

城市地表雨水汇流运动波计算方法研究

邹霞,刘佳明,张艳军,袁迪,宋星原

(武汉大学水利水电学院,湖北 武汉 430072)

摘要:从以圣维南方程为基础的坡面流角度出发,引入运动波描述城市地表汇流过程,同时考虑全面汇流和部分汇流,利用分级叠加法,对净雨强度随时间变化的城市地表雨水径流过程用坡面流运动波方程进行模拟计算,并将地表划分成多个子集水单元,按照各子集水单元的地表属性分别得到相应的流量过程,最后汇总得到区域出口处的流量过程。最后用实测资料对模拟计算结果进行了验证,结果表明模拟结果与实测资料拟合度较高,该方法得出的模拟结果基本合理,可在城市降雨径流计算等方面作为参考。

关键词:坡面流;运动波;城市地表汇流

中图分类号:TV121+.2

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2015)02-0012-05

1 概述

城市地表汇流过程是指城市排水区域内各子流域的地表径流沿子流域坡降方向汇入各集水口的过程,因此集水口流量过程线集中反映了城市地表产、汇流的特点。城市地表相对于天然流域覆盖更为复杂,且汇水边界不明显,汇水面积也较小,加之复杂的水文水力条件使城市地表汇流过程的求解比较困难,求解方法分为水文学和水动力学两大类^[1]。水文学方法以系统分析为基础,将城市汇水流域当作一个黑箱或灰箱系统,建立输入输出的关系,从而来模拟坡面汇流的过程^[2],主要包括推理公式法、等流时线法、线性水库汇流模型及非线性水库汇流模型。水动力学方法建立在微观物理定律(连续性方程和动量方程)的基础上,直接求解圣维南方程来模拟坡面汇流的过程。水文学方法对流域的初始和边界条件要求简单,从而被广泛应用;而水动力学方法由于城市地表的复杂性,在应用上有一定的难度,却能够提供更为丰富的城市地表汇流过程的信息,因此对水动力学方法求解城市地表汇流过程进

行探索有重要的意义。本文利用圣维南方程组推求了城市地表坡面汇流计算公式,并通过对净雨的分级叠加,模拟了非均匀净雨条件下的城市地表坡面汇流过程。

2 坡面流运动波方法

2.1 均匀雨强下的运动波过程

坡面汇流是一个十分复杂的过程,其水流形态随地表径流水深而变化,如层流或紊流、次临界流或超临界流、恒定流或非恒定流。坡面流的描述有扩散波、运动波和动力波三类。如 Ponce, V.^[3](1986)建立了扩散波的水动力学模型来求解汇流过程; Mizumura, K.和 Ito, Y.^[4](2011)用运动波方法求解了流域变雨强条件下的坡面汇流过程; Pierfranco Costabile, Carmelina Costanzo, Francesco Macchione^[5](2013)建立了二维动力波方程对地表径流过程进行模拟。城市地表雨水的汇流过程可以看作是一个非均匀和非稳定的宽浅明渠水流汇集的过程。不稳定流可以用一组水位或流量的偏微分方程组来描述,其中用圣维南方程组描述的坡面流运动方程如下:

$$\begin{cases} \text{动量方程: } \frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{gA} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + \frac{\partial y}{\partial x} = S_0 - S_f + \frac{1}{gA} \int_{\sigma} q V_x d\sigma \\ \text{连续方程: } \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = \int_{\sigma} q V_x d\sigma \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期:2014-01-14

基金项目:国家自然科学基金项目(51379149);国家青年基金项目(51209162).

作者简介:邹霞(1989-),女,浙江慈溪人,硕士研究生,主要从事水文预报及水环境方面的研究。E-mail: zouxia1989@yeah.net

通讯作者:宋星原(1953-),男,湖北孝感人,教授,研究方向包括洪水实时预报方法与技术、流域水文模型研制与数字化技术、水库控制运行与管理及水环境预测与和水污染防治等。E-mail: songxy@whu.edu.cn

式中: g 为重力加速度; t 为时间; x 为水流方向; A 为垂直于水流方向的断面面积; Q 为通过相应断面的流量; y 为水深; V_x 为 x 方向断面平均流速; S_0 为地表坡度; q 为降雨(或下渗); S_f 为摩擦阻比降。

当运动水流满足水力条件 $k = \frac{gn^{1.2} i_0^{0.4} L^{0.2}}{r^{0.8}} > 10$, 圣

维南方程组的完全解非常接近运动波解^[6]。其中 k 为水流数; n 为区域糙率; i_0 为区域坡度; L 为区域坡长; r 为净雨强度; 当区域坡长 L 的单位取为 m, 净雨强度 r 的单位取为 mm/h 时, 水流数可表达为:

$$k = 1.72n^{1.2} i_0^{0.4} L^{0.2} r^{-0.8} \times 10^6 \quad (2)$$

城市地表汇流基本满足以上水力条件, 因此可将其近似为运动波过程进行描述。则圣维南方程组可简化成如下形式(其中旁侧入流即为净雨):

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r(x, t) \\ q = \partial h^m \end{cases} \quad (3)$$

式中: x 为坡面某点至坡顶的距离,m; t 为时间,s; h 为水深,m; q 为单宽流量,m²/s; ∂ 为偏微分符号; m 为参数; $r(x, t)$ 为坡面上距离坡顶 x 米处在 t 时刻的单宽净雨, m/s;本文中采用曼宁公式,取 $m=5/3$ 。

当雨强均匀时,可求得运动波方程的解析解。其中坡脚的流量即可看成城市地表流域出口处的流量。其中坡脚处的平衡流量 q_m :

$$q_m = 2.78rL \times 10^{-7} \quad (4)$$

上式计算的平衡流量在坡面汇流达到全面汇流时才发生,其中平衡流量 q_m 的单位:m²/s;净雨强 r 的单位:mm/h;坡长 L 的单位:m。全面汇流的平衡时间 t_m 计算公式如下:

$$t_m = 6.99r^{-0.4} i_0^{-0.3} n^{0.6} L^{0.6} \quad (5)$$

式中符号意义和单位同上。

当还未达到平衡流量时为涨水阶段,此时的流量 q 为:

$$q/q_m = (t/t_m)^m \quad (6)$$

式(6)中 q/q_m 与 t/t_m 是单值关系,与雨强无关。将其化简和进行单位统一后有涨水段 t 时刻的流量:

$$q = 2.78rL \left(\frac{t}{t_m}\right)^{5/3} \times 10^{-7} \quad (7)$$

类似可得退水段任意 t 的流量:

$$\frac{q}{q_m} - 1 + \frac{5t}{3t_m} \left(\frac{q}{q_m}\right)^{0.4} = 0 \quad (8)$$

式(4)~(8)即为均匀雨强下流域全面汇流状态的坡脚处流量过程。刘金星等^[7]在研究时提出了城市雨

水地面径流过程部分汇流的概念,即在降雨历时小于全面汇流平衡时间 t_m 时,坡面流为部分汇流状态,在坡脚退水过程中出现平头峰。平头峰 q_d 及历时计算公式如下:

$$q_d = 2.78rL \left(\frac{t_r}{t_m}\right)^{5/3} \quad (9)$$

$$t_d = 0.6 \left(\frac{nL}{60i_0^{1/2} h_d^{2/3}} - t_r\right) \quad (10)$$

式(9)、(10)中: t_r 为净雨历时,min; h_d 为平头峰出现时的积水深度, $h_d = 1.67rt_r \times 10^5$ 。

在坡面部分汇流情况下,净雨结束前的时刻都为涨水阶段,其计算公式同式(7);而当平头峰历时过后,为退水阶段,此时任意 t 的流量:

$$\frac{q}{q_d} - 1 + \frac{5t}{3t_m} \left(\frac{q}{q_d}\right)^{0.4} = 0 \quad (11)$$

2.2 非均匀雨强分级叠加的运动波

上述坡面流运动波的解只适用于均匀净雨强度条件下,而自然条件下的任何一场降雨的净雨强度都不可能是均匀的,而是随时间变化的。假设一场降雨的净雨过程如图1所示,现将其进行线性分割,分割后的每一部分各自计算,最后将每一部分的流量进行线性叠加即可得到坡脚处的流量过程线。

假设净雨在 t 时段内可看作是均匀的(当 $t \rightarrow 0$ 时,净雨强度即瞬时变化)。如图1所示,将净雨进行分割,分割方法如下:净雨强度为 r_1 时,净雨历时为 t_1 ;净雨强度为 $r_2 - r_1$ 时,净雨历时为 t_2 ;净雨强度为 $r_3 - r_2$ 时,净雨历时为 t_3 ;依此可将净雨分成 n 个过程,并且当 $n \rightarrow \infty$ 时,被分割的每一个部分可看成净雨强度为均匀的,那么即可用均匀雨强条件下的坡面汇流求其运动波解。考虑被分割后的每一部分净雨在坡面汇流过程中能否达到全面汇流,若能达到全面汇流的平衡时间,则按全面汇流公式进行其流量计算;若不能达到全面汇流的条件,则按部分汇流公式进行其流量计算;最后将各部分计算所得的流量经过线性分级叠加,得到非均匀净雨强度下的坡面汇流流量过程线(如图2中所示, q_1, q_2, q_3 为 $r_1, r_2 - r_1, r_3 - r_2$ 分别对应的流量过程,且 $r_1, r_2 - r_1$ 达到全面汇流, $r_3 - r_2$ 为部分汇流; q 为 q_1, q_2, q_3 线性分级叠加的流量过程)。

3 模拟与验证

3.1 研究区域基本概况

为了对上述所阐述的方法进行全面的检验,现将

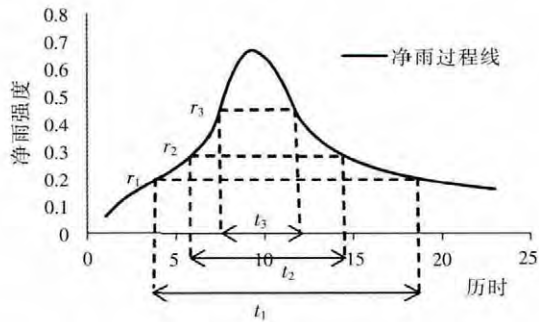


图1 某一场降雨的净雨过程
Fig.1 The net rainfall process

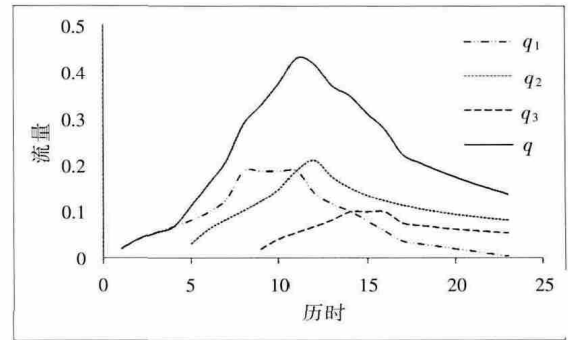


图2 汇流流量过程线
Fig.2 The flow convergence process

该计算方法对武汉市汉阳区桃花岛区域(1.33km²) 2003年6月23日的一场降雨径流过程进行模拟及验证。根据初步调研和分析,汉阳桃花岛区域属于残丘性冲积平原,主要由剥蚀低丘和漫滩阶地组成。该地区属亚热带大陆季风性(湿润)气候,具有雨量丰沛、热量充足、雨热同季、冬冷夏热、四季分明等特点。降雨量充沛,年均降水量1237.7mm,年均降日数124.9d,降水集中在4~8月,降水量占全年的65%,年降雪日一般在10d以内。桃花岛区域是典型的居民区,下垫面特征复杂,其遥感影像图如图3所示。在地表汇流过程中,根据下垫面透水性质的不同将汉阳桃花岛区域分为了工业区、商业区、居民区、草地及水体5中不同的地表属性,其中曼宁糙率的选取是参照相关的文献^[9-11]来确定的,工业区、商业区、居民区、草地分为不透水及透水来计算,具体数值如表1所示。按照子集水区划分原则,即根据地形将主干道路、雨水排水管道确定为汇流

子集水区的分界线并考虑社会单元分布,对研究区域进行单元划分,得到20个子集水单元,划分结果及地表特征如图4所示。根据公式(2),结合以上资料计算水流数,计算中按照最不利情况,取糙率数为0.04,坡度区域平均值0.05;区域坡长取平均值1000m,净雨强度取该日降雨的最大净雨强度118.2mm/h,此时算得的水流数为 $9.54 \times 10^2 > 10$,故可用上述运动波解在该研究区域进行计算。

表1 曼宁糙率参考值
Table1 The Manning roughness reference values

地表特性	透水性(比例)	曼宁糙率参考值
工业区	不透水(90%)	0.04
	透水(10%)	0.3
商业区	不透水(85%)	0.04
	透水(15%)	0.3
居民区	不透水(80%)	0.04
	透水(20%)	0.3
草地	透水(100%)	0.08



■ 工业区 ■ 商业区 ■ 居民区 ■ 草地 ■ 水体

图3 桃花岛区域影像图
Fig.3 Taohuadao area image map

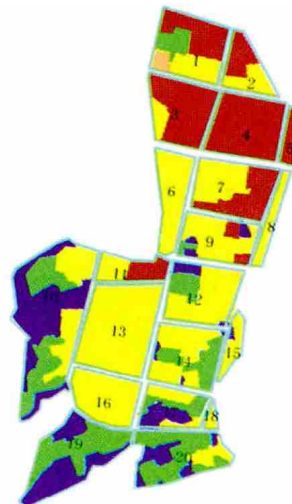


图4 桃花岛区域单元划分及地表特征
Fig.4 Taohuadao area surface division and properties

3.2 模拟及验证

对桃花岛区域划分后的 20 个子集水单元分别按照上述的坡面流运动波过程进行计算, 选取 2003 年 6 月 23 日的降雨对该方法进行模拟及验证, 其降雨过

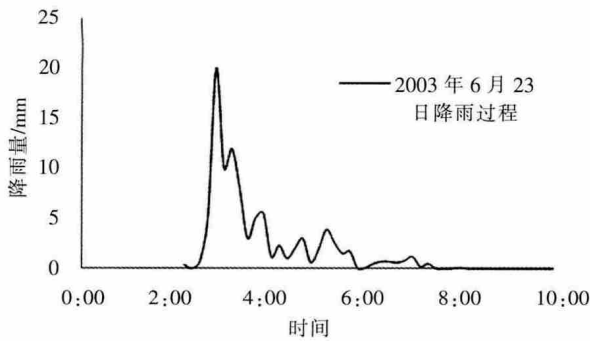


图5 降雨过程
Fig.5 The rainfall process

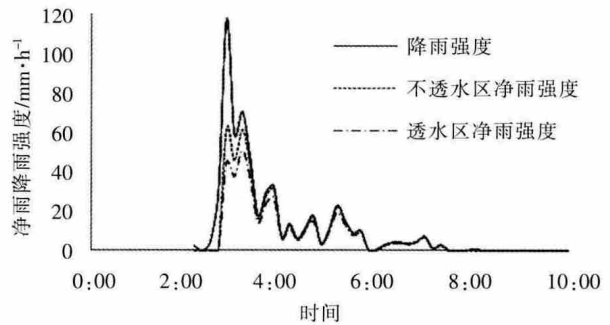


图6 净雨强度
Fig.6 The net rainfall intensity

表2 实测流量与模拟流量比较
Table2 Comparison between the observed values and simulated values of the flow process

时间	流速/m·s ⁻¹	实测值/m ³ ·s ⁻¹	模拟值/m ³ ·s ⁻¹	模拟相对误差
3:01	0.454	0.009	0.008	-11.11%
3:11	0.522	0.102	0.105	2.94%
3:21	0.593	0.146	0.172	17.81%
3:31	1.281	0.315	0.295	-6.35%
3:41	1.280	0.362	0.384	6.08%
3:51	1.280	0.386	0.406	5.18%
4:01	0.786	0.415	0.427	2.89%
4:11	1.236	0.449	0.439	-2.23%
4:31	1.246	0.401	0.385	-3.99%
4:41	1.079	0.347	0.358	3.17%
5:01	0.860	0.277	0.316	14.08%

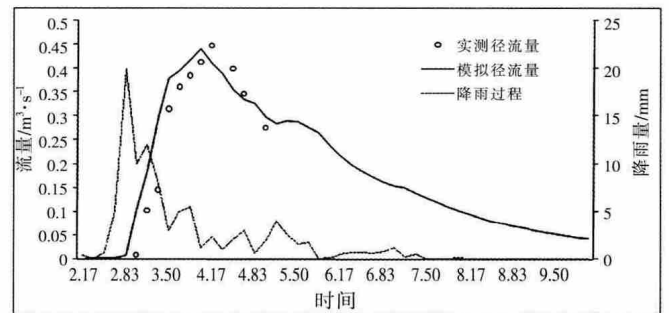


图7 流量过程实测值与模拟值比较图
Fig.7 Comparison between the observed values and simulated values of the flow process

区进行了降雨径流流量过程监测 (在流速监测值上乘以过水断面面积), 就可以与流量的模拟值进行比较, 结果如表 2 及图 7 所示。

从图 7 中可知, 由于降雨初期雨强较大, 集水区的透水性较差, 径流系数较大, 降雨形成径流过程短, 径

程如图 5 所示, 在已知降雨数据的基础上, 在汉阳桃花岛区域进行净雨计算, 对不透水区采用 linsley 公式计算其净雨, 对透水区采用 horton 公式计算其净雨, 得到不透水区及透水区的净雨强度如图 6 所示。最后, 运用上述坡面流求解方法得到流量的模拟结果, 并在该地

流初期流量急剧增加, 在两小时内即达到了峰值。流量的峰值与降雨的峰值存在滞后时间。滞后时间的产生是因为从开始降雨到产流、然后形成汇流之间有一个滞后过程, 该过程的历时与降雨条件、流域土地利用方式以及下垫面的特征有关。另外, 从表 2 中可以看到模拟流量与实测流量之间的相对误差比较小, 其中洪峰流量相对误差为 2.23%, 平均相对误差为 6.89%, 模拟效果较好。由于资料所限, 本文模拟结果对应所有汇水区的地表入汇口总量, 没有考虑排水管网的汇流作用, 而实测流量对应于地表子集水区汇水口的排水管出口, 是经过地下排水管网的汇流再排到出口的, 因此实测流量稍滞后于模拟流量。

4 结语

将坡面流运动波引入城市地表汇流过程,按照全面汇流或者部分汇流分别求解运动波方程,并将非均匀雨强条件下的净雨过程分割,通过线性叠加把用在均匀雨强条件下的坡面流运用到非均匀雨强条件下,得到汇流出口处的流量。通过实例对该方法进行模拟及验证,通过分析比较发现模拟结果与实测结果吻合较好,该方法得出的模拟结果基本合理,可在城市降雨径流计算等方面作为参考。在今后研究中,可收集更加丰富的城市雨洪资料,对曼宁糙率的值进行率定,使该方法的精度进一步提高。

参考文献:

- [1] 胡伟贤,何文华,黄国如,等. 城市雨洪模拟技术研究进展[J]. 水科学进展, 2010,21(1):137-144. (HU Weixian, HE Wenhua, HUANG Guoru, FENG Jie. Review of urban storm water simulation techniques [J]. Advances in Water Science, 2010,21(1):137-144. (in Chinese))
- [2] 朱元,金光炎. 城市水文学[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1991. (ZHU Yuan, JIN Guangyan. Urban Hydrology [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1991. (in Chinese))
- [3] Ponce, V. Diffusion Wave modelling of catchment dynamics [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1986,112(8):716-727.
- [4] Mizumura, K. and Ito, Y. Influence of moving rainstorms on overland flow of an open book type using kinematic wave [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011,16(11):926-934.
- [5] Pierfranco Costabile, Carmelina Costanzo, Francesco Macchione. A storm event watershed model for surface runoff based on 2D fully dynamic wave equations [J]. Hydrological Processes, 2013,27(4):554-569.
- [6] 詹道江,叶守泽. 工程水文学 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000. (ZHAN Daojiang, YE Shouze. Engineering Hydrology [M]. Beijing: China Water Power Press, 2000. (in Chinese))
- [7] 刘金星,邵卫云. 城市区域雨水地面径流模拟方法探讨 [J]. 水利学报, 2006,2(37):184-188. (LIU Jinxing, SHAO Weiyun. Simulation of rainfall runoff in urban districts [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006,2(37):184-188. (in Chinese))
- [8] Huber, W.C., Dickinson, R.E. Storm Water Management Model, Version 4, User's Manual [M]. Athens, Georgia: US Environmental Protection Agency. 1988: Report EPA/600/3-88-001a.
- [9] 肖彩. 分布式城市降雨径流面源污染模拟及预测研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005. (XIAO Cai. Simulation and Prediction Research on Distributed Urban Non-point Source Pollution of Rainfall-Runoff [D]. Wuhan: Wuhan University. (in Chinese))
- [10] 李芳英,冯建中. 城市雨洪计算[J]. 太原工业大学学报, 1991,22(1): 32-39. (LI Fangying, FENG Jianzhong. A calculation of urban storm flood [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 1991,22(1):32-39. (in Chinese))

Calculation of Kinematic Wave for Urban Surface Rainfall Runoff

ZOU Xia, LIU Jiaming, ZHANG Yanjun, YUAN Di, SONG Xingyuan

(School of Water Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: From the point of view for overland flow based on Saint-Venant equations, kinematic wave was introduced to describe the rainfall convergence process for urban surface, simultaneously, the linear superimposition was used when the theory for calculating the overland flow under the condition of even rain intensity was improved to calculate the flow process under uneven rain intensity, and the catchment was divided into several units in accordance with their properties, finally the flow process at the outlet was obtained by adding each unit's flow process. At last, the simulated results were verified using the measured data, and show a high degree of data fitting.

Key words: overland flow; kinematic wave; urban surface rainfall runoff