

利用 CD-TIN 的城区暴雨内涝淹没模拟方法及其实验

李志锋¹ 吴立新^{1,2} 张振鑫³ 杨宜舟⁴

1 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室,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 中国矿业大学地球科学和测绘工程学院,北京,100083

4 东北大学资源与土木工程学院,辽宁 沈阳,110004

摘要:基于约束 Delauney 不规则三角网(CD-TIN)对复杂城区地表进行精细建模,采用三角形面片上的汇流模式划分汇水单元,为内涝淹没过程模拟提供基本的分析单元。顾及雨水管排水能力和地表特征的复杂性,提出了汇水单元内产汇流的时空模型与建模方法,并利用三棱柱集的二分数值解法给出了内涝淹没范围和水深的求解算法。以北京师范大学主校园为例,对 2012 年“7.21”暴雨内涝淹没过程进行了模拟分析,结果表明,本文方法有效、结果可靠。

关键词:城区内涝;淹没模拟;CD-TIN;产汇流;时空模型

中图分类号:P208;P237.9 **文献标志码:**A

城区内涝灾害直接威胁着人类生存与城市发展,而在突发的城区内涝灾害过程中暴露出来的城区内涝灾情模拟推演难、内涝隐患分析排查难等问题,成为城市防涝减灾与应急决策的瓶颈。因此,亟需建立一种合理、实用的城区内涝淹没过程模拟方法,以提高城市的防灾减损能力。

国内外学者对城区内涝淹没过程模拟进行了大量研究,根据所用数据、模型假设、方法参数和模拟对象的不同,有以下几种主要方法:①结合水文学产汇流理论和水力学方法的城区“双排水系统”^[1]的模式。②采用一维二维水动力学方法的城区内涝演进过程模拟^[2-3]。③基于 GIS 的内涝淹没过程模拟方法^[4-7]。城区地表特征复杂,微小地物特征即可改变城区汇流过程,进而影响内涝淹没模拟的最终结果,故对该特征进行精细建模尤为重要,而约束 Delaunay 三角网(CD-TIN)能够更为准确地反映上述地物特征。时间序列快照模型可为城区内涝淹没提供时空过程的模拟,反映淹没过程和淹没历时信息,而不仅局限于静态的淹没分析^[4-5]。因此,本文将城区精细地表特

征视为城区 TIN 的约束面、约束边或约束点,采用基于 CD-TIN 的 DEM 来精细表达城区地表,结合三角形面片上的汇流模式划分城区汇水单元,并对汇水单元的产汇流时空过程进行建模,基于三棱柱集的二分数值解法给出了淹没范围和水深模拟的方法。以北京师范大学(简称为北师大)主校区为例,对“7.21”暴雨内涝淹没过程进行模拟分析,并与实测数据进行了对比。

1 基于时空过程的内涝淹没模拟方法

本文基于序列快照模型,给出了基于 CD-TIN 的城区地表内涝淹没过程模拟的新方法。如图 1 所示,将连续时空过程离散为 $T=B \cup I = \{T_0\} \cup \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ 。初始 T_0 时刻建立城区 CD-TIN 地表,并对其划分城区汇水单元;快照集 $I = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ 可提供各淹没过程的场景集(含淹没范围和水深),进而获取致灾因子的淹没历时信息。

收稿日期:2013-03-21

项目来源:北京市自然科学基金重点资助项目(8111003);国家 973 计划资助项目(2011CB707102);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(105565GK)。

第一作者:李志锋,博士生。主要从事空间信息理论与技术、灾情模拟与风险评估研究。E-mail:lizhifengemail@gmail.com

通讯作者:吴立新,博士,教授。E-mail:awulixin@263.net

1.1 基于 CD-TIN 的城区地表建模

本文定义约束特征集 $C = \{c \mid c \text{ 为影响城区地表汇流和淹没过程的地物特征}\}$, 包含 3 个子集 $P = \{p \mid p \text{ 为约束点特征, 即造成水流量改变和汇流方向改变的点}\}$, $L = \{l \mid l \text{ 为约束线特征, 即地表高程突变边}\}$, $F = \{f \mid f \text{ 为约束面特征, 即不同类型的下垫面或者改变水流方向的面}\}$ 。在实际城区地表中, 则有 $\{\text{雨水篦, 出水口点}\} \subseteq P$, $\{\text{马路牙, 减速坡, 陡坎, 围墙, 建筑物边界}\} \subseteq L$, $\{\text{绿地, 路面, 建筑物}\} \subseteq F$ 。实际工作中, 可依据国家四等水准测量标准对约束特征进行实地测量(精度优于 cm 级), 并整理、组织数据入库进行管理。基于约束特征和测量碎步点, 可采用对角线交换循环算法, 构建顾及约束特征的精细城区地表 CD-TIN。

1.2 城区汇水单元划分原理

城区汇水单元划分是内涝淹没模拟分析的基础, 虽然基于栅格 DEM 的研究较多^[5-6], 但栅格不能充分表达汇流方向^[8], 且无法精细表达城区地表^[9], 故有学者研究了基于 TIN 的汇流路径提取^[8-9]和汇水单元划分^[7-9]。本文采用了面点汇流模式划分城区汇水单元, 即三角形面片上的水先汇流到各三角形高程最低顶点, 然后沿着三角形边汇流到邻近的边坡度最陡顶点, 直到汇流至终点(即局部洼地点)的汇流模式。

1.3 城区地表产汇流计算方法

根据物质守恒原理^[4,5,7], 暴雨降落到地面, 除去地表下渗、雨水篦排水, 剩余的地面净积水量将转换为地表径流和蒸散量(暴雨时间蒸散量较少, 本文暂不考虑)。对某城区汇水单元而言, 考虑到地表汇流, 其净积水量计算公式为:

$$Q_a = Q_p + Q_c = (Q_f - Q_s - Q_d) + (Q_i - Q_o) \quad (1)$$

式中, Q_a 为累积净积水量; Q_p 为累积产流量; Q_c 为累积汇流量; Q_f 为持续降水量; Q_s 为累积地表下渗量; Q_d 为雨水篦的累积排水量; Q_i 为邻域汇水单元流入的累积水量; Q_o 为流出到邻域汇水单元的累积水量。

1.3.1 城区产流量计算

汇水单元的净产流量 Q_p 主要为降水量 Q_f 与地表下渗量 Q_s 、雨水篦排水量 Q_d 之差。降水量为某一降雨强度下某一时段内降落在一定面积内的累积雨水量(见式(2)), 其中, 降雨强度为气象观测数据, 也可采用历史暴雨案例记录的数据, 亦可采用降雨强度-历时-重现期方法。本文采用给水排水设计手册^[10]的计算方法:

$$Q_f = P \cdot S_p \cdot t \cdot 10^{-3} \quad (2)$$

$$P = \frac{10.662 + 8.842lgT_E}{(t + 7.857)^{0.679}} \quad (3)$$

式中, P 为降雨强度; S_p 为汇水单元的水平投影面积; t 为降雨历时; T_E 为重现期。

由于地表下渗的复杂性和多变性, 且城区地表多为沥青等不透水下垫面, 下渗较少, 为便于计算, 本文采用地表径流系数 φ 来推算地表经验下渗系数, 则地表下渗量 Q_s 可表示为:

$$Q_s = (1 - \varphi) \cdot Q_f \quad (4)$$

式中, φ 为地表下垫面径流系数, 不同系数的参考值^[10]如表 1 所示。

表 1 不同下垫面的径流系数
Tab. 1 Runoff Coefficient of Different Urban Surface

下垫面种类	φ	本文实验区取值		
		φ_1	φ_2	φ_3
屋面、混凝土或沥青路面	0.85~0.95	0.85	0.90	0.95
大块石铺砌路面或沥青表面的碎石路面	0.55~0.65	0.55	0.60	0.65
级配碎石路面	0.40~0.50	0.40	0.45	0.50
干砌砖石或碎石路面	0.35~0.40	0.35	0.38	0.40
非铺砌土路面	0.25~0.35	0.25	0.30	0.35
公园或绿地	0.10~0.20	0.10	0.15	0.20

若汇水单元中含有雨水篦等排水设施, 则该汇水区单元的第 j 个雨水篦的排水量 Q_{dj} 的计算可参考给水排水设计手册^[10]中给出的雨水篦形式、排水能力及其适用条件, 实际应用时需结合研究区雨水篦的实际情况, 选取对应的排水能力。因此, 汇水区单元的净产流量计算公式为:

$$Q_p = \varphi Q_f - \sum_{j=1}^m Q_{dj} \quad (5)$$

式中, Q_p 为汇水区单元的净产流量; φ 为地表径流系数; m 为汇水区单元所包含的雨水口的个数。

1.3.2 城区汇流量计算

当汇水区的积水不断增加, 到达出水口之后, 积水将流向邻域汇水区, 形成不同汇水区之间的汇流。具体计算步骤为: ① 判断汇水区 A 内的水位值 H_a 是否达到出水口 O 点的高程, 如果没达到, 则水位继续增加; 否则, 进入步骤②。② 根据出水口点 O 处的下垫面类型和水位值, 结合坡面流速计算方法^[11], 采用式(6)计算该处的水流量 Q_v 。③ 搜索出水口 O 点所连接的邻接汇水区 (B, C, D), 比较 A 和 B, C, D 的水位值。如果 $H_a > H_b, H_a > H_d, H_a < H_c$, 则汇水区 A 的积水按照流量 Q_v 均分流入到汇水区 B, D 中, 其余情况类推。④ 所

有汇水区按照步骤①~③依次进行汇流,即可得到当前时刻 T_i 的城区淹没范围和水深;

$$Q_v = A_s \cdot k \cdot \sqrt{S} \quad (6)$$

式中, A_s 为出水口积水横断面的面积; S 为坡面流平均坡度; k 为坡面流速度常数,具体取值见参考文献[20]。

1.4 淹没水面二分求解

根据等体积的原则^[4-6],地表累积净水量将转化为地表径流量。由于地表特征的复杂性和异质性,较难明确地建立式(7)的解析方程,本文采用二分数值求解^[12]的方法得到淹没水位的数值解。由于积水量计算的基本区域为三角形,为便于求解,引入三棱柱的概念,即以地面三角形的3个顶点垂直向上引垂线形成三棱柱,则汇水单元可划分为三棱柱集(如图2(a))。水面上升淹没过程可概化为淹没1、2和3个顶点的情况(对应图2(b)、2(c)、2(d))分别进行汇水区积水量计算,从而进行二分数值求解。

$$Q_a = \int_A (H_w - H_g) ds \quad (7)$$

式中, A 为淹没的面积; ds 为积分划分的基本区域; H_w 为淹没水位; H_g 为地表高程。

城区暴雨内涝淹没的计算过程为:首先,按照式(1)~(6)依次计算汇水区的产流量和汇流量,进而得到各汇水区的净积水量;然后,采用式(7)数值求解某时刻的淹没范围和水深,进而得到整个研究区的淹没情况;依此类推,即可得到研究区的内涝淹没历时情况,从而实现暴雨内涝淹没的时空模拟。

2 应用实例

2.1 CD-TIN 地表建模

北师大位于北京市北二环与北三环之间,为典型城区地表。利用全站仪(2"级)和水准仪(S3型)依照国家四等测量标准,对北师大主校园地表特征进行碎部测量(导线全长闭合差为0.153 m,相对闭合差为1/17 127(<1/10 000),高程闭合差为8 mm),并依据国家1:500制图标准制图。基于地表约束特征的测量数据,构建CD-TIN表达的北师大主校园城区地表,如图3(a)所示,其中,约束三角面1 128个、约束边223条、约束点364个。为便于表达,采用不同显示模式对CD-TIN表达的北师大主校园城区地表进行可视化(灰色为建筑物、绿色为地面)。采用汇水区划分方法划分的汇水区如图3(b)所示,其中,不同颜

色标示了不同汇水区的邻接情况。

2.2 “7.21”内涝淹没模拟

近年,北师大主校园几乎每年均受暴雨内涝的侵袭。以北京“7.21”暴雨内涝为例,采用本文方法对北师大主校园内涝淹没情况进行模拟。据相关报道,此次暴雨重现期为61 a,12 h降水量高达215 mm。据观测,北师大此次暴雨降水持续3 h,由式(3)计算此次降雨强度为0.76 mm/min。结合北师大主校园雨水篦的实际情况(道牙平篦式),选取经验值(20 m³/s)作为雨水篦的排水能力,对于易被树叶等杂物堵塞的雨水篦,其排水能力计算时可视实际情况乘以系数0.5~0.7,因北师大校园清洁情况较好,本文不考虑堵塞情况。

参考表1中的不同地表径流系数,设置实验参数(表1中 φ_2),在实验机(Intel®Core™2 Duo CPU p8600 @ 2.4 GHz, 1.93 GB RAM)上,采用课题组开发的模拟软件对北师大“7.21”暴雨内涝进行淹没模拟。如图4所示,此次暴雨积水较为严重的区域为辅仁路(尤其是地遥楼前(标示为A)和幼儿园前(标示为B))、南门、东门、北门和励耘楼等。采用钢卷尺(精度mm级)在暴雨的不同时刻对A、B两点进行了水深实地测量(后文的实测水深指该点测得的最大淹没水深),其余淹没区域进行了实地照片的采集,图4中照片亦是采集到的最大淹没情景。通过与实地采集照片的对比,在一定程度上表明了淹没模拟效果的可靠性。

为验证淹没模拟过程中水深的可靠性,选取不同径流系数 φ_1 、 φ_2 、 φ_3 (见表1)对淹没水深进行差异化模拟。A所在汇水区的下垫面由花坛和道路路面组成(汇水面积为5 374.33 m²),B所在汇水区下垫面由沥青路面和屋面组成(汇水面积为409.17 m²)。A、B所在汇水区在不同径流系数(φ_1 、 φ_2 、 φ_3)、不同降雨历时(1 h、2 h、3 h)情况下的净产流量关系如图4所示:①相同下垫面在不同径流系数下净产流量不同,径流系数变大,净产流量增大;②A所在汇水区的净产流量呈相似规律性,相同下垫面在同一径流系数下净产流量随着降雨历时而递增;但B所在汇水区的净产流量则规律性不明显,主要是受邻域汇水区流入积水量的不确定性影响。将模拟结果与A、B两处的实测淹没水深进行对比,如表2所示:①不同的径流系数对淹没模拟结果产生了一定的影响,且影响结果视地表情况而定。A处附近地表为道路面和花坛的交界,而单位面积上的花坛相对道路面产流量较少,故模拟的净积水量偏少,导致淹

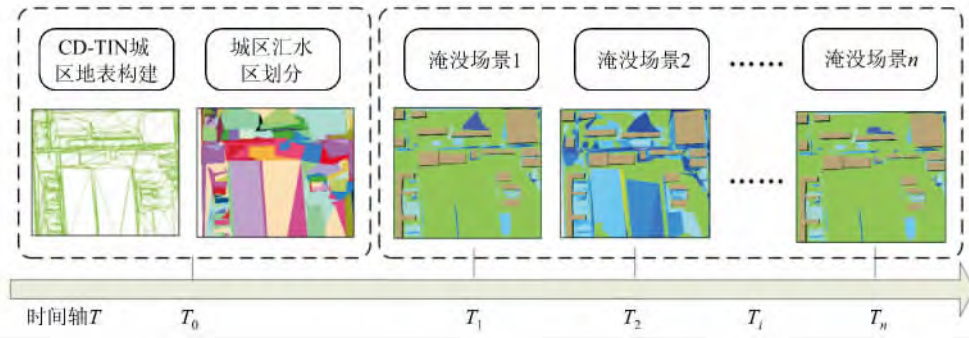


图 1 城区内涝淹没过程模拟的时空流程

Fig. 1 Spatio-temporal Process Simulation of Urban Flood Inundation

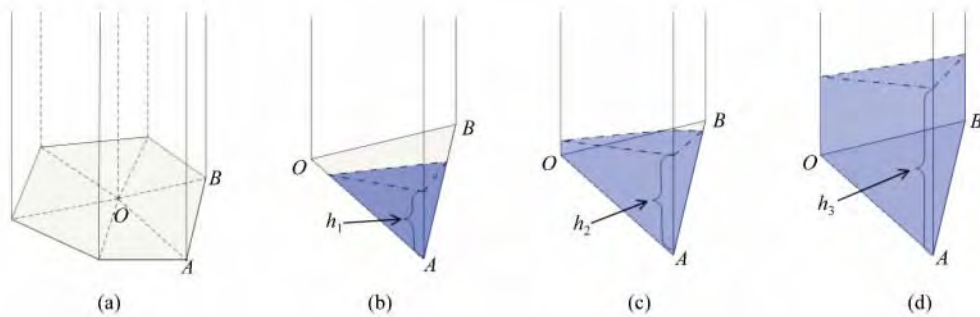


图 2 汇水区三棱柱集及其 3 种淹没情况示意图

Fig. 2 Triangular-Prism Sets of Basin and Three Inundation Phases of One Triangular-Prism

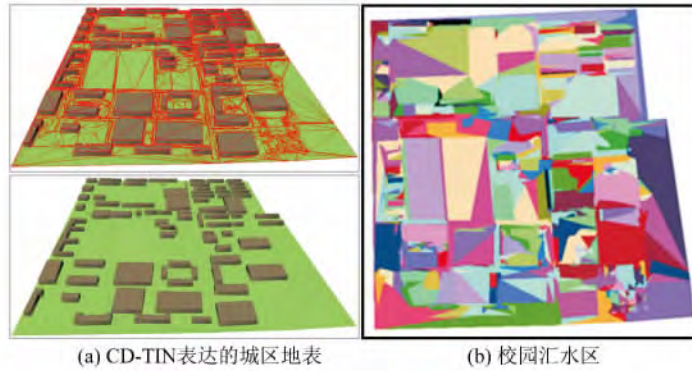


图 3 北师大城区地表表达及其汇水区划分效果图

Fig. 3 Representation for Urban Terrain of BNU Main Campus and Its Basin Division Results

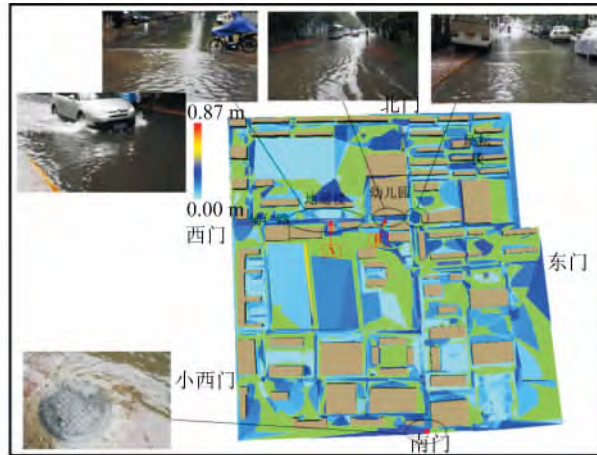


图 4 “7. 21”暴雨内涝淹没模拟效果与现场实景对比图

Fig. 4 Comparison of “7. 21” Storm Inundation Simulation with In-suit Scene

没水深偏小;②B处附近地表为沥青路面和屋面,径流系数相似,模拟结果应基本稳定,但其在径流系数 φ_2 情况下的变化主要是受邻域汇水区积水量流入的影响,导致净积水量发生变化,从而影响了B处的模拟结果。总体而言,该验证数据在一定程度上说明了本方法模拟淹没水深的可靠性。若后续暴雨淹没案例中采集到更多的实测数据,可更精确地率定相关参数,并为准确模拟提供更多的交叉验证。

表2 A、B两处淹没水深实测结果和模拟结果对比
Tab.2 Inundation Depth comparison of Spot A's and B's Simulation Results with In-suit Captured Data

径流系数	实测水深/cm		模拟结果/cm		相对误差	
	A	B	A	B	A	B
φ_1	42	36	35	33	16.7%	8.3%
φ_2	42	36	37	39	9.6%	8.3%
φ_3	42	36	38	34	9.5%	5.6%

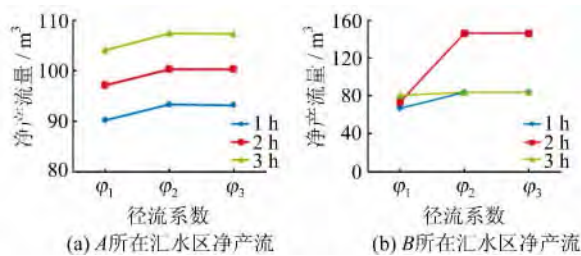


图5 不同径流系数在降雨历时1 h、2 h、3 h情况下的净产流量

Fig.5 Excess Runoff Volume with Different Runoff Coefficient at Rainfall Duration of 1 h, 2 h, and 3 h, Respectively

3 结语

在汇水区产流量计算中,本文采用的是雨水篦的经验排水量,而实际当中排水量可能随着淹没时间和淹没水深而变化,导致了本文最终模拟结果的误差。同时,被杂物堵塞的雨水篦,其排水能力也将发生改变,后续研究中应视实际情况乘以相应系数。另外,由于北师大主校园空间范围相对较小,故采用统一的降雨强度。实际上,城区范围内不同区域的降雨强度一般不同,将本文方法应用于大范围的城区内涝模拟时需要考虑降雨强度的空间差异性。虽然本文未考虑排水管网与地面水量的交互过程,但本文方法具有较好的可扩展性,后续研究可引入排水管网与地面水量交互模型来准确模拟汇水区的净积水量,以得到更为准确的模拟与仿真。本文方法可望推广于大范围城区内涝淹没模拟,可采用基础地理数据、高分

影像数据作为数据来源,融合激光雷达高精度高程数据,实现大范围城区地表的快速建模。下一步拟采用并行计算解决大范围、大数据量城区内涝模拟的效率问题,达到实时模拟的目的。

参考文献

- [1] Djordjevic S, Prodanovic D, Maksimović. An Approach to Simulation of Dual Drainage[J]. *Water Science and Technology*, 1999,39(9): 95-103
- [2] Li Weifeng, Chen Qiuwen, Mao Jingqiao. Development of 1D and 2D Coupled Model to Simulate Urban Inundation: An Application to Beijing Olympic Village[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(9): 1 613-1 621
- [3] Qiu Jinwei, Li Na, Cheng Xiaotao, et al. The Simulation System for Heavy Rainfall in Tianjin City [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000 (11): 34-42(仇劲卫,李娜,程晓陶,等.天津市城区暴雨内涝仿真模拟系统[J].水利学报,2000,(11): 34-42)
- [4] Chen J, Hill A A, Urbano L D. A GIS-based Model for Urban Flood Inundation[J]. *Journal of Hydrology*, 2009,373(1/2): 184-192
- [5] Wang Lin, Qin Qiming, Li Jizhi, et al. Study on the Disaster Analysis Model of Water-Logging in City Based on GIS[J]. *Survey Science*, 2004, 29 (3): 48-53 (王林,秦其明,李吉芝,等.基于GIS的城市内涝灾害分析模型研究[J].测绘科学,2004,29 (3): 48-53)
- [6] Yin Zhane, Xu Zhiyuan, Yin Jie, et al. Small-Scale Based Scenario Modeling and Disaster Risk Assessment of Urban Rainstorm Water-logging[J]. *Acta Geographica Sinica* 2010,65(5): 553-562 (尹占娥,许世远,殷杰,等.基于小尺度的城市暴雨内涝灾害情景模拟与风险评估[J].地理学报,2010,65(5): 553-562)
- [7] Yu Ye, Liu Xiaoping, Yuan Xiaohui, et al. City Modeling and Simulation for Flood Disaster Assessment[J]. *Journal of System Simulation*, 2010, 22 (9): 2 136-2 140(余焯,刘晓平,袁晓辉,等.面向洪水灾害评估的城市建模与仿真[J].系统仿真学报,2010,22(9): 2 136-2 140)
- [8] Liu Y, Snoeyink J. Flooding Triangulated Terrain [M]. Berlin, Heidelberg, Springer, 2005
- [9] Li Zhifeng, Wu Lixin, Zhang Zhenxin, et al. Basin Division Method for Tin Surface Based on Face-point-Edge Flow Confluence[C]. The 35th ISRSE, Beijing, 2013
- [10] Beijing General Municipal Engineering Design and Research Institute. Water Supply and Drainage De-

- sign Manual. Volume 5th: Urban Drainage [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2004 (北京市市政工程设计研究总院, 给水排水设计手册, 第 5 册: 城镇排水 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004)
- [11] Hao Zhenchun, Li Li, Wang Jiahu, et al. Distributed Hydrological Model Theory and Method [M]. Beijing: Science Press, 2010 (郝振纯, 李丽, 王加虎, 等. 分布式水文模型理论与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2010)
- [12] Li Zhifeng, Wu Lixin, Zhang Zhenxin, et al. Triangular-Prism-Based Urban Flood Inundation Simulation Algorithm Employing Dichotomy Solving Method [C]. IGARSS, Melbourne, Australia, 2013

CD-TIN Based Urban Inundation Simulation Method and Its Experiment

LI Zhifeng¹ WU Lixin^{1,2} ZHANG Zhenxin³ YANG Yizhou⁴

1 Key Laboratory of Environment Change and Natural Disaster, Beijing Normal University, Beijing, 100875, China

2 IoT Perception Mine Research Center, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China

3 College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China

4 College of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China

Abstract: Urban storm floods cause dramatically property damage and severely influence on city life. It is an emergency issue and a knotty problem to be solved. Much research focuses on raster-based DEM and hydrodynamic equations to simulate inundation processes. Nevertheless, current methods strictly require hydrology data and are unable to model accurately the urban terrain features. By employing a constrained Delaunay triangular irregular network (CD-TIN), complex urban surfaces are precisely modeled in detail. Urban basins, serving as simulation units, are generated based on the water flow rules for triangular surface. Referring to the capacity of the drainage and complexity of urban terrain features, we introduce the basin runoff yield and confluence method for spatio-temporal calculation step by step. In order to obtain the inundated extent and water depth, a numerical solution is put forward based on the concept of triangular-prism sets through dichotomy. The main campus of Beijing Normal University (BNU) is used as a case to construct the CD-TIN and to simulate the “7.21 storm” inundation event, 2012, to test the usability and suitability of the method presented. Simulation water depths are compared with the observation data, showing that the CD-TIN based method for urban inundation simulation is effective and reliable. The CD-TIN based simulation method will be useful for urban flood emergency preparation, storm flood risk analysis and urban reforms in potential inundation areas.

Key words: urban inundation; inundation simulation; CD-TIN; runoff yield and confluence; spatio-temporal model

First author: LI Zhifeng, PhD candidate, specializes in spatial information methods and technologies, disaster assessment and risk simulation. E-mail: lizhifengemail@gmail.com

Corresponding author: WU Lixin, PhD, professor. E-mail: awulixin@263.net

Foundation support: The Natural Science Foundation Key Program of Beijing, No. 8111003; the National 973 Program of China, No. 2011CB707102; the Fundamental Research Funds for Central Universities, No. 105565GK.