

基于多要素的城市汇水区分级划分研究

朱治州¹, 张书亮^{1,2}, 王一梅¹, 杨祺琪¹, 戴 强^{1,2}

(1. 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210023)

(2. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 江苏 南京 210023)

[摘要] 为有效提高城市雨洪模型的建模质量, 在传统水文分析方法的基础上, 结合多级汇水区的空间认知理念, 提出了顾及多要素的城市地表汇水区分级划分方法。该方法综合了地形、河流、建筑物、道路及人工排水设施等不同层次的要素, 将城市地表作三个等级的划分, 由大到小, 逐级细化, 并采用丽水市莲都区雨洪模型进行模拟实验, 结果表明分级划分法所得汇水区分别在 SWMM 模型与 MOUSE 模型中的模拟结果均比泰森多边形法的更加准确, 在实地考察对比后发现, 该方法划分结果基本符合实地真实汇水情况, 证实了其能够应用于较复杂的城市汇水区划分, 可为城市防洪减灾研究和灾后恢复工作提供指导。

[关键词] 城市雨洪模拟, 多要素, 汇水区, 分级划分, 丽水市莲都区

[中图分类号] P208 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2020)03-0071-07

Research on Hierarchical Partition of Urban Catchment Area Based on Multiple Factors

Zhu Zhizhou¹, Zhang Shuliang^{1,2}, Wang Yimei¹, Yang Qiqi¹, Dai Qiang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment of Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China)

Abstract: In order to effectively improve the modeling quality of urban stormwater models, the urban land surface watershed hierarchical partition method that took into account multiple factors has been proposed in this paper which was based on traditional hydrological analysis methods and the spatial cognition concept of multi-level catchment area was combined. The method incorporated different levels of elements such as terrain, rivers, buildings, roads, and artificial drainage facilities, and the urban land surface was divided into three levels according to the principle of large to small as well as step-by-step refinement. The rain flood model was experimentally carried out in Liandu District of Lishui City, China. The verification results showed that the simulation results obtained by the hierarchical partition method in the SWMM model and the MOUSE model were more accurate than the Thiessen polygon method. After field comparison, it was found that the method results were consistent with the actual real water situation basically in the field. The method has been proved to be applicable to the more complicated urban catchment division, and it could provide reference for urban flood control and disaster reduction research, as well as guide disaster recovery work to a certain extent.

Key words: urban rainfall and flood simulation, multiple factor, catchment area, hierarchical partition, Liandu District of Lishui City

近年来, 中国城市内涝灾害频发, 严重威胁到人们的生命及财产安全, 给城市发展带来诸多困扰。为有效应对洪涝灾害及其不利影响, 越来越多的工程与非工程措施实施于洪涝灾害管理中。城市雨洪模拟作为一项有效的非工程性措施, 通过城市降雨径流过程模拟获取一定降雨条件下地表与地下的径流情况, 能有效辅助灾情预报及分析, 被广泛应用于国内外城市中^[1]。为体现区域内降雨径流过程在时空上的不均匀性和可变性, 通常需要在建模前进行空间离散化^[2-4], 将整个模拟区域离散成较小的空间单元。汇水区是常用的一类离散单元, 也是 SWMM、MOUSE 等城市雨洪模型的水文计算单元, 其划分方法的准确性

收稿日期: 2019-10-25.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771424、41871299)。

通讯作者: 张书亮, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 地理信息系统、地理信息共享与地理信息检索。E-mail: zhangshuliang@njnu.edu.cn

成为影响城市雨洪模拟的关键因素^[5-6]。

汇水区是城市雨洪模型的一类建模对象,表示城市地表径流汇聚而形成的区域,同时也是模型的计算单元^[7]。根据汇水区划分方式的不同,可将其分为人工划分、自动划分及半自动划分、综合多要素修正划分。人工划分汇水区出现较早,涉及要素单一,简单方便,在一定时期内受到众多研究者的青睐,但随着时代的发展,其存在的主观性强、精度低、效率低等缺点愈发明显,后来众多研究者开始选择自动化及半自动化的划分方式。早期出现的基于单一要素的汇水区自动划分方法主要分为两类,一类是仅考虑地形因素,参照自然流域划分的原理,基于 DEM 自动划分自然汇水区^[8];另一类是仅考虑距离,利用泰森多边形法生成汇水区^[9-10],基于雨水篦或雨水井等排水管网中的进水管点集合并按照就近原则划分。尽管都实现简单高效划分地理单元,但它们未能充分考虑城市中复杂环境对汇流过程的影响,缺乏对城市实际情况的判断。为了更加真实地描述地表水流过程及合理划分汇水区,越来越多的研究将城市微地形及人工设施等因素考虑在内。Duke 等提出了综合 REA^[11]和 CEA 算法的 RIDEM 模型^[12],将道路、沟渠等地物信息与 DEM 数据融合,再利用 Burn in 和 D8 算法生成汇水区。左俊杰等^[13]基于此模型提出了一套适用于平原河网地区的汇水区划分方法,将影响径流的地物要素与 DEM 叠加,在一定程度上细化了 DEM,使得提取的河网接近于实际情况。薛丰昌等^[14]又在此基础上继续改进,提出了一种适用于城市平原地区的汇水区划分方法,将城区排水设施做了三个等级的划分,以此作为汇水区划分的基础,进一步完善平原河网的汇水区划分方法。

纵观国内外研究,在城市雨洪模型及城市雨水汇水区划分方法方面已取得较多成果,但随着模型的发展及人们对雨洪模拟精度要求的提高,有些研究仍存在些许问题,对汇水区的认知不够充分、对汇流影响要素的考虑不够全面、对汇水区划分方法的验证与评价不足等问题突出,研究对象也多着眼于山地丘陵或平原河网,深入复杂的城市环境内部探索其汇水区划分方法的研究相对缺乏。鉴于此,本研究针对城市复杂的汇流过程,分析道路、建筑等人工设施对城市汇流的影响及城市雨洪模型的需求后,提出了顾及城市多要素的汇水区分级划分方法,可为城市雨洪模拟的地表空间离散化提供新的理论及方法支持,以提高建模质量,也可城市防洪减灾研究和灾后恢复工作提供指导。

1 分级划分方法

1.1 基于水文分析的一级汇水区划分方法

自然河网作为城市汇流网络最基本的“骨架”,其出水口成为城市径流的最终汇集点。一级汇水区划分选择沿用传统水文学理论,将地形作为划分的主要依据,结合分水线、河流及行政区界等划分流域,从宏观上将城市划分成若干个汇水区。通常可借助 ArcGIS 完成一级汇水区划分,主要步骤包括流向提取、伪洼地填充、汇流累积量计算、天然水系提取及汇水区生成。

水流方向提取选择采用“D8”算法,比较中心栅格单元和其 8 个相邻单元格的值,高程值下降最多的方向即为水流方向^[15];若存在伪洼地则增加洼地栅格的高程,直到该范围内的水能够流出;根据水流方向,计算流经每个栅格点的累积水量,即为区域的汇流累积量;由实际河流数据确定最终的阈值,以提取天然水系;根据河网的分布,确定每个汇水区的出水口,再依据每个栅格单元水流方向搜索上游栅格,最终将每个栅格归入唯一的汇水区。

1.2 基于 stroke 及修正 DEM 的二级汇水区划分方法

在划分二级汇水区时,需以地形、主干排水网及建筑物等城市硬件设施的分布为考虑因素,借助 stroke 对路网及管网数据进行简化,结合长度、宽度等信息实现主干道路及管线的提取。stroke 是指在遵循“良好的延伸性规律”之下,依据一定的准则将路段进行连接,形成道路链,以有效简化数据的复杂度^[16-17],已广泛应用于路网研究中。构造 stroke 的思路是以某一弧段为种子弧段,向它的两端查找与其起止点相连的未构成 stroke 的弧段,如果符合设定的连接要求则合并成一条 stroke,然后其他弧段依次作为种子弧段,重复查找与合并,直至每一条弧段都有所属的 stroke。不同弧段是否属于一条 stroke 主要从道路的属性信息、道路弧段间的偏向角及弧段整体趋势发展 3 个方面进行判断。

为体现建筑物对径流汇流的影响,需要将建筑信息融入到 DEM 中。将建筑物面要素转成同样分辨率的栅格数据,然后将原始的 DEM 及建筑物栅格数据进行叠加,增加建筑物高度,完成 DEM 与建筑物信息

的融合。若仅根据道路宽度构建各段缓冲区易产生重叠区域,因此需要单独考虑交叉口范围的分配,对道路分割及汇水区合并。分割交叉范围可利用主干排水线交点与周围街区的顶点的连接线实现。具体步骤如下:(1)依据某一主干排水线交点所关联的主干排水线所在道路的宽度,构建主干排水线缓冲区,从而获取主干排水线的交叉区范围,并以此范围查询街区顶点;(2)通过计算主干排水线间的夹角确定两两相邻的主干线;(3)对所有顶点进行筛选,确定位于相邻两段排水线间的顶点,连接顶点与交点即形成分割线。主干排水线交点所关联的主干排水线的数量决定了交叉区域最终被分割成的区域数,相邻两段主干排水线间都需形成一条分割线。

如果两条主干排水线间不存在街区顶点,即无法通过连接交点与顶点形成分割线,此时可构建两者的角平分线,具体步骤如下:(1)利用管网数据和路网数据分别构建 stroke,以此提取主干道路和管线;(2)根据主干道路和管线的空间位置进行整合,完成主干排水网生成;(3)由主干道路生成主干道路面后与研究区域相减得到街区,利用建筑物数据对 DEM 进行修正,并根据汇流情况利用水文分析方法划分街区;(4)根据主干网的分布,划分每段所属的主干路面,合并街区和道路的汇水区边界,形成最终的二级汇水区。

1.3 基于分水线及人文属性的三级汇水区划分方法

一般来讲,城市在小范围内的地形起伏较小,难以再直接根据地形进行划分,所以在划分三级汇水区时,排水点的分布为主要的依据,可以以排水口为中心点构建泰森多边形,基于微地形数据和社会经济数据提取精细化的汇水区。若部分区域地形起伏较大,还需要根据具体情况进一步修正。三级汇水区划分步骤为:(1)提取排水点,以其为基础进行泰森多边形的构建;(2)依据微地形提取精细化的分水线;(3)基于人工建筑形态提取建筑线;(4)依据建筑线及社会人文属性修正泰森多边形的边界,形成三级汇水区。

构建泰森多边形是三级划分的前提,它需要根据若干个离散点的空间位置而定。设平面上—离散点集 $P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}$, $3 \leq n < \infty$, 其中任意两点不共位,即 $p_i \neq p_j (i \neq j, 1 \leq i, j \leq n)$, 且任意 4 点不共圆,任意点形成的 Voronoi 多边形公式为:

$$V(p_i) = \{x; d(x, p_i) < d(x, p_j), p_i, p_j \in P, p_i \neq p_j\}, \quad (1)$$

式中, $d(p_i, p_j)$ 表示点 p_i 与点 p_j 间的欧式距离; x 为平面上任意一点。区域 $V(p_i)$ 称为顶点为 p_i 的 Voronoi 多边形,表示平面内所有到 p_i 距离最小点的集合。定义 P 的泰森多边形公式为:

$$V(P) = \{V(p_1), V(p_2), \dots, V(p_n)\}. \quad (2)$$

微地形数据是提取精细化地理单元的基础,由汇流累积量为零的栅格组成。其通过水文分析处理,获取汇流累积量后再结合邻域分析、叠置分析及重分类等技术与方法完成对城市微地形的提取。为从建筑物数据中提取“山脊线”,需将建筑物抽象成线对象,形成建筑线。建筑线作为城市中的“分水岭”,具有阻水与分水作用。借助道路面要素中提取道路中心线的方法^[18-19],将建筑物矢量面数据转为栅格数据,对其二值化处理后再提取栅格元素的中心,从而生成中心线要素,即所需的建筑线。再根据相应的社会人文要素对建筑线进行合并和归类,将属于不同社区不同类型建筑线拆分,并以此作为泰森多边形修正的必要条件,同时结合地形分水线和建筑线完成泰森多边形的修正。

2 结果与讨论

2.1 实验区域与数据来源

为验证分级划分法的可行性,选择浙江省丽水市莲都区作为研究区域。丽水市位于浙江省与福建省交界处,莲都区处于括苍山、洞宫山、仙霞岭山脉之间,地形以丘陵山地为主,间含小块河谷平原,主要覆盖丽阳街、丽青路以南,瓯江以北的范围,面积约为 749 hm^2 ,海拔 50~80 m 之间,属亚热带季风气候,在夏季常受到台风的影响,易导致内涝积水等灾害。莲都区作为丽水市主要城区(图 1),在一定程度上能代表较复杂的城市环境。

研究所用的数据主要如下:丽水市基础地理数据,包括水系、建筑、植被、道路中心线及道路面等,来源于国家基础数据库;由丽水市地理信息中心提供的 5 m 分辨率的 DEM 数据;降雨数据及积水数据,来源于浙江省水雨情信息展示系统中获取的间隔为 1 h 的莲都区降雨数据,本实验选取 2017 年 8 月 4 日、19 日两场短历时强降雨数据及 2014 年 8 月 18—20 日长历时强降雨数据,以及这三场降雨过程中研究区范围内的路面积水数据;莲都区的雨水管点及雨水管线数据,雨水管点数据包括雨水篦、检查井、出水口的管点



图 1 研究区域位置

Fig. 1 The location of research area

的编号、高程、所属道路、附属物等属性信息,雨水管线数据包含管线的起点号、止点号、起点高程、止点高程、起点埋深、止点埋深、管径、管线材质、所属道路等属性信息,共计 17 164 个管点和 16 784 条管线;土地利用类型数据,包含耕地、园地、林地、草地、交通运输用地、住宅用地、商服用地等 10 种类型;排水现状及规划数据,包括现状雨水数据、各片区流量分配数据及规划雨水数据等. 上述的雨水管点和管线数据、土地利用数据及排水数据均由当地政府部门提供.

2.2 汇水区划分结果

本研究在丽水市莲都区别采用传统泰森多边形法和分级划分法两种方法进行汇水区划分. 分级划分法中一级汇水区需要依据自然河网的分布进行划分,利用水文分析工具实现了一级汇水区的划分,在整个研究区内共形成了 11 个一级汇水区.

二级汇水区划分须在一级汇水区划分结果的基础上进行,所以需要构建管网及路网 stroke,再设定一定的阈值筛选出主干管网及路网. 多次实验对比后选择管网长度为 300 m、道路长度为 400 m、路宽为 14 m (双向两车道)的主干网. 在研究区范围内擦除主干网所在的道路区域提取街区,再将建筑物转成栅格,基于空间叠置分析原理,将原始 DEM 与建筑物栅格进行叠加. 由于缺少建筑物高程数据,本研究统一设建筑物高度为 10 m (非极端条件下一般地表汇水高度不会超过 10 m). 基于修正的 DEM 数据利用水文分析工具求取水流方向,对每段主干网寻找相邻街区流向该段的栅格,完成对街区的划分. 在划分过程中,还需对每块区域标注主干网络进行编号,便于相同主干网进行融合. 结合每段主干网所服务的道路范围,将拥有相同管网编号的道路块与街区划分结果进行融合,从而形成最终的二级汇水区,共计 201 个二级汇水区.

在二级汇水区的基础上,根据节点的位置基于距离划分后再依据分水线及建筑线修正,最终形成的三级汇水区共计 1 526 个. 为验证该方法的可行性,利用泰森多边形法在研究区域内 1 503 个排水点生成汇水区,并以此作为对比依据.

2.3 验证与分析

泰森多边形能够充分利用其空间剖分上的等分特性,保证每个地理计算单元内任意一点到对应的排水口最近,在传统汇水区划分方法中占有一定优势. 借助泰森多边形法划分的结果与本研究提出的分级划分法划分所得结果进行对比,以此来验证本研究方法的优势.

尽管两者结果都符合城市雨洪模型的建模需求,但两者具有明显的差异(图 2). 依据本文的分级划分方法最终划分得到汇水区为 1 526 个,而基于泰森多边形法所得的汇水区为 1 503 个,与实验中的进水节点个数完全一致,主要由于基于泰森多边形法的划分仅依据节点分布分割整个范围,节点与汇水区之间形成了一一对应的关系,而本文的分级划分方法兼顾了地形、建筑等对汇流过程的影响,节点分布只是其中

重要的一个划分因素. 对比两个划分结果, 本文的分级划分方法所得汇水区结果更符合实际汇流情况.

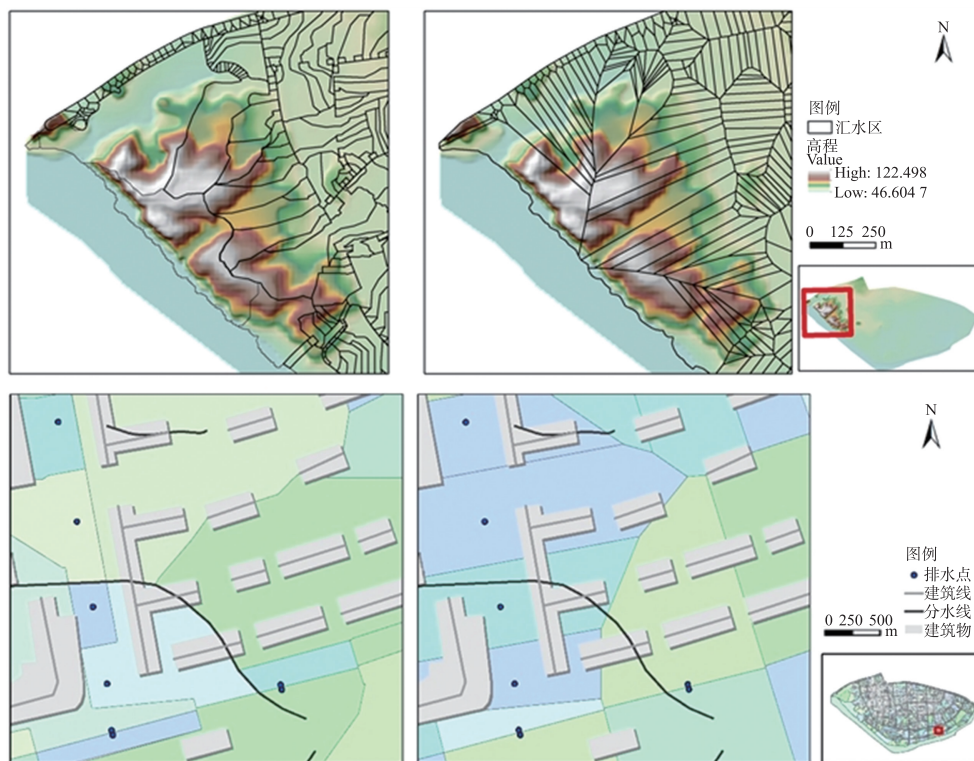


图2 局部划分结果对比(左侧基于分级划分法,右侧基于泰森多边形)

Fig. 2 Comparison of localized results(the left is based on the hierarchical partition method, the right is based on the Thiessen polygon method)

在研究区域内,临江区域存在一处明显高地,一侧雨水直接流入瓯江. 分级划分法的划分结果体现了这一汇流情况,而基于泰森多边形法的划分结果则并没有体现这一点,存在明显的错误(图2中的右下图),明显增加了部分排水点的汇水面积. 此外,在局部区域内,分级划分法所得结果中分水线及建筑线的分布影响了汇水区范围,而基于泰森多边形的划分结果中明显存在分水线及建筑线切割汇水区的情况,不符合实际的汇流过程.

对于两种方法所得的汇水区结果,理论上认为关联到相同排水点的汇水区空间形状差异较大,因此本文对这两类汇水区结果进行了统计. 两类方法对应的汇水区的面积统计结果差异较大:基于分级划分法划分的汇水区中,面积在 $1\,000\text{ m}^2$ 以内的占了总数的 49.6%,而基于泰森多边形法划分的汇水区中,面积集中在 $1\,000\sim 8\,000\text{ m}^2$, 占了总数的 77.9%,因此可以认为当城市局部区域内地形起伏不大时,汇水区面积不同时坡度亦无较大差异.

基于分级划分方法所得的汇水区,分别利用 SWMM 模型和 MOUSE 模型模拟后出现的溢流点个数为 52 个和 62 个,而基于传统泰森多边形法的模拟结果中出现的溢流点个数分别为 68 个和 70 个(表1). 分析溢流点的空间位置分布,采用分级划分法划分汇水区后分别基于 SWMM 模型和 MOUSE 模型进行模拟的结果中有 41 个溢流点的空间位置相同,采用泰森多边形法后进行模拟的运行结果中有 61 个溢流点空间位置相同;而基于两种方法所得汇水区,SWMM 模型的模拟结果中仅有 15 个溢流点空间位置相同,MOUSE 模型的模拟结果中仅有 10 个溢流点空间位置相同. 通过对比可以发现:基于同一汇水区分别使用 SWMM 与 MOUSE 模型的模拟结果中溢流点空间位置分布基本相同,而基于同种模型使用不同的汇水区进行模拟时溢流结果则相差较大.

实际的积水记录数据中,此 3 次降雨在实验区内共有 15 处明显积水,包括卢镗街与寿尔福路路口、围山路与紫金路路口、围山路与丽青路路口、卢镗街与古城路路口、古城路与解放街路口等. 通过对比实际与模拟的积水点位置分布,基于分级划分法划分所得的汇水区,使用 SWMM 模型模拟产生的 52 个溢流点中有 28 个与实际积水位置相符,而使用 MOUSE 模型模拟产生的 62 个溢流点中有 35 个与实际积水位置

相符;基于泰森多边形法所得的汇水区,使用 SWMM 模型模拟产生的 68 个溢流点中有 16 个与实际积水位置相符,而使用 MOUSE 模型模拟产生的 70 个溢流点中有 17 个与实际积水位置相符(表 2)。相比之下,分级划分方法所得汇水区的模拟结果中节点溢流情况与实际情况更符合。

表 1 空间位置相同的溢流点个数
Table 1 The number of overflow points with the same spatial position

划分方法	溢流点个数		相同空间位置个数
	SWMM	MOUSE	
分级划分法	52	62	41
泰森多边形	68	70	61

表 2 模拟溢流点统计
Table 2 The statistics of simulated overflow point

模型	划分方法	溢流点个数	与实际位置相符个数
SWMM	分级划分法	52	28
	泰森多边形法	68	16
MOUSE	分级划分法	62	35
	泰森多边形法	70	17

2.4 讨论

本研究提出的顾及多要素的城市雨水汇水区分级划分方法综合了城市环境内的影响地表汇流的多类要素,结果更符合城市雨水汇流过程。但由于城市环境的复杂性,研究过程中仍存在不足,在分级划分方法中只研究到了第三级,是否存在更精细更真实的第四级,第四级又该考虑哪些因素,或许社会人文要素可以发挥重要作用,这也是进一步研究的重点。在自然流域中,对汇水区域划分往往仅以地形为依据,然而在城市内部,地形起伏度通常较小,地形难以作为汇水区划分的依据,这时需要更多地考虑建筑物、交通基础设施、人为环境的差别。由于受实验范围的限制,本研究仅在丽水市莲都区内进行了雨洪模拟,而不同城市格局与地形差异下是否仍然适用亟待解决,比如著名的“山城”重庆,因此该方法的通用性还需进一步完善。在实验数据方面若拥有研究区域经济与人口各指标数据,以及增加对水文数据的定期监测,在划分第三等级汇水区时将会更加精准,方法的验证与评价也将更完善。近年来,随着海绵城市建设的推进,相关的研究与实践逐步开展,越来越多的城市雨洪模拟中融入了低影响开发模块(LID),这对城市雨洪模拟的削减效果产生不同影响,在这种情况下,汇水区该如何结合低影响开发措施进行合理划分也将成为一个新的科学问题。总体来讲,本文提出的汇水区分级划分方法在一定程度上满足较复杂的城市汇水区划分需求,能够进一步提升城市雨洪模拟精度。

3 结论

在传统水文分析方法的基础上,依据多级汇水区的空间认知过程,并遵循由大到小、逐层细化的划分原则,提出了顾及多要素的城市雨水汇水区分级划分方法。该方法归结如下:一级划分方法沿用传统水文学理论,结合分水线、河流及行政区界等划分流域,从宏观上将城市划分成若干个汇水区。二级划分方法则以地形、主干排水网及建筑物等城市硬件设施的分布为考虑因素,借助 stroke 对路网及管网数据进行简化,进一步地将城市地表进行划分。三级划分方法主要通过构建泰森多边形、提取城市微地形数据和建筑物分水线完成对城市地表的汇水区的划分。通过对丽水市莲都区进行城市雨洪模拟发现,该方法所得的汇水区在 SWMM 模型及 MOUSE 模型中的模拟结果在整体、局部、细节等多个方面均比泰森多边形法的模拟结果更加准确,经过实地考察对比后发现该方法划分结果基本符合实地真实汇水情况,能够进一步提高城市雨洪模拟的质量。

[参考文献]

[1] 徐慧珺. 基于 SWMM 模型的南京典型区雨洪模拟研究[D]. 南京:南京师范大学,2017.
[2] PARK S Y,LEE K W,PARK I H,et al. Effect of the aggregation level of surface runoff fields and sewer network for a SWMM

- p>simulation[J]. Desalination,2008,226(1):328-337.
- [3] 宫永伟,梁晓莹,戚海军,等. 汇水区离散程度对雨水径流模拟结果的影响分析[J]. 中国给水排水,2016,32(15):130-135.
- [4] 赖正清. 平原河网区水文特征骨架数据模型与分布式空间离散化研究[D]. 南京:南京师范大学,2013.
- [5] 张书亮,孙玉婷,曾巧玲,等. 城市雨水流域汇水区自动划分[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2007,26(4):630-632.
- [6] JOHN N C,KIMBERLY P V N,GUY S B. How does modifying a DEM to reflect known hydrology affect subsequent terrain analysis? [J]. Journal of hydrology,2007,332(1/2):30-39.
- [7] AUGUSTO C V G,MARIE P B,OTTO C R F,et al. Improving hydrological information acquisition from DEM processing in flood plains[J]. Hydrological processes,2009,23(3):502-514.
- [8] ZHAO D,CHEN J,WANG H,et al. GIS-based urban rainfall-runoff modeling using an automatic catchment-discretization approach;a case study in Macau[J]. Environmental earth sciences,2009,59(2):465-472.
- [9] 谢家强,廖振良,顾献勇. 基于 MIKE URBAN 的中心城区内涝预测与评估:以上海市霍山-惠民系统为例[J]. 能源环境保护,2016,30(5):44-49.
- [10] 李文科,杨淑芳. 城市雨水排放系统的数值模拟技术及其应用[J]. 城市道桥与防洪,2012(7):195-198.
- [11] DUKE G D,KIENZLE S W,DAN L J,et al. Improving overland flow routing by incorporating ancillary road data into digital elevation models[J]. Journal of spatial hydrology,2003,3(2):1-21.
- [12] DUKE G D,KIENZLE S W,JOHNSON D L,et al. Incorporating ancillary data to refine anthropogenically modified overland flow paths[J]. Hydrological processes,2006,20(8):1827-1843.
- [13] 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.
- [14] 薛丰昌,盛洁如,钱洪亮. 面向城市平原地区暴雨积涝汇水分级划分的方法研究[J]. 地球信息科学学报,2015,17(4):462-468.
- [15] CALLAGHAN J F,MARK D M. The extraction of drainage networks from digital elevation data[J]. Computer vision graphics and image processing,1984,28(3):289-334.
- [16] 田晶,何青松,颜芬. 道路网 stroke 生成问题的形式化表达与新算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2014,39(5):556-560.
- [17] YANG Q,DAI Q,HAN D,et al. Impact of the storm sewer network complexity on flood simulations according to the stroke scaling method[J]. Water,2018,10(5):645.
- [18] ROSA D J,CLAUSEN J C,DIETZ M E. Calibration and verification of SWMM for low impact development[J]. Jwra journal of the American water resources association,2015,51(3):746-757.
- [19] SUN N,HALL M,HONG B,et al. Impact of SWMM catchment discretization;case study in Syracuse,New York[J]. Journal of hydrologic engineering,2014,19(1):223-234.

[责任编辑:丁 蓉]