

# 新安江模型理论研究的进展与探讨

刘金涛<sup>1,2</sup>, 宋慧卿<sup>2</sup>, 张行南<sup>2</sup>, 陈喜<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:**回顾了新安江模型发展的历程,指出在具有物理基础的分布式水文模型发展遭遇理论瓶颈的背景下,可重新审视新安江等概念性模型的重要作用 and 地位。文章介绍了近年来新安江模型在结构、理论方法及应用等方面取得的进展,认为新安江模型是一个不断发展的模型理论体系。新安江模型理论的创新首先需秉承其理论的特色,即蓄满产流及以统计曲线形式表达的部分产流的概念,可用山坡水文的理论和发现指导模型创新,并采取野外实验、理论分析与计算机建模三者并重的理念。

**关键词:**新安江模型;分布式水文模型;蓄满产流;山坡水文

中图分类号:TV131.6

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2014)01-0001-06

## 1 概述

自从1969年Freeze和Harlan<sup>[1]</sup>发表“具有物理基础的水文响应模型的蓝图”(Blueprint of a physically-based digitally simulated hydrological response model)的文章以来,40年间,基于水流动力学机制的分布式水文模型不断得到发展。然而,具有物理基础的分布式水文模型(以下简称物理模型)的发展似乎遭遇了不可跨越的瓶颈,如尺度与参数化等问题(Beven, 2002)<sup>[2]</sup>。目前,物理模型的研究似乎过度强调和依赖计算能力,比如空间数据的处理能力以及大型水流动力方程的求解速度等。显然,流域的空间变异和复杂性要远超过渠道(河道)和水库(湖泊)等水体,这决定了模拟流域水文过程的难度要远高于对河流等水体水动力过程的模拟。因此,一味强调建立大型水流动力方程组,并采用各种离散格式求解,不仅不能有效解决问题,反而加剧了尺度及参数化等问题,将进一步阻碍物理模型自身理论的发展,这显然背离了物理模型发展的初衷。

事实上,解决问题的基本思路就是复杂问题简化。传统上,水文学方法就是秉承这一哲学理念的、有别于力学物理学等经典数理方法的简化方法(任立良等, 2011)<sup>[3]</sup>。

因此,人们开始反思水文模型未来发展的方向,重

新审视传统概念性模型的作用。实际上,多年的研究和应用证明,传统模型具有结构简单、参数少、模拟精度稳定可靠和适用广泛等优点。如新安江模型目前仍是在我国应用最为广泛的水文模型,其在水文预报、水资源规划与管理等领域的应用已取得巨大的社会和经济效益。因此,深入挖掘新安江等传统模型的潜力,进一步发展模型的理论,具有重要的理论意义和实用价值。

本文描述了新安江模型发展的历程,简要介绍了模型的理论体系,探讨了新安江模型理论发展的方向,总结了未来模型发展过程中需保持的理论方法和可能的创新点及实施途径;最后做出了总结。总之,新安江模型具有其鲜明的理论特色,在保持它基本理论体系的基础上,如何实现进一步的发展和 innovation 是本文讨论的重点。

## 2 研究的进展

新安江模型及其理论是20世纪60、70年代由赵人俊教授和其团队创立的,被列入了建国40周年国家百项重大科技成果,是中国水文科学领域最具原创性的学术成果。1964年,赵人俊教授在总结我国大量产汇流计算的经验和分析水文资料的基础上,发现降雨量超过一定阈值后,降雨径流过程线的斜率近似为“1”,并在此基础上提出了蓄满产流的概念,从而奠定了新安江模型的理论基础<sup>[4]</sup>。此后10余年,又将流域

收稿日期:2013-03-04

基金项目:国家自然科学基金项目(41030636,41271040)

作者简介:刘金涛(1977-),男,河北唐山人,教授,博士,主要从事山坡水文学及流域水文模拟方面研究。E-mail: jiliu@hhu.edu.cn

水文过程作为一个完整的系统加以研究,给出了蒸发、产流、汇流等环节的连续计算公式,并于1973年编制新安江水库入库预报方案时首次提出新安江模型(赵人俊,1963)<sup>[5]</sup>。在随后的实际应用中,新安江模型在理论和结构等方面得以完善和发展,并在20世纪80年代趋于成熟,形成了一个比较完整的、适合我国湿润和半湿润地区应用的降雨径流模型(王厥谋,1994)<sup>[6]</sup>。可以说,从模型的研制到逐步完善,赵人俊教授和同事花了近20年的时间。

新安江模型理论的基础就在于蓄满产流理念,所谓“蓄满产流”是指土湿达到田间持水量以后才开始产流,这符合湿润地区的水文条件,并已被当时的山坡水文研究所证实(Kirkby,1988)<sup>[7]</sup>。此外,新安江模型采用统计曲线描述山坡或流域面上蓄水容量分布的空间异质性,例如:采用指数型张力水和自由水蓄水容量曲线:

$$\frac{f}{F}=1-\left(1-\frac{W'm}{W'mm}\right)^B \quad (1)$$

$$\frac{f}{F}=1-\left(1-\frac{S'm}{MS}\right)^{EX} \quad (2)$$

式中: $f/F$ 为产流面积比重; $W'm$ 为张力水蓄水容量; $W'mm$ 为最大张力水蓄水容量; $S'm$ 为自由水蓄水容量; $MS$ 为最大自由水蓄水容量; $B$ 为流域张力水蓄水容量曲线的指数; $EX$ 为流域自由水蓄水容量曲线的指数。这是新安江模型最为精华的一部分,是其优于同时代其它集总模型的所在(Gan等,1997)<sup>[8]</sup>。因此,在考虑流域径流形成的非均一性时,蓄水容量曲线被其它重要的水文模型所借鉴采用,如美国的VIC模型(Liang等,1996)<sup>[9]</sup>和欧洲的Arno模型(Todini,1996)<sup>[10]</sup>等。

新安江模型主要参数有15个,所有参数都具有明确的物理意义和定义,并且参数都有相对应的合理的取值范围。在传统模型应用中,由于缺乏对物理量空间分布的定量描述和模型中间物理变量的验证,所有参数基本上都要由流域出口断面的径流过程来率定。这种定量研究的不足,影响了人们对流域产汇流基本规律的认识,也阻碍了对新安江模型理论的进一步深入研究。此外,模型在实际应用中,参数依赖率定,这制约了模型的推广使用,尤其是在广大的无资料地区。

20年来,随着地理信息的丰富和易于获取,新安江模型的发展有三个特点:

(1)架构形式趋于多样性。这里模型的架构主要指模型计算单元的划分。为了适应高分辨率GIS和RS数据输入的需要,许多学者将新安江模型应用于栅格

之上,栅格的尺度则从50m×50m, ..., 1km×1km至50km×50km不等(Lu等,1996;任立良等,2000;Li等,2004;张行南等,2005;陆桂华等,2006,不一一列举)<sup>[11-15]</sup>。事实上,栅格型水文模型是近年来最为常见的分布式模型架构形式,许多概念性模型都有栅格化的趋势,如HBV(Das et al., 2008)<sup>[16]</sup>。然而,由于新安江模型特殊的建模理念,即采用统计曲线的方式描述水文变量的空间变异,较小的网格尺度(如小于1km×1km),仍值得考虑其空间变异性吗?换句话说,小尺度网格内的蓄水容量符合现行的指数型的统计曲线吗?为此,Liu等(2012)<sup>[17]</sup>讨论了不同网格尺度上,张力水蓄水容量曲线空间分布的规律,发现网格间的变异随网格尺度变小而增大,网格内部变异则随网格尺度变大而变大,不能忽视较小的网格尺度上的空间变异,对于所选流域,200m的网格被认为是应用新安江模型蓄水容量曲线的合理尺度。然而,人为的将流域划分为网格系统,仍然存在诸多的问题,比如网格过细造成不必要的计算负担,过粗则不能捕捉下垫面空间变异,还可能造成单个网格面积实际分属不同子流域的情况。

(2)产汇流模型物理化明显。得益于快速发展的地形处理能力,网格水流方向及水系可以方便的定义,这为建立有物理基础的流域产汇流模型提供了技术保障。例如,井立阳等(2004)<sup>[18]</sup>提出了由流域下垫面地理特征值定量推求模型参数的方法,从而解决了新安江模型在无资料区应用的限制。郭方等(2001)<sup>[19]</sup>认为新安江模型的流域蓄水容量曲线与TOPMODEL地形指数 $\ln(a/\tan\beta)$ 累积频率分布曲线都反映了流域土壤饱和和缺水量的分布情况,实质具有相同的物理意义,并建议采用地形指数分布曲线推求新安江模型蓄水容量曲线的参数 $B$ 值,从而避免了对参数 $B$ 的率定。随后,熊立华等(2004)<sup>[20]</sup>、石朋等(2008)<sup>[21]</sup>分别给出了通过地形指数计算流域单点蓄水容量的方法。Chen等(2007)<sup>[22]</sup>则将此方法成功应用于新安江模型,并用于实际流域月径流模拟。在河道汇流方面,如采用圣维南方程组进行河道汇流演算(王船海等,2003)<sup>[23]</sup>;在坡面汇流方面,如采用Muskingum Cunge算法(袁飞等,2004)<sup>[24]</sup>,或者采用基于栅格单元系统的运动波方程描述(Liu等,2009)<sup>[25]</sup>。

(3)应用的范围得到延伸。近年来,通过扩展蒸散发、产污等模块,新安江模型被应用于生态环境领域。如Li等(2009)<sup>[26]</sup>基于MODIS-LAI数据,通过在新安江模型中增加Penman-Monteith公式,预测了植被影

响下的径流响应;Yuan等(2008)<sup>[27]</sup>则将双源蒸散发模型与新安江模型耦合,用于评价植被对水文过程的影响;Su等(2003)<sup>[28]</sup>通过增加土壤侵蚀模块,将新安江模型用于预测降雨侵蚀的研究中;Zhao等(2011)<sup>[29]</sup>把新安江模型应用于土地利用评价。其他的应用领域,比如与区域陆面模式耦合,用于大尺度的气候变化和人类活动影响研究等,如苏凤阁等(2002)<sup>[30]</sup>应用新安江模型蓄水容量曲线概念改进了AVIM陆面过程模式对产流描述的不足。陆桂华等(2006)<sup>[15]</sup>则建立了中尺度大气模式MC2和新安江模型单向耦合模型系统,用于提高洪水预报预见期。

经过近50年的发展,新安江模型已经从最初的专门从事水库入库洪水预报的单一功能模型发展为适合用于水文预报、水资源管理、水土资源评价、面源污染预测、气候变化和人类活动影响研究的多功能的水文模型;已经从原来的集总的模型结构发展为分散的、网格分布式的水文模型;其部分参数已从靠经验率定发展为可以进行物理推求。总之,新安江模型是一个不断发展的模型体系。

### 3 未来发展之认识和展望

模型是对现实世界的逼近,不论是黑箱模型、概念性模型,还是物理模型均是仿真真实世界水文过程的一种方法。黑箱模型与物理模型是两类有根本性差异的水文模拟方法,前者不考虑流域物理过程,模型的建立基于输入和输出时间序列的分析,后者则强调对真实流域水动力过程的模拟,而概念性模型则介于两者之间。这里不对各类模型的优劣做评判,但需指出的是概念性模型是基于水文学方法理念建立的。新安江模型是一种类型的概念性模型。然而,作者认为新安江模型不应仅仅作为一个模型,其理论的拓展将使得新安江模型成为一个模型体系。这一模型体系的共同点应在于它们均采用统计曲线(或相似曲线)的方式来描述水文过程的非均一特性,不同点则表现在我们如何解析这条曲线。传统上,我们采用参数率定的方式得到这条统计曲线。未来,随着对流域山坡结构特征(包括地形、土壤及基岩等)空间分布规律及其水文影响认识的深入,流域水文相似性研究将使得确定这一统计曲线的过程更加“白化”,从而将统计意义上的曲线变为描述流域水文响应特性的“相似曲线”。这里,相似曲线,顾名思义,就是指具有相同频率分布的流域(或山坡)具有相似的水文特性。

众多的研究均发现,流域结构特征或水文要素的空间频率分布具有规律性。例如,地形因子、地形曲率和山坡宽度的概率密度函数均有近似服从高斯分布的现象(郭方等,2001;刘金涛等,2011,2012)<sup>[19,31-32]</sup>,且研究已经证实具有相同地形指数频率分布的流域具有水文相似性(孔凡哲等,2003)<sup>[33]</sup>。从图1中不难看出,地形曲率和山坡宽度等流域结构特征要素的空间分布均近似符合高斯分布函数,与新安江模型的蓄水容量曲线分布类似。这实际上将成为依据流域结构信息反演水文模型参数(即“白化”的过程)前提基础。正是基于这一发现,许多的研究均已成功的将地形因子分布曲线用于确定新安江模型蓄水容量曲线(如郭方,2001;Chen等,2007)<sup>[19,22]</sup>。然而,一方面,这种做法的合理性有待深入解析;另一方面,不同的流域结构特征对径流形成发展的影响具有阶段性。例如,山坡形状影响水流汇聚,而土壤厚度则影响径流的产生,如何将这些影响因子在新安江模型中加以利用并整合是问题的关键。

新安江模型的蓄满产流理论具有广阔的适用范围。赵人俊教授等在20世纪60年代通过大量的流域产汇流数据分析,得出了湿润地区以蓄满产流为主,干旱地区以超渗产流为主的结论。在世界各地进行的山坡水文实验发现了降雨径流阈值效应是普遍存在的,这证实了蓄满产流理论的合理性。蓄满产流理论的提出实际奠定了新安江模型理论的基础,是新安江模型被广泛接受的前提。随后提出的蓄水容量曲线则应用统计的方法巧妙的解决了流域蓄水容量空间分布不均匀的问题。然而,应该注意到,新安江模型理论是在长期的生产实践中分析和总结的成果,虽然在理论上得到了随后的山坡水文学印证,但在实际的天然流域上,仍然需要大量的田间工作以验证模型的一些假定是否成立、采用的方法在多大程度符合自然规律。比如:蓄水容量曲线中点的最大蓄水容量到底是否成指数型分布,产流过程在多大程度上受坡度、坡形、土壤和基岩等下垫面山坡结构的影响,模型中自由水蓄水容量包括哪几部分,基岩形状和渗透性对其影响各如何,基岩蓄水、排水的机制。当然,很多问题不单单是新安江模型本身的问题,其实涉及山坡水文学研究的核心内容。因此,新安江模型或者说水文模型理论的发展需要水文、地质、地貌和土壤学研究的交叉和共同推进。

最后,建立适合新一代模型的完整的方法体系,完善技术支撑手段。传统上,新安江模型的建立包括单元划分、数据输入、参数率定等几个方面,其中参数的优



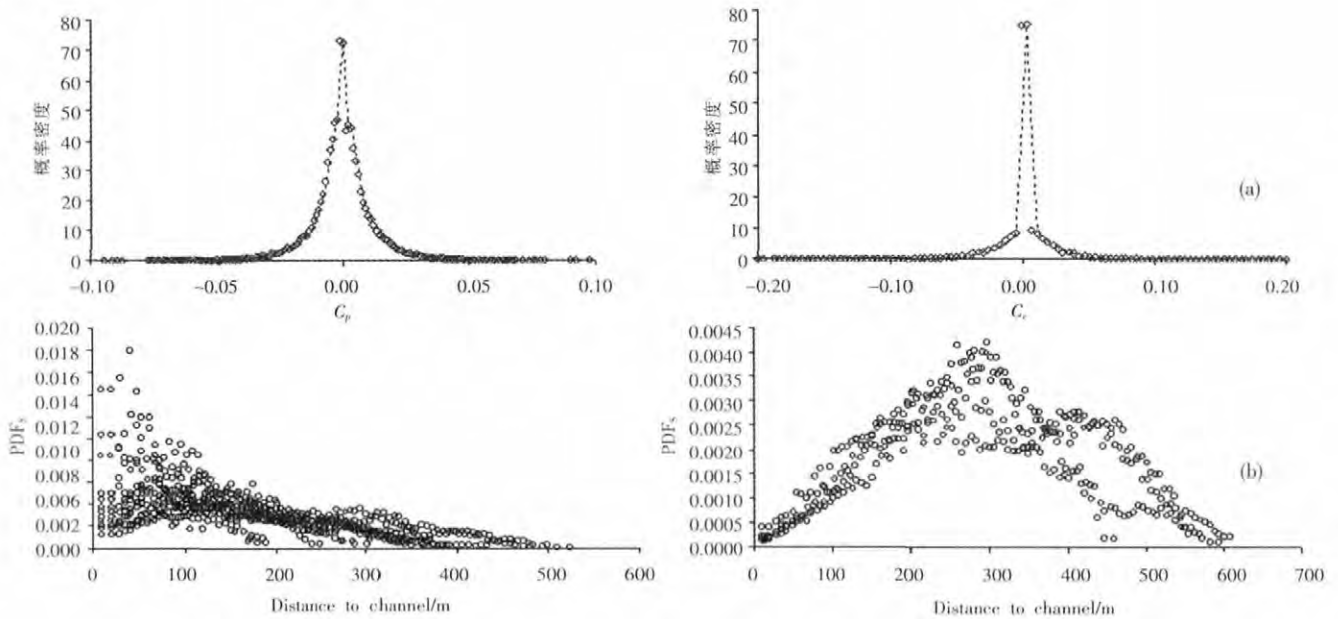


图1 流域地貌结构的分布特征 (a) 剖面曲率( $c_p$ )和水平曲率( $c_c$ )<sup>[32]</sup>; (b) 边坡型山坡和源头型山坡宽度函数的概率密度分布<sup>[33]</sup>

Fig.1 The distribution characteristics of the catchment geomorphological structure for (a) Profile curvature( $c_p$ )and contour curvature( $c_c$ ); (b) Probability density of sideslope and headwater hillslope width functions

选是重要的环节,这是因为传统的新安江模型参数虽然有一定物理意义,但很大程度上仍然依赖率定,至于单元划分则往往是在屏幕或图纸上数字化得到。未来,随着对山坡水文过程认识的深入,地形、土壤和基岩等山坡结构信息的丰富,一方面,模型的基本理论,例如参数物理化将会有长足的发展,参数逐步白化;另一方面,模型的架构和应用将日趋合理。为此,可能取得进展的工作有:

(1)随着新安江模型理论的发展,强调田间试验在其参数确定的重要性,避免建模过度依赖计算机模拟且忽略对流域进行野外查勘,需要针对新安江模型建立相应的野外试验方案;

(2)基于空间信息处理技术,整合多源数据,如通过地形信息提取跟水系、下垫面结构特征信息,通过野外测定土壤厚度、土壤岩石渗透性,反演模型张力水及自由水蓄水容量等参数,而这些均需要建立配套的数据库和软件系统;

(3)依据建模目的、应用范围和尺度、资料情况等确定单元划分、计算模块等模型架构形式,给出合理规则和建议,避免建模的盲目性。

(4)开展水文相似与流域分类研究,建立大的流域(甚至全国范围)内模型参数与自然条件的定量转化关系,扩展新安江模型应用的范围和领域。

总之,强调野外实验、理论分析与计算机建模三项工作的协调与密切配合,这是实现新安江模型理论创新的重要途径之一。

#### 4 总结

回顾了新安江模型发展的历程,指出在物理模型研究遭遇理论瓶颈时,需重新审视基于水文学方法建立的概念性水文模型。新安江模型是概念性水文模型的代表,具有原创性,是我国为数不多的被国际上广泛认可的模型,也是一个不断发展的模型理论体系。未来,其核心理论思想应予以保持,例如蓄满产流和统计相似曲线描述流域非均一性的思想等,可以将山坡水文的理论和发现作为指导新安江模型理论创新的途径之一,实现野外实验、理论分析与计算机建模三者的并重。

参考文献:

- [1] Freeze R A, Harlan R L. Blueprint for a physically-based digitally-simulated hydrological response model [J]. Journal of Hydrology, 1969, 9(3):237-258.
- [2] Beven K. Towards an alternative blueprint for a physically-based digitally simulated hydrologic response modeling system [J]. Hydrological Processes, 2002, 16(2): 189-206.
- [3] 任立良,江善虎,袁飞,等.水文学方法的演进与诠释[J]. 水科学进展, 2011,22(4):586-592. (REN Liliang, JIANG Shanhu, YUAN Fei, et

- al. Evolution of methodology in hydrology and its explanation[J]. *Advances in Water Science*, 2011(4): 586–592. (in Chinese))
- [4] 赵人俊, 庄一鹤. 降雨径流关系的区域规律 [J]. *华东水利学院学报*, 1963,(S2):53–68. (ZHAO Renjun, ZHUANG Yiling. Regional pattern of rainfall–runoff relationship [J]. *Journal of East China Technical University of Water Resources Engineering*, 1963(S2):53–68. (in Chinese))
- [5] 赵人俊. 流域水文模拟——新安江模型与陕北模型[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984:106–130. (ZHAO Renjun. *Watershed Hydrological Modeling——Xinjiang Model and Shanbei Model*[M]. Beijing: China WaterPower Press, 1984:106–130. (in Chinese))
- [6] 王厥谋. 赵人俊水文预报文集序言[A]. 王厥谋, 张恭肃, 李玉瑶, 等. 赵人俊水文预报文集 [C]. 北京: 水利电力出版社, 1994:266. (WANG Juemou. Preface for Proceedings of ZHAO Renjun' Hydrological Forecasting [A]. WANG Juemou, ZHANG Gongsu, LI Yuyao, et al. Proceedings of ZHAO Renjun' Hydrological Forecasting [C]. Beijing: China WaterPower Press, 1984:266. (in Chinese))
- [7] Kirkby M. Hillslope runoff processes and models [J]. *Journal of Hydrology*, 1988, 100(1–3): 315–339.
- [8] Gan T Y, Dlamini E M, Biftu G F. Effects of model complexity and structure, data quality, and objective functions on hydrologic modeling [J]. *Journal of Hydrology*, 1997, 192(1–4): 81–103.
- [9] Liang X, Lettenmaier D P, Wood E F. One-dimensional statistical dynamic representation of subgrid spatial variability of precipitation in the two-layer variable infiltration capacity model [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101(D16): 21403–21422.
- [10] Todini E. The ARNO rainfall–runoff model [J]. *Journal of Hydrology*, 1996, 175(1–4): 339–382.
- [11] Lu, M., Kioke, T. and Hayakawa, N., 1996. Distributed Xinjiang model using radar measured rainfall data, Proceedings of International Conference on Water Resources & Environmental Research: Towards the 21st Century, Vol.1, pp.29–36.
- [12] 任立良, 刘新仁. 基于 DEM 的水文物理过程模拟 [J]. *地理研究*, 2000,19(4):369–376. (REN Liliang, LIU Xinren. Hydrological processes modeling based on digital elevation model [J]. *Geographical Research*, 2000,19(4): 369–376. (in Chinese))
- [13] Li Z J, Ge W Z, Liu J T, et al. Coupling between weather radar rainfall data and a distributed hydrological model for real-time flood forecasting [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2004, 49(6): 945–958.
- [14] 张行南, 井立阳, 叶丽华, 等. 基于数字高程模型的水文模拟对比分析 [J]. *水利学报*, 2005,36 (6):759–763. (ZHANG Xingnan, JING Liyang, YE Lihua, et al. Study of hydrological simulation on the basis of digital elevation model[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36 (6): 759–763. (in Chinese))
- [15] 陆桂华, 吴志勇, 雷 Wen, 等. 陆气耦合模型在实时暴雨洪水预报中的应用 [J]. *水科学进展*, 2006,17 (6):847–852. (LU Guihua, WU Zhiyong, LEI Wen, et al. Application of a coupled atmospheric–hydrological modeling system to real-time flood forecast [J]. *Advances in Water Science*, 2006,17(6): 847–852. (in Chinese))
- [16] Das T, Bárdossy A, Zehe E, et al. Comparison of conceptual model performance using different representations of spatial variability [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 356(1–2): 106–118.
- [17] Liu J T, Chen X, Wu J C, et al. Grid-parameterization of a conceptual distributed hydrologic model through integration of sub-grid topographic index: the necessity and practicability [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2012, 57(2): 282–297.
- [18] 井立阳, 张行南, 王俊, 等. GIS 在三峡流域水文模拟中的应用[J]. *水利学报*, 2004,(4):1–7. (JING Liyang, ZHANG Xingnan, WANG Jun, et al. Application of GIS in simulation of river basin hydrology in three gorges project reservoir[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004,(4): 1–7. (in Chinese))
- [19] 郭方, 刘新仁, 任立良. 以地形为基础的流域水文模型——TOP-MODEL 及其拓宽应用[J]. *水科学进展*, 2000,11(3),298–301. (GUO Fang, LIU Xinren, REN Liliang. A topography based hydrological model: topmodel and its widened application[J]. *Advances in Water Science*, 2000,11,(3): 298–301. (in Chinese))
- [20] 熊立华, 郭生练, 田向荣. 基于 DEM 的分布式流域水文模型及应用 [J]. *水科学进展*, 2004,15 (4):517–520. (XIONG Lihua, GUO Shenglian, TIAN Xiangrong. DEM-based distributed hydrological model and its application [J]. *Advances in Water Science*, 2004,15(4): 517–520. (in Chinese))
- [21] 石朋, 芮孝芳, 瞿思敏, 等. 一种通过地形指数计算流域蓄水容量的方法[J]. *水科学进展*, 2008,19(2):264–267. (SHI Peng, RUI Xiaofang, QU Simin, et al. Calculating storage capacity with topographic index [J]. *Advances in Water Science*, 2008,19(2): 264–267. (in Chinese))
- [22] Chen, X., Y. D. Chen, and C. Y. Xu, 2007. A distributed monthly hydrological model for integrating spatial variations of basin topography and rainfall [J]. *Hydrology Process*, 21:242–252.
- [23] 王船海, 郭丽君, 芮孝芳, 等. 三峡区间入库洪水实时预报系统研究[J]. *水科学进展*, 2003,14(6):677–681. (WANG Chuanhai, GUO Lijun, RUI Xiaofang, et al. Study on real-time flood forecasting system for the Three Gorges Reservoir [J]. *Advances in Water Science*, 2003,14(6): 677–681.)
- [24] 袁飞, 任立良. 栅格型水文模型及其应用[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2004,32(5):483–487. (YUAN Fei, REN Li-liang. Methodology of grid-based hydrological model and its application [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2004,32(5): 483–487. (in Chinese))
- [25] Liu J T, Chen X, Zhang J B, et al. Coupling the Xinjiang model to a kinematic flow model based on digital drainage networks for flood forecasting[J]. *Hydrological Processes*, 2009, 23(9): 1337–1348.
- [26] Li H X, Zhang Y Q, Francis H S C, et al. Predicting runoff in ungauged catchments by using Xinjiang model with MODIS leaf area index [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 370(1–4): 155–162.
- [27] Yuan F, Ren L., Yu, Z., Xu, J., 2008, Computation of potential evapotranspiration using a two-source method for the Xin'anjiang hydrological model [J]. *ASCE Journal of Hydrologic Engineering*, 13: 305–316.

- [28] Su B L, Kazama S, Lu M J, et al. Development of a distributed hydrological model and its application to soil erosion simulation in a forested catchment during storm period [J]. *Hydrological Processes*, 2003, 17(4): 2811–2823.
- [29] Zhao G J, Hrmann G, Fohrer N, et al. Application of a simple raster-based hydrological model for stream flow prediction in a humid catchment with polder systems [J]. *Water Resources Management*, 2011, 25(2): 661–676.
- [30] 苏凤阁,郝振纯.一种陆面过程模式对径流的模拟研究[J].*气候与环境研究*, 2002,7(4):423–432. (SU Fengge, HAO Zhenchun. A study of streamflow simulations using a land surface model [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2002,7(4): 423–432. (in Chinese))
- [31] 刘金涛,冯德程,陈喜,等. 山坡地形曲率分布特征及其水文效应分析——真实流域的野外实验及相关分析研究 [J]. *水科学进展*, 2011,22(1):1–6. (LIU Jintao, FENG Dezeng, CHEN Xi, et al. Distribution characteristics of hillslope curvature and its effects on hydrological processes: a real-world test [J]. *Advances in Water Science*, 2011,22(1): 1–6. (in Chinese))
- [32] Liu J T, Chen X, Zhang X N, et al. Grid digital elevation model based algorithms for determination of hillslope width functions through flow distance transforms [J]. *Water Resources Research*, 2012, 48(4): W04532, doi:10.1029/2011WR011395.
- [33] 孔凡哲, 芮孝芳. 基于地形特征的流域水文相似性 [J]. *地理研究*, 2003,22(6):709–715. (KONG Fanzhe, RUI Xiaofang. Hydrological similarity of catchments based on topography[J]. *Geographical Research*, 2003,22(6):709–715. (in Chinese))

### A Discussion on Advances in Theories of Xinanjiang Model

LIU Jintao<sup>1,2</sup>, SONG Huiqing<sup>2</sup>, ZHANG Xingnan<sup>2</sup>, CHEN Xi<sup>1,2</sup>

(1. *State Key Laboratory of Hydrology–Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;*

2. *Department of College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

**Abstract:** The development history of the Xinanjiang model was reviewed in this study. It was noted that we should re-understand the importance of the model as recent physically-based distributed hydrologic models were encountering theoretical bottleneck. In this paper, recent advances in model structure, theories and methods, application fields were introduced, and it was pointed that the Xinanjiang model is a developing model system. The presupposition for any innovations to this model is that the core theories of it should be remained, e.g., the excess storage conception and the statistical curve for describing the variable contribution area conception. We should pay more attention to hillslope experiments and findings, and field works, theoretical analysis and simulations are all important for further development of the Xinanjiang model, and all these three factors should be in concordance with each other.

**Key words:** Xinanjiang model; distributed hydrologic model; excess storage; hillslope hydrology

(上接第 57 页)

### Hydrological Modeling for Karst Area in Bajiang River Basin

LU Debao<sup>1</sup>, SHI Zhengtao<sup>2</sup>, LI Yuhui<sup>2</sup>, GU Shixiang<sup>3</sup>

(1. *Department of Hydrosience, Nanjing University, Nanjing 230093, China;*

2. *College of Tourism & Geography Sciences, Yunnan Normal University, Kunming 650092, China;*

3. *Yunnan Survey and Design Institute of Water Resources and Hydropower, Kunming 650021, China*)

**Abstract:** Karst aquifers are known for their heterogeneity and irregular complex flow patterns which make them more difficult to model. Although different modeling approaches have been used to make it through, they all have somewhat deficiency. This paper presents one such approach which is based on MIKE–SHE. The model was applied in a Karst area of the Bajiang River Basin with support of the observed and GIS/RS data. Modeling of evapotranspiration and flow in the upper part of the unsaturated zone is more detailed. The model was calibrated and validated by the observed discharge which was got from the Huangjiangzhuang Station. The results show that the model is able to adequately simulate temporal evolution of the river discharge, measured by Nash–Sutcliffe coefficient (0.84) as well as overall water balance. Besides, through the sensitivity analysis, we got to know that the precipitation was the key variable, and changes in spatial distribution of precipitation would cause the great influence on the results.

**Key words:** hydrological modeling; MIKE–SHE; Bajiang River Basin; Karst