

城区内涝淹没模拟算法

张振鑫¹, 吴立新², 李志锋³, 杨宜舟⁴, 江锦成⁵, 许志华⁵

(1. 北京师范大学 地理学与遥感科学学院 遥感科学国家重点实验室, 北京 100875;

2. 中国矿业大学 物联网(感知矿山)研究中心, 江苏 徐州 221008;

3. 中国再保险(集团)股份有限公司, 北京 100033;

4. 东北大学 测绘遥感与数字矿山研究所, 沈阳 110819;

5. 北京师范大学 民政部/教育部减灾与应急管理研究院, 北京 100875)

摘要: 针对城区内涝淹没范围和水深模拟问题, 该文提出了一种基于约束 Delaunay 不规则三角网与三棱柱的城区内涝淹没模拟算法。该算法以沿地面三角形的顶点垂直向上引垂线形成的三棱柱为计算单元, 通过“等体积”的方法, 建立时间序列切片下的淹没水深和积水量的关系, 据此实现淹没范围和水深模拟。以北京师范大学(简称“北师大”)主校区为例, 对单汇水区的水面高程上升模拟结果与实际观测值进行对比, 基本吻合; 并与传统栅格 DEM 的淹没效果进行了对比, 表明该算法正确有效。

关键词: 淹没模拟; 三棱柱; 城市内涝; 汇水区; 约束 Delaunay 不规则三角网

【中图分类号】P208

【文献标志码】A

【文章编号】1009-2307(2016)06-0087-05

DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2016.06.019

Algorithm of urban storm flood inundation simulation based on TIN and triangular prism

Abstract: Based on the triangular prism and the urban land surface, this paper proposed a storm inundation simulation algorithm for inundated area and water depth simulation. The triangular prism, served as calculation unit, was constructed by triangular surface and its perpendicular line along each node. Based on the principle of equal volume, the relationship equation between water surface level and the accumulative water volume was proposed at each time serial slice. Then, the simulations of inundated area and water depth were realized by taking the main campus of Beijing Normal University as an example. Relative correctness of water level rising pattern in single catchment was proved by comparing the model calculated results with the measured values. The effectiveness and correctness of the CD-TIN and triangular prism based inundation simulation algorithm were validated by contrasting to traditional raster DEM based inundation algorithm.

Keywords: inundation simulation; triangular prism; city inundation; catchment; CD-TIN

ZHANG Zhenxin¹, WU Lixin², LI Zhifeng³, YANG Yizhou⁴, JIANG Jincheng⁵, XU Zhihua⁵

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. IoT Perception Mine Research Center, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221080, China; 3. China Reinsurance (Group) Corporation, Beijing 100033, China; 4. Institute of Geo-informatics & Digital Mine, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 5. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Civil Affairs & Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)



作者简介: 张振鑫(1986—), 男, 辽宁大石桥人, 博士研究生, 主要研究方向为地理信息系统空间模拟与建模。
E-mail: zhenxin066@163.com

收稿日期: 2015-01-04

基金项目: 北京市自然科学基金重点项目(8111003)

通信作者: 吴立新 教授 E-mail: awulixin@263.net

0 引言

近年城区暴雨内涝多发, 亟须对城区暴雨内涝过程进行模拟分析和预警防范, 其中暴雨内涝致灾因子(淹没范围和水深)模拟尤为重要。

国内外淹没模拟研究主要基于栅格和不规则三角网(triangulated irregular network, TIN)^[1]。栅格因结构简单等优点^[2]在城区内涝中广泛应用。当前研究多是基于城区栅格数字高程模型(digital elevation model, DEM), 采用水动力学方程进行

模拟^[3-4]。然而,水动力学方程求解复杂,对排水管网数据要求较高。基于 GIS 的快速模拟方法^[5-6]可在一定程度上解决上述问题,但栅格的分辨率固定等特征限制了其表达地形细节的准确性和灵活性^[7],导致了水流方向计算不准确、模拟参数计算困难^[8]。鉴于 TIN 表达地表精细、拓扑性强等优势^[7],已有学者采用 TIN 进行水文模拟研究^[7,9],但基于 TIN 的城区内涝模拟多采用三角形有限元分解的方式^[10],计算复杂,不利于城区内涝淹没范围和水深的快速模拟。

本文采用约束 Delaunay TIN (constrained Delaunay triangulated irregular network, CD-TIN)^[11]表达的城区地表,提出了城区内涝淹没范围模拟的三棱柱算法;以北师大主校区为例,进行了单汇水区水位上升过程模拟实验,并与栅格淹没算法对比,验证本算法的正确性与合理性。

1 地表数字表达与划分

本文先采用生长法^[11]构建 DTIN,再将建筑物、道路、马路牙、雨水篦等作为约束特征,插入构建 CD-TIN 来精细表达城区地表。

城区汇水区是内涝淹没模拟的基本单元。本文假定三角面片上的水汇流到该三角形的最低点,再沿连接该最低点的最陡边由高至低汇流,直到局部最低点(称为局部洼地点,如图 1 中的 D、F、J 点)。流入此局部最低点的汇流区域称为汇水区(见图 1),不同的图案标示了不同的汇水区。

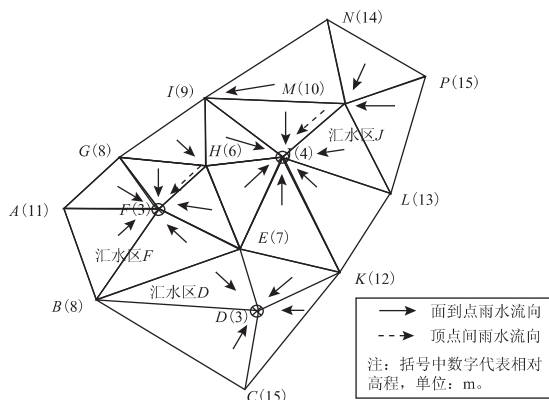


图 1 汇水区划分示意图

Fig 1 Schematic Diagram of Catchment Division

2 淹没范围模拟算法设计

2.1 三棱柱剖分策略

取城区 CD-TIN 的某一三角形面片,沿该三角形的 3 个顶点向上引垂线形成三棱柱(见图 2(a)),则汇水区划分为一组相邻三棱柱的集合。根据汇

水区某时刻下洪水面淹没底面三角形顶点的个数,将三棱柱淹没过程概化为:淹没底面一点、淹没底面两点和淹没底面 3 点(见图 2(b))。

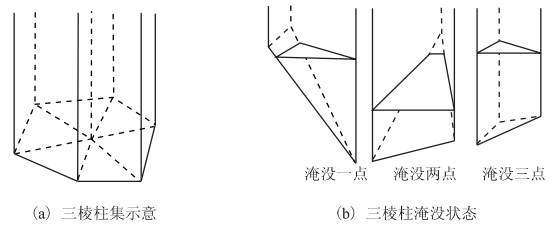


图 2 汇水区三棱柱集及其淹没状态

Fig 2 Triangular Prisms in Catchment Area and Its Inundated States

2.2 水体淹没模型的建立

本算法以各汇水区作为基本模拟单元,对于整个城区则分而治之。先划分汇水区,分别模拟单个汇水区的淹没范围和水深;进而合并实现整个城区的淹没模拟。下文采用的积水量是单汇水区的净积水量,即顾及不同汇水区之间的产流及汇流(除去下渗、截流和排水系统的排水而剩余的水量,加上邻域汇水区流入水量并减去流出到邻域汇水区的水量)。

将单汇水区内所承接的净雨水量全部转换为其淹没水量;假定任一时刻同一汇水区水面高程一致^[9],根据淹没三棱柱底面点的个数,分别对该汇水区内所有三棱柱的淹没状态进行界定;求出不同状态下三棱柱的积水量和水面高程之间的关系;然后,将各三棱柱的水量累加,得到该汇水区内积水量与水面高程的关系模型。整个汇水区内其他汇水区的淹没模拟依此类推。

2.2.1 淹没底面一点的积水量模型

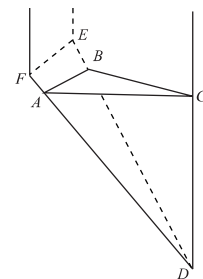


图 3 淹没底面一点的三棱柱

Fig 3 Triangular Prism with One Bottom-node Inundated

如图 3 所示,由三棱锥的体积公式可以求得第 i 个淹没底面一点的三棱柱内的积水体积。其中, A 、 B 、 C 的坐标可由淹没水位和 D 、 E 、 F 坐标求得。

$$Q_{li} = Q_D = \frac{1}{3} S_1 \cdot (h - z_D) \quad (1)$$

式中: Q_{1i} 是淹没底面一点的第 i 个三棱柱内积水体积; Q_D 是三棱锥 $D-ABC$ 的体积; S_1 是三角形 ABC 的面积。

该汇水区内, 淹没底面一点的所有三棱柱的总积水量 Q_1 等于所有淹没底面一点的三棱柱的积水量和。

$$Q_1 = \sum_{i=1}^m Q_{1i} \quad (2)$$

式中: m 为该汇水区内淹没底面一点的三棱柱总数。

2.2.2 淹没底面两点的三棱柱积水量模型

淹没底面两点的三棱柱的水体形状相对复杂, 本文通过对空间体的规则分割得到该积水体积与水面高程之间的关系, 如图 4 所示。

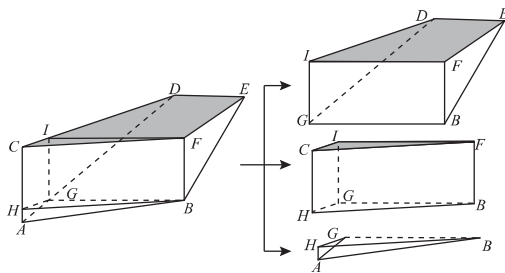


图 4 淹没底面两点的三棱柱剖分图

Fig 4 Split Diagram of Triangular Prism with Two Bottom-nodes Inundated

由此将不规则水体划分为三棱锥 $B-AHG$ 、楔形 $GIFB-DE$ 和规则三棱柱 $HGB-CIF$ 进行体积计算, 建立汇水区第 j 个淹没底面两点的三棱柱的积水量 Q_{2j} 。

$$Q_{2j} = Q_p + Q_q + Q_x = \frac{1}{3} \cdot l_{AH} \cdot S_2 + l_{BF} \cdot S_2 + \frac{1}{6} \cdot h_x \cdot l_{BF} \cdot (2 \cdot l_{GB} + l_{DE}) \quad (3)$$

式中: Q_{2j} 是淹没底面两点的三棱柱内第 j 个积水水体的体积; Q_p 是三棱锥内的水量; Q_q 是规则三棱柱内的水量; Q_x 是楔形体内的水量; h_x 是底面 $GIFB$ 的楔形的高度, 其值为 $l_{BF} \cdot \cot \alpha$ (α 为 $GBED$ 法向量与竖直方向的夹角); S_2 是三角形 HGB 的面积。

则淹没底面两点的三棱柱的总水量 Q_2 等于所有淹没底面两点的三棱柱所承接的水量之和。

$$Q_2 = \sum_{j=1}^n Q_{2j} \quad (4)$$

式中: n 为该汇水区内淹没底面两点的三棱柱总数。

2.2.3 淹没底面 3 点的三棱柱积水量模型

如图 5 所示, 将淹没底面 3 点的三棱柱剖分成规则三棱柱 $ACB-DFE$ 和四棱锥 $B-ACHG$, 则第 k 个淹没底面 3 点的三棱柱的体积可表示为:

$$Q_{3k} = Q_m + Q_n = S_3 \cdot (h - z_B) + \frac{1}{3} S_4 \cdot h_q \quad (5)$$

式中: Q_{3k} 是第 k 个淹没底面 3 点的三棱柱内的积水量; Q_m 、 Q_n 分别代表四棱锥 $B-ACHG$ 、三棱柱 $ACB-DFE$ 内的积水量; h_q 代表四棱锥 $B-ACHG$ 的高; S_3 是三角形 ABC 的面积; S_4 是梯形 $ACHG$ 的面积。

因此, 可求得该汇水区内所有淹没底面 3 点的三棱柱总积水量 Q_3 。

$$Q_3 = \sum_{k=1}^p Q_{3k} \quad (6)$$

式中: p 为该汇水区内淹没底面 3 点的三棱柱个数。

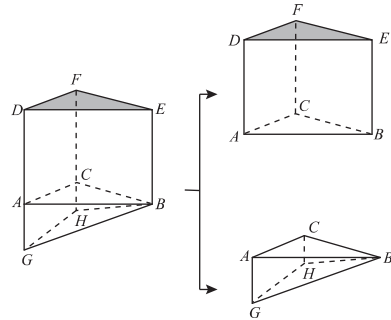


图 5 淹没底面 3 点的三棱柱剖分图

Fig 5 Split Diagram of Triangular Prism with Three Bottom-nodes Inundated

2.2.4 单汇水区净积水量与三棱柱体积和的关系

通常, 汇水区积水水面高程的计算主要采用“等体积法”^[12]思想, 即: 将汇水区的净积水量全部转换为淹没水量, 进而求解水面高程。假定单汇水区的总水量 Q_s 与所承接的净积水量 Q_t 相等, 则单汇水区的净积水量与汇水区的各三棱柱所承接水量的关系如下。

$$Q_t = Q_s = Q_1 + Q_2 + Q_3 = \sum_{i=1}^m Q_{1i} + \sum_{j=1}^n Q_{2j} + \sum_{k=1}^p Q_{3k} \quad (7)$$

2.3 水面高程计算及算法流程

为便于阐述, 定义如下: 将汇水区内及边缘的点由低到高地依次连线称为水面上升路径, 相邻两点组成的线段为路径段, 水面所在的路径段发生变化称为路径段传递, 将路径段上、下两个端点称为路径段的上、下端点。

汇水区进行预处理: 将每个汇水区内所有节点按高程由低到高排序, 并存入链表。水面在各路径段的上升过程遵循式(7)。每个时间序列切片下的淹没模拟算法步骤如下。

1) 判断汇水区链表是否遍历完成, 若完成, 则算法结束; 未完成, 则进入步骤 2)。

2) 在指定时间序列切片下, 计算汇水区的积水量, 判断水面高程是否高于出水口点高程。若

高于出水口点高程,则将水量分配到邻域汇水区中;若未超过出水口点高程,则找到水面所在的路径段。

3)判断三棱柱的淹没状态,建立水量与水面高程的关系模型。

4)实时解算水量关系模型,求出水面高程。

5)每个时间序列切片下重复步骤 1)~4),得到每个时间序列切片下的淹没模拟范围,实现淹没过程的动态模拟。

3 实验与分析

3.1 算法正确性检验

取北师大地遥楼前的汇水区,对 2012 年“7.21”暴雨的水深变化进行了数据采集。于降雨强度是单位时间内的降雨量(mm/h 或 mm/min),本文主要探索城区暴雨淹没模拟算法的相对正确性和可行性,方法中不包括排水管网、地表渗流模型及水动力学模型,因此,本实验选择汇区内的一点,在连续时间间隔内进行水深的数据采集,将水深变化与时间的比值等效为降雨强度,该次实验计算的等效降雨强度为 1 800 mm/h。采用本文算法进行模拟,如图 6 所示,实测水深与模拟水深差值的平均值是 5.2 mm,相对误差均值为 13.7%,表明本算法的模拟值和实测值大体一致,算法结果基本正确。

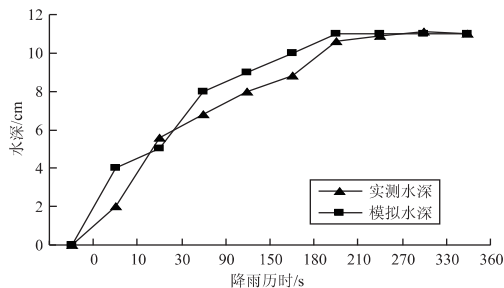


图 6 北师大校园模拟水深与实测数据对比图

Fig 6 The Comparison between Simulated and Measured Data in BNU Campus

3.2 算法效率测试与分析

针对不同测试区域(见表 1),对算法效率进行了测试(测试环境: Intel Core(TM)2 CPU, 2.66 GHz 主频, 2.00 GB 内存),测试结果如图 7 所示:①每个测试区域在各时间序列切片下消耗的时间随着测试区域的汇水区个数增加而递增;②测试区域 3 和 4 的汇水区个数虽然仅差 1 个,但三角面片数相差 504 个,导致测试区域 4 的算法模拟时间消耗是区域 3 的 1.6 倍,这表明影响算法效率的主要因素是测试区域的三角形个数。

表 1 各测试区域情况表

Tab 1 Situations of Each Test Area

测试区域编号	汇水区数目	三角面片数
1	35	586
2	99	1 583
3	186	2 982
4	187	3 486

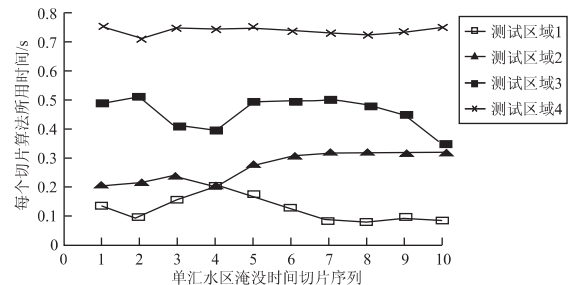


图 7 算法效率测试图

Fig 7 Algorithm Efficiency Test Chart

3.3 淹没效果对比验证

本文采用北师大地形测量数据构建 CD-TIN 表示的 DEM,并划分汇水区,模拟各汇水区的淹没范围和水深。图 8 给出了降雨强度为 36 mm/h、降雨历时分别为 0.5、1.0、1.5 和 2.0 h 的模拟效果,从图 8 中可以看出:各汇水区的积水逐渐增加,且水面上升的速度先快后慢,与实际相符。

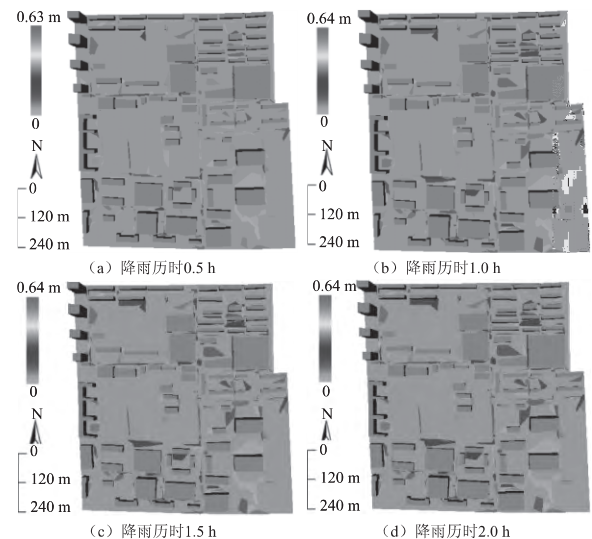


图 8 基于 CD-TIN 的淹没效果

Fig 8 The Simulated Inundation Results Based on CD-TIN

同时,为了验证本算法的适用性,与基于栅格 DEM 的淹没范围^[13]进行对比。实验所用栅格 DEM 的空间分辨率为 5 m(由测量数据插值得到),降雨强度设置为 36 mm/h、120 min 的淹没历时,模拟效果如图 9(b)所示。对比图 9(b)和图 8(d)发现,两者模拟效果具有一定的吻合度,但在淹没深

度和范围上存在细微差异, 原因如下: ① CD-TIN 能准确表达城区地表影响汇水过程的重要特征, 而栅格 DEM 不能; ② 在确定水流方向时 CD-TIN 比栅格 DEM 更准确。

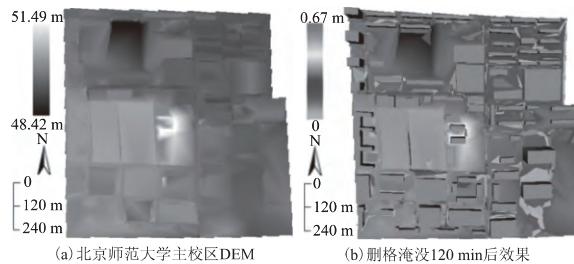


图 9 分辨率为 5 m 的栅格 DEM 淹没效果图

Fig 9 The Simulated Inundation Results Based on Raster DEM with 5 m Resolution

4 结束语

本文针对 CD-TIN 表达的城区地表, 采用基于三棱柱的城区内涝淹没算法, 可以动态模拟城区内涝淹没范围和水深。与基于栅格 DEM 淹没模拟结果相比, 本文方法的适应性更强。后续工作包括两方面: ① 由于本文算法采用的是净积水量, 没有也考虑排水、地表下渗, 对邻域汇水区汇流量也考虑较少, 因此需要结合排水模型和地表下渗模型对城区暴雨内涝淹没过程进行模拟分析, 进而得到真实淹没过程与内涝场景; ② 由于本文算法在大规模水淹分析中时间复杂度较高, 将考虑算法的并行化, 提高算法效率。

参考文献

- [1] THEOBALD D M, GOODCHILD M F. Artifacts of TIN-based surface flow modeling[C]//Proc. GIS/LIS'90. [S.l.: s. n.], 1990: 955-964.
- [2] JONES R. Algorithms for using a DEM for mapping

- catchment areas of stream sediment samples[J]. Computers & Geosciences, 2002, 28(9): 1051-1060.
- [3] KRZHIZHANOVSKAYA V V, MELNIKOVA N B, CHIRKIN A M, et al. Distributed simulation of city inundation by coupled surface and subsurface porous flow for urban flood decision support system[J]. Procedia Computer Science, 2013, 18(1): 1046-1056.
- [4] CHEN A S, EVANS B, DJORDJEVIC S, et al. Multi-layered coarse grid modelling in 2D urban flood simulations[J]. Journal of Hydrology, 2012, 470(23): 1-11.
- [5] SMITH M B. Comment on "analysis and modeling of flooding in urban drainage system"[J]. Journal of Hydrology, 2006, 317(3/4): 355-363.
- [6] CHEN J, HILL A A, URBANO L D. A GIS-based model for urban flood inundation[J]. Journal of Hydrology, 2009, 373(S1/2): 184-192.
- [7] HSU M H, CHEN S H, CHANG T J. Inundation simulation for urban drainage basin with storm sewer system[J]. Journal of Hydrology, 2000, 234(1): 21-37.
- [8] LIU Y, SNOEYINK J. Flooding triangulated terrain [M]. Berlin: Springer, 2005: 137-148.
- [9] 刘学军, 王永君, 任政, 等. 基于不规则三角网的河网提取算法[J]. 水利学报, 2008, 39(1): 27-34.
- [10] ZHOU Q. Estimating surface flow paths on a digital elevation model using a triangular facet network[J]. Water Resources Research, 2011, 47(7): 1772-1780.
- [11] WU L X, WANG Y B, SHI W Z. Integral ear elimination and virtual point-based updating algorithms for constraint Delaunay TIN[J]. Science in China (E), 2008, 51(1): 135-144.
- [12] 刘小生, 黄玉生. "体积法"洪水淹没范围模拟计算[J]. 测绘通报, 2004(12): 47-51.
- [13] 刘仁义, 刘南. 基于 GIS 技术的淹没区确定方法及虚拟现实表达[J]. 浙江大学学报: 理学版, 2002, 29(5): 573-578.

(责任编辑: 程锦)

(上接第 63 页)

- [9] 左虎, 殷达伟, 范杰. 对地震后龙泉局部地区形变的分析[J]. 测绘, 2008, 31(5): 216-219.
- [10] 蒋光伟, 程传录, 田晓静, 等. 日本大地震 (Mw9.0) 对中国大地基准框架的影响[J]. 测绘通报, 2014(1):

16-18.

- [11] 刘焱雄, 范士杰, 乔方利, 等. 2011 年日本 Mw9.0 级地震的 GPS 响应研究[J]. 海洋学报: 中文版, 2012, 34(6): 59-65.

(责任编辑: 贾娇)