

水文非线性系统与分布式时变增益模型^{*}

夏 军^{**} 王纲胜 谈 戈 叶爱中 黄国和

(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; ③ Faculty of Engineering, University of Regina, Canada)

摘要 论述了以 Volterra 泛函级数表达的流域降雨-径流非线性系统理论与概念性模拟方法. 依据流域数值高程模型、遥感信息和单元水文过程, 提出了水文非线性系统理论的时变增益模型 (TVGM) 和推广应用到流域时空变化模拟的分布式时变增益模型 (DTVGM). 研究表明, 除了常用的非线性系统分析方法之外, 从复杂水文关系研究中另辟蹊径, 提出一种简单关系的非线性系统分析是完全有可能的. 时变增益水文模型的提出及其与一般性水文非线性系统的联系就是一个例证. 水文非线性系统方法与分布式流域水文模拟结合的 DTVGM 模型, 能够发挥水文系统方法与分布式水文模拟方法相结合的优点, 探索环境变化下的流域水文模拟问题. 将 DTVGM 分别应用到河西走廊干旱地区的黑河流域和华北地区潮白河流域实例研究, 模拟了水文时空变化以及陆面覆被变化与水文影响分析, 取得了较好的效果, 说明了其特色和应用价值.

关键词 水文系统 非线性 时变增益模型 分布式水文模拟

水文学是地球系统科学的一个重要分支. 为了研究流域水文水资源的变化和相关的环境问题, 水文系统方法论得到了发展. 1973 年, Dooge 出版了有关水文系统的线性理论的专著^[1]. 1988 年, 美国 Singh 主编了水文系统方面的丛书^[2]. 2000 年, 黄河水利委员会水文局组织翻译了 Singh 的另一部著作《水文系统: 流域水文模拟》^[3]. 国内葛守西^[4]对水文线性系统理论方法做了比较系统的研究. 在发展水文线性系统理论的同时, 国内外许多水文学者也一直探索水

文系统的非线性问题^[5-23]. 原因是实际的水文现象远比线性系统描述的问题复杂. 目前, 尽管解决水文系统非线性问题的普适性理论还没有完全被建立, 但是, 这方面的试验研究、理论与方法研究一直在不断地发展.

例如, 早在 20 世纪 60 年代初, Minshall^[20]在一个 $1.093 \times 10^5 \text{m}^2$ 的天然实验流域上利用观测资料, 详细地推求了 5 次雨强不同的洪水单位线明显变化规律. 以后 Amorocho^[5]等用多种途径作了检查. Min-

2003-10-22 收稿, 2004-02-04 收修改稿

^{*} 中国科学院 2000 年度“百人计划”项目、中国科学院知识创新工程项目(批准号: KZCX2-SW-317/CX10G-E01-08)、国家自然科学基金(批准号: 50279049)和中国科学院海外杰出学者基金资助

^{**} E-mail: jxia_mail@263.net

shall的资料已成为说明天然流域汇流存在非线性现象的有力证据之一。

1963 年, Amorocho^[6]为了认识线性水文系统单位线理论固有的误差和适用范围, 他基于非线性系统 Volterra 方程, 定义了一个流域系统的线性度量函数 λ , 即

$$\lambda(t) = \frac{\int_{-\infty}^t h(\tau)x(t-\tau)d\tau}{\sum_{n=1}^{\infty} \int_{-\infty}^t \cdots \int_{-\infty}^t h_n(\tau_1, \dots, \tau_n) \prod_{j=1}^n x(t-\tau_j) d\tau_1 \cdots d\tau_n},$$

并利用实验室人工降雨设备, 研究了入流 $x(t)$ 分别为阶跃函数、矩形输入和矩形序列输入三种情况下的流量过程。实验表明, 除洪水过程退水段尚符合线性关系之外, 降雨与直接径流之间存在不可忽略的非线性问题。

1975 年, Singh^[2]利用室内人工降水实验流域的 210 次观测资料, 对非线性运动波模型和线性系统理论的 Nash 模型作了比较分析。结果表明, 地表径流过程具有高度的非线性, 而线性理论只能给出它的近似解。在预测径流过程线的比较中, 非线性模型优于 Nash 线性模型。

20 世纪 80 年代后, 随着水文信息技术手段的提高, 水文非线性系统识别理论得到了应用与发展^[7~19]。例如, 夏军提出了针对水文非线性复杂模型的系统识别理论, 解决建立非线性模型的难点问题, 其中包括水文非线性分析与系统识别原理, 水文非线性系统可识别性理论及其判别的解析与准解析方法^[15,16,19]。

2004 年, 张士锋等^[21]利用中国科学院地理科学与资源研究所的室内人工降雨设备, 在 $2.77\text{m} \times 7.63\text{m}$ 不透水单坡和河槽上, 进行了不同下垫面条件下的降雨径流关系的试验研究, 重点分析降雨径流过程的驱动因子与非线性变化问题。179 场次的实验分析表明, 无论是降雨历时还是降雨强度都会影响流域汇流的滞时。在部分汇流条件下, 水文系统的非线性十分明显, 线性系统理论的单位线方法必须进行适当的非线性校正。

1989~1995 年, 夏军参加爱尔兰国立大学戈尔威学院(UCG)“国际河川径流预报”研讨班合作研究过程中, 通过世界不同地区的 40 多个流域的实测水文资料分析, 提出了与复杂非线性 Volterra 泛函模型相等的时变增益系统的简单关系^{1,2)}。以后, 在此基础上发展了一种时变增益的水文非线性系统模型(即 Time Variant Gain Model, 简称为 TVGM 模型), 通过实际检验, 其水文过程模拟的效率明显优于线性水文系统模型^[19,23]。

20 世纪 90 年代后, 由于研究人类活动和气候变化影响下的需要, 流域水循环模拟已经从集总式扩展到分布式系统。分布式水文模型成为水文学发展新的热点之一^[24~28]。分布式水文模型的开发不仅需要单元水文物理机理的支撑, 而且需要获得大量的流域空间分布数据信息和不同水文单元的集成工作。因此, 水文尺度以及非线性问题也成为分布式水文模型应用中急需研究与解决的关键问题。目前, 国内外开发的分布式水文模拟技术主要特点是将水文物理模型或者概念性模型或系统模型与数字高程模型(DEM)相结合, 通过地理信息系统(GIS)充分提取流域重要水文特征参数信息, 如坡度、坡向、水沙运移方向、汇流网络、流域界线等。通过反映土地利用/覆被变化(LUCC)的遥感信息(RS)和与单元水循环过程的集成, 揭示流域下垫面变化和气候变化作用下的流域水循环规律。

当前国内外开发的流域分布式水文模型大体上有 3 种途径: 1) 分布式水文物理模型, 即在山坡水文学基础上, 基于完全的水流运动物理方程和 DEM 信息, 应用数值分析求解的水文物理模型, 如国外知名的 SHE 模型^[26]等; 2) 分布式概念性水文模型, 即通过降雨分区或者在每一个网格单元(或子流域)上将现有的概念性水文单元, 通过 DEM 分水系联系成整体的水文模型, 如分布式的新安江模型^[27]和国外的 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型等^[28]; 3) 半分布式水文模型, 即基于 DEM 推求地形空间变化

1) Xia Jun. Nonlinear system approach. Research Report of the 3rd International Workshop of River Flow Forecasting. UCG, Ireland. 1989

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

信息,利用地形指数模拟水文响应、水文输入仍然是流域平均化的水文模型,如TOPMODEL^[24,25].第1类模型有比较好的物理基础,在水文学理论发展方面有重要意义.但是,面临的主要问题是:现行的水文物理模型主要基于小尺度山坡水文过程观测设计的,存在参数多和相互不独立等问题,导致实际应用中确定模型参数的困难与不确定性.在推广到实际流域时受到了相当的限制.另外,这类模型用于描述大尺度水文过程存在一定的缺陷,需要解决众所周知的水文尺度问题.第2和第3类分布式水文模型在实际应用中发展较快.但是多数是传统的水文概念性模型方法,如新安江模型等.TOPMODEL基于DEM推求了地形指数的概率分布函数,但是模型的实际应用与集总式水文模型方法相当.无论是新安江模型还是TOPMODEL,流域产流机制多半有“蓄满”或“饱和”产流的假定,较适合南方湿润地区.在半干旱、半湿润地区,由于假定与实际存在明显差别,需要改进或探讨新的模型.

21 世纪水文模拟新的挑战是如何解决发展中国家由于资料条件限制和面对环境变化需求的流域水文模拟问题.例如,2003 年 7 月在日本召开的第 23 届国际大地测量及地球物理学联合大会(IUGG),国际水文科学协会(IAHS)专门提出未来 10 年水文科学研究的一个热点,即针对发展中国家水文观测资料不全甚至无测站流域的水文预测科学研究计划(即PUB计划)^[29].研究表明,在资料条件有限和有不确定性干扰的情况下,水文系统理论方法似乎有更大的“弹性”,即对环境变化和资料不足的适应能力.另一方面,分布式水文物理方法能够提供水文变化的物理解释和对水文过程内在规律的认识.因此,加强水文物理方法与水文系统理论方法的结合,探索变化环境下的水文系统非线性机理,建立既有理论意义又简便实用的分布式流域水文模型,一直是水文学家面对的重要课题.

基于这样的背景,本文提出一种试图将水文非线性系统理论与水文物理方法结合的分布式水文模型研究成果.首先,论述水文非线性系统与时变增益水文模型(TVGM),说明时变增益水文模型(TVGM)与一般性水文非线性系统表达关系之间的内在联系.

然后,提出一种与流域 DEM 结合的分布式时变增益水文模型(DTVGM)以及初步的应用与检验.目的是说明对流域水文系统非线性问题,设法“从复杂关系中找到一种简单关系”的研究是完全有可能,时变增益水文模型的提出及其与一般性水文非线性系统的联系就是一个例证.水文非线性系统方法与分布式流域水文模拟结合,将是适应环境变化条件下流域分布式水文模拟的一种有效途径.

1 水文非线性系统与时变增益模型(TVGM)

在水文非线性系统理论及其数学模拟研究中,有两种不同的方法.一种是着眼于宏观从整体上考察系统输入-输出非线性关系的Volterra泛函级数,它是一种有普适性特点的非线性积分方程模型类^[5~13,19],一般形式为

$$\begin{aligned} y(t) = & h_0 + \int_{-\infty}^t h_1(\tau)x(t-\tau)d\tau \\ & + \int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^t h_2(\tau_1, \tau_2)x(t-\tau_1)x(t-\tau_2)d\tau_1 d\tau_2 + \cdots \\ & + \int_{-\infty}^t \cdots \int_{-\infty}^t h_n(\tau_1, \cdots, \tau_n)x(t-\tau_1) \cdots x(t-\tau_n)d\tau_1 \cdots d\tau_n, \end{aligned} \quad (1)$$

式中, x 为系统输入(如降雨), y 为系统输出(如径流); $h_1, h_2, \cdots, h_n$ 分别称为一阶系统响应函数、二阶系统响应函数,以及 n 阶系统响应函数,其阶数表示系统的非线性程度; $\tau, \tau_i (i=1, 2, \cdots, n)$ 为时间积分变量.在这里,系统的核函数表达了系统的功能.对于降雨-径流系统,核函数主要反映流域系统的基本特征和综合效应.

在实际应用时,由于线性模型是水文系统的主要部分,可以认为二阶泛函级数已能充分反映地表径流的非线性特性.非线性水文系统模型可近似表达式为

$$\begin{aligned} y(t) = & \int_0^L h(\tau)x(t-\tau)d\tau \\ & + \int_0^L \int_0^L g(\tau, \sigma)x(t-\tau)x(t-\sigma)d\tau d\sigma, \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $h(\tau)$ 是线性系统响应函数; $g(\tau, \sigma)$ 为非线性系统二阶响应函数; L 为记忆长度; τ, σ 为时间积分变量.

另一种则是基于微观尺度描述单元系统质量守恒与动力学过程的微分方程组模型.流域水文系统

的非线性微分方程一般表达式为^[30,19]

$$\left. \begin{aligned} \text{平衡方程: } \frac{dS}{dt} &= x - y \\ \text{动力方程: } S &= \sum_{m=1}^M a_m(x, y) \frac{d^{(m)}x}{dt^{(m)}} + \sum_{n=1}^N b_n(x, y) \frac{d^{(n)}y}{dt^{(n)}} \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

式中, S 是单元水体调蓄量(m^3); x 为单元水体入流量(m^3/s); y 是单元水体出流量(m^3/s); $a_m\{\cdot\}$ 是 m 阶入流率的非线性系数; $b_n\{\cdot\}$ 为 n 阶出流率的非线性系数。

需要指出, 尽管水文非线性系统的表达形式(1)与(3)不同, 系统的关系比较复杂, 但是在一定条件下, 二者之间也是可互为转换的。

例如, 假定水文系统单元水体的蓄量 S 与出流量 y 有非线性幂函数关系, 简记为

$$\left. \begin{aligned} \frac{dS_i(t)}{dt} &= x_i(t) - y_i(t) \\ y_i(t) &= aS_i^m(t) \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

式中, a 是单元体蓄水参数; m 为非线性调蓄参数。进一步将流域系统构想为集总入流的非线性梯级, 可以从理论上推导出水文非线性微分模型(4)所对应的 Volterra 非线性卷积参数模型, 即(2)式的系统表达式(理论证明见文献[13, 19]), 其中的线性与非线性系统响应函数分别为

$$\begin{aligned} h(t) &= \frac{(t/K)^{n-1}}{K(n-1)!} e^{-t/K} \\ g(\tau, \sigma) &= b \left[h'_n(\tau) \sum_{j=1}^n h'_j(\sigma) + h'_n(\sigma) \sum_{j=1}^n h'_j(\tau) - h'_n\{\max(\tau, \sigma)\} \right], \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $h'_j(t) = \frac{(t/K)^{j-1}}{(j-1)!} e^{-t/K}$, K 为纳希单位线模型的

调蓄参数。对(5)式表达的概念性非线性水文模型, 系统特征主要取决于参数(n, K, b)。

传统的水文非线性系统分析, 主要求解非线性系统的响应函数或者参数集^[7~16], 经常遇到非线性系统求逆的“病态”、“可识别性”等问题。在非线性

数学模型应用方面, 需要发展一些有效的水文非线性系统识别技术与方法^[19]。由于非线性系统识别问题的复杂性, 在一定程度上也限制了水文非线性理论与方法的应用。长期以来, 能否在复杂系统关系中找到一种简单的关系, 成为水文非线性理论研究面对的一个科学问题。换句话说, 能否寻求一种简单的系统关系, 它能够等价地模拟(2)式表达的复杂非线性水文过程?

1989~1995 年, 夏军赴爱尔兰参加由 Nash 教授等主持的“国际河川径流预报研讨班”, 利用中国以及世界不同地区的水文资料, 开展了水文系统理论方法的应用与比较研究。通过大量实际资料分析, 发现一种时变增益的系统关系, 以后逐步发展为一种成为时变增益的水文非线性系统模型。主要贡献是, 利用爱尔兰国立大学收集的世界多个不同流域的水文长序列资料分析, 发现水文时变增益因子并非常数, 而是与土壤湿度有关系, 为时变增益因子。一般情况下, 水文时变增益因子, $G(t)$, 与土壤湿度(例如用土壤前期影响因子 $API(t)$ 近似)之间的简单关系可以表达为

$$G(t) = g_1 API^{g_2}(t), \quad (6)$$

式中, g_1 与 g_2 是时变增益因子的有关参数; $API(t)$ 可采用单一水库的线性系统模拟^[13,14], 即:

$$\begin{aligned} API(t) &= \int_0^t U_0(\sigma) X(t-\sigma) d\sigma \\ &= \int_0^t \frac{\exp(-\frac{\sigma}{K_e})}{K_e} X(t-\sigma) d\sigma, \end{aligned} \quad (7)$$

式中, K_e 是与流域蒸发和土壤性质有关的滞时参数。

利用水文时变增益因子的系统概念, 可以建立结构十分简单、仅有少量几个参数的时变增益水文非线性概念性模型(TVGM), 其中:

流域产流过程表达为

$$R(t) = G(t)X(t), \quad (8)$$

式中, $X(t)$ 是 t 时间的降水; $R(t)$ 是 t 时间的径流。

流域汇流过程可表达为

$$Y(t) = \int_0^m U(\tau) R(t-\tau) d\tau, \quad (9)$$

式中, $U(\tau)$ 是系统的响应函数。

从理论上可以证明, 基于(6)~(9)式简单关系的水文系统模拟, 可以获得与复杂的 Volterra 非线性系统响应模型(2)同构的系统关系.

譬如, 将(6)式做台劳级数展开, 仅取前两项, 有近似的时变增益因子

$$G(t)=\alpha+\beta API(t),$$

(10)

式中, α 和 β 是时变增益因子模型参数. 将(7)式代入上式, 进一步再将(10)式代入(8)式, 可以分析流域产流的非线性过程关系, 即:

$$\begin{aligned} R(t) &= G(t)X(t) \\ &= (\alpha + \beta API(t))X(t) \\ &= \alpha X(t) + \beta API(t)X(t) \\ &= \alpha X(t) + \int_0^t \beta U_0(\sigma)X(t-\sigma)X(t)d\sigma. \end{aligned}$$

(11)

最后, 将(11)式代入(9)式的流域系统响应关系, 得到的是与沃 Volterra 非线性系统响应模型(2)式完全同构的系统关系, 即:

$$\begin{aligned} Y(t) &= \int_0^m U(t-\tau)R(\tau)d\tau \\ &= \int_0^m \alpha U(t-\tau)X(\tau)d\tau \\ &\quad + \int_0^m \beta U(t-\tau)API(\tau)X(\tau)d\tau \\ &= \int_0^m \alpha U(t-\tau)X(\tau)d\tau \\ &\quad + \int_0^m \int_0^\tau \beta U_0(t-\sigma)U(t-\tau)X(\sigma)X(\tau)d\tau \\ &= \int_0^m H_1(t-\tau)X(\tau)d\tau \\ &\quad + \int_0^m \int_0^\tau H_2(t-\sigma,t-\tau)X(\sigma)X(\tau)d\tau, \end{aligned}$$

(12)

式中, $H_1(t-\tau)=\alpha U(t-\tau)$, $H_2(t-\sigma,t-\tau)=\beta U_0(\tau-\sigma)U(\tau-\sigma)$; τ 和 σ 都是时间积分变量; m 为记忆长度.

(12)式的系统分析表明, 引入时变增益的概念, 使得过去比较复杂的水文非线性系统模拟(Volterra非线性泛函级数)能够用一种简单的水文系统概念性模型(TVGM)实现, 二者之间有内在的联系. 夏军的进一步研究还表明^[22,23], 该模型容易实时校正作业, 也容易扩展到非线性季节扰动的水文系统. 通过实际资料检验, TVGM非线性模型预报效率要明显优于线性水文系统方法(部分结果见表 1).

2 分布式时变增益水文模型(DTVGM)

分布式时变增益水文模型(简记为DTVGM)是将单元时变增益(TVGM)通过DEM/GIS拓广到流域分布式水文模拟的一种新的系统分析途径. 它建立在GIS/DEM的平台上, 通过GIS/RS和流域系统网格化过程提取陆地表层空间变化面信息. 它结合蒸散发、融雪等物理过程模拟, 在流域单元网格上进行非线性地表水产流计算, 基于水量平衡方程和蓄泄方程建立土壤水或(和)地下水产流模型. 它利用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^[19,31].

DTVGM 由分布式输入数据处理、网格单元产流模型以及分级网格汇流模型等多个部分组合而成. 它的特点是: 通过 DEM 网格化和气候-水文变量的空间数据处理, 描述流域降水、气温、蒸发和下垫面覆被空间分布的变化; 通过土壤湿度(描述土壤含水量

表 1 时变增益水文非线性模型与线性模型的效率比较

类 别	流域名称	流域面积/km ²	国家名称	模型参数		率定期效率R ²		预报期效率R ²	
				<i>m</i>	<i>K_e</i>	TRLM	TVGM	TRLM	TVGM
A	Bird Creek	2344	美国	10	20	59.24	87.67	-52.70	43.29
	Wolombi	1580	澳大利亚	10	20	46.23	83.57	-13.37	36.70
B	Kizu	1445	日本	10	20	80.00	87.96	67.41	75.17
	柴坪	2370	中国	40	40	56.68	75.12	61.63	77.37
	西川	3092	中国	10	20	71.95	87.54	53.91	74.75
C	Nam Mune	104000	泰国	30	100	50.27	78.89	54.09	85.78
	大清江	61780	中国	10	20	70.12	83.96	70.62	78.31
	白河	15300	中国	10	20	79.28	84.34	82.96	88.60
	杨县	23805	中国	10	20	72.44	87.11	61.26	80.04

A, 水文资料有明显不一致性特点的代表性流域(模型率定期 6 年, 预报检验期 4 年); B, 代表性的中小流域; C, 代表性的大中流域. TRLM, 总径流线性响应模型; TVGM, 时变增益模型

大小的一个指标)这一重要物理量的变化将水文循环中的产汇流过程联系在一起, 实现基于网格和河网的流域分布式产汇流模拟, 其中产流发生在每个网格上, 产流模型在垂直方向上可以划分为两层或者多层. 以地表两层模式为例, 上层为地表产流(地表水), 下层统称为壤中流. 流域的水源随海拔而变化.

图 1 所示是应用到河西走廊黑河流域上游(流域出口为莺落峡)的 DTVGM 模型结构. 其中, 高寒山区的水源主要是由冰川和积雪融水补给, 而在中高山区为融水和雨水混合补给水源, 到中低山区主要为雨水补给. 汇流则通过划分“网格等级”的方法进行概化的河流运动波过程联系起来. 由于 DTVGM 模型组合的灵活性, 其模型结构可以针对实际研究对象的区域特性和流域水文模拟的共性具体加以确定.

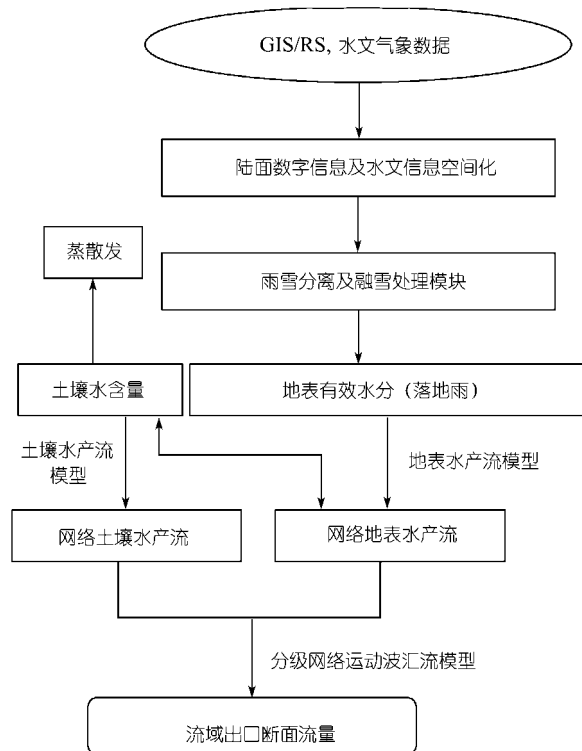


图 1 黑河干流山区 DTVGM 结构示意图

DTVGM 模型的特色为水文系统理论与分布式模型结合, 有明确的水文意义; 易于建立水文参数与土地利用/覆被变化联系; 模型简单实用. DTVGM 既有分布式水文概念性模拟的特征, 同时具有水文系统分析适应能力强的优点, 适宜水文资料信息不完

全或者有不不确定性干扰条件下的分布式水文模拟与分析, 研究降水变化和流域下垫面变化对水文时间空间变化的影响.

建立 DTVGM 的基本思路是:

(1) 流域陆面数字信息及水文信息空间化 通过流域GIS和数字高程模型(DEM)网格化平台以及气温、降水空间插值或同化技术, 获取流域陆地表面单元坡度、流向、水流路径、河流网络、流域边界、土地覆被以及水文气象输入变量的空间变化信息. 其中, 网格单元蒸发模拟涉及到蒸发能力和实际蒸发的计算. 蒸发能力主要决定于可供蒸发的潜热. 在与大气环流模型(GCMs)连接的水文模型中, 可依据气温、湿度和太阳辐射资料, 利用Penman-Monteith方法、Priestley-Taylor方法和Hargreaves方法加以估算^[32]. 实际蒸发的估算一方面决定于蒸发能力, 另一方面受控于土壤湿度的大小. 通过研究与分析, 可以建立实际蒸发 E_a 与蒸发能力 E_p 之间的联系^[31,32], 如 $E_a = E_p \cdot f(S/W)$, 其中 S 为土壤湿度; W 为饱和土壤湿度; $f(S/W)$ 是 (S/W) 的函数.

(2) DTVGM的网格单元产流模拟 根据时变增益非线性产流的概念, 网格单元地表水产流量为 $R_d = g_1 \cdot S^{g_2} \cdot P$, 式中 R_d 为地表产流, S 为土壤湿度, P 为降水, g_1 与 g_2 是时变增益子模型参数. 进一步, 引入无因次量 S/W 代替 S , t 时段第 i 个网格产生的地表径流可以表示为 $R_{dt,i} = g_1 \cdot (S_{t,i}/W_i)^{g_2} \cdot P_{t,i}$, 式中 $R_{dt,i}$ 为网格地表产流量(mm), $S_{t,i}$ 为网格土壤湿度(mm), W_i 为网格的饱和土壤湿度, $P_{t,i}$ 为网格雨量(mm). 单元网格的土壤水产流模型可基于水量平衡与动力调蓄的关系求得. t 时段第 i 个网格的土壤水产流量(mm) $R_{st,i} = K_g \cdot \frac{S_{t+1,i} + S_{t,i}}{2}$, 式中 S_t 和 S_{t+1} 分别表示 t 和 $t+1$ 时段的土壤湿度, K_g 为土壤水出流系数. 网格总产流量 $R_{t,i}$ 即为地表水产流量 $R_{dt,i}$ 与土壤水产流量 $R_{st,i}$ 之和, 即: $R_{t,i} = R_{dt,i} + R_{st,i}$.

(3) DTVGM流域汇流模拟 DTVGM采用分级网络运动波汇流方法. 所谓分级网络汇流就是根据DEM栅格来划分网格等级, 然后应用运动波汇流模型^[24,33]进行连续汇流演算. 定义流域出口断面网

格为第 1 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 1 级网格的网格为第 2 级汇流网格, 所有流入第 2 级网格的网格为第 3 级汇流网格, 以此类推, 最后得到第 N 级网格.

从径流形成的物理过程的观点看, 产流和汇流过程是交替进行、难以彼此分割的整体. 因此, 本文 DTVGM 模型中的产流和汇流实际上也并非两个完全独立的过程. 在产流模型分析中, 实际上包括了简单的山坡汇流过程, 即用不同的调蓄系数表达地表径流和壤中流向河道的汇流, 当这些径流成分进入河道之后, 都成为河道水流. 河道洪水演算有许多相当成熟的水力学和水文学方法, DTVGM 即采用运动波模型进行汇流演算. 关于运动波模型中圣维南方程组的数值解法有很多, 如有限差分方法^[18]等. 目前, DTVGM 已经开发为水文模拟系统平台, 便于操作与应用.

(4) DTVGM 模型的应用 DTVGM 分别应用到西部干旱-半干旱地区的黑河干流山区流域和半湿润的华北地区潮白河流域水文时空变化模拟, 以及陆面覆被变化与水文影响分析的实例研究. 其中分布式水文模型运行效果的主要评价指标是模型效率系数(R^2)、峰值模拟相对误差($\Delta Y\%$)和水量平衡系数等. 模型效率系数定义为^[34]

$$R^2 = \frac{(F_0 - F)^2}{F_0^2},$$

式中, $F_0 = \sum_{k=1}^N [Y(k) - \bar{Y}]^2$, $F = \sum_{k=1}^N [Y(k) - \hat{Y}(k)]^2$, $Y(k)$ 是日径流量实测值, $\hat{Y}(k)$ 日径流量计算值, $\bar{Y}$ 日径流量

均值.

黑河干流山区流域面积为 10009 km², 是黑河流域的主要产流区. 建立分布式流域水文模型, 分析西部内陆地区水资源的演变规律, 对于科学地配置水资源、保护下游绿洲生态有重要意义. 由 DEM 提取出的流域平均高程为 3670 m, 高程变化范围为 1737~5010m. DTVGM 水文模型计算网格尺度采用 500m×500m, 整个流域被划分为 38277 个网格单元, 汇流网格被划分为 456 级. 考虑到该流域为高寒山区, DTVGM 中采用物理模拟方法描述融雪径流过程^[35]. 需要说明, 黑河干流山区降水-径流时空变化比较剧烈, 水文测站较少, 建立完全物理机理的分布式水文模拟十分困难. 本文采用 DTVGM 的水文系统方法与有物理基础的分布式水文模拟的结合, 较好地克服了这个问题. 应用该流域山区水文控制站莺落峡 1990~1995 年 6 年的实测资料进行分析和检验, 其中 1990~1992 资料建立模型, 1993~1995 年资料检验模型. DTVGM 的模拟效率和洪峰模拟相对误差结果见表 2. 实际资料检验说明, 黑河干流山区水文日径流过程模拟平均效率达 0.75 以上. 模拟与实测流量过程线在趋势上吻合较好 (如图 2 所示), 尤其是较大的流量模拟精度很高.

潮白河密云水库以上流域 (以下简称潮白河流域) 总面积为 13846 km², 是目前首都北京市唯一的地表水源地. 但是, 20 世纪 80 年代以后入库径流明显减少, 水资源短缺问题比较突出. 流域覆被变化以及人类活动对水文变化的影响是目前迫切需要研究的问题

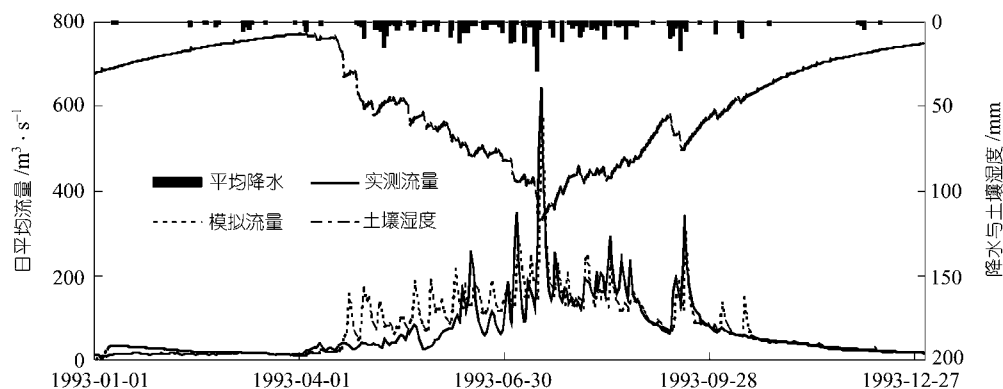


图 2 黑河流域莺落峡站 1993 年日径流过程模拟示意图

表 2 黑河干流山区 DTVGM 模型效率与峰值误差比较

年份	降雨/mm	实测年径流/mm	计算年径流/mm	模型效率系数 R^2	日径流洪峰值/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$		
					实测值	模拟值	误差/%
1990	346.4	158.23	166.23	0.80	485.0	479.5	1.1
1991	249.9	127.39	117.62	0.71	205.0	138.7	32.3
1992	332.0	132.09	150.01	0.79	233.0	264.5	13.5
1993	391.1	180.10	172.54	0.79	378.0	377.1	0.25
1994	278.6	140.39	137.81	0.73	242.0	225.2	6.9
1995	304.8	147.87	152.65	0.69	305.0	293.1	7.76

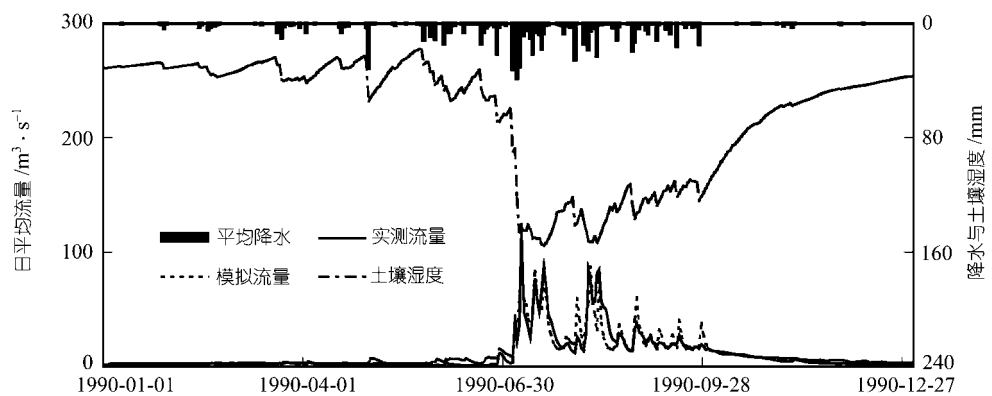


图 3 潮白河流域下会站 1990 年日径流过程模拟结果

之一. 针对这样的需求, 本文开发了流域分布式时变增益水文模型(DTVGM). 由 DEM 提取出的高程变化范围为 130~2262 m, 计算网格大小采用 500 m×500 m, 潮白河流域被划分为 55444 个网格单元. 根据网格流向来判断网格等级, 潮河划分为 298 级, 白河划分为 398 级. DTVGM 初步的分析结果表明, 潮白河流域分布式水文模拟的水量完全平衡(模拟总水量与实测总水量的比值为 1.0); 日径流分布式流域水文模拟的效率系数都在 0.75 以上(部分结果见图 3), 满足水文模型应用的基本要求.

进一步, 利用RS信息和DTVGM模型, 分析了该流域陆面林地、草地、旱地等不同覆被与流域时变增益因子 G 之间的关系. 思路是: 选取前期比较干旱的流域场次降雨-径流过程, 由DTVGM模型计算空间分布的时变增益因子 G ; 识别它与每个网格下垫面类型(由 30m×30m分辨率的TM图提供)之间的对应关系. 由于不同覆被在流域空间分布是不同的, 对应的 G 值也是变化的, 直接建立相互的联系不容易. 但是, 通过分析等于和大于某个 G 阈值水平下流域不同覆被类型面积与它的总面积的比, 视其为发生该事件

空间随机变量, 采用累积频率(P)分析方法, 可识别出反映流域增益因子 G 与不同覆被类型(林地、草地、旱地等)的关系, 如图 4 所示意. 结果表明: (1)不同土地利用类型的产流特性参数 G 值频率分布曲线存在差异性, 说明土地利用变化会对产流产生一定的影响. (2)图 4 中旱地的 G 值频率分布曲线处于偏下的位置, 而林地和草地处于偏上的位置, 说明在较干旱的无雨期, 旱地土壤较干燥, 土壤下渗率增大, 产流较困难; 林地和草地由于根系发育, 其土壤持水能力较强, 所以相对旱地而言较湿润, 产流相对较容易; 旱地与荒地的产流特性则比较相近. (3)林地与草地对应的空间 G 值统计曲线出现交叉, 说明流域不同覆被类型对产流影响关系并不是固定的, 一定尺度条件下也会发生变化. 实例中, 对于 $G_0 < 0.0028$ 情况, 林地比草地容易产流. 但是, 在 $G_0 > 0.0028$ 情况下, 草地中 G 值大于等于 G_0 的概率高于林地.

由于 DTVGM 中的增益因子 G 结构简单, 概念比较直观, 比较容易利用陆面遥感(RS)信息建立不同单元陆面覆被特性与水文下渗特性之间变化的联系, 直接或间接估计土地利用/覆被变化不同条件对水文

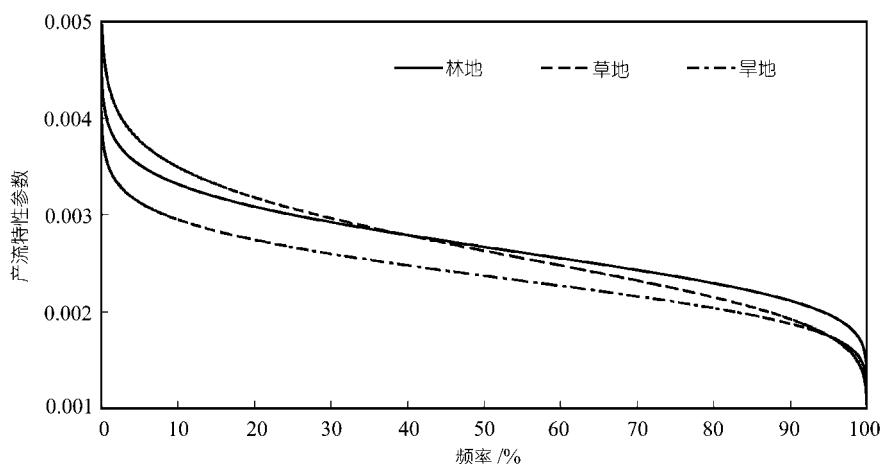


图 4 潮白河流域覆被类型变化与水文产流时变增益 G 之间的统计关系

循环、流域产流特性的影响。因此，它在描述土地利用/覆被变化对水文循环影响量化方面，有比较好的开发应用前景^[36]。目前，正在开展这方面研究，包括基于单元模块蒸散发能量通量变化、土壤湿度变化与土地利用/覆被变化之间联系的研究。

3 结语

(1) 水文系统的非线性是流域水文学研究的科学难点问题之一，其研究的理论与方法在不断发展，是地球系统科学和陆地水文水资源领域十分重要的前沿课题。

(2) 在水文非线性系统研究中，有不同的数学模拟途径。一种是基于宏观整体上考察系统输入-输出关系的 Volterra 非线性卷积方程模型，具有一定的普适性。另一种是基于微观尺度描述单元系统质量守恒与动力学过程的非线性微分方程组模型。本文通过水文非线性梯级系统分析理论的举例说明，在一定的条件下二者之间是可以相互转换的。

(3) 尽管水文非线性系统分析比线性系统复杂得多，但是设法从系统分析的观点，采用简单的方法来研究复杂的水文问题是有可能的。作者通过建立水文非线性系统增益因子与流域土壤湿度之间的联系，提出简单结构的时变增益水文模型(TVGM)，使得过去需要基于复杂非线性系统识别建立水文非线性模型的问题，能够采用一种结构简单、理论上“等价”的水文概念性系统模拟，具有参数少、效率高的特点。

TVGM 模型研究的一个启示是：除了采用经典的动力学微分系统方法研究水文非线性问题，探讨从水文现象本身找规律的思维方法十分有意义。“从复杂现象中找出简单关系”的研究，将是水文非线性系统理论与实践值得在探索与发展的一种新的方法论。

(4) 对于流域水文学问题，由于需要考虑水文时间和空间的变化与人类活动的影响，水文系统的非线性和不确定性更加突出。本文在水文非线性系统分析基础上，进一步提出一种与流域 DEM 结合的分布式时变增益水文模型。目前在西部黑河流域和华北潮白河流域的初步的应用与检验说明，它不但有比较好的模拟效果，而且能够分析土地覆被变化与水文系统产流之间的影响关系。水文非线性系统方法与分布式流域水文模拟结合，将是一种适应变化环境下流域分布式水文模拟有效的途径之一。

(5) 目前开发的流域时变增益水文模型和分布式时变增益水文模型仍然需要在实践中进一步检验与完善，需要加强适应不同地区分布式地下水水文模型的耦合研究与应用研究。

参 考 文 献

- 1 Dooge J C I. Linear theory of hydrological system. Thch Bulletin No.1468, Agr Res Ser, U.S.D.A., Washington D C, 1973
- 2 Singh V P. Hydrologic Systems. Vol 1. Rainfall-runoff Modeling. Englewood Cliffs. New Jersey, Prentice-Hall, 1988
- 3 Singh V P. 水文系统：流域水文模拟。赵卫民，戴东，牛玉国，译。郑州：黄河水利出版社，2000

- 4 葛守西. 现代洪水预报技术. 北京: 中国水利水电出版社, 1999
- 5 Amoroch J. Nonlinear hydrologic analysis. *Advance in Hydro-science*. 1973, 9: 203~251
- 6 Amoroch J. Measures of the linearity of the hydrologic system. *J Geophy Res*, 1963, 68(8): 2237~2249
- 7 Amoroch J, Brandstetter A. Determination of nonlinear functional response functions in rainfall-runoff processes. *Water Resour Res*, 1971, 7(5):1087~1101
- 8 Ahsan M, O'Connor K M. A simple non-linear rainfall-runoff model based on the concept of a variable gain factor. *J Hydrol*, 1994, 155: 151~183[DOI]
- 9 Bidwell V C. Regression analysis of nonlinear catchment system. *Water Resour Res*, 1971, 7: 1118~1126
- 10 Boneh A, Diskin M H. Demonstration of nonlinear effects of a second order runoff model by field data. In: Schultz E F, et al, eds. *Floods and Droughts*. For Collins, Colo: Water Resour Publications, 1973. 157~168
- 11 Diskin M H. Identification of a Volterra series conceptual model based on a cascade of nonlinear reservoir, *J Hydrol*, 1984, 68: 231~245[DOI]
- 12 Liu C C-K, Brutsaert W. A nonlinear analysis of the relationship between rainfall and runoff for extreme floods. *Water Resour Res*, 1978, 14 (1): 75~83
- 13 Napiorkowski J J, Strupczewski W G. The properties of the Kernels of the Volterra Series describing slow deviation from a steady state in an open channel. *J Hydrol*, 1981, 52: 185~198
- 14 Patry G G, Marino M A. Nonlinear runoff model: parameter identification. *ASCE J Hdraul Eng*, 1983,109(6) : 865~880
- 15 Xia Jun. Parameter identifiability of hydrological models with implicit structure. *Hydrological Science Journal*, 1989, 34(1-2): 1~19
- 16 Xia Jun. Identification of a constrained nonlinear hydrological system described by Volterra Functional Series. *Water Resour Res*, 1991, 27(9): 2415~2420
- 17 Muftuoglu R F. New models for nonlinear catchment analysis. *J Hydrol*, 1984, 73: 335~357[DOI]
- 18 Singh V P. *Computer models of watershed hydrology*. Water Resources Publications, Highlands Ranch, USA. 1995
- 19 夏 军. 水文非线性系统理论与方法. 武汉: 武汉大学出版社, 2002
- 20 Minshall N E. Predicting storm runoff on small experimental watersheds. *Journal of the Hydraulics Division*, 1960, 86(HY8): 17~38
- 21 张士锋, 刘昌明, 夏 军, 等. 降雨径流过程驱动因子的室内模拟实验研究. *中国科学, D 辑*, 2004, 34(3): 280~289
- 22 Xia Jun, O'Connor K M, Kachroo R K, et al. A non-linear perturbation model considering catchment wetness and its application in river flow forecasting. *Hydrologic Journal*, 1997, 200: 164~178[DOI]
- 23 Xia Jun. A system approach to real time hydrological forecasts in watersheds. *Water International*, 2002, 27(1): 87~97
- 24 Beven K J. *Rainfall-Runoff Modeling*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2001. 136~145, 162~166, 176~285
- 25 Beven K, Feyan J. The future of distributed hydrological modeling. *Special Issue of Hydrol Processess*, 2002, 16(2): 169~574
- 26 Abbott M B, Bathurst J C, Cunge C, et al. An introduction to European Hydrological System—1. History and philosophy of a physically-based distributed modeling system. *J Hydrol*, 1986, 87: 45~69[DOI]
- 27 Lu M, Koike T, Hayakawa N. Distributed XinAnjiang model using radar measured rainfall date. In: *Water Resources & Environmental Research: Towards the 21st Century*, 1996, (1): 29~36
- 28 Arnold J G, Williams J R, Srinivasan R, et al. *Model Theory of SWAT*. Agricultural Research Service Grassland, Soil and Water Research Laboratory, USDA, USA, 1997
- 29 Dirk H de Boer, Wojciech F, Takahisa M, et al, eds. *Proceeding of Erosion Prediction in Ungauged Basins (PUBs): Integrating Methods and Techniques*. IAHS Publication 279, UK, 2003
- 30 Chow V T, Kulandaiswamy V C. General hydrologic system model. *Journal of the Hydraulics Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers* 97(HY6), 1971, 791~804
- 31 王纲胜, 夏 军, 谈 戈, 等. 潮河流域时变增益分布式水循环模型研究. *地理科学进展*, 2002, 21(6): 573~582
- 32 Pereira L S, Pereira A, Allen R G, et al. Evapotranspiration: concepts and future trend. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE*, 1999, 4: 45~51[DOI]
- 33 David R M, 主编. *水文学手册*. 张建云, 等译. 北京: 科学出版社, 2002. 387~422
- 34 康尔泗, 程国栋, 蓝永超, 等. 西北干旱区内陆河流域出山径流变化趋势对气候变化响应模型. *中国科学, D 辑*, 1999, 29(增刊): 47~54
- 35 Garrick M, Cunnane C, Nash J E. A criterion of efficiency for rainfall-runoff models. *J Hydrol*, 1978, 36(3/4): 375~381
- 36 李秀彬. 全球环境变化研究的核心领域——土地利用/覆被变化的国际研究动向. *地理学报*, 1996, 51(6): 553~557