

山区小流域分布式单位线计算方法应用

程双虎, 胡春歧, 马存湖

(河北省水文水资源勘测局, 石家庄 050031)

摘要: 基于GIS及DEM的分布式单位线分析方法为无资料小流域洪水汇流计算提供了有用工具。将分布式单位线法用于大阁流域,对5场洪水的模拟结果表明,洪峰相对误差均小于10%,洪量误差均小于20%,峰现时间误差均小于0.5h,确定性系数均在0.8以上,得到了很好的模拟结果。

关键词: 山区小流域; 分布式单位线; 洪水

中图分类号: P333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)01-0189-04

Application of the calculation method for the spatially distributed unit hydrograph in mountain watershed

CHENG Shuang hu, HU Chun qi, MA Cun hu

(Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Hebei Province, Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: The calculation method for the spatially distributed unit hydrograph based on GIS and digital elevation model is a useful tool to calculate the flood confluence in the mountain watershed. The method was applied to simulate five floods in the Dage watershed. The simulation results showed that the relative error of flood peak is less than 10%, the relative error of flood volume is less than 20%, the error of time to peak is less than 0.5 h, and the effective coefficient is greater than 0.8, which indicated that the method is applicable for flood simulation.

Key words: mountain watershed; spatially distributed unit hydrograph; flood

流域上的降雨径流必须经过流域汇流过程才能形成流域出口的流量过程。由于流域汇流的复杂性,尚不能用水力学的方法求解水流的运动过程,因此,不得不对其进行概化,将流域作为一个动力系统,流域汇流则是系统将净雨输入转变成流量过程输出^[1-5]。单位线是对流域汇流概化的一个主要途径。

概化单位线方法简明易用,且具有一定的应用精度,在水文预报及水文计算中得到了广泛的应用。但是采用出口断面的水文资料反推单位线的曲线形式,仅能反映流域水体分配沿流程的变化及一次洪水随时间变化的平均情况,而没有与流域上对汇流有影响的特性(流域形状、地形地貌特征、坡度等)直接联系起来,没有明确的产流场和传播场,因此只能停留在经验关系上^[6-11]。

考虑到降雨和下垫面特征的空间分布不均匀性,特别是局部防洪的要求,需要对预报流域离散,而离散后的计算单元是没有实测水文资料的,难以利用传统的单位线分析方法,因此必须解决无实测资料地区单位线的分析问题^[12-15]。虽然对于参数单位线法和综合单位线来说,也可以利用流域特征分析出单位线,但只能得到单位线的特征值,还必须对

单位线的形状进行概化才能得到完整的单位线。

分布式单位线分析方法^[16-17]直接基于流域的形状、地形地貌等特征,按照水流的真实汇流过程分析单位线,物理意义明确,可以分析出完整的单位线过程。本文拟以山区小流域为例,对分布式单位线分析方法进行应用研究。

1 分布式单位线分析方法

1.1 基本思路

流域中水质点汇流时间的概率密度分布函数等同于瞬时单位线,因此分析计算流域汇流单位线的基本思路为:首先分析计算流域(包括离散后的形状不规则的计算单元或小流域)中各栅格内径流的滞留时间,然后根据汇流路径计算每一点的径流到达流域出口的汇流时间,推求汇流时间的概率密度分布——瞬时单位线,最后转换成单位净雨的时段单位线。整个过程见图1。

1.2 流速的计算

根据以上分析,要推求流域汇流单位线,首先要确定各水质点的汇流时间,而汇流时间取决于水质点水流的汇流速度。理论上,坡地以及河道水流的汇流速度随着区域位置的

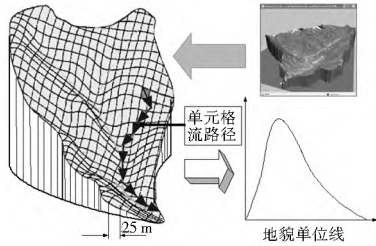


图 1 单位线推求过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the derived process of unit hydrograph

不同而改变,并且与水流下垫面的坡度有关。因此,在流域上存在着一个流速的空间分布场。由水力学可知,明渠水流速度可按曼宁(Manning)公式计算,但水质点在流域上的运动规律与明渠水流并不完全相同。水质点在流域上某处的运动速度 V 为

$$V = aS^{1/2} \quad (1)$$

式中: S 为流域上某处水流方向的流域坡度(%); a 为经验参数,主要反映植被、土壤等下垫面要素对流速的摩擦影响。

1.3 汇流时间的计算

水质点在流域(或计算单元)中的任意一点,都有一条相对较为固定的到达其出口断面的水流路径。在 DEM 中,某一网格内的径流沿坡度最大方向流向其周围相邻的网格,按照此方法可以得到该网格内的径流向其出口断面的汇集路径。根据各网格的尺寸及网格中的水流速度,可采用公式(2)计算出每一网格中径流的滞留时间 $\Delta\tau$ 。

$$\Delta\tau = L/V \text{ 或 } \Delta\tau = \sqrt{2}L/V \quad (2)$$

式中: L 为网格的边长转换为实际距离的长度(m); V 为流速(m/s)。

沿着水流汇流路径,各网格到达流域出口断面的汇流时间,可采用公式(3)求出。

$$\tau = \sum_{i=1}^m \Delta\tau_i \quad (3)$$

式中: m 为径流路径上网格的数量。

1.4 单位线计算

将汇流时间作为随机变量,进行分析统计可得到汇流时间的概率密度分布——瞬时单位线及时段单位线。

2 单位线的参数分析

2.1 参数 a 的物理意义分析

经验参数 a 是一个具有速度量纲的参数,综合反映流域下垫面(植被等)对径流的摩擦影响,其涵义为当坡度等于 1 时,水流沿坡面的流动速度。坡度越小,摩擦阻力越大, a 的取值就越小,反之越大。

2.2 参数 a 的确定

由于流域下垫面影响难以定量分析,参数 a 需要率定。一般情况下应选择有水文资料、植被条件相对均匀的流域,采用流域出口断面的实测资料对参数 a 进行率定,具体方法为:

给定一个初始 a 值,分析计算出每一个计算单元的单位线;利用水文模拟系统和各计算单元的单位线计算已知降雨在流域出口处形成的流量过程;根据计算流量过程与实测流

量过程间的拟合情况以及 a 值对计算结果的影响规律,调整参数 a 数值;重复以上步骤,直至计算流量过程与实测流量过程拟合满意为止,此时的 a 值即为该流域参数 a 的最终取值。

2.3 参数 a 对单位线的影响

由流速公式知,当 a 值增大时,地面摩擦阻力减小,流速增大,汇流时间快,单位线底宽减少,峰值增加,峰现时间提前。反之,单位线峰值减小,峰现时间滞后,汇流时间延长。

3 应用实例

3.1 流域概况

本研究以大阁流域为研究流域。大阁水文站位于东经 $116^{\circ}41'$,北纬 $41^{\circ}11'$,处于河北境内潮河上游丰宁满族自治县大阁镇四道河村,集水面积为 $1\,858\text{ km}^2$ 。大阁水文站以上流域地质构造体系属天山—阴山纬向构造的东延部分,从地域地质特征分析,称冀北纬向隆起带,地层岩性以侵入岩和喷出岩为主,土壤以细沙、壤土、块石为主,森林植被率好,水土流失不明显。流域多年平均降水量 488.4 mm ,降水主要集中在汛期(6月—9月),占年降水量 83% 。流域 DEM 见图 2,共划分为 258 个小流域计算单元,见图 3。

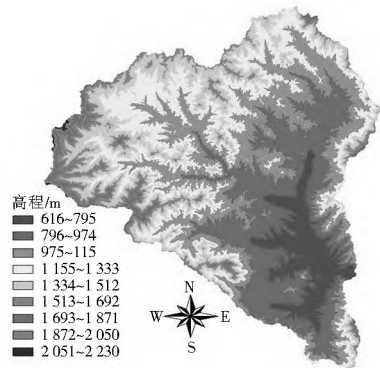


图 2 大阁以上流域 DEM

Fig. 2 DEM of the Dage Basin

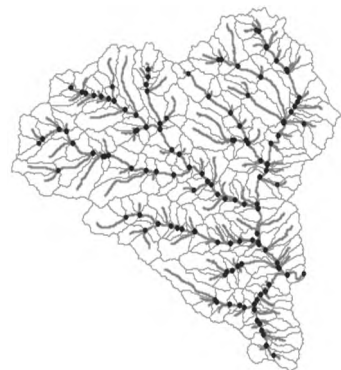


图 3 大阁以上流域小流域划分

Fig. 3 Division of small watersheds in the Dage Basin

3.2 模拟计算及结果分析

产流计算及地下汇流计算部分采用河北雨洪模型^[6],坡面汇流采用分布式单位线法,河道演进采用马斯京根模型。对 860907、930811、940723、960723 及 980706 五场较大洪水过程进行模拟计算,模拟结果见表 1 及图 4。

表1 模拟结果统计

Tab.1 Statistics of simulation results

| 洪号 | 洪峰流量 误差(%) | 洪量误差 (%) | 峰现时间 误差/h | 确定性 系数 |
|--------|---------------|-------------|--------------|-----------|
| 860907 | 11.28 | -1.5 | -0.1 | 0.93 |
| 930811 | 7.58 | 18.22 | -0.2 | 0.89 |
| 940723 | 9.09 | 8.67 | -0.3 | 0.86 |
| 960723 | -0.52 | -0.09 | 0.3 | 0.96 |
| 980706 | -8.49 | 17.61 | -0.3 | 0.92 |

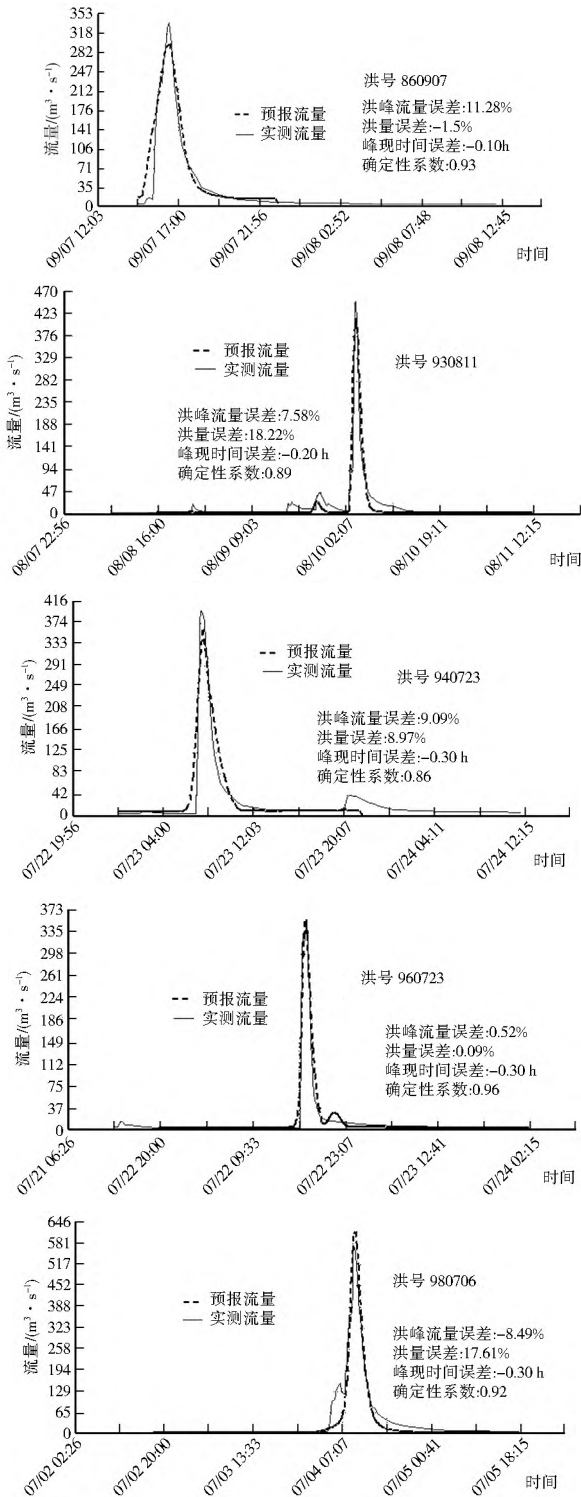


图4 大阁流域洪水模拟成果

Fig. 4 Flood simulation results in the Dage Basin

可以看出,5场洪水的洪峰流量相对误差均小于10%,洪量误差均小于20%,峰现时间误差均小于0.5h,确定性系数均在0.8以上,可见,模拟效果非常理想。

5 结论

(1) 基于GIS及DEM的分布式单位线分析方法,为无资料山丘区小流域以及以自然小流域为计算单元的分散式水文模型提供了极为有用的汇流曲线分析方法,解决了无资料流域的汇流计算问题。

(2) 对河北境内大阁流域5场较大洪水的模拟结果表明:洪峰流量相对误差均小于10%,洪量误差均小于20%,峰现时间误差均小于0.5h,确定性系数均在0.8以上,可以看出,采用分布式单位线可以得到很好的模拟结果。

参考文献(References):

- [1] 文康,金管生.地表径流过程的数学模型[M].北京:水利电力出版社,1990.(WEN Kang, JIN Guann sheng, Surface runoff process mathematical model [M]. Beijing: Water Conservancy and Electric Power Press, 1990. (in Chinese))
- [2] 孔凡哲,王小赞.一个基于DEM的半分布式水文模型[J].武汉大学学报:工学版,2009,42(5):596-600.(KONG Fan zhe, WANG Xiaozan. A DEM based semidistributed hydrological model [J]. Journal of Wuhan University: Engineering and Technology Edition, 2009, 42(5): 596-600. (in Chinese))
- [3] 水利部水文局,长江水利委员会水文局.水文情报预报技术手册[K].北京:中国水利水电出版社,2010:423-428.(Bureau of Hydrology, Hydrology Bureau of Changjiang Water Resources Commission. The hydrological information and forecasting technology handbook [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2010: 423-428. (in Chinese))
- [4] 胡春歧,张登杰,胡军波.半分布式河北雨洪模型在黄壁庄以上流域的应用[A].中国水利学会2006学术年会论文集[C].北京:中国水利水电出版社,2006.(HU Chunqi, ZHANG Dengjie, HU Junbo. Application of semi distributed Hebei stormwater model of watershed in Huangbizhuang basin [A]. Papers Collection of Beijing 2006 Annual Academic Meeting of China Institute of water resources [C]. China Water Conservancy and Hydropower Press, 2006. (in Chinese))
- [5] 韩家田.河北模型在岩溶地区洪水预报中的应用[J].水文,2002,22(3):28-30.(HAN Jiartian. Application of Hebei hydrological model in flood forecasting for karst regions [J]. Hydrology, 2002, 22(3): 28-30. (in Chinese))
- [6] 冯秀英.河北水文模型在水资源评价中的应用[J].河北水利水电技术,2003(1):22-28.(FENG Xiuying. Application of Hebei hydrological model in water resources assessment [J]. Hebei Water Resources and Hydropower Engineering, 2003(1): 22-28. (in Chinese))
- [7] 芮孝芳.地貌瞬时单位线理论的若干评论[J].水科学进展,1991,2(3):194-200.(RUI Xiaofang. Some comments on geomorphologic instantaneous unit hydrograph [J]. Advances in Water Science, 1991, 2(3): 194-200. (in Chinese))
- [8] 李硕,曾志远,张运生.数字地形分析技术在分布式水文模型中的应用[J].地球科学进展,2002,17(5):769-775.(LI Shuo, CENG Zhiyuan, ZHANG Yusheng. Digital terrain analysis

- application of intertechnology in distributed hydrological model [J]. *Advances of Earth Science*, 2002, 17(5): 769-775.
- [9] 余新晓, 赵玉涛, 张志强. 基于地形指数的 Topmodel 研究进展与热点跟踪 [J]. *北京林业大学学报*, 2002, 24(4): 117-121. (YU Xin xiao, ZHAO Yu tao, ZHANG Zhi qiang. Progress and focus tracking of Topmodel research based on topographic index [J]. *Beijing Forestry University Journal*, 2002, 24(4): 117-121. (in Chinese))
- [10] 芮孝芳. 利用地形地貌资料确定 Nash 模型参数的研究 [J]. *水文*, 1999(3): 6-10. (RUI Xiao fang. Research on using topography data to determine the parameters of Nash model [J]. *Hydrology*, 1999(3): 6-10. (in Chinese))
- [11] 吴现兵, 程伍群, 孟霄, 等. 河北省中小河流防洪现状及减灾对策分析 [J]. *南水北调与水利科技*, 2013, 12(6): 35-38. (WU Xian bing, CHENG Wu, MENG Xiao, et al. The current situation of small and medium sized River flood in Hebei province and the Countermeasures of disaster reduction analysis [J]. *South to North Water Diversion and Water Science & Technology*, 2013, 12(6): 35-38. (in Chinese))
- [12] Turcotte R, Fortin J P, Rousseau A N, et al. Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network [J]. *J. Hydro.* 2001, 240: 225-242.
- [13] Saghalian B, Yulien P Y, Rajaie H. Runoff hydrograph simulation based on time variable isochron technique [J]. *J. Hydrol.* 2002, 261: 193-203.
- [14] Fortin J P, Turcott R, Massicotte S, et al. A distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data I: Description of model [J]. *J. Hydrologic Eng.*, 2001, 6(2): 94-99.
- [15] Ambrose B, Beven K J, Freer J. Towards a generalization of the TOPMODEL concepts: topographic indices of hydrological similarity [J]. *Water Resour. Res.*, 1996, 32: 2135-2145.
- [16] Beven K, Freer J. A dynamic TOPMODEL [J]. *Hydrol. Process.*, 2001, 15: 1993-2011.

(上接第 157 页)

- [2] 沈杰, 杨大庆, 邱卫国. 上海市水资源利用效率及其驱动因子分析 [J]. *人民长江*, 2014, 45(9): 48-50, 54. (SHEN Jie, YANG Da qing, QIU Wei guo. Analysis on water resources utilization efficiency and driving factors of Shanghai City [J]. *Yangtze River*, 2014, 45(9): 48-50, 54. (in Chinese))
- [3] 李保国, 黄峰. 1998 年-2007 年中国农业用水分析 [J]. *水科学进展*, 2010, 21(4): 575-583. (LI Bao guo, HUANG Feng. Trends in China's agricultural water use during recent decade using the green and blue water approach [J]. *Advances in Water Sciences*, 2010, 21(4): 575-583. (in Chinese))
- [4] 翟兴涛, 张庆华, 蒋磊, 等. 山东省南四湖流域 2001-2010 年用水趋势与影响因素分析 [J]. *水利经济*, 2013, 31(4): 59-61, 72. (ZHAI Xing tao, ZHANG Qing hua, JIANG Li, et al. Trend of water consumption of Nansi Lake Basin in Shandong Province from 2001 to 2010 and its influencing factors [J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2013, 31(4): 59-61, 72. (in Chinese))
- [5] 葛学伟, 刘志强, 刘洪海, 等. 天津地区住宅建筑用水规律的研究 [J]. *给水排水*, 2012, 38(9): 149-152. (GE Xue wei, LIU Zhi qiang, LIU Hong hai, et al. Study on the water use of residential building in Tianjin [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2012, 38(9): 149-152. (in Chinese))
- [6] 张瑞她, 张庆华, 蒋磊, 等. 山东省 2001 年-2010 年用水趋势与影响因素分析 [J]. *南水北调与水利科技*, 2014, 12(2): 37-40. (ZHANG Rui ta, ZHANG Qing hua, JIANG Lei, et al. Analysis of water consumption trend and its impact factors from 2001 to 2010 in Shandong Province [J]. *South to North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2014, 12(2): 37-40. (in Chinese))
- [7] 苏龙强. 福建省近 10 年用水结构变化及驱动力分析 [J]. 2010, 21(1): 104-104. (SU Long qiang. Analysis of water consumed structure change and its driving forces last 10 years in Fujian Province [J]. 2010, 21(1): 104-104. (in Chinese))
- [8] 席锐超, 李继清, 王勇. 天津市水资源承载力的变化及驱动力研究 [J]. *水力发电*, 2011, 37(10): 22-24, 27. (XI Rui chao, LI Ji qing, WANG Yong. Carrying Capacity Change and Driving Forces Analysis for Water Resources in Tianjin [J]. *Water Power*, 2011, 37(10): 22-24, 27. (in Chinese))
- [9] 刘伟忠. 天津市水价改革探讨 [J]. *水利经济*, 2010, 28(3): 36-38, 76. (LIU Wei zhong. Reform of water price in Tianjin City [J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2010, 28(3): 36-38, 76. (in Chinese))
- [10] 宋君, 李克勋, 穆东雪, 等. 天津市工业用水现状及节水分析 [J]. *水资源与水工程学报*, 2010, 21(3): 148-151. (SONG Jun, LI Ke xun, MU Dong xue, et al. Analysis on present condition of industrial water consumption and water saving in Tianjin [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2010, 21(3): 148-151. (in Chinese))