文章编号: 1007-6301 (2002) 06-0573-10

潮河流域时变增益分布式水循环模型研究

王纲胜[1], 夏 军[1,2], 谈 戈[1], 吕爱锋[3]

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 武汉大学, 武汉 430072;
3. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011)

摘要: 在广泛了解有关分布式水文模型研究进展的基础上, 结合中国实际资料条件和问题, 提出了一种"水文循环机理- 系统理论"相耦合的分布式水循环模型——时变增益分布式水循环模型 (DTVGM), 并建立了潮河流域分布式水文循环模型。实例研究表明, DTVGM 的应用是比较成功的, 基本上能够满足水资源管理的要求。

关 键 词: 分布式水循环模型; 系统理论; 潮河流域

中图分类号: F323.213 文献标识码: A

1 引言

由于全球变化、社会经济发展, 水资源问题愈来愈突出, 给水文科学研究提出新的挑战, 即变化环境下的水资源形成与演化规律问题。变化环境下的水文循环及其时空演化规律研究, 是国际国内地学领域积极鼓励的创新研究课题。如何量化人类活动对水循环水资源的变化及影响? 这是近代水科学面临的主要科学问题。回答上述问题, 迫切需要建立认识陆地水循环演化格局的空间信息支撑系统、陆地水循环过程变化的实验研究支撑系统和可定量描述自然变化/ 人类活动影响的分布式水循环模型等。

流域分布式水文模型 (又称数字水文模型) 是指以流域面上分散的水文参数和变量来描述水文时空变化特性的数学模型。它构建在 GIS/ RS 基础之上, 先由 GIS/ DTM 建立数字高程流域水系模型, 再与产流模型和汇流模型进行有机结合。目前, 基于 DEM 的流域分布式水文模型有三种建模思路[1]: ¹ 应用数值分析来建立相邻网格单元之间的时空关系, 这类模型也称紧密耦合型分布式水文模型。如 SHE 模型及其变形, 这也是人们所指的具有物理基础的分布式水文模型。º 在每一个网格单元 (或子流域) 上应用现有的概念性集总模型来推求净雨, 再进行汇流演算, 最后求得出口断面流量, 这类模型也称松散耦合型分布式水文模型。如分布式新安江模型和 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型。» 基

收稿日期: 2002-08; 修订日期: 2002-09

基金项目: 中国科学院知识创新工程方向性及领域前沿项目资助 (KZCX2-SW-317/ CX10G-E01-08); 中科院 "百人计划"项目资助

作者简介: 王纲胜 (1978-), 男, 博士生, 主要从事变化环境下水循环研究。
E-mail: wanggs@igsnrr.ac.cn

于 DEM 推求地形空间变化信息, 利用地形信息 (如, 地形指数 ln (A/tanB)) 模拟水文响应的特性, 并用统计方法求得出口断面流量, 这类模型也称半分布式流域水文模型, 如 TOPMODEL。

本文提出一种 "水文循环机理- 系统理论" 相结合的研究思路。事实上, 系统理论模型与概念性模型一样, 形式简单, 使用方便; 如果将系统理论中的某些参数与水文循环机理建立联系, 那么模型就又具有了一定的物理基础。正是在这样一种新思路的引导下, 本文提出了时变增益分布式水循环模型 (Distributed Time Variant Gain Model, 简记为 DTVGM), 并将其应用于潮白河支流——潮河流域。

2 DTVGM 的概念

2.1 TVGM 简介

时变增益水文非线性系统模型[2] (Time Variant Gain Model, 简记为 TVGM) 是夏军于 1989～1995 年期间在爱尔兰国立大学 (U. C. G.) 参加国际河川径流预报研讨班提出的一种方法, 在国外曾经受各种不同资料的检验。初步应用表明: 在受季风影响的半湿润、半干旱地区和中小流域, 实际应用效果较好。它的概念是: 降雨径流的系统关系是非线性的, 其中重要的贡献是产流过程中土壤湿度 (即土壤含水量) 不同所引起的产流量变化。

2.2 DTVGM 的概念

时变增益分布式水循环模型 (DTVGM) 是建立在 GIS/DEM 的基础上, 通过 GIS/RS 提取陆地表面单元坡度、流向、水流路径、河流网络、流域边界和土地覆被等信息, 将单元 TVGM 拓广到由 DEM 划分的流域单元网格上进行非线性产流计算, 并利用 DEM 提取出的汇流网络进行分级网格汇流演算, 从而得到流域水循环要素的时空分布特征以及流域出口断面的流量过程。

3 DTVGM 模型结构

DTVGM 模型结构如图 1 所示。

4 DTVGM 产流模型

在本文的研究中, 产流发生在每个网格上, 汇流则通过划分 "网格等级" 的方法进行概化的河道汇流。

本研究中, 产流模型在垂直方向上以地表为界划分为两层: 上层为地表产流 (地表水), 下层统称为壤中流 (土壤水)。流域的水源随海拔而变化, 高寒山区水源主要由冰川和积雪融水补给; 而在中高山带为融水和雨水混合补给水源; 到中低山带主要为雨水补给。

4.1 融雪模型

在集总融雪径流模型中, "度日因子模型" 是常用的融雪水量计算模型[3], 融雪水量由气温、积雪温度、融雪率 (度日因子) 和雪盖面积控制。在 DTVGM 模型中, 由于产流发生在每个计算网格单元上, "雪盖面积" 这一因素就表现为分布式网格积雪。只有当积雪温

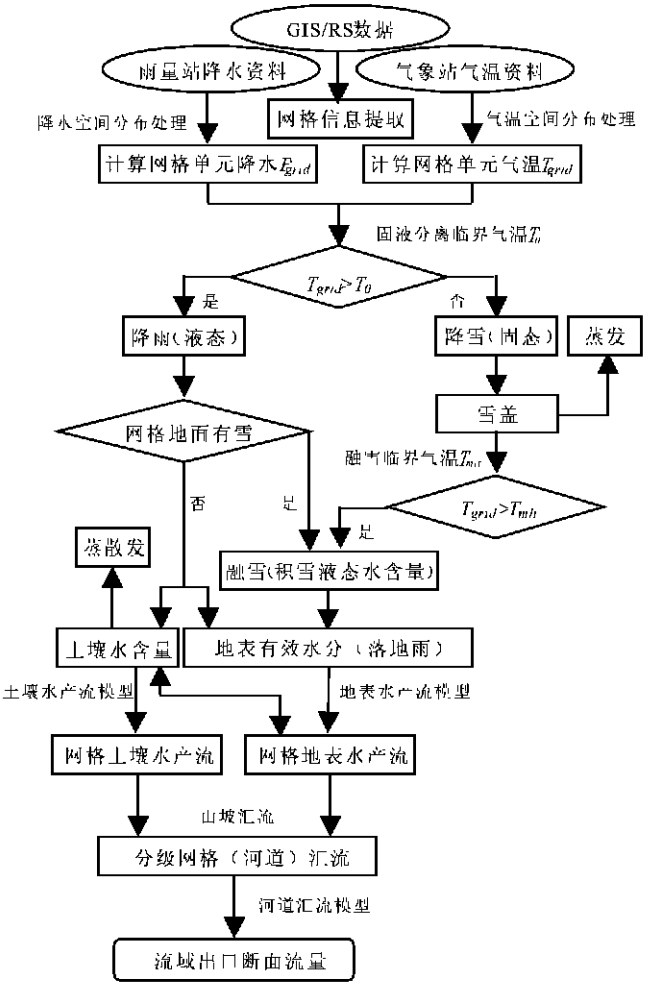


图 1　时变增益分布式水循环模型结构

Fig. 1　Mlodel Structure of DTVGM

度超过融雪域值 T_{mlt}时, 积雪才会开始融化。在华北地区, 积雪融水补给相对于雨水补给可以忽略, 所以不必考虑融雪过程。

4. 2　网格单元地表水产流模型

网格单元产流计算必须首先判断网格降水是液态降雨还是固态降水。判断的依据是当地的气温, 当气温 $T_{av} \geqslant T_0$ (T_0 为临界温度), 降水为液态降雨, 否则为固态降水。若是降雪则增加到积雪层中, 如果是降雨, 要判断是降在有雪的地方还是地面上, 若是降在雪面上, 则进入积雪层, 若是降在地面上 (即为 "落地雨") 则和该时段的融雪一起进入下一步产流计算[3]。

融雪水和降雨如果进入积雪, 就会被积雪层滞留, 即成为液态水含量 W_{liquid}; 假设积雪层的最大持水能力为 W_{cmax}, 当 $W_{liquid} > W_{cmax}$ 时, 开始发生融雪出水。

用 "落地雨量" P 表示上述落地雨和融雪出水之和, 根据时变增益非线性产流的概念, t 时段第 i 个网格产生的地表径流可以表达为网格雨量 $P_{t,i}$ 与该网格系统增益因子 $G_{t,i}$ 的乘

积，即网格地表径流产流量为:

$$R_{dt,i} = g_1 \cdot S_{t,i}^{g_2} \cdot P_{t,i} \quad (1)$$

式中 $R_{dt,i}$为网格地表产流量; $S_{t,i}$为网格土壤湿度; g_1、g_2 为产流参数; $P_{t,i}$为网格落地雨量。

4.3 网格单元蒸发计算模型

一般将蒸发分解为两个问题，即潜在蒸发 (或称蒸发能力) 和实际蒸发[4]。蒸发能力主要决定于可供蒸发的潜热。实际蒸发则一方面决定于蒸发能力，一方面受控于土壤水运动特性。在与 GCM 耦合的水文模型中，蒸发能力可以用蒸发物理模型做精确的模拟，因为影响蒸发的各种因素，在GCM 模型中基本都能获得。但是，在与 GCM 仅作外部连接的水文模型中，在所需变量不易获得的情况下，可以依据气温或气温和湿度 (如果有湿度资料) 以及太阳辐射估算蒸发能力，如 Penman- Monteith 方法、Priestley- Taylor 方法和 Hargreaves[5]方法等。

实际蒸发 E_a 与蒸发能力 E_p 的关系假定为:

$$E_a = E_p \cdot \frac{S}{W} \quad (2)$$

式中 S 为土湿，W 为饱和土湿。上式表明，当土湿达到最大值即饱和土湿时，实际蒸发等于蒸发能力。

4.4 网格单元土壤水产流模型

对于土壤层，由水量平衡 (见图 2) 可以得到如下方程:

$$S_{t+1} - S_t = I_t - O_t \quad (3)$$

式中 S_t 和 S_{t+1}分别表示 t 时段初和 t 时段末的土壤湿度; I_t 和 Q_t 分别表示 t 时段的平均入流量和出流量。

令

$$K_c = \frac{1}{2}\left(\frac{E_p}{W} + K_g\right)$$

式中 K_g 为土壤水出流系数，经过推导[1]，可以得到:

$$S_{t+1} = \frac{1}{1+K_c} \cdot (1-G) \cdot P_t + \frac{1-K_c}{1+K_c} \cdot S_t \quad (4)$$

那么，t 时段第 i 个网格的土壤水出流量为:

$$R_{st,i} = K_g \cdot \frac{S_{t+1,i} + S_{t,i}}{2} \quad (5)$$

式中 $R_{st,i}$为网格土壤水产流量。

4.5 网格单元总产流

网格总产流量即为地表水产流量与土壤水产流量之和，也就是:

$$R_{t,i} = R_{dt,i} + R_{st,i} \quad (6)$$

式中 $R_{t,i}$为网格总产流量。

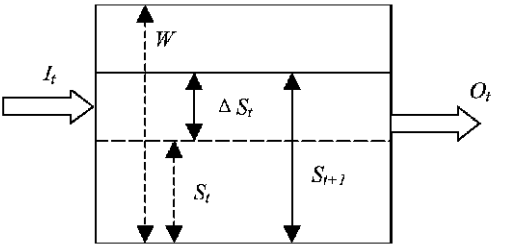


图 2 土壤单元水量平衡示意图

Fig. 2 Water balance of the soil unit

5 DTVGM 汇流模型

DTVGM 采用分级网格汇流方法。所谓分级网格汇流就是根据 DEM 栅格来划分网格

等级, 然后应用汇流模型进行分级汇流演算。定义流域出口断面网格为第一级, 根据每个网格的流向来判断网格等级。例如, 定义所有流入第一级网格的网格为第二级汇流网格, 所有流入第二级网格的网格为第三级汇流网格, 以此类推, 最后得到第 N 级网格。至于汇流模型, 常用的有马斯京根河道演算 (汇流) 模型和动力波河道演算模型[6~10]。

6　DTVGM 在潮河流域的应用

6.1　潮河流域概况

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。潮河, 古称大榆河、濡河, 又称鲍丘 (邱) 水, 因其 "时作响如潮" 而称潮河。发源于河北省丰宁满族自治县草碾子沟南山下, 经滦平县, 自古北口入本市密水县境, 有安达木河、清水河、红门川等支流汇入, 在辛庄附近注入密云水库, 市境内河长 72 km。白河, 古称湖灌水、沽水、沽河、潞水、潞河、溆水、白屿河。河多沙, 沙洁白, 故名白河; 河性悍, 迁徙无常, 俗称自在河。发源于河北省沽源县, 经赤城县, 于白河堡进入本市延庆县境, 东流经怀柔县青石岭人密云县, 沿途有黑河、汤河、白马关河等支流汇入, 在张家坟附近注入密云水库。潮、白两河出库后, 各自排放故道, 于密云县城之西南的河漕村汇合后称潮白河。南流, 经怀柔县、顺义县, 至通县, 沿途有支流怀河、箭杆河来汇, 于通县牛牧屯出本市入河北省境, 东流汇入海河而注渤海。

潮白河介于北运河与蓟运河之间, 与北运、蓟运两河在海河北系合成 "北三河"。水系的北部、西部为燕山, 东部、南部为平原。上下游流域面积总计 19 354 km^2, 其中山区占 87%, 平原占 13%。潮白河及其支流组成潮白河水系, 河道全长 458 km, 北京市境内长 118 km, 本境流域面积 6 531 km^2, 占全市面积 33.4%, 年均径流量 10.22×10^8 m^3, 占全市水系总径流量的 39.4%。两项均居全市首位。潮白河自然落差 1 706 m, 水能理论蕴藏量 10.06×10^4kW。解放后, 在这一水系上修建了密云水库、怀柔水库 2 座大型水库和 5 座中型水库、33 座小型水库, 总库容 46.686 7×10^8 m^3, 亦居全市各水系首位; 以密云水库为引水源, 通向市区的京密引水渠为北京市供水主动脉。潮河、白河的河道在历史上曾多次改道。东汉以前, 潮河、白河各自入海; 北魏时, 在今通县东北 (潞县) 汇合; 以后, 汇流点逐步向北迁移, 至五代在顺义县牛栏山汇流; 明嘉靖三十四年 (1555 年), 为利用潮白河通漕, 经人工治理, 始于密云县西南 18 里之河漕村汇流而合。

随着社会经济的发展, 潮白河水资源开发利用的程度也逐步加深。据不完全统计, 截止 1998 年, 潮白河流域主要水利工程的总库容已超过 48×10^8 m^3, 引水工程的总引水能力大于 3.0×10^8 m^3, 实际最大灌溉面积在 25×10^4 ha 以上。

本研究区域为密云水库以上潮白河流域, 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。初步的研究中, 我们只将 DTVGM 应用于潮河流域。

6.2　潮河流域 DEM 及其信息提取

根据 DEM (分辨率为 100m×100m) 提取出潮白河密云水库以上流域, 进一步提取出潮河流域及其河网, 如图 3 所示 (图中黑色边框内为潮河流域)。

由 DEM 提取出的潮河流域平均高程 854 m, 高程变化范围从 200～2 132 m, 控制面积

为 4 854.5 km^2。水文模型计算网格大小采用 500m×500m, 这样, 整个流域被划分为19 418 个网格单元。

采用单流向法, 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 (见图 4)。

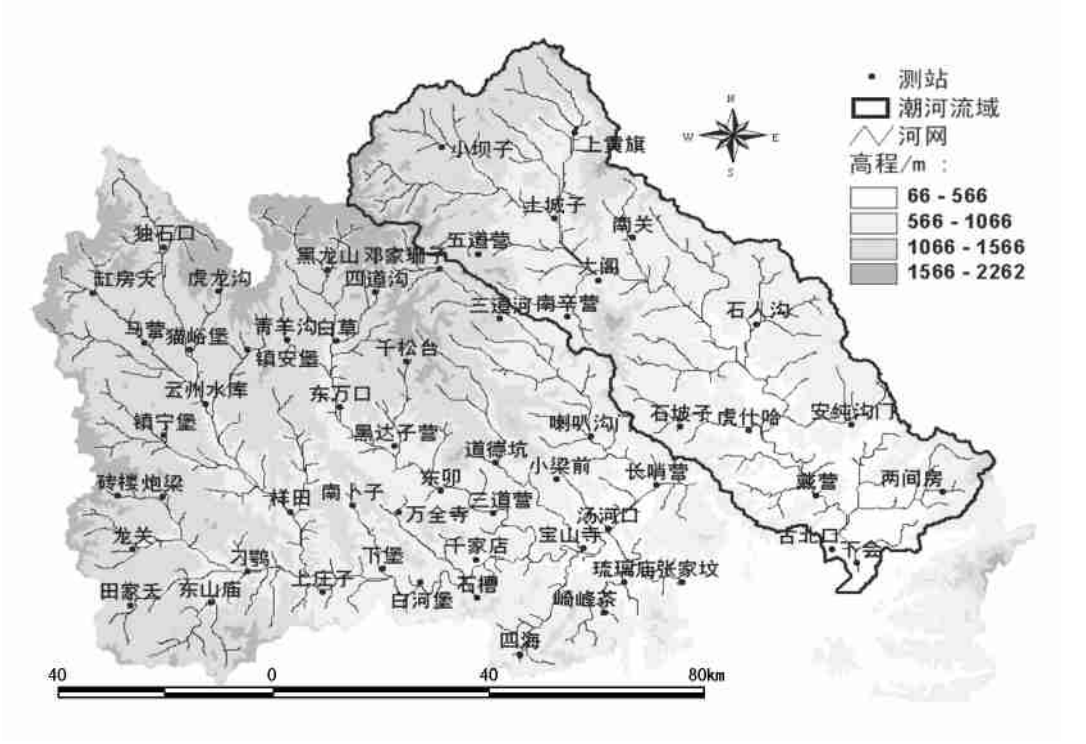


图 3 潮白河密云水库以上流域及其河网图

Fig. 3 Chaobaihe River Basin above Miyun Reservoir

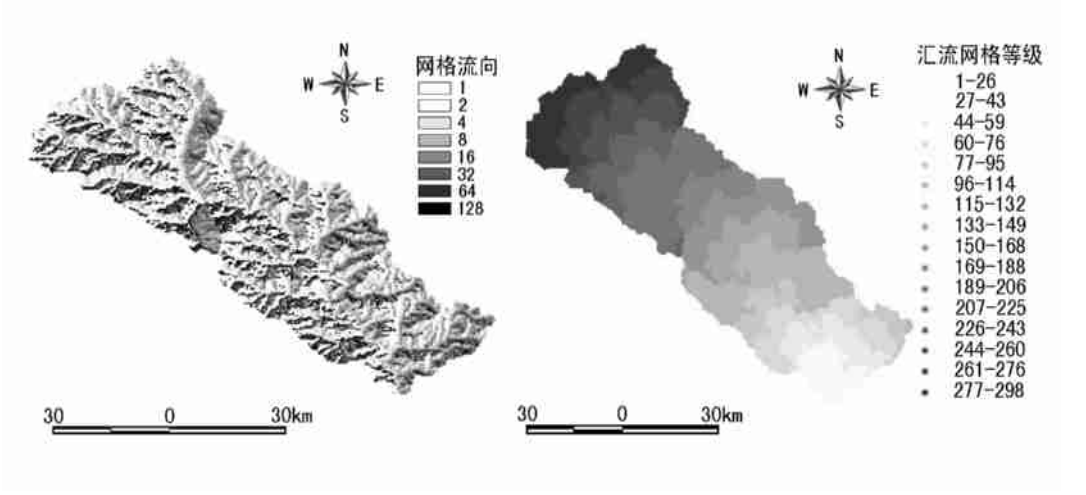


图 4 潮河流域网格流向分布及汇流网格等级划分

Fig. 4 Flow directions and ranked grids of Chaohe River Basin

6.3 潮河流域 DTVGM 模拟结果

DTVGM 的分布式输入模块包括降水空间分布处理[11~14] (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; 水文模型计算部分包括网格单元产流和分级网格动力波汇流。由于分布式模型的计算量非常大, 因此目前只选取 1990 年进行模拟分析。

1990 年潮河流域DTVGM 径流模拟结果见图5 和图 6, 主要流量峰值模拟结果见表1。

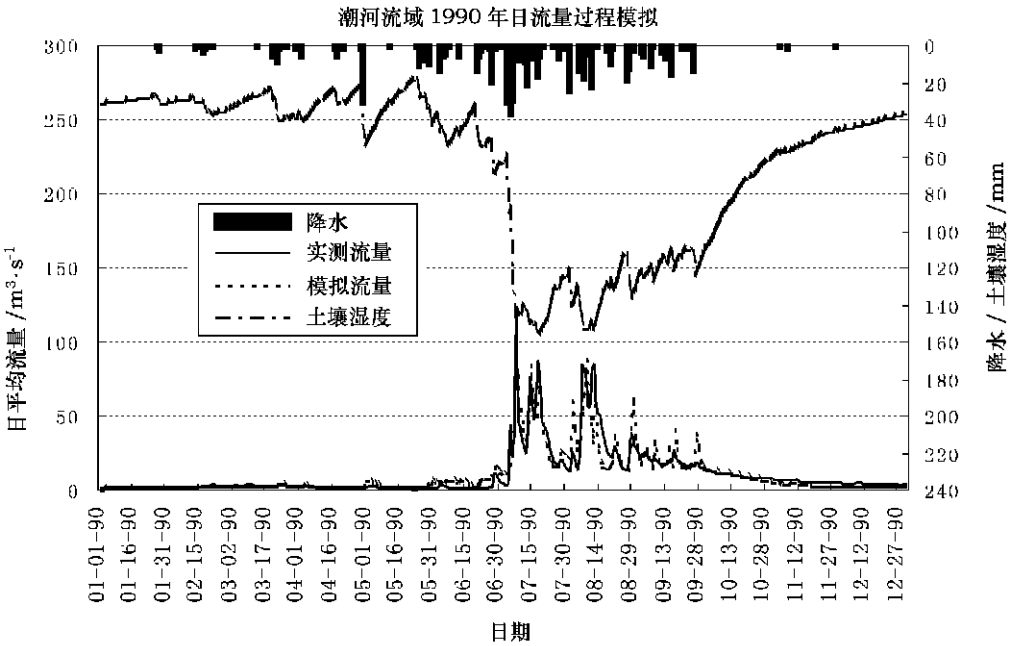


图 5　潮河流域 1990 年实测与模拟径流对比图

Fig. 5　Comparison between Observed and Simulated Runoff of Chaohe River Basin in 1990

表 1　DTVGM 模拟峰值与实测峰值对比表

Tab. 1　Simulated peaks and Observed peaks

实测径流		DTVGM 模拟径流		峰值误差	
日　期	流量/$m^3 \cdot s^{-1}$	流量/$m^3 \cdot s^{-1}$	峰现时间	流量相对误差/%	峰现时间误差/d
1990-07-08	125	101.65	1990-07-08	-18.7	0
1990-07-14	77.2	83.95	1990-07-14	8.7	0
1990-07-18	87.8	75.9	1990-07-18	-13.6	0
1990-08-07	85.7	87.65	1990-08-08	2.3	1
1990-08-12	85.3	76.8	1990-08-12	-10.0	0
1990-08-21	29.1	36.8	1990-08-21	26.5	0
1990-08-29	38.1	60.45	1990-08-29	58.7	0
效率系数: R= 0.85; 水量平衡系数: C_b= 1.00					

注: 效率系数 $R=\left[1-\frac{\sum (Q_c-Q_o)^2}{\sum (Q_o-\overline{Q_o})^2}\right]$; Q_o、Q_c、$\overline{Q_o}$分别为实测流量、模拟流量、实测流量均值[15]。水量平衡系数为模拟总径流与实测总径流之比。

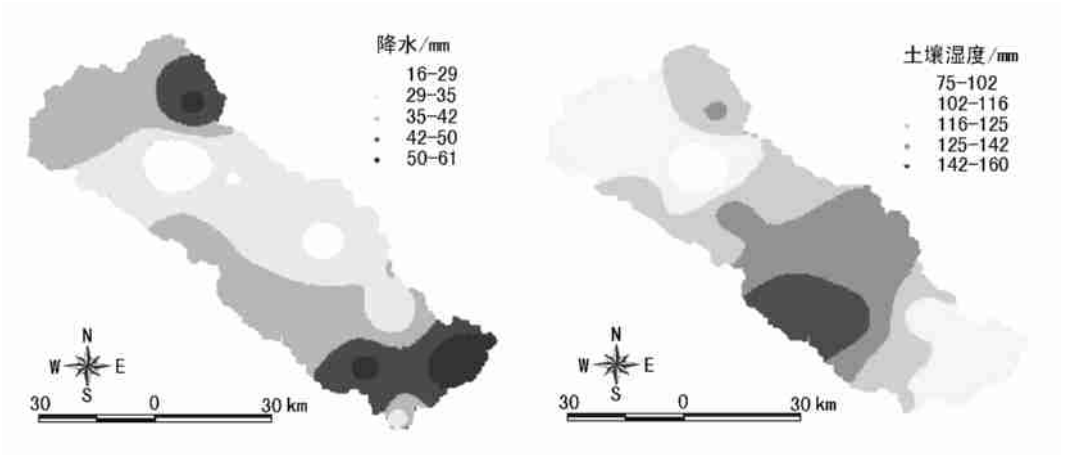


图 6 1990 年 7 月 6 日雨量及土壤湿度空间分布图

Fig. 6 Spatial distribution of precipitation and soil moisture on July 6th, 1990

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很高: 模型效率系数高达 0.85, 水量完全平衡, 不仅峰值误差基本在允许误差 (20%) 范围内, 而且过程线也吻合的很好, 基本上能够满足水资源管理的要求。

7 结语

(1) 在自然变化和人类活动影响下, 流域水文循环存在着明显的时空变异特征, 而分布式水文循环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。水文系统理论模型依据有限的资料通过系统识别方法来确定系统的功能函数, 有比较好的适应能力, 能有效地描述这种非线性特征, 但是在描述时空分布特性上往往存在着不足, 因此, 如何将水文时空变异特性与系统理论结合起来, 是一个国际前沿研究课题。

(2) 时变增益非线性系统模型(TVGM) 通过时变增益因子的引入, 可以描述水文循环系统的输入和输出之间一般的非线性关系, 其产流机制非常简单, 却能够获得与一般 Volterra 泛函级数相同的系统模拟结果。本文将 TVGM 拓展到空间分布处理和时变处理的分布式模型 (DTVGM), 提出了空间分布式信息与系统理论方法相结合的一种新构架, 研制了一种简单而实用的水文模型, 这与使用复杂的完全物理机制模型和概念性模型相比是一个明显的优点。

(3) 直接在栅格上进行产流计算, 不再进行分类、分块或集合, 避免了进一步概化引入的误差。但是因网格数量很大, 所以本文的汇流过程采用分级网格动力波汇流方法, 巧妙地耦合了网格单元产流与分级汇流过程, 大大减小了计算量, 缩短了模型计算时间。

(4) 模型体系比较开放, 能与其他模块相耦合。同时, 与 GIS 空间信息的外部联接方式比较有利于模型的进一步研究。但是, 有关数据空间分布处理方法 (数据同化) 需作更深

入的研究。

(5) DTVGM 这种简单的结构为模型参数与其他空间信息 (如土壤类型及遥感可获取的地表覆被信息, 地质特性指标等) 的耦合提供了可行的途径, 是 DTVGM 深入研究的重点和创新点。

(6) 此次研究只涉及到潮河流域, 在后面的研究中不仅会针对 DTVGM 本身作深入的研究, 而且其应用研究会扩展到整个潮白河流域 (密云水库以上), 在流域 DEM 模型基础上, 集成实验流域水循环机理研究成果, 通过 RS 获取流域陆面生态变化、人类活动影响信息, 建立潮白河入库流域的分布式水循环模型。

参考文献:

[1] 王纲胜. 分布式时变增益水文模型研究[D]. 硕士学位论文. 武汉: 武汉大学, 2002.

[2] Xia Jun. Real-Time Rainfall-Runoff Forecasting by Time Variant Gain Models and Updating Approaches[A]. Research Report of the 6th International Workshop on River Flow Forecasting[C]. UCG, Ireland, 1995.

[3] 杨针娘, 曾群柱. 冰川水文学[M]. 重庆: 重庆出版社, 1999. 159-203.

[4] 刘新仁. 大尺度水文模拟若干问题的讨论, 淮河流域能量与水分循环研究(一)[M]. 气象出版社, 1999. 221-228.

[5] Arnold J A, Williams J R, Srinivasan R et al. Model theory of SWAT[EB/OL]. USDA, Agricultural Research Service Grassland, Soil and Water Research Laboratory, 1997.

[6] Beven K J. Rainfall-Runoff Modelling[M]. John Wiley & Sons Ltd, 2001. 136-145.

[7] Dawen Yang, Srikantha Herath, Katumi Musiake. Comparision of different distributed hydrological models for characterization of catchment spatial variability[J]. Hydrological Progresses, 2000, 14: 403-416.

[8] Dawen Yang, Srikantha Herath, Katumi Musiake. Development of a geomorphology-based hydrological model for large catchments[J]. Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, 1998, 42: 169-174.

[9] Yutaka Ichikawa, Yasuto Tachikawa, Michiharu Shiiba. Lumping slope runoff model using digital elevation model and steady state assumption[J]. Water 99 Joint Congress-Brisbane, Australia, 1999(6-8): 113-118.

[10] Kuniyoshi Takeuchi, Tianqi Ao and Hiroshi Ishidaira. Introduction of block-wise use of TOPMODEL and Muskingum-Cunge method for the hydro-environmental simulation of a large ungauged basin[J]. Hydrological Science, 1999: 633-646.

[11] Singh V P 著. 赵卫民 等 译. 水文系统: 降雨径流模拟(Hydrologic Systems: Rainfall-Runoff Modeling)[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1999.

[12] Singh V P 著 3 赵卫民 等 译. 水文系统: 流域模拟(Hydrologic Systems: Watershed Modeling)[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1999.

[13] 罗乔林. 数据处理之进展——见于气象四维同化问题[J]. 系统工程理论与实践, 1997(9): 98-103.

[14] Singh V P. Mathematical modeling of watershed hydrology[A]. Advanced seminar on education of water-sciences, Tsinghua University, Sichuan University, 2001(14- 26): 1-26.

[15] 叶守泽, 夏军. 水文系统识别(原理与方法)[M]. 北京: 水利电力出版社, 1989. 99-110.

A Research on Distributed Time Variant Gain Model: a Case Study on Chaohe River Basin

WANG Gang-sheng[1], XIA Jun[1,2], TAN Ge[1], LU Ai-feng[3]

(1. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101 China; 2. Wuhan University, Wuhan 430072 China; 3. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi 830011 China)

Abstract: By probing into the evolvement of distributed hydrological model and considering real conditions of the arid or semi-arid regions in China, this paper advances Distributed Time Variant Gain Model (DTVGM) by coupling the mechanism of water cycle with system theory. The distinguish feature of TVGM is that runoff generation contribution can be analyzed by a set of time variant gain parameters (g_1, g_2, etc.). The rainfall-runoff relationship characterized by TVGM is just a typical nonlinear behavior.

DTVGM is developed based on TVGM. It picks up such information as the gradient of the slope, the direction of the slope, the water current path, as well as the boundaries of the river network and the watershed of the land surface units with DEM by establishing itself on the basis of GIS/DEM. It simulates the movement of the water in the soil-vegetation-atmosphere (SVAT) system, describes the relation between the cellular grids in the horizontal direction, and performs mathematical calculations of the surface water and the groundwater on the watershed cellular grids divided by DEM.

DTVGM includes two components: one is runoff generation process on grid elements; the other is flow routing process based on ranked grids. At present, the runoff generation process is divided into two layers in the vertical direction: the upper layer is the surface flow; the lower layer is the subsurface flow. On the other hand, the kinematic wave models are applied to simulate the flow routing process.

At the end of the paper, the distributed hydrological model of Chaohe River Basin is established by applying DTVGM. The research results indicate that the application of DTVGM is successful, which can satisfy the requirement of water resources management.

Key words: Distributed Hydrological Model; System Theory; Chaohe River Basin