

# 基于地表路径追踪的排水流域识别方法

刘子龙<sup>1</sup>, 刘 原<sup>2</sup>, 曾玉蛟<sup>1</sup>, 叶婉露<sup>1</sup>, 赵 见<sup>1</sup>

(1. 北京市城市规划设计研究院, 北京 100037; 2. 北京博汇特环保科技股份有限公司, 北京 100102)

**摘 要:** 基于传统的水文流向分析算法,通过对汇水流域的计算方法进行改进,建立了综合考虑地形变化因素和城市雨水管网系统布局的流域识别计算方法。实例研究表明,该方法可快速实现雨水管网系统影响下的排水流域自动计算,可为雨水管网系统的规划改造提供技术支撑。同时,结合水力模型工具计算超标降雨下的内涝情景,以原始地形栅格叠加内涝淹水计算结果后的新栅格数据为基础,开展了北京下凹式立交桥客水区影响范围划定的实例研究。结果表明,基于路径追踪法,以立交桥低区范围内栅格作为路径追踪终点,可计算获得不同重现期情景下的客水区影响范围,为桥区内涝规划改造方案的制定提供重要的决策依据。

**关键词:** 城市内涝; 流域划分; 路径追踪; 下凹立交桥

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)03-0134-05

## Identification Method of Urban Drainage Watershed Based on Surface Route Tracking

LIU Zi-long<sup>1</sup>, LIU Yuan<sup>2</sup>, ZENG Yu-jiao<sup>1</sup>, YE Wan-lu<sup>1</sup>, ZHAO Jian<sup>1</sup>

(1. Beijing Municipal Institute of City Planning & Design, Beijing 100037, China; 2. Beijing Bohuite Environmental Technology Co. Ltd., Beijing 100102, China)

**Abstract:** Based on traditional hydrologic flow direction algorithm, a watershed identification method with the consideration of topography variation and the layout of stormwater pipe network was established through improvement of route tracking algorithm for watershed calculation. The case study showed that this method was capable of realizing automatic rapid calculation of drainage watershed under the influence of stormwater pipe network system, which could provide technical support for the planning and design of stormwater pipe network system. Meanwhile, a case study of impact scoping analysis in an area of concave-down overpass of Beijing was carried out combined with hydraulic model tools to calculate the waterlogging situation under the condition of excessive rainfall based on the new grid data obtained from calculation of the original terrain grid superimposed with waterlogging. It was shown that the outside affected range could be calculated by using route tracking method when the low-inside area of overpass was taken as the destination of route tracking, which provided an important basis for the plan and reconstruction of waterlogging control in bridge area.

**Key words:** urban waterlogging; watershed division; route tracking; concave-down overpass

城市雨水排水流域的识别可用于分析城市区域的雨水汇流特征,校核雨水系统的排水能力,进而可为雨水管网的规划改造工作提供重要依据<sup>[1]</sup>。针

对超标降雨情况下的地表汇流特征分析,也有助于排水防涝规划方案的制定<sup>[2]</sup>。城市雨水排水流域具有明显的地理空间特性,通常以地形的实际分水

线为划定边界,传统的流域识别方法以人工计算和目测估计为主,划分精度和效率低,且划分过程容易受到工程人员的经验等人为因素影响,准确性难以保证<sup>[3]</sup>。因此,近年来结合地理信息系统的分析计算功能,以数字化地形高程数据(DEM)为基础,基于 ArcGIS 等地理信息软件的水文分析模块,从而实现基于实际地形的排水流域自动识别和划分方法已成为主流方向<sup>[4]</sup>。

利用地理信息系统的水文分析模块,虽然可以较为快速地实现流域的自动划分,但是该方法仅考虑实际的地形变化,而城市雨水管网的建设以及超标降雨下的地表积水均改变了实际地表的水流运动特性,因此传统的水文分析方法并不适用于结合管网的排水流域划分。笔者在传统的水文流向分析算法基础上,对汇水流域的计算方法进行改进,以期实现考虑管网的流域自动化划分方法,并结合水力模型工具,基于超标降雨情景下的地表积水结果,开展北京市下凹式桥区的客水区影响范围划定的实例研究。

### 1 基于路径追踪的流域计算方法

城市区域雨水排水流域的识别和划分需考虑的主要因素有2个,一是实际地形数据,二是城市雨水管网的分布。实际地形数据是分析地表水流运动特征的基础,基于路径追踪的流域计算方法首先需采用 D8 算法,以 DEM 为基础,构建新的地表流向栅格数据集<sup>[5]</sup>。

DEM 数据通常采用规则的四边形结构化网格表征,各个网格的数值代表了实际的地形高程,网格尺寸越小代表地形的数字化表达精细程度越高。地表的水流方向是指水流离开栅格单元时的指向,采用最大距离权落差法(最大坡降法)计算中心网格与邻域8个栅格的距离权落差值以确定地表的流向,计算方法如下:

$$S_{(i,j+1)} = \frac{H_{(i,j)} - H_{(i,j+1)}}{D_{(i,j+1)}} \quad (1)$$

式中: $S_{(i,j+1)}$ 是行数为*i*、列数为*j*处地形网格与行数为*i*、列数为*j+1*处地形网格的距离权落差值; $H_{(i,j)}$ 和 $H_{(i,j+1)}$ 分别为相应位置的地形高程值; $D_{(i,j+1)}$ 为两栅格间的距离。

分别计算周边8个网格与中心网格的距离权落差值,并采用其中最大值作为判断水流方向的依据,通过方向编码记录网格的流向特性,编码规则见图

1。若8个方向的距离权落差均为负值,则代表该栅格为局部地形的洼点,并记录流向编码值为0。

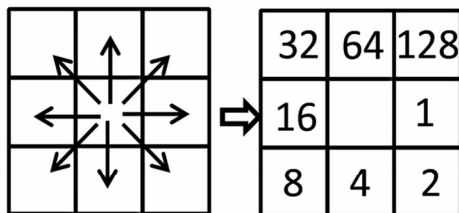


图1 地表流向编码规则示意

Fig. 1 Coding rule of surface flow direction

通过地表流向分析,可将地形栅格数据转换为表征地表水流方向特征的新栅格数据集,见图2。

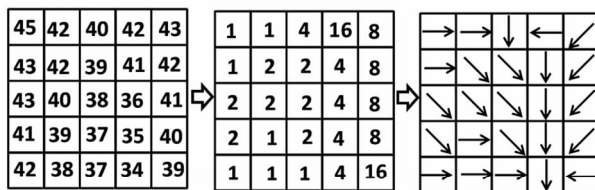


图2 地表流向栅格数据转换

Fig. 2 Raster data conversion of surface flow direction

城市雨水管网的汇水区划分是定义每一管段所服务的汇水范围,在划分该范围时,地形网格遵循就近原则排入对应雨水管段。因此,需首先基于城市雨水管网分布构建管网栅格,并编号记录每一网格单元的所属管段编号,如图3所示。

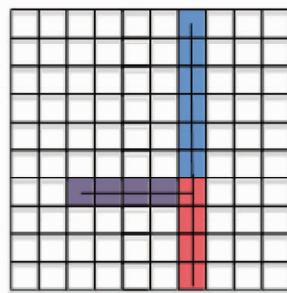


图3 雨水管网栅格示意

Fig. 3 Raster of stormwater pipe network

其次,通过逐一遍历地形网格,基于其地表流向栅格数据,追踪地表水流运动路径,当其下游搜索至已编号管网栅格单元或地形洼点时,算法终止,并记录其经过的路径栅格为数组  $Route[i, j]$ ,采用末端栅格编号赋值该路径数组,如图4所示。

算法开始阶段,由于搜索路径较长,执行效率慢,但随着更多的网格单位被赋值编号,算法将逐渐提高其搜索效率,直至所有地形网格遍历终止,最

终重新编号的栅格数据集即为排水流域划分结果,如图5所示。

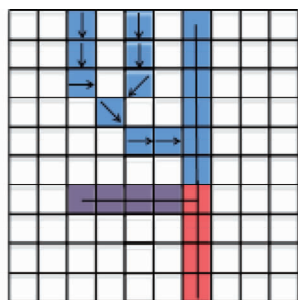


图4 地表路径追踪示意

Fig. 4 Schematics of surface route tracking

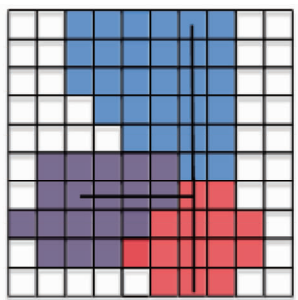


图5 排水流域划分结果

Fig. 5 Results of drainage watershed division

## 2 应用实例研究

### 2.1 排水流域的识别计算

左安东路排水系统位于北京市东南三环,区域总面积约为  $4 \text{ km}^2$ ,其内部主要道路包括东三环、左安东路、潘家园路和弘燕路等。北京2011年“6·23”暴雨和2012年“7·21”暴雨等,屡次造成下凹式立交桥区(主要为潘家园桥和华威桥)严重积水<sup>[6]</sup>。该项目区的排水管网系统规划改造和内涝防治对策研究,属于北京市2014年20座下凹桥区的积水改造项目之一。

以北京基础测绘高程点集数据库为基础,利用ArcGIS的3DAnalyst模块反距离权重插值<sup>[5]</sup>,创建  $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$  的地表DEM栅格模型,如图6所示。项目区高程采集点总数约为  $5.7 \times 10^4$  个,桥区约5 m一个高程采集点,高程值精度为0.1 m。

左安东路雨水管道分为高水管道和桥区低水管道,高水管道是指可以通过重力流方式排除雨水的桥区周边雨水管道;桥区低水管道是指下凹桥区内的雨水管道,其设计高程较低,无法通过重力流方式排除雨水,因此采用泵站抽升后独立排放。

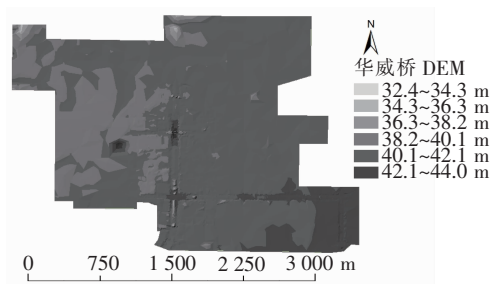


图6 项目区的地表DEM模型

Fig. 6 DEM model of study area

为实现排水流域的自动识别,基于ArcEngine开发自动化计算程序<sup>[7]</sup>。通过对本研所述算法的实现,结合部分管线分布的汇水流域划分结果如图7所示。

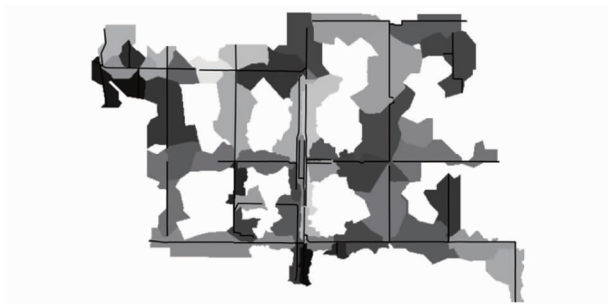


图7 项目区的排水流域划分结果

Fig. 7 Drainage watershed division results of study area

通过将桥区低水管道系统进行统一编号,如图8所示,可准确计算获得低区汇水流域范围,并明确高低区流域边界,为低区管网系统的规划改造提供技术支撑。

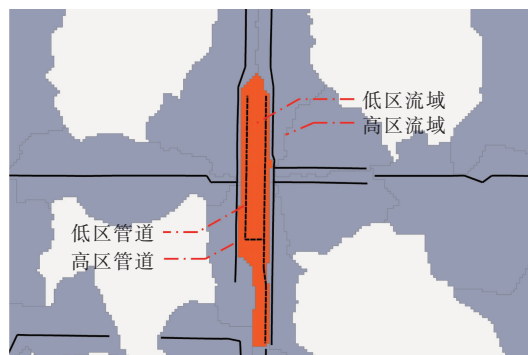


图8 桥区低区流域划分结果

Fig. 8 Watershed division results of low-inside area of concave-down overpass

通过实例研究表明,基于路径追踪的流域计算方法,通过同时考虑地形变化因素和排水管线布局,

可快速实现排水流域的识别计算。相邻区域根据实际地形高程进行分配,按照水流方向对区域进行分割,提高了流域划分的准确性和效率。但值得注意的是,当前国内常用的地形数据精度值并不高,对于城市区域部分精细化地形,如小区的建筑、围墙等,往往无法准确地进行数字化表达,而实际城市地表存在的阻水地形特征对流域的划分同样存在较大的影响。因此,利用地形识别城市区域的排水流域,现阶段仍然需要人工进行参与,事先对重要的微地形特征进行人工刻画,如构建高填方道路涵洞、小区围墙以及建筑物等。

## 2.2 客水区影响范围的划定

以管网系统作为主要约束条件的排水流域计算方法,在一定程度上体现了管网设计标准内的地表降雨汇水特性。但应对超标降雨时,由于管道无法及时排除的雨水将在地表低洼区产生积水,实际上改变了地表的水流运动特性,因此内涝情景下的地表汇水计算需结合淹水特征进行综合分析。

应用水力模型技术,结合超标降雨过程进行仿真模拟,从而计算地表内涝淹水的发生及发展变化过程是当前的主流方向<sup>[8]</sup>。本研究应用 DHI MIKE 模型工具实现对地形栅格和管网系统的耦合计算,获取不同重现期下的地表最大淹水结果,见图 9。

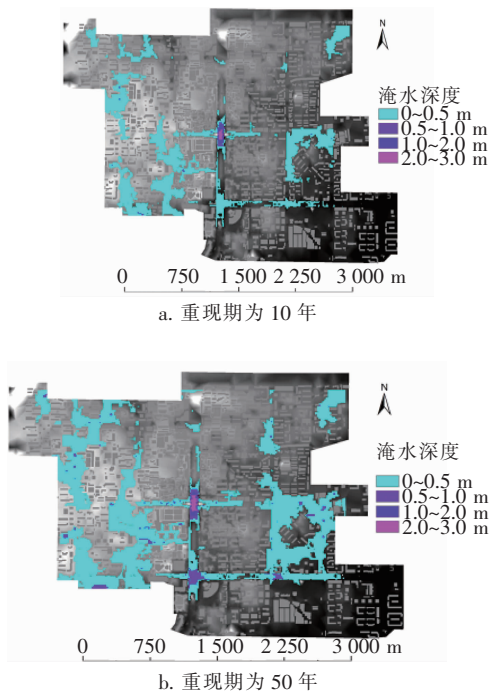


图 9 地表内涝淹水计算结果

Fig. 9 Calculation results of waterlogging

超标降雨情况下,无需考虑雨水管道对地表水流路径的隔断作用,桥区高处范围内的部分暴雨径流将进入低区,从而加重桥区的内涝状况。低区的内涝影响范围分析(称为客水区)以原始地形栅格叠加内涝淹水计算结果后的新栅格数据为基础,2.1 节获得的下凹桥低区范围内栅格采用统一编号赋值,作为地表路径追踪的终点,应用上文所述计算方法,分析不同重现期下的客水影响范围,如图 10 所示,相应的客水区面积统计如图 11 所示。

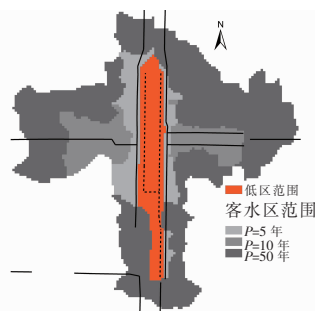


图 10 下凹桥区客水影响范围计算结果

Fig. 10 Influence area calculation results of foreign water in concave-down overpass

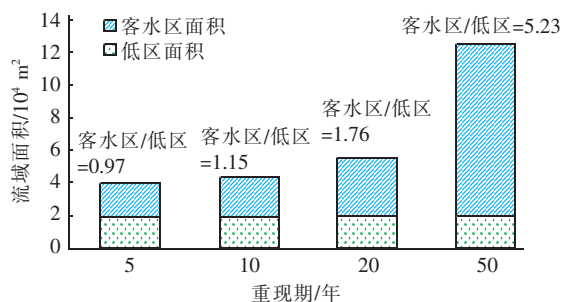


图 11 下凹桥区的客水区面积统计

Fig. 11 Statistics of foreign water area in concave-down overpass

从图 10 和图 11 可以看出,随着降雨重现期的增加,桥区的客水区影响范围逐渐向外扩张。通过实例研究表明,基于路径追踪法,以低区范围内栅格作为路径追踪终点,通过分析叠加淹水深度后的地表栅格水流路径,可计算获得不同重现期情景下的客水区影响范围,为桥区内涝规划改造方案的制定提供重要的决策依据。

## 3 结论

通过对传统的水文流域计算方法进行改进,综合考虑地形变化因素和城市雨水管网系统布局,采用地表路径追踪的流域计算方法,可快速实现结合管网的排水流域识别划分。同时,结合水力模型工



具,基于超标降雨情景下的地表积水结果,可分析重点关注区域的内涝影响范围,为内涝改造方案的制定提供重要的基础依据。

城市排水流域的划分不同于大尺度的水文流域分析工作,城市快速且不连续的地形变化需要更加准确和精细化的地形数据。因此,建立完善的城市地形高程测绘数据库系统,是应用本研究相关成果的前提基础。

#### 参考文献:

- [1] 周玉文,赵洪宾. 排水管网理论与计算[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2000.  
Zhou Yuwen, Zhao Hongbin. Theory and Calculation of Drainage Network [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000 (in Chinese).
- [2] 朱晨东. 关于北京下凹式立交桥积水的思考[J]. 北京水务, 2011(5): 4-5.  
Zhu Chendong. Thoughts on the waterlogging of concave overpass in Beijing[J]. Beijing Water, 2011(5): 4-5 (in Chinese).
- [3] 张书亮,干嘉彦,曾巧玲,等. GIS支持下的城市雨水出水口汇水区自动划分研究[J]. 水利学报, 2007, 38(3): 325-329, 336.  
Zhang Shuliang, Gan Jiayan, Zeng Qiaoling, et al. Automatic compartmentalization of urban rainwater catchments on water outlet supported by GIS technology [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(3): 325-329, 336 (in Chinese).
- [4] 曾巧玲. 城市汇水区自动划分研究[D]. 南京:南京师范大学,2005.  
Zeng Qiaoling. Study on Automatic Division of Urban Catchment Area [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2005 (in Chinese).
- [5] 汤国安,杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京:科学出版社,2006.  
Tang Guoan, Yang Xin. ArcGIS Geo-information System Spatial Analysis Course [M]. Beijing: Science Press, 2006 (in Chinese).
- [6] 顾孝天,李宁,周扬,等. 北京“7·21”暴雨引发的城市内涝灾害防御思考[J]. 自然灾害学报, 2013(2): 1-6.  
Gu Xiaotian, Li Ning, Zhou Yang, et al. Thinking on urban waterlogging disaster defense initiated by “7·21” extraordinary rainstorm in Beijing [J]. Journal of Natural Disasters, 2013(2): 1-6 (in Chinese).
- [7] 于娟. 基于 ArcEngine 的 Grid 数据编辑与应用系统的设计与实现[D]. 兰州:兰州交通大学,2009.  
Yu Juan. The Design and Realization of Edit and Application of ESRI Grid Based on ArcEngine [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2009 (in Chinese).
- [8] 刘畅,周玉文,赵见. 下凹式立交桥内涝模型构建方法及原因分析[J]. 河北工业科技, 2014, 31(5): 389-394.  
Liu Chang, Zhou Yuwen, Zhao Jian. Modeling method and reason analysis of urban flooding in concave-down overpass area [J]. Hebei Journal of Industrial Science & Technology, 2014, 31(5): 389-394 (in Chinese).



作者简介:刘子龙(1988-),男,江西萍乡人,博士,高工,从事城市排水及河湖水系规划工作。

E-mail: liu360313@126.com

收稿日期:2018-07-10