

汾河上游流域分布式水文模型的构建

孙西欢¹, 张柏治², 王志璋¹

(1. 太原理工大学 水利科学与工程学院, 山西 太原 030024; 2. 陕西省杨凌区政府水务局, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 根据汾河上游流域的水文特性, 采用以坡度、坡向为主要因素, 按照集水区自然分水线划分子流域的流域离散方法, 将 SCS 产、汇流模型与马斯京根法结合用于计算该地区的径流过程, 建立了适于该地区, 基于流域尺度的次降雨—径流分布式水文模型。选用该地区的典型流域——岚河流域与分布式模型耦合, 进行模拟。经实测资料与模拟结果的分析比较, 结果表明, 该模型具有一定的精度, 径流量合格率及汇流合格率分别达到 70% 和 80%, 且计算流量过程与实测流量过程吻合较好, 所建模型基本适用于该地区的降雨—径流计算。

关键词: 分布式水文模型; 汾河流域; 产流; 汇流

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2008)03-0089-04

中图分类号: S157, TV11

Distributed Hydrological Model of Watersheds in the Upper Reaches of the Fenhe River

SUN Xi-huan¹, ZHANG Bai-zhi², WANG Zhi-zhang¹

(1. Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

2. Water Resource Administrative Bureau of Yangling District, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Through the analysis of hydrological characteristics of watersheds in the upper reaches of Fenhe River, a distributed hydrological model at a catchment scale was constructed. The runoff yielding and sink flow model of SCS and the Muskingum method were firstly combined to determine discharge process in the area. Moreover, taking slope angle and slope orientation as the main indexes, a watershed was divided into sub-catchments by natural draining divide. To test accuracy of this model, the catchment of the Lanhe River in the area was chosen as a typical catchment. Results show that calculated runoff yielding and sink flow account for 70% and 80% of the observed data, respectively, and simulated discharge process is basically coincident with observed discharge process. The model is suitable to modeling runoff yielding and sink flow in the area.

Keywords: distributed hydrological model; watershed of the Fenhe River; runoff yielding; sink flow

汾河水库上游流域控制面积有 5 253.36 km², 该流域降雨的时空分布极不均匀, 且下垫面条件如土壤类型、植被形式、土地利用等存在很大差异, 各次降雨径流过程中由各部分区域所组成的洪水比例也各不相同。采用集总式模型对其进行降雨径流预报, 模拟的精度难以满足要求。分布式水文模型在结构和参数上具有空间分布的特点, 能够进行流域的径流组成分析; 可以计算流域河网中任一断面上游集水区内的径流和流量过程; 能够在流域多个点上同时进行洪水预报, 具有集总式水文模型所无法比拟的优点^[1-5]。由于水文模型是对一定时空尺度下水文原

型的一种抽象和概化, 都具有特定(某种水文尺度)的水文学机理^[6]。因此, 任何水文模型都只能适用一定的应用范围。本文根据汾河上游流域的气象、水文条件, 选择合理的时空尺度和产汇流机制, 构建面向 GIS、RS 的半分布式水文模型, 旨在为汾河上游流域的洪水预报提供依据。

汾河水库上游位于东经 111°21′—112°27′, 北纬 37°51′—38°59′之间, 流域长 126 km, 宽 93 km, 流域面积 5 253.56 km², 依其流域地貌可划分为黄土丘陵沟壑区、土石山区和河川阶地区 3 大类型区。汾河水库上游共有沟道 19 660 条, 其中 20 km 以上的沟道

收稿日期: 2005-12-01

修回日期: 2006-07-21

资助项目: 山西省科技攻关项目(051115); 山西省青年科技研究基金资助项目(20031053)

作者简介: 孙西欢(1960—), 男(汉族), 山西省临猗县人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事水土保持及节水灌溉研究。E-mail: sunxihuan@tyut.edu.cn。

21 条, 20~10 km 的沟道 49 条, 10~5 km 的沟道 162 条, 5 km 以下的沟道 19428 条。汾河上游现有岔上、静乐、上静游 3 个水文站, 其中上静游水文站位于岚河流域, 控制面积 1 146 km²。由于流域地处半干旱季风气候区, 其降水有以下 3 大特征: 年内降水变化大, 最显著的特点是冬春少而夏秋多; 大雨、暴雨多且集中, 7—9 月的平均降水量占年平均降水量的 62%; 年际降水变幅大。据 33 a 的资料统计, 严重干旱与中等干旱的出现频率分别为 6% 和 27%。可见, 汾河上游流域下垫面条件和降雨时空分布极不均匀。

1 模型的构建

流域降水径流过程包括产流和汇流两个环节, 流域汇流过程包括坡面汇流和河网汇流两个阶段。

1.1 流域的离散

采用子流域法, 按照水文相似单元对流域进行离散^[7], 即子流域是考虑地形为主要因素的水文相似单元, 每个水文相似单元有相似的坡度与坡向。具体方法为: 先对整个流域的干流以及各级支流进行识别, 然后按照支流集水区的自然分水线划分为若干个相互不嵌套的, 封闭的子流域。另外, 每个子流域再按坡向分成阴坡、阳坡 2 个子单元分别进行模拟。这样, 整个流域就成为一个以子流域为节点, 以河道为节点间连线的网络, 而且每个子流域都具有封闭性。

1.2 子流域产流计算

采用 SCS 模型进行产流计算。由于该模型是次降雨径流模型, 所以未考虑雨期蒸发量, SCS 模型的产流计算公式如下

$$\left. \begin{aligned} Q &= \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S}, P \geq 0.2S \\ Q &= 0, P < 0.2S \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: P —— 次降雨量 (mm); Q —— 径流量 (mm); S —— 流域当时的可能滞留量 (mm)。 S 值的变化幅度可以很大, 不便于取值。为解决这个问题, 引入一个无因次参数 CN, 称曲线数。

$$S = (25400 / \text{CN}) - 254 \quad (2)$$

CN 是反映降雨前流域特征的一个综合参数, 它与流域前期土壤湿润程度 (AMC)、植被、土壤类型和土地利用现状等有关。SCS 模型把前期土壤湿润程度分为 3 级: AMC I 为干旱情况, AMC II 为正常情况, AMC III 为湿润情况, 具体确定时以此次降雨前 5 d 的降雨量为依据。

1.3 子流域汇流计算

在 SCS 模型汇流计算中, 采用一条统一的无因次单位线来计算径流输出过程。单位线的净雨时段

是变化的, 故不能给出各时段的无因次单位线纵标值。因此, 在转绘此无因次单位线时必须十分准确。通过对该无因次单位线的分析得到: 单位线的底宽为峰现时间的 5 倍, 3/8 的总径流量在洪峰前产生, 退水反曲线点的出现时间约为峰现时间的 1.7 倍。如果把此无因次单位线概化为三角形, 则三角形的底长为峰现时间的 8/3 倍, 其它特征不变。

模型用下述经验公式计算单位线洪峰流量

$$q_p = 0.278AQ/t_p \quad (3)$$

式中: q_p —— 洪峰流量 (m³/s); Q —— 径流深 (mm); A —— 流域面积 (km²); t_p —— 峰现时间 (h)。

t_p 与汇流时间 t_c (h) 建立如下关系

$$t_p = 2/3t_c \quad (4)$$

而 t_c 是由滞时 L (h) 通过以下公式来求得

$$t_c = 5/3L \quad (5)$$

L 的计算公式为

$$L = \frac{l^{0.8}(S + 25.4)^{0.7}}{7069.7y^{0.5}} \quad (6)$$

式中: L —— 滞时 (即由净雨中心到洪峰出现时间的时距, h); l —— 水流长度 (m); S —— 流域的当时最大可能滞留量 (mm); y —— 流域平均坡度的百分数 (%)。

由无因次单位线转化成的时段单位线, 其单位净雨是 25.4 mm, 净雨时段 D 的大小用下式确定

$$D = 0.133t_c \quad (7)$$

根据流域条件, 由上述诸公式可求得 q_p , t_p 和 D , 用 q_p 和 t_p 可将无因次单位线转化为有因次单位线。再利用产流公式可求出每一时段 D 内的径流量 Q (mm), 与单位线相乘, 按叠加定理可得子流域出流过程。

本模型采用 SCS 模型模拟子流域的出流过程时, 对于每个流域的阴坡和阳坡分别进行汇流计算, 然后在子流域出口叠加形成整个子流域的流量过程。当每个子流域的汇流过程得出后, 按照“先合后演”的原则, 采用马斯京根法演算出整个流域的出口流量过程。“先合后演”指的是根据子流域在河网中的出流顺序, 先把河网中同一断面上的子流域出流过程叠加, 然后再演算至下一子流域的出口断面, 然后再与其叠加, 再演算, 以此类推, 直至出口。

1.4 模型中的河道演算

河道演算采用马斯京根法。马斯京根法的基本原理是以水量平衡方程代替连续性方程和以槽蓄方程代替的动量方程来描述的, 即

$$\left. \begin{aligned} \frac{dW}{dt} &= I - Q \\ W &= k[XI - (1-X)Q] \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: I —— 研究河段的上游入流量; Q —— 研究河段的下游出流量; W —— 该河段内的蓄水量; t —— 等于在相应蓄水量 W 下稳定流状态的河段传播时间; X —— 流量比重因子, 反映水面曲线的形状和河段调蓄作用的大小。

式(8)的差分解为

$$Q_{t+\Delta t} = C_0 I_{t+\Delta t} + C_1 I_t + C_2 Q_t \quad (9)$$

式中: $C_0 = \frac{-kX + 0.5\Delta t}{k - kX + 0.5\Delta t}$,

$$C_1 = \frac{kX + 0.5\Delta t}{k - kX + 0.5\Delta t}, \quad C_2 = \frac{k - kX - 0.5\Delta t}{k - kX + 0.5\Delta t}$$

1.5 模型对降雨的处理

采用移植雨量站雨量的方法, 先用流域内各雨量站对流域进行泰森多边形分割, 然后求各子流域的形心, 用子流域的形心雨量来代表子流域的雨量。求形心雨量时, 定性分析形心位置与“泰森多边形”的位置关系。如果形心靠近“泰森多边形”的一条边, 则以这条边两侧的“泰森多边形”内 2 个雨量站的雨量均值来代表此形心的雨量; 如果形心靠近“泰森多边形”的一个顶点, 则以这个顶点相邻的 3 个“泰森多边形”内雨量站的雨量均值来代表此形心的雨量; 否则用包含此形心的“泰森多边形”内雨量站的雨量来代表此形心的雨量。

2 岚河流域分布式水文过程模拟实例验证

2.1 研究区域及资料

岚河是汾河上游河段的一级支流, 在流域的出口, 有上静游水文站作为流域的控制测站。另外, 流域内较均匀地分布着坪上、岚县、普明、闫家沟、白家庄、楼子、草城、上静游 8 个雨量站。岚河流域的降雨量、降雨历时在流域内呈现出极大的空间不均匀性。岚河流域的洪水由当地暴雨形成, 洪水强度大, 流量陡涨陡落, 年际最大洪峰变化较大。

收集到的资料主要有: 岚河流域 1: 50 000 的地形图, 岚河流域的水系图、土壤类型图及土地利用图。此外, 还收集到岚河流域中 8 个雨量站 1971—1987 年 15 a 的降雨资料(其中缺 1977 年和 1986 年的资料), 以及岚河流域出口控制测站这 15 a 的流量、水位、流速资料。并从中选出 29 场降雨—洪水资料对模型进行验证。

2.2 流域的离散与模拟

用岚河流域的水系图在其 1: 50 000 的地形图

上进行叠合, 然后在 1: 50 000 地形图上用上述方法划分子流域, 共划分了 28 个子流域(如图 1)。将每个子流域又划分为阴坡、阳坡 2 个单元作为产流、汇流的模拟单元, 经过汇流模拟后, 在子流域的出口处把 2 个单元的流量叠加, 之后再进行河道演算至整个流域的出口。

从收集的资料中挑选出具有代表性的 29 场降雨过程, 然后用所提出的模型编制程序, 对这 29 场降雨进行模拟与求解计算。

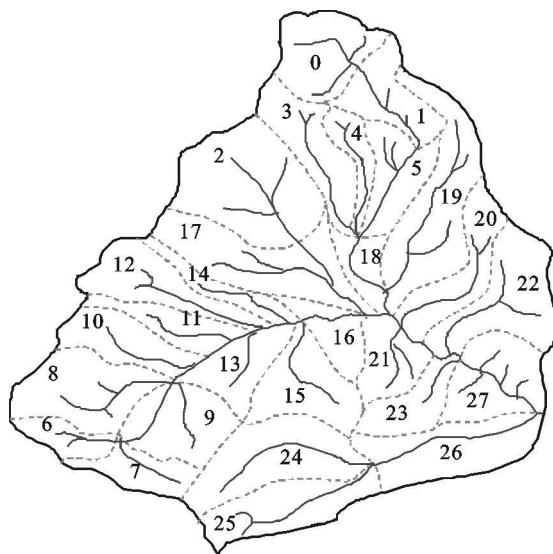


图 1 岚河流域子流域划分图

2.3 径流模拟结果与分析

为了分析模型的模拟精度, 对于径流量, 本文采用水量平衡误差方法进行衡量, 计算公式为

$$\Delta R = Q_c - Q_o$$

式中: Q_c —— 模型计算的总径流量; Q_o —— 实测的总径流量。

以 $|\Delta R| \leq 2 \text{ mm}$ 为其合格标准。经计算, 29 场降雨中, 有 21 场降雨的模拟结果合格, 合格率为 70%。

对于次洪峰流量过程的模拟精度, 本文采用相对误差进行衡量。首先, 选出径流量模拟结果合格的洪水, 然后对该洪水进行流量过程模拟, 并以下述 2 个条件为其合格标准。

$$\left\{ \begin{aligned} |Q_{pc} - Q_{po}| / Q_{po} \times 100 &\leq 30\% \\ |t_{pc} - t_{po}| / T \times 100 &\leq 20\% \end{aligned} \right.$$

式中: Q_{pc} —— 计算的洪峰流量; Q_{po} —— 实测洪峰流量; t_{pc} —— 计算峰现时间; t_{po} —— 实测峰现时间; T —— 实测洪水历时。

经计算, 21 场洪水中有 17 场洪水的模拟结果合格, 合格率为 80%。部分模拟流量过程与实测流量过程见图 2—4。

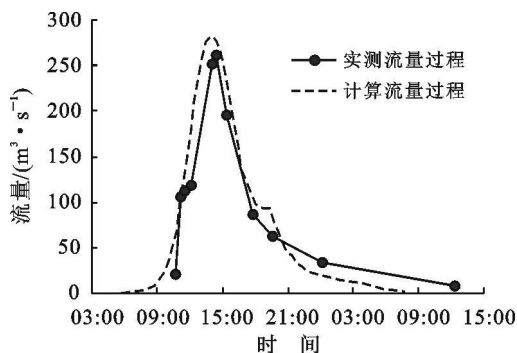


图 2 710725# 洪水过程线

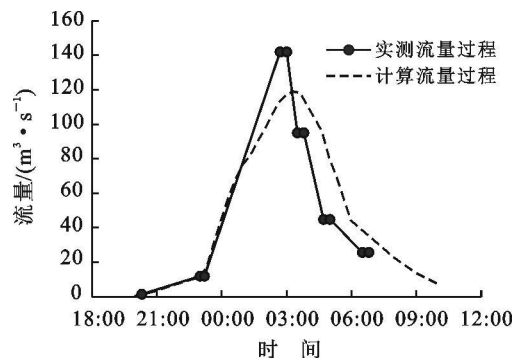


图 3 800827# 洪水过程线

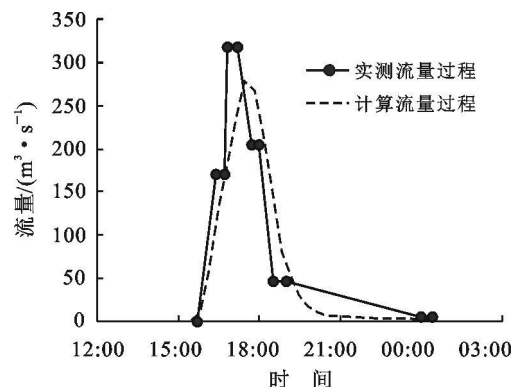


图 4 820721# 洪水过程线

3 结论

本文将 SCS 模型和马斯京根法引入汾河上游流域水文预测中,建立了半分布式水文模型。在进行流域离散时,考虑坡度、坡向为主要影响因子,按照自然分 watershed 把流域划分为由河网连结的面积较小的多子流域。

从水文循环角度看,这样的子流域是封闭的水文单元且面积较小,适用于 SCS 模型。从模型在典型流域的计算结果看,模型在产流计算方面的合格率达到 70%,在汇流计算方面的合格率达到 80%,模型所模拟的流域出口处洪水过程与实测的洪水过程线有较好的一致性。这些结果表明,本文所提出的流域分布式水文模型在流域的离散,点雨量的处理,产、汇流的计算及参数的确定上都较为合理,可以应用于研究区及研究区以外的半干旱地区的中等尺度流域。

[参 考 文 献]

- [1] Yu Z, Lakhtakia M N, Yarnal B. Simulating the river basin response to atmospheric forcing by linking a mesoscale meteorological model and hydrologic model system[J]. Journal of Hydrology, 1999, 218: 72—91.
- [2] 芮孝芳,朱庆平. 分布式流域水文模型研究中的几个问题[J]. 水利水电科技进展, 2002, 22(3): 56—58.
- [3] 郝振纯,李丽. 基于 DEM 的数字水系的生成[J]. 水文, 2002, 22(4): 8—10.
- [4] Ignacio Rodriguez Iturbe, Juan B Valdes. The geomorphologic structure of hydrological response[J]. Water Resour Res, 1979, 15(6): 1409—1420.
- [5] Gupta V K, Waynre E, Wang C T. A representation of an instantaneous unit hydrograph from geomorphology[J]. Water Resour Res, 1980, 16(5): 855—862.
- [6] 夏军. 水文尺度问题[J]. 水利学报, 1993(4): 32—37.