

分布式水文模拟汇流方法及应用

王纲胜¹, 夏 军^{1,2}, 牛存稳²

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

2. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

摘要: 对于必须考虑汇流过程的分布式水文模型而言, 其汇流模型可以分解为三个层次来讨论: 第一个层次是单元划分; 第二个层次为汇流路径; 第三个层次则是基于该汇流路径的汇流演算模型。基于栅格的分级运动波汇流模型是根据栅格 DEM 的网格单元水流向来划分栅格等级(汇流带), 然后应用运动波模型进行逐级汇流演算。文中从可操作性的角度对栅格分级方法和运动波汇流模型进行了分析讨论, 最后根据潮白河流域 1981~1990 年资料进行了日径流过程模拟分析, 说明该方法在理论上是合理的, 并在应用中取得良好的模拟效果。

关键词: 分布式水文模拟; 汇流; 运动波; 潮白河

中图分类号: P344 **文章编号:** 1000-0585(2004)02-0175-08

1 引言

针对汇流演算固有的复杂性和不同计算方面的要求已有许多演算模型的研制, 但是缺乏普遍优良的水流演算模型^[1]。简化的模型由于其计算简单而受到注意, 然而精度的考虑可能限制他们的应用范围。汇流演算(水流演算)可以划分为集总式和分布式两类。在集总式汇流演算中, 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。径流的流量、流速和水深(水位)随时间和空间变化, 因此比较精确的算法是将其描述为分布过程。基于一维非恒定流 Saint-Venant 方程组^[1]的分布式汇流演算模型能把流量和水位表达为空间和时间的函数, 而不像集总式方法那样仅为时间的函数。

汇流模型的繁简决定于模型的时间分辨率和汇流滞时的相对关系^[2]。从时间尺度上来讲, 当时间步长较大(月、年), 汇流过程非常简单甚至可以忽略; 当时间步长较小(日、时), 汇流过程对于流域出口断面的流量尤其是峰值形成则是非常重要的。当然, 时间和空间不能决然分开, 对于尺度很小的流域, 汇流时间步长可能以分钟为单位了。对于必须考虑汇流过程的分布式模型而言, 作者认为其汇流模型可以分解为三个层次来讨论: 第一个层次是单元划分^[3,4]; 第二个层次为汇流路径; 第三个层次则是基于该汇流路径的汇流演算模型(对于地表径流、壤中流、地下径流可以采用不同的演算模型)。以栅格单元划分方法为例, 一般来说, 有两种汇流路径可循: 一种以栅格为单元建立流域汇流网络, 逐个栅格进行汇流, 直至出口断面, 另一种则基于栅格建立汇流带逐级进行汇流; 至于汇流

收稿日期: 2003-07-13; 修订日期: 2003-10-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(50279049); 中国科学院知识创新工程方向性及领域前沿项目(KZCX2-SW-317/CX10GE01-08); 中科院“百人计划”项目

作者简介: 王纲胜(1978-), 男, 湖北鄂州人, 中科院地理科学与资源研究所博士生, 主要从事水文水资源研究。
E-mail: wanggs@gsnrr.ac.cn.

演算模型,有许多相当成熟的水力学和水文学方法,可以根据情况选用,常用的有马斯京根汇流模型、扩散波汇流模型和运动波汇流模型^[5~9]。如果逐个栅格进行汇流,不仅汇流节点较多,而且需要具有很强物理机制的汇流模型才能比较客观地反映流域的汇流过程,同时,模型物理机制较强也就表示计算程度更复杂,模型的计算量更大;如果建立汇流带进行汇流,则汇流节点大大减少,汇流演算模型可繁可简。基于栅格的分级运动波汇流模型是以栅格为基础划分汇流栅格等级(即汇流带),在此基础上应用运动波模型进行逐级汇流演算直至流域出口断面。

2 单元划分

分布式模型一般是基于 GIS 来构建的,模型单元划分与 DEM 紧密相关。在目前构建降雨—径流模型的方法中,有三种最常用到的 DEM,即:栅格网络(square-grid/ raster networks)模型、等高线网络(contour-based networks)模型和不规则三角网络(triangulated irregular networks, TIN)模型^[3]。栅格 DEM 在流域地貌分析中最常用,拓扑关系简单,算法容易实现,计算速度也较快,但是对于地形简单的区域存在大量冗余数据。等高线 DEM 考虑了地势变化,但是算法较复杂,运算时间较长。TIN 尽管克服了栅格 DEM 数据冗余问题,又能充分表示复杂地形的特征,但其数据结构和组织类似于矢量数据结构,不便于规范管理,也不便于同 GIS 直接交互使用。基于 DEM 的单元划分即是对计算区域的空间离散,通常有三种方法。

2.1 网格单元

网格单元包括规则网格和不规则网格两类。规则网格主要是指矩形网格^[7],其中,正方形网格可以由栅格 DEM 直接得到,也最为简便。SHE 模型^[7]是最著名的基于规则格网的分布式模型,其他基于规则格网的模型有 Huggins 与 Monke 研制的 ANSWERS, Doe 研制的 CASC2D, Bronstert 与 Plate 研制的三维 HILLFLOW 等等。模型模拟精度对网格尺寸也是敏感的,Refsgaard 曾在 Karup 流域应用 SHE 模型进行了网格尺度灵敏性分析,结果表明当网格尺寸为 500m 时模拟效果最好,当然,该结论是针对地下水占主导地位的 Karup 流域得出的^[7]。不规则网格可看作规则正交网格^[10],当计算域几何形状复杂时,很难生成这种类型的格网,而且在这种格网上进行方程求解精度不高。在二维洪水数值模拟模型中,当计算网格采用无结构不规则网格时,必须建立计算网络的拓扑关系,以利于相邻网格之间通量的计算。

2.2 坡面单元

以坡面为单元的划分方法是沿着水流路线进行的,这样就能够忽略邻近坡面单元之间的旁侧水流交换,这种基于表面地形的坡面单元离散化方法是对水流方向的合理近似。在早期的这类模型中,由于单元边界不规则,往往采用一个等价的规则位面(一致的宽度、深度和坡度)来表示,例如 IHDM (Institute of Hydrology Distributed Model) 的早期版本和 Smith 描述的 KINEROS 软件包。Beven (1977) 发展的模型^[7]表明如果应用有限元方法就可以不用构造等价位面,而可以相对容易地直接采用实际形状的坡面,而且同一坡面内的不同水面线可以采用不同的深度。杨大文等研制的 GB (Geomorphology-based hydrological model) 模型^[11]由矩形坡面单元组成汇流带进行全流域汇流演算。

2.3 子流域单元

将流域按自然子流域的形状进行离散,实际上是与 GIS 直接交互的有效方法,如 Arc/

Info 可以在给定阈值情况下根据流域的 DEM 生成子流域。自然子流域作为模型计算单元, 最大的好处是单元内和单元之间的水文过程十分清晰。SWAT^[12] (Soil and Water Assessment Tool) 的模拟单元即为子流域。

3 汇流路径

汇流路径与水流方向是不同的概念。汇流路径是在水流方向的基础上建立的, 是汇流模型应用的“对象”, 也可以说是汇流模型应用的空间尺度。对于分布式模型, 笔者认为有两种基本汇流路径可循: 一种以模型计算单元为基础建立流域汇流网络(即建立计算单元的拓扑关系), 逐个单元进行汇流, 直至出口断面; 另一种则基于计算单元建立汇流带逐级(分段)进行连续汇流演算。

4 汇流演算模型

汇流演算模型可以分为两类: 水文学模型和水力学模型。水文学方法比较简单, 其控制方程一般只是时间的函数; 水力学方法除了考虑时间因素, 还要考虑空间因素。

4.1 水文学方法

Muskingum 及其改进方法(如 Muskingum-Cunge)是众所周知的水文学方法, 但是研究表明 Muskingum 槽蓄方程是扩散波动力方程的近似表达, Muskingum 演算公式在一定条件下是扩散波方程的二阶精度解^[5]。Muskingum-Cunge 方法在 Muskingum 方法基础上考虑了旁侧入流的影响。可以证明, 该方法是经典运动波方程的有限差分表示^[11]。线性水库调蓄方法也是一种典型的水文学汇流方法。Jayawardena 发展的 RRM^[13] (Runoff Routing Model) 对地表径流和地下径流采用线性水库进行调蓄演算, 并假定地下水库可能对相应的地表径流有反馈(补充)作用, 地表径流经由河网连接起来。

4.2 水力学方法

水力学方法基本上都是基于对圣维南方程组的简化和近似, 其中最主要的近似方法为扩散波和运动波。运动波近似方法假定水面坡度与河床坡度一致(或者摩阻坡度与地表坡度一致), 对动量方程进行简化^[7]。运动波方程实际上是稳定流方程, 不同的稳定流方程(如 Darcy-Weisbach 公式, Manning 公式等等)都将 v (流速)与 h (水深)描述为指数关系^[7,14], 从而得到 h 与 q ($=vh$, 单宽流量 (m^2s^{-1}))的指数关系, 即

$$h = aq \quad (1)$$

此式与连续方程^[7]联立即得到运动波方程。

如果使用完全 Saint-Venant 方程组, 则演算模型称为动力波演算模型。由于高速计算机的出现, Stoker 于 1953 年首先试图用完全 Saint-Venant 方程组来演算 Ohio 河的洪水。动力波演算模型可分为求解 Saint-Venant 方程组的特征线法和直接法。直接法又可分为显式和隐式两种。显式方法应用中比较简单, 但要受到数值稳定性条件的限制。隐式有限差分方法, 由于其在数学上的稳定性而对时间步长的大小没有限制, 但对数值的收敛性条件要求比较严格。在已研制的各种隐式有限差分分解法中, 普遍认为加权四点格式是最为优良^[11]。

5 基于栅格的分级运动波汇流模型

分布式水文模型在给出水文参量和状态变量的空间分布与时间序列方面具有很大的优

越性。但是,一方面,由于信息的严重不足,这种模型的局限性显得十分突出,限制了它的实际应用范围;另一方面,即使资料充足,分布式模型的运行将面临繁重的数据处理任务,与集总式模型相比,其消耗的计算机系统资源和时间也是巨大的,这给模型结构和参数的率定检验带来了极大的困难。因此,在分布式水文模型的开发研制中,有必要在考虑模型物理机制的同时,尽可能采用有效的方法来降低模型系统的计算量。因此,本文提出基于栅格的分级运动波汇流模型开展实例研究。

5.1 研究思路

分级栅格运动波汇流模型得益于“等流时线”和“河道分段连续演算”^[15]两个概念的启发。“等流时线法”是根据时间-面积曲线计算流量过程的方法,虽然可以处理降雨空间不均匀性,但是等流时线将流域汇流视为线性时不变系统,假定流域各处汇流速度不随时间变化;更为完善的方法是将等流时线法与河道演算相结合,即将各块等流时面上的漫流量再作一次等流时面积以下的河道演算,得到出口流量过程,几个等流时面形成的流量过程叠加得到流域出流过程。“河道分段连续演算”把演算河段划分成若干个单元演算河段,然后采用分段连续演算方法将入流过程演算到下游出流断面,如马斯京根法的分段连续演算、特征河长法的分段连续演算。分级栅格运动波汇流模型是作者在研究基于栅格的分布式水文模拟过程中提出的。根据 DEM 栅格的水流方向,建立栅格单元的拓扑关系,并由此对流域进行分级(汇流带),处于同一级的栅格单元之间没有水量交换,相邻级别的栅格单元之间存在水量交换,并以运动波方法进行汇流演算。

5.2 栅格分级

定义流域出口断面栅格为第一级汇流栅格,根据每个栅格的流向^[7]来判断栅格等级。例如,定义所有流入第一级栅格的栅格为第二级汇流栅格,所有流入第二级栅格的栅格为第三级汇流栅格,以此类推,最后得到第 N 级栅格。图 1 为栅格水流方向示例,图 2 则是根据图 1 得到的栅格分级示例(此例中,栅格被分成 5 级)。

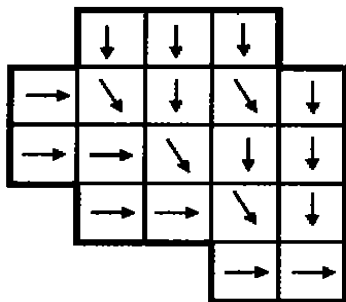


图 1 栅格水流方向示例

Fig. 1 A sketch map of flow directions

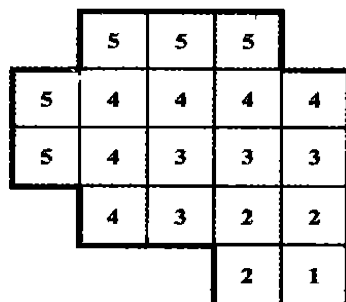


图 2 栅格分级示例

Fig. 2 A sketch map of ranked grids

5.3 运动波汇流模型及其求解

本研究中采用 Manning 公式,式(1)中的 n 和 S_0 分别为

$$n = \left(\frac{n}{\sqrt{S_0}} \right)^{0.6}, \quad = 0.6 \quad (2)$$

式中, n 为糙率系数,根据文献[6]选取; S_0 为地表(或河底)坡度,利用 ArcView 直接提取。汇流模型中,采用同级汇流带内各栅格的糙率和坡度均值进行计算。

关于运动波模型的数值解法,则采用有限差分方法^[1,7,14]。由于式(2)为非线性方程,通常使用迭代、高效的二次求解技术,如 Newton-Raphson 方法^[16]。

5.4 实例分析

5.4.1 研究区域

潮白河为流经北京市北部、东部的重要河流,属海河水系。其上源有两支,东支为潮河,西支为白河。本研究区域为潮白河密云水库以上流域,同时将潮白河流域划分为潮河、白河两个流域分别进行模拟,潮河流入密云水库的控制站为下会,白河流入密云水库的控制站为张家坟。

根据栅格 DEM (分辨率为 $100\text{m} \times 100\text{m}$) 提取出潮白河密云水库以上流域 (以下简称潮白河流域) 及其河网 (图 3)。由 DEM 提取出的潮白河流域高程变化范围为 $130 \sim 2262\text{m}$, 控制面积 13861 km^2 (水文年鉴中为 13846 km^2), 计算网格大小采用 $500\text{m} \times 500\text{m}$, 潮白河流域被划分为 55444 个网格单元。

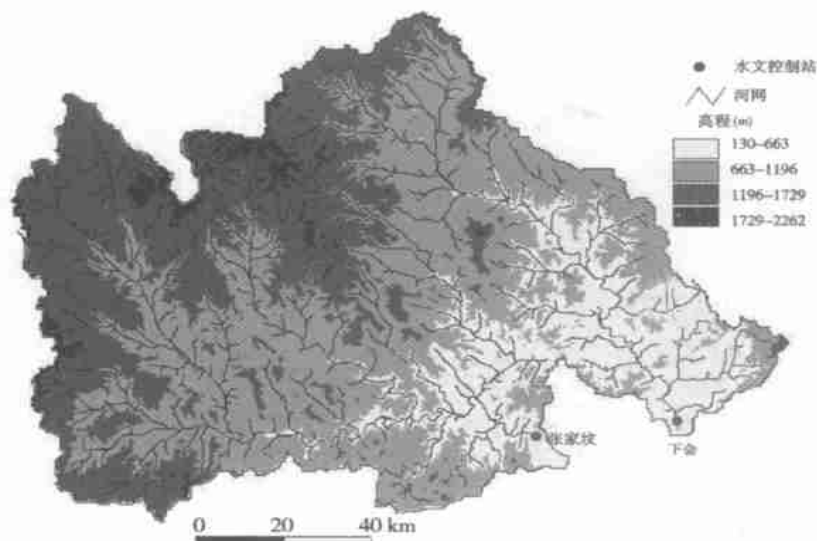


图 3 潮白河密云水库以上流域及其河网图
Fig. 3 Chaobaihe River Basin above Miyun Reservoir

5.4.2 栅格分级

采用单流向法^[17], 由 DEM 计算得到网格流向, 根据每个网格的流向来判断网格等级。潮河流域共划分为 298 级, 白河划分为 398 级 (图 4)。

5.4.3 模拟结果

本研究采用时变增益非线性水文模型^[17]在栅格单元上计算地表水产流, 应用自由水蓄水库线性出流计算土壤水和地下水产流^[18], 然后应用分级栅格运动波汇流模型进行汇流演算, 最后得到流域出口断面流量过程, 同时模型也能输出降水、产流及土壤湿度的空间分布数据。模型分布式输入模块包括降水空间分布处理 (如果考虑气温因素, 还有气温空间分布处理), 土壤湿度空间分布初始化等等^[19,20]。潮河流域模拟时间为 1986 ~ 1990 年; 白河流域则取 1981 ~ 1986 年作为模拟期, 选取 1987 ~ 1990 年作为模型检验期。模型模拟及检验精度评价指标采用水量平衡系数 IVF (模拟总水量与实测总水量的比值) 和效率系数 R^2 ^[17]。模型模拟期效率系数均在 0.70 以上, 水量平衡系数均达到 1.0; 检验期水量平衡系数 0.98 ~ 1.00, 说明水量基本保持平衡, 效率系数则有所降低。限于篇幅, 本文

列出部分模拟结果（图 5）。

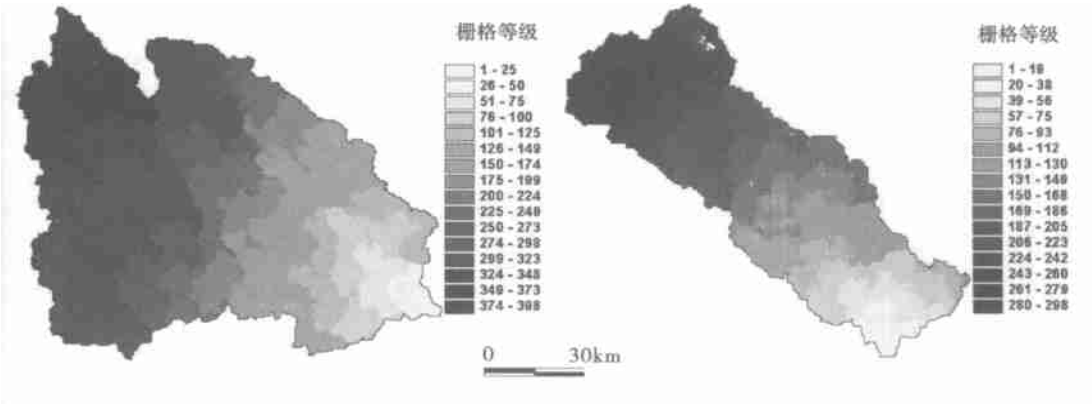


图 4 潮白河流域汇流网格等级划分（左边为白河，右边为潮河）
Fig.4 Ranked grids of Chaobaihe River Basin (Left is Baihe River and Right is Chaohe River)

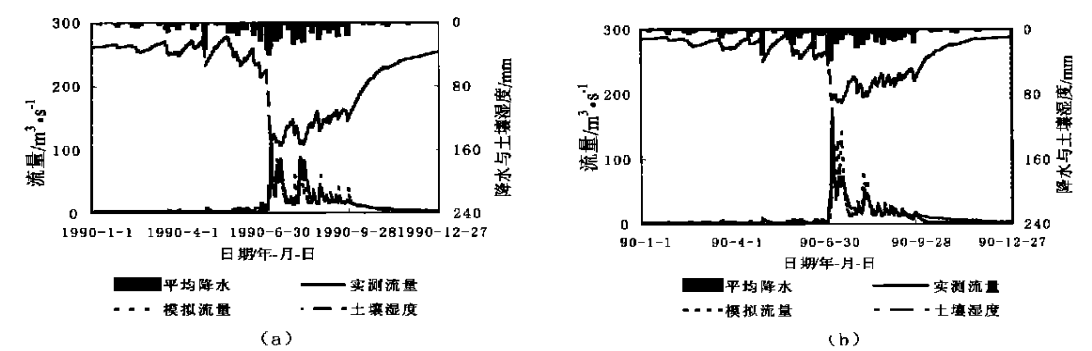


图 5 1990 年实测与模拟日径流过程：(a) 潮河下会站，(b) 白河张家坟站
Fig.5 Observed and simulated daily runoff in 1990: (a) Xiahui station, (b) Zhangjiafen station

表 1 潮白河 1990 年 DTVGM 实测与模拟峰值对比

Tab. 1 Observed and simulated streamflow peaks in Chaobaihe River Basin in 1990

测站	实测径流		DTVGM 模拟径流		峰值误差	
	日期	流量(m³/s)	流量(m³/s)	峰现时间	流量相对误差(%)	峰现时间误差(day)
下会	1990-7-8	125.0	101.7	1990-7-8	-18.7	0
	1990-7-14	77.2	84.0	1990-7-14	8.7	0
	1990-7-18	87.8	75.9	1990-7-18	-13.6	0
	1990-8-7	85.7	87.7	1990-8-8	2.3	1
	1990-8-12	85.3	76.8	1990-8-12	-10.0	0
张家坟	1990-7-8	180.0	158.9	1990-7-7	-11.7	-1
	1990-7-18	74.9	142.8	1990-7-17	90.6	-1

分析以上实测与模拟流量对比图、主要峰值模拟结果表和模型效率系数，说明流量过程线图和峰值模拟结果统计表显示模拟精度较高：1990 年潮河模型效率系数高达 0.85，水量完全平衡，潮河下会站及白河张家坟站主要峰值误差在允许误差（流量相对误差在

$\pm 20\%$ 以内, 峰现时间误差在 2 个计算时段内——本文为 2 天) 范围内。张家坟站检验期 1990 年 7 月 18 日洪峰流量模拟值比实测值偏大很多, 可能是由于模型中尚未考虑水库调蓄对于汇流过程的影响, 因为白河发生了近一个月的连续降雨期 (1990 年 6 月 30 日 ~ 7 月 20 日, 其中 7 月 4 日 ~ 17 日的日平均雨量超过 10mm), 如果没有水库调蓄, 峰值不会削减这么大 (从 $180 \text{ m}^3/\text{s}$ 下降到 $74.9 \text{ m}^3/\text{s}$)。

6 结 论

分布式水文模型是研究时空变异的有效途径和方法。但是, 分布式水文模型依赖于对水循环时空变化的实验和机理认识, 由于水文循环复杂的非线性特性, 这种时空分布资料信息的获取非常有限甚至缺乏, 从而严重制约了分布式模型的实际应用效果; 即使资料充足, 分布式模型的运行将面临繁重的数据处理任务, 与集总式模型相比, 其消耗的计算机系统资源和时间也是巨大的, 这给模型结构和参数的率定检验带来了极大的困难。

基于栅格的分级运动波汇流模型根据 DEM 对栅格进行分级, 应用运动波模型在汇流带之间进行汇流演算。由于该方法利用地形来划分汇流带, 因此比较适用于地形起伏特征明显 (尤其是山区) 的流域; 对于地形平坦的平原地区的汇流带划分方法及其合理性需要研究新的途径。另外, 模型涉及到的水文单元划分方法以及计算单元尺度^[21]有待深入研究; 模型中需要进一步考虑流域内水库调蓄对汇流过程的影响。

参考文献:

- [1] David R Maidment. 水文学手册 (Handbook of Hydrology). 张建云等译. 北京: 科学出版社, 2002. 387 ~ 422.
- [2] 刘新仁. 大尺度水文模拟若干问题的讨论. 见: 淮河流域能量与水循环研究 (一). 北京: 气象出版社, 1999. 221 ~ 228.
- [3] 卢振千, 吕妙儿, 黄杏元. 不规则三角网 (TIN) 在流域坡面汇流分析中的应用. 测绘科学, 2001, 26(4): 45 ~ 48.
- [4] 王中根, 刘昌明, 左其亭, 等. 基于 DEM 的分布式水文模型构建方法. 地理科学进展, 2002, 21(5): 430 ~ 439.
- [5] 芮孝芳. Muskingum 法及其分段连续演算的若干理论探讨. 水科学进展, 2002, 13(6): 682 ~ 688.
- [6] Thompson S A. Hydrology for water management. Rotterdam: A A Balkema, 1999. 212 ~ 216, 272 ~ 275.
- [7] Keith J Beven. Rainfall-Runoff Modelling. John Wiley & Sons Ltd, 2001. 67 ~ 68, 124 ~ 178.
- [8] 谢平, 梁瑞驹. 扩散模拟流域地貌汇流模型. 地理学报, 1997, 52(4): 316 ~ 323.
- [9] 黄国如, 芮孝芳. 基于运动波数值扩散的洪水演算方法. 河海大学学报, 2001, 29(2): 110 ~ 113.
- [10] 万洪涛等. GIS 技术支持下的洪水模型建模. 地理研究, 2001, 20(4): 407 ~ 415.
- [11] Yang Dawen, Herath Srikantha, Musiak Katumi. Comparison of different distributed hydrological models for characterization of catchment spatial variability. Hydrological Progresses, 2000, 14: 403 ~ 416.
- [12] Arnold J G, Williams J R, Srinivasan R, et al. Model theory of SWAT. USDA, Agricultural Research Service Grassland, Soil and Water Research Laboratory, 1997.
- [13] Jayawardena A W. Daily river discharge prediction using GCM generated atmospheric data. IAHS Publ. no. 270, 2001. 159 ~ 165.
- [14] Yutaka Ichikawa, Yasuto Tachikawa, Michiharu Shiiba. Lumping slope runoff model using digital elevation model and steady state assumption. Water 99 Joint Congress-Brisbane, Australia 6-8 July 1999. 113 ~ 118.
- [15] 庄一麟, 林三益. 水文预报. 北京: 水利电力出版社, 1986. 21 ~ 36, 155 ~ 160.
- [16] 何光渝, 高永利. Visual Fortran 常用数值算法集. 北京: 科学出版社, 2002. 444 ~ 449.
- [17] Xia J. A system approach to real time hydrological forecasts in watersheds. Water International, 2002, 27(1): 87 ~ 97.
- [18] Xia Jun, Wang Gangsheng, Tan Ge. A distributed hydrological model applied to Heihe mountainous basin in western China. IAHS Publication no. 282, 2003. 268 ~ 274.
- [19] 李海滨. Kriging 方法在区域土壤水分估值中的应用. 地理研究, 2001, 20(4): 446 ~ 452.
- [20] 邱扬等. 黄土丘陵小流域土壤水分空间预测的统计模型. 地理研究, 2001, 20(6): 751 ~ 759.

[21] 卫海燕. 分布式侵蚀预报模型中网格面积选定及其论证. 地理研究, 2002 21(5): 578 ~ 584.

Flow routing method and its application in distributed hydrological modeling

WANG Gang-sheng¹, XIA Jun^{1,2}, NIU Cun-wen²

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract :Flow routing model (FRM) plays important roles in the distributed hydrological modeling. Whether a simple or complex FRM is chosen depends on the relative relationship between the time resolution and the lagging time of routing. Generally, the FRM of a distributed hydrological model (DHM) consists of three components: the first is subdivision method of the basin; the second is the routing path; and the last is the routing method based on the routing path. In order to decrease the runtime of model, an efficient routing method, the so-called Ranked-Grid-based Kinematic Wave Routing model (RGKWR), is developed in this paper. This model applies the kinematic wave method to successive routing on ranked raster grids. Raster grids can be divided into different ranks due to each grid's flow direction computed by the single direction algorithm. We define the basin's outlet grids as the first rank, and the grids from which water flows into the first ranked grids as the second rank, the rest can be deduced by analogy, so the most upstream grids are defined as the highest rank. Flow routing is undertaken from those grids having higher rank onto the grids having lower rank. This paper puts forward the classifying method for raster grids, discusses the kinematic wave model and its numerical solutions, and carries out a case study on Chaobaihe River Basin in North China. The basin, with a drainage area of 13,846 km², has two outlets to Miyun Reservoir: one is Xiahui hydrologic station on Chaohe River, the other is Zhangjiafen station on Baihe River. The whole basin is divided into 55,444 grid elements at a 500-m resolution, with the Chaohe River basin partitioned into 298 ranks, and Baihe River basin 398 ranks. The application shows RGKWR based on GIS/DEM is reasonable and efficient.

Key words :distributed hydrological modeling; flow routing; kinematic wave; Chaobaihe River Basin