancy analysis [J]. Bioresource Technology, 2016, 219:196-203.

- [18] NANCUCHEO I, BITENCOURT J A P, SAHOO P K, et al. Recent developments for remediating acidic mine waters using sulfidogenic bacteria[J]. Biomed Research International, 2017. DOI:10.1155/2017/7256582.

作者简介:许峥(1981-),男,浙江丽水人,大学本科,正高级工程师,长期从事海绵城市、给排水、消防设计研究工作,多次获得省部级设计奖和科技进步奖。

E-mail: xu_z@ecidi.com

收稿日期:2020-01-02

修回日期:2020-11-16

(编辑:孔红春)