

流域洪水模拟的分布式时变汇流方法及应用

谢华¹, 都金康², 胡裕军¹, 吴从晖³, 严为洁²

(1. 广州军区 75719 部队三队, 湖北 武汉 430074; 2. 南京大学 城市与资源系, 江苏 南京 210093;
3. 南京陆军指挥学院作战实验中心, 江苏 南京 210045)

摘要: 在考虑流域降雨时空变化和流域地形对流域产、汇流影响的基础上, 提出了一种流域洪水模拟的新方法——分布式时变汇流方法。该方法在分布式产、汇流模拟过程中, 增加了时变因子, 克服了传统方法中忽略降雨在时间上变化的影响。此外, 该方法还充分利用了 GIS 和遥感技术, 使得模型中的大多数参数均可从 DEM、土壤类型图或遥感影像中获取, 只需要率定少数敏感参数。尽管模型结构简单, 却能反映降雨径流过程的物理机制。因此, 它可用于无资料地区的水文预报, 便于应用与推广。将该方法用于浙江省较口水库流域的洪水模拟, 结果显示该模型效率高, 模拟的流量曲线与实测曲线吻合较好, 并且模拟结果不受降雨强度大小的限制。对双峰型或多峰型洪水, 该方法不仅能很好地模拟出各峰的形状, 而且主次洪峰分明。

关键词: 分布式汇流; 地理信息系统(GIS); 遥感(RS); 时变因子

文献标识码: B

文章编号: 1000—288X(2006)05—0065—06

中图分类号: P333, TP79

A Method for Spatially Distributed Time-variable Routing of Simulated Watershed Flood

XIE Hua¹, DOU Jin-kang², HU Yu-jun¹, WU Cong-hui³, YAN Wei-jie²

(1. Guangzhou Troop 75719, Wuhan 430074, Hubei Province, China; 2. Department of Urban and Resources Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu Province, China;
3. Nanjing Army Command College Campaign Experiment Center, Nanjing 210045, Jiangsu Province, China)

Abstract: Through considering the effects of spatiotemporal transformations as well as watershed topography on runoff routing, this paper reports the development and implementation of the new method named spatially distributed time-variable routing method. The method incorporates time-variable factors into distributed yielding and routing simulations. In this way, it can overcome the shortcomings of ignoring the changes of excess rainfall over time in the traditional methods. In addition, with the support of the geographical information system (GIS) and remote sensing(RS), most of the parameters in the model can be obtained by means of DEM, soil maps and/or satellite images. Among the others, only some sensitive parameters need to be determined through calibration. Although the model seems to be simple, it can reflect the physical mechanism of rainfall - runoff process. In consequence, the method can predict the runoff hydrograph in the ungauged watersheds, so that it can be extended to other areas in the future. In the combination of this method with GIS technique, stream responses to runoff events in the Jiaokou Reservoir Watershed in Zhejiang Province were predicted. Results showed that the model efficiency was high, and the simulations were approximately consistent with the observations for the shapes of runoff hydrographs when the factor for the changes of excess rainfall over time was considered in the model. Most importantly, the floods can be identified by the shapes of each peak including the major and minor ones of all floods, especially of the double-peaks or multi-peaks flood, regardless of the rainfall intensity.

Keywords: spatially distributed routing; geographical information system (GIS); remote sensing (RS); time-variable factor

汇流方法可以分为集总式和分布式 2 类。在集总式汇流计算中, 只在沿水道的一个位置上把水流表

达为时间的函数; 而在分布式汇流演算中, 可以沿水道的若干个断面处同时把水流表达为时间的函数, 径

流量、流速和水深随时间和空间的变化而变化。因此,比较精确的算法是将其描述为分布过程^[1]。

在分布式汇流方法中,当时间步长较大(如年、月)时,汇流过程可以忽略不计;而当时间步长较小(如日、小时)时,汇流过程对于流域出口断面的流量,尤其是流量的峰值则显得非常重要。如果需要考虑汇流过程,则它的计算模型分为 2 种。一种是以栅格为单元建立流域的汇流网络。另一种是先按栅格单元建立汇流带,然后再按汇流带进行汇流。与后者相比,前者汇流节点较多,只有很强物理机制的汇流模型才能准确地反映流域的汇流过程,并且计算的过程复杂而量大,汇流演算模型比较繁琐。因此,本文选用前一种模型作为研究基础。通常,分布式汇流方法只关心净雨在空间上的分布情况,忽视了净雨在时间上的变化,净雨强度取其整个降雨时段的平均值^[2]。为了改善洪水模拟精度,本文提出了一种新的方法——空间分布式时变汇流方法,即将时变因子加入分布式汇流计算。具体地,该方法首先计算了各个时期的净雨深,得到时变的净雨强度。然后再根据时变净雨强度,计算出各个时段的汇流量和汇流速度。同时,用流域的 DEM 确定每个栅格单元的流向,得到汇流路径。最终,用汇流路径、时变汇流量、时变汇流速度以及时变净雨强度,计算出各个栅格单元到达流域出口的总汇流时间。于是,出口的直接径流就是在各个汇流时间段内到达出口的所有栅格单元的体积流之和。总之,分布式时变汇流方法就是考虑流域降雨时空变化和流域地形、河网特征对流域汇流的影响,利用地表遥感覆盖信息和 GIS 做支持,以栅格为单元建立流域汇流网络,逐个栅格进行汇流,进行流域的洪水过程模拟的一种分布式汇流方法。

1 空间分布式时变汇流方法

1.1 空间分布式产流模型

空间分布式汇流方法采用美国水土保持局研制的 SCS(Soil Conservation Service)模型,进行空间分布的净雨计算^[3]。其数学表达式为:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} \quad (P > 0.2S) \quad (1)$$

式中: Q ——不同空间位置上一次洪水所产生的净雨深; P ——总的降雨深,且 $P \geq Q$ 。将雨量站获取的降雨数据进行插值,可以得到不同位置上的 P 值; S ——流域最大蓄水容量,它的计算公式为 $S = 25400/C_N - 254$; C_N ——是反映流域下垫面特征的特征参数,其取值范围为 1 ~ 100。该参数在不同位置的数值可以由流域的水文土壤类型(HSG)、地表覆盖、耕

作方式、前期土壤湿度条件(AMC)计算而得。而当 $P \leq 0.2S$ 时,降雨全部被吸收,没有形成地表径流,净雨深为 0。

净雨强度的数学表达式如下:

$$i_c = Q/t \quad (2)$$

式中: i_c ——整个降雨时段 t 内的净雨强度; Q ——根据式(1)得到的净雨深。

1.2 模型的改进

流域洪水模拟的分布式时变汇流方法,在考虑净雨在空间上的分布的同时充分考虑净雨在时间上的变化,分别计算各个不同时间段的净雨,得到随时段变化的净雨强度,从而各个时段的汇流量、汇流速度也都是时变的。对第 i 个时段,降雨量取前 i 个时段的降雨量之和,用 SCS-CN 方法求得前 i 个时段对应的净雨深 Q_i ; 对第 $(i-1)$ 个时段,降雨量取前 $(i-1)$ 个时段降雨量之和,求得前 $(i-1)$ 个时段对应的净雨深 $Q_{e(i-1)}$,则第 i 个时段的净雨深 $Q_{e(i)}$ 可表示为:

$$Q_{e(i)} = Q_{(i)} - Q_{(i-1)} \quad (3)$$

$$i_c = Q_{e(i)}/i * \Delta T - (i-1) * \Delta T = Q_{e(i)}/\Delta T \quad (4)$$

1.3 分布式时段汇流计算

分时段计算在各个降雨时段内流域各格网单元到达流域出口的汇流时间和汇流量;从流域出口沿汇流路径方向累加各个汇流时间得到流域各单元的累积汇流时间 $\sum t_i$ 和累积汇流量;重分类 $\sum t_i$ 为指定时间间隔 T ; 出口的直接径流就是在各个以 T 为间隔的汇流时间段内到达流域出口的所有格网单元的汇流量之和。图 1 为流域洪水模拟的分布式时变汇流方法的流程图。

对流域的流水累积量设置阈值进行单元划分,它分为 2 种类型,其一是河道单元,其二是山坡单元。划分原则是,任何上游入流的栅格单元数目大于或等于阈值的定义为河道单元,小于阈值的定义为山坡单元。为了计算各个栅格单元的汇流时间,必须要分别计算这 2 种单元的流速。河道单元流速公式选用曼宁方程和连续方程来计算,其具体公式如下^[4]:

$$v_c = S^{0.3} Q^{0.4} / n^{0.6} B^{0.4} \quad (5)$$

式中: S ——坡度,它可以从填注处理后的 DEM 上提取; Q ——汇流量,一维河道流速没考虑入流。 $Q = i_c * A$, 其中的 i_c 是时变净雨强度,该值的计算方法参考上节的叙述, A 为每个格网单元的面积。 n ——土地覆被的糙率系数,该值最初由 Brater 和 King 定义, Montes 对其加以完善^[5-6]。 B 是河道有效宽度。

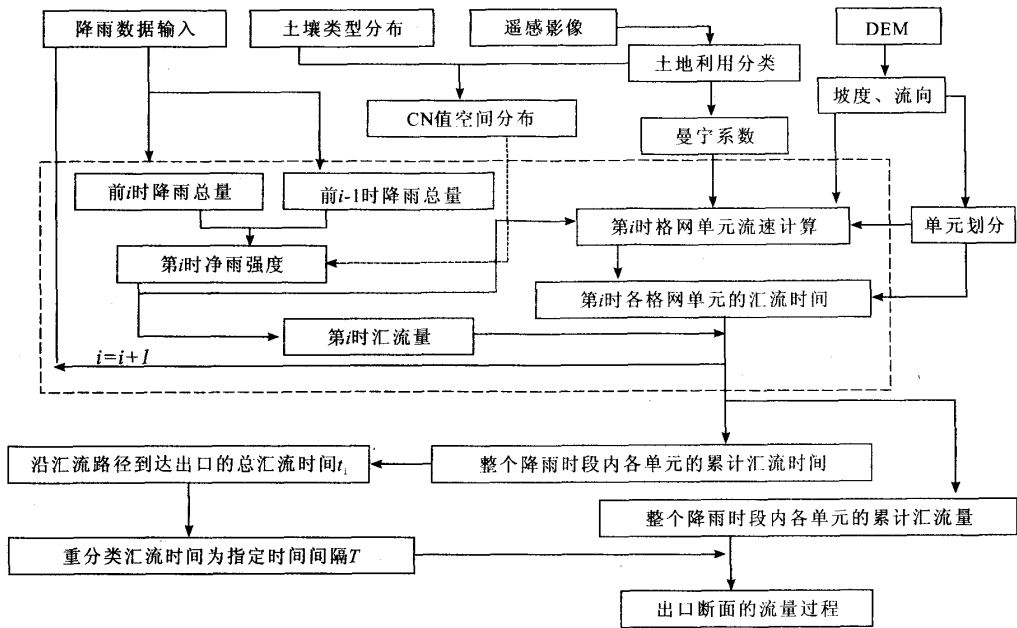


图 1 流域洪水模拟的分布式时变汇流方法流程图

河道单元汇流时间 t_c 的计算公式如下:

$$t_c = L/v_c \quad (6)$$

式中: L ——该单元的汇流长度, 它可以从填洼处理后的 DEM 提取; v_c ——汇流速度, 由式(5)计算。

山坡单元的汇流时间可以用近似运动波动力方程和连续方程来估算。对平稳山坡流, 时间 t_0 用运动波方程表示为^[4,8]:

$$t_0 = L^{0.6} n^{0.6} / t_c^{0.4} S^{0.3} \quad (7)$$

式中: L ——坡面单元汇流长度; S ——坡度; n ——曼宁糙率系数, 计算同上。前 2 个参数值来自于填洼处理后的 DEM。

2 流域洪水模拟的分布式时变汇流方法应用

2.1 流域概况

皎口水库流域位于浙江省鄞县境内, 属于奉化江支流, 流域控制面积为 259 km²。该流域属亚热带季风气候区, 气候温和湿润, 四季分明。主要覆被类型为森林、农田、水系和居民地。

全年平均气温 16.3℃。最高气温 39.5℃, 最低为 -11.1°, 月平均气温以 7 月最高, 1 月最低。雨量充沛, 年平均降水量在 2000 mm 以上, 年均径流量达 3.12 × 10⁸ m³, 雨水以夏秋热带风暴季节为最多。雨量相对集中于 3 月和 9 月间。突出的土壤类型为黏

土, 产流潜力高, 渗透率低, 水文土壤类型为 D。

此外, 流域有皎口、下牛塘和花龙庄 3 个雨量站, 1 个流量站, 其分布情况见附图 4。

2.2 数据准备

用于皎口水库流域洪水模拟的地理底图取自于 1:50 万纸质土壤数据, 1:5 万 1969 年纸质地形图, 以及 1987 年 TM 影像。降雨和流量数据为该流域 3 个观测站 1979, 1981, 1987, 1988, 1990, 1992, 2000, 2001 年的 8 场实测观测值, 时间间隔为 1 h(见表 1)。

附图 5 是皎口水库流域的 DEM, 分辨率为 50 m, 汇流计算所需的流向、流水累积量、坡度都从 DEM 中提取而来。至于在空间分布式产流模型中所使用的参数 CN 值, 本文在参考美国水土保持局的各类型 CN 值表的基础上^[8], 利用该流域的 TM 影像和水文土壤类型数据(见附图 6)来确定。附图 7 是该流域的 CN 值分布图。

2.3 参数率定

在本文中, 模型的评价指标为模型效率系数 (R^2)、水量守恒指数 (V_{CI})、峰现时间绝对误差 $|\Delta T|$ 及洪峰流量的相对误差 δP_{max} 。模型效率系数是指模型对于减小仅用均值预测的方差所显示的效率, 水量拟合指标是衡量模型水量拟合程度的重要指标, 其表达式分别为:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (8)$$

表 1 降雨和流量数据汇总

洪水场次	降雨日期	降雨 ^①			径流 ^②	
		降雨量/mm	降雨时间/h	降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	洪峰流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	峰现时间/h
1	19790823	377.70	60	6.30	827.90	42
2	19810830	458.60	96	4.80	1591.00	45
3	19870909	304.10	73	4.20	841.00	49
4	19880729	222.70	19	11.70	1483.00	15
5	19900830	386.00	43	9.00	1128.00	33
6	19920828	504.40	89	5.70	1480.50	80
7	20000913	262.80	53	5.00	692.50	30
8	20010623	153.60	85	1.80	249.40	29
平均值		333.70	65	5.20	1036.66	40

注:① 此处的径流量为各雨量站的加权平均值;② 见参考文献[3,7],表中的流量数据为已经分割基流的实测值。

$$VCI = \frac{\sum_{i=1}^N P_i / \sum_{i=1}^N Q_i}{\bar{Q}} \quad (9)$$

式中: \bar{Q} ——平均流量; Q_i, P_i ——实测和估算流量。显然 R^2 越大,效率越好; V_{CI} 愈接近 1,模型的拟合程度愈高。

在用本文提出的方法模拟了一场 1979 年单峰型洪水,以及另一场 2001 年双峰型洪水后发现,模型对河网有效宽度的取值相当敏感,所以需要率定。另外,前期土壤湿度条件对计算结果的影响也很大,但由于该流域缺少前期的降雨数据,因此只能通过水量的拟合指标分析确定。最终模型的参数选定河网有效宽度为 0.2 m,前期土壤湿度条件为 AMC—II。

3 结果和讨论

将率定的参数和前期的土壤湿度条件用于时变汇流方法,可以得到皎口流域的 6 场洪水模拟值。图

2 是这些洪水模拟值与实测值的比较图。图 2 显示,只有洪号 92828 为双峰洪水,并且它的实测曲线与模拟曲线几乎重合(图 2e)。其余均为单峰洪水,其中 88729 号洪水的模拟曲线与实测曲线错位较大。

为了更好地分析模拟结果,除了图 2 之外,本文还列出了洪水的模拟评价指标值(表 2)。从表 2 中获悉,所有场次的模型效率系数均超过 0.85,均值达 0.92。其中,0.90 以上的有 4 场洪水,占总模拟场次的 2/3。

具体而言,90830 号洪水的模拟效果最好,达 0.97;而 88729 号洪水的模拟效果最差,只有 0.87。两者间相差 10%。尽管 90830 号洪水的模型效率最高,但从模拟的另一个评价指标——峰现时间来看,其绝对误差却最大,达 4 h。相比之下,尽管 88729 号洪水的模拟效果不佳,但它的模拟值与实测值同时到达洪峰,峰现时间为 0。

表 2 分布式时变汇流方法模拟的 6 场洪水径流的评价指标值

场次	洪号	实测值		分布式时变汇流方法					
		洪峰流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	峰现时间/ h	洪峰流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	峰现时 间/h	$ \Delta T /h$	δP_{\max}	R^2 后	V_{CI}
2	81830	1591	45	1196.5	47	1	-0.25	0.93	0.92
3	87909	841	49	854.9	51	2	0.02	0.94	1.15
4	88729	1483	15	1710.6	15	0	0.15	0.87	1.10
5	90830	1128	33	1189.4	29	4	0.05	0.97	1.08
6	92828	1480.5	80	1542.2	82	2	0.04	0.88	1.08
7	20913	692.5	30	624.7	31	1	-0.10	0.93	0.86
平均		1202.7	42	1186.4	43	2	-0.02	0.92	1.03

至于 88729 号洪水的模拟效果不理想的原因,一方面是因为此次洪水实测数据的异常,实测值在第 13 时段内,流量从 4.02 m³/s 急剧上升到 912 m³/s(见图 2)。另一方面是因为降雨时间较短(见表 1),

而实测的时间间隔相比较长,达到 1 h,无法反映短时间内降雨的变化过程。假如降雨的实测数据更为详实,则模拟的结果可能会更理想一些。另外,在这 6 场洪水模拟中,惟有 92828 号洪水是双峰型洪水(见

图 2e)。虽然其实测曲线与模拟曲线几乎重合,但它的模拟效率却不高,只有 0.88,仅高于 88729 号洪

水。通常,双峰型洪水的模拟效果相对要弱一些。可能是因为次洪峰的峰现时间滞后所造成的。

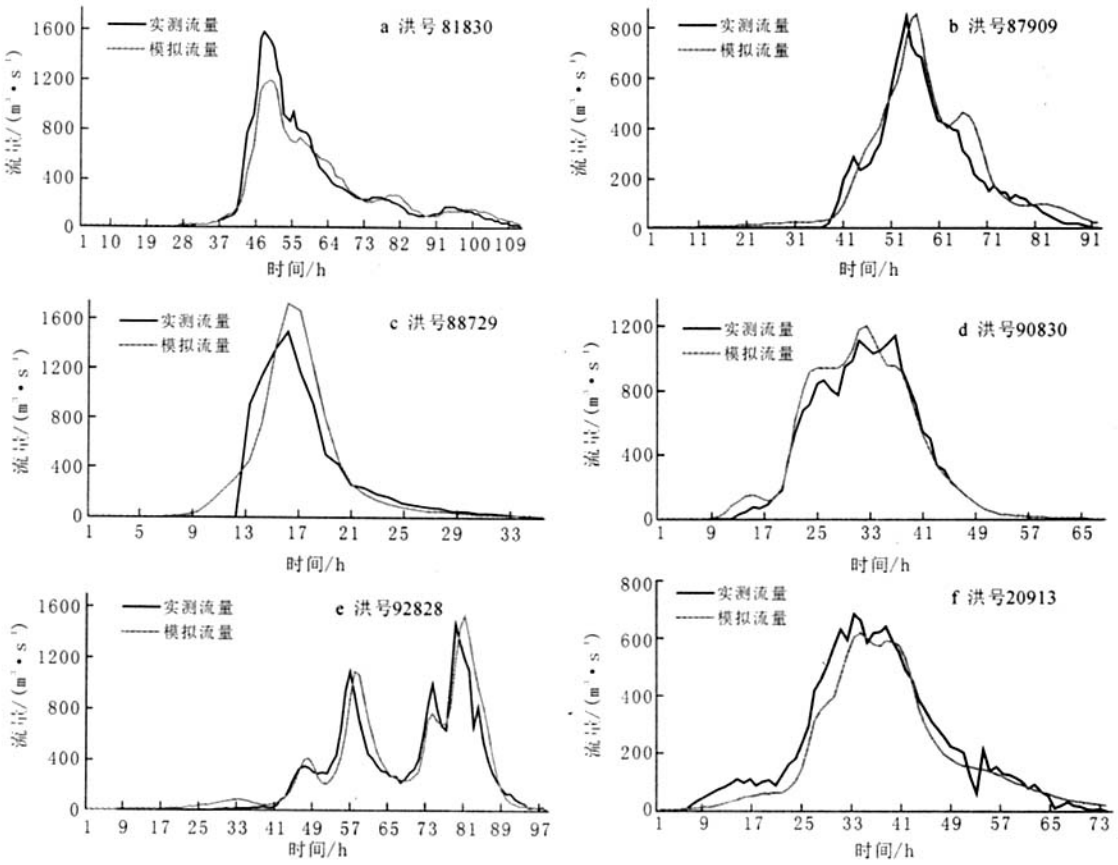


图 2 分布式时变汇流方法的模拟和实测流量过程线

值得一提的是,还有 3 场洪水,洪号分别是 87909,90830,以及 20913。尽管它们是单峰型洪水,但实测曲线却有几个微小的次峰。在洪水模拟过程中,本文所提出的分布式时变汇流方法很敏锐地捕捉到这些信息。详见分布式时变汇流方法的模拟和实测流量过程线(图 2)。

上述模拟的效率均大于 0.93,且洪峰流量相对误差和峰现时间误差都不大。这说明该方法不仅能很好地模拟出主峰的形状,而且还能得到各次峰的形状,且主次洪峰分明。

为了更好地观察降雨强度与模型效率系数间的关系,将每场的降雨强度与对应的效率系数展示于图 3 和附图 6。图形显示,随着降雨强度的增大,效率系数没有明显的增大或减小的趋势,效率系数最大值出现在雨强为 9 mm/h 时。这说明本文演绎的方法不受降雨强度的限制。

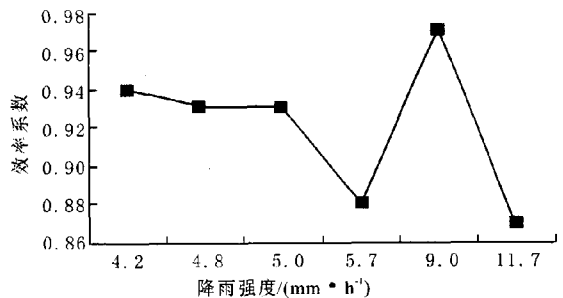


图 3 不同降雨强度下的效率系数

4 结 论

本文将时变因子加入分布式汇流计算,提出了空间分布式时变汇流方法,并在浙江省皎口水库流域进行了应用检验,模拟结果比较令人满意。综上所述,该方法将时变因子分别加入到分布式产、汇流模拟过

程中,改进了分布式汇流方法,克服了传统分布式汇流模型中忽略净雨在时间上的变化过程的做法(净雨强度值取其整个降雨时段降雨量的平均值),充分考虑了降雨在时间尺度上的变化对模拟结果的影响。此外,此法还受降雨强度大小的限制,模拟的流量曲线与实测曲线吻合较好。更重要的是,该方法能很好地模拟出各峰的形状,且主次洪峰分明。在模拟曲线形状方面,此方法有其独到之处。

除上述提及的优点外,尽管该方法的模型结构简单,但却能反映降雨径流过程的物理机制。在模拟过程中,只需要简单的地形数据、土地覆被和降雨数据作为输入就可以产生出口流量过程线。而模型的大多数参数均可以通过 GIS 和遥感手段获取,只有少数敏感参数需要率定而得。因此,该方法可用于无资料地区的水文预报,便于推广和应用。

目前,该方法的关注对象主要是次降雨径流过程,没有考虑汇流计算中的蒸发因素。所以,以后可以增加蒸发项,使模型拓展到长期的水文过程模拟。再者,在汇流计算时,没有考虑格网单元间汇流的相互影响。考虑这些因素也许会提高本方法的模拟精度。当然,该模型只是在小流域进行了验证,还需在实际流域进行检验和改进,使其适用于不同空间尺度的洪水径流模拟。

[参 考 文 献]

- [1] 王纲胜,夏军,牛存稳. 分布式水文模拟汇流方法及应用[J]. 地理研究, 2004, 23(2): 175.
- [2] Assefa M Melesse, Wendy D Graham. Storm runoff prediction based on a spatially distributed travel time method utilizing remote sensing and GIS[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2004, 40(4): 863—879.
- [3] 袁作新. 流域水文模型[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990. 76—87.
- [4] Muzik I. GIS Derived Distributed Unit Hydrograph, A New Tool for Flood Modeling[M]. In: Developments in Computer Aided Design and Modeling for Civil Engineering, B. H. V. Topping(Editor). Civil-Comp Press, Edinburgh, United Kingdom, 1995. 243—247.
- [5] Brater E F, King H W. Handbook of Hydraulics for the Solution of Hydraulic Engineering Problems[M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1976.
- [6] Montes S. Hydraulics of Open Channel Flows[M]. ASCE Press, Reston, VA, 1998. 697.
- [7] Singh V P. Rainfall-runoff relationship. Proceeding of the International Symposium of Rainfall-Runoff Modeling [M]. Mississippi, U. S. A, Water Resources Publications, 1982.
- [8] Chow V T. Applied Hydrology[M]. New York: McGRAW-Hill Book Co, Inc, 1988.

欢迎订阅 2007 年《麦类作物学报》

《麦类作物学报》是由教育部主管,西北农林科技大学和国家小麦工程技术研究中心联合主办的专业性学术期刊,也是全国惟一的一份麦类作物专刊。主要刊载麦类作物(小麦、大麦、燕麦、黑麦等)遗传育种、生理生化、栽培管理、食品加工、产品贸易等方面有创见性的学术论文,领先水平的科研成果、学术报告,有新意的文献综述以及学术动态等。此外,本刊还将继续开办“著名专家介绍”以及“新成果、新品种、新产品介绍”等宣传性专栏,并继续以优惠价格刊登各类广告。读者对象为国内外农业科技人员、农业院校师生及高级农业技术推广和管理人员。

本刊为“农业科学中文核心期刊”、“中国科技核心期刊”、“中国科技精品期刊”,现已被《中国科学引文数据库》等国内外多家权威性检索系统收录。影响因子排名已连续 3 年居全国农业期刊前 10 位。

本刊为双月刊,单月中旬出版,国际标准大 16 开本,180 页码(2007 年将增至 200 页)。每册定价 10.00 元,全年 60 元,国内刊号:CN61—1359/S,国际刊号:1009—1041。全国各地邮局均可订阅,邮发代号:52—66。漏订者可直接汇款至编辑部补订。国外总发行:北京 中国国际图书贸易总公司,代号:1479Q。

热忱欢迎国内外专家随时指导和赐稿,亦欢迎各有关课题组、单位和个人出版专辑、刊登广告。

联系人 华千勇

电 话 (029)87082642

邮政编码 712100

通讯地址 陕西杨凌 渭惠路 3 号《麦类作物学报》编辑部

E-mail: mlzwx@pub. xionline. com; mlzw@chinajournal. net. cn