# 巴江岩溶流域水文模拟研究

卢德宝1、史正涛2、李玉辉2、顾世祥3

(1.南京大学地球科学与工程学院水科学系,江苏 南京 210093;2.云南师范大学旅游与地理科学学院,云南 昆明 650092;3.云南省水利水电勘测设计研究院,云南 昆明 650021)

摘 要:岩溶地区因其多相且不规则的复杂流态使得其水循环模拟及预测较为困难。以石林巴江流域为研究区,将流域内水文气象站点数据与遥感数据相结合,利用 MIKE-SHE 模型来模拟巴江流域水文过程,该模型对于蒸散发及不饱和带的模拟较为详细。并使用黄家庄水文站 2000~2005 年的实测日径流量进行率定与验证。结果表明,验证期总水量基本保持平衡,nash-sutcliffe 系数为 0.84,表明该模型能够模拟短时间内的水流演变过程。在此基础上对模型参数进行敏感性分析,得出降雨量为关键变量,且其空间分布的差异对模拟结果影响较大。

关键词:水文模拟:MIKE-SHE;巴江流域:岩溶

中图分类号:P334 文献标识码:A 文章编号:1000-0852(2014)01-0052-06

1 前言

岩溶分布区占地球表面的 20%,全球约 25%的人 口饮水与岩溶含水层相关。岩溶含水层含水介质复 杂,水文转化系统多态,使得建模预测岩溶水循环较困 难。不同的模拟方法都曾被用来模拟岩溶地区地下水 运动<sup>[2-4]</sup>, Denic-Jukic 及 Jukic (2003) 提出了 3 种数学 水文模型用于模拟岩溶地区水循环:经验模型或称黑 箱模型、概念模型与理论或称物理模型。对于水文过 程描述最实用便捷的模型是经验模型,它可以重现输 入与输出的响应机制而不需要含水层系统的具体信 息[5-7],这种简略也对描述岩溶地下水输出细节造成了 限制,同时该类模型的预测能力局限于自身演化(无大 变化的系统);其他复杂物理模型能够模拟岩溶含水层 的水流路径,也能描述其输出变化的水流过程,但需要 含水层系统的水力和几何特征的准确、详细的节点信 息,而这些信息目前很难获得。在模拟过程中,许多模 型不能很好地模拟地表水和地下水的运移以及它们之 间的转化过程,如 MODFLOW 仅能模拟饱和流,所有 其它组成部分不是被忽略(如坡面流)就是被简化的饱 和带边界条件所取代(如蒸散发)。此外水循环的许多

过程如降雨时的入渗和地表径流过程变化很快, 描述 这些过程的动力学机制需要日以下的时间步长,许多水 文模型由于算法上的限制很难处理日及以下(如小时或 更短)的水文过程或者处理结果的误差过大。因此,岩溶 地区的水文模拟一般来说还集中在使用一些简化模型, 即使用简化的水文过程作为其表现方式,通常与线性水 库模型一起使用,用来模拟水文过程的阶段<sup>[8-11]</sup>。本文通 过分布式物理模型 MIKE-SHE, 应用分布式数据研究 流域产流机制,实现岩溶地区的水循环模拟。

相比之下,分布式水文模型 MIKE-SHE 则能够模 拟流域空间和时间上的整个水分循环和水文过程,包 括地下水深度、土壤水分含量及蒸散发等要素的空间 分布,并且其还能模拟地表水与地下水运动及其转化 过程。本研究试图通过该分布式物理模型来描述云南 岩溶高原的岩溶逐日水文过程,并选择世界著名的石 林岩溶区—巴江流域进行。巴江流域具有岩溶高原断 陷盆地水文一般特点<sup>[12]</sup>,分布着世界著名石林岩溶。境 内地貌结构多样,高原、丘陵、低山、洼地、盆地、石丘、 石林、石芽原野、峰丛和溶洞、湖泊、河谷分布其中。其 作为一个封闭的高原岩溶小流域集中了中国西南岩溶 区资源环境的一般特点,是西南岩溶地区典型的径流

收稿日期:2011-11-29

基金项目:973 计划前期研究专项(2009CB426312);云南省水利重大科技项目(YSK-2010-1);水利部公益项目(201001058)

作者简介:卢德宝(1984-),男,安徽六安人,在读博士,主要研究方向为水文与水资源学。E-mail:lu\_debao@163.com

汇流盆地,因此,本文以此作为研究区开展水文模拟工 作,在岩溶水文学上不仅具有典型性和代表性,而且具 有重要的科学价值和理论意义。本研究中在应用分布 数据的基础上对模型较难获取的参数进行了概化处 理,通过率定的方式获得。从而解决了详细数据缺乏 造成的矛盾。模型中一些物理意义尚不明确的参数通 过测量直接获得,以测试该类模型能否用于复杂岩溶 地区。经测试,MIKE-SHE 能够用于模拟研究区域短 时间内的主要水文过程。

#### 2 研究区域概况

巴江流域属于珠江上游的南盘江一级支流,主要 分布于云南省石林县境内。流域位于东经103°1′46"~ 103°9′54"、北纬24°0′2"~24°6′46"之间,南北长 30.7km,东西宽30.9km,其流域面积为580.8 km<sup>2</sup>。海拔 最低1605m,最高2132m(见图1)。该流域地处亚热 带,受西南季风影响。年平均气温15.7℃;多年降雨量 为820mm,雨季降雨量占全年降水量的80%以上。





流域从老至新出露的地层有前震旦系牛头(首)山 组、震旦系、寒武系、志留系、泥盆系、石炭系、二叠系、 第三系和第四系,奥陶系、中生界在本区缺失。出露地 层中,以泥盆系、二叠系浅海相碳酸盐分布面积最广, 占研究区的 60%以上,详见图 2。

在大地构造上,流域位于扬子准地台西南缘,滇东 台褶带西南侧,夹峙于九乡—石娅口断裂与师宗—弥 勒断裂之间。东侧为华南褶皱系之滇东南褶皱带,西侧 为川滇台背斜。区内构造以脆性变形为主,褶皱次之。构 造线主要为南北向及北东-南西向。地层倾角和缓,流域 内晚古生代碳酸盐中构造裂隙均较晚发育,经过多次构 造运动的作用,构造裂隙系统均得以继承和改造发展, 连通性得以加强,开放程度逐渐增大,为地表水的入渗、 地下水的运移、贮存等提供了有利的空间条件。

从含水层的特征来看,流域主要由碳酸盐岩与碎 屑岩构成,地下水主要以岩溶水及裂隙水的形式存在, 主要发育在地表下 30m 以内的高孔隙度层,但由于碎 屑物的填充,使其有效孔隙度大幅降低,其垂向和横向 透水性均很小,但当填充物和岩石表面间的孔隙达到 管道性质时,其透水性就会变得很大<sup>[13]</sup>。流域含水层具 有季节性变化,在 4~8 月雨季,含水层得到充分的补 给。当降雨停止,含水层中水位就下降,含水层中的水 通过裂隙填充物与围岩之间联通的空间进行侧向循 环,有的通过垂向裂隙运动,成为快速流,流向河流或 者流域出口。

自 20 世纪 50 年代,巴江流域先后建有 5 个雨量 站和 1 个水文站,其中黄家庄水文站位于流域边缘,也 是流域的出口水文站(见图 1)。地表水及地下水系总



1.寒武系:中上部以白云岩、石灰岩为主,下部为砂、页岩夹灰岩 2.二叠 系:上部砂岩、页岩、泥岩夹煤层;中部基性火山岩;下部灰岩、白云岩 3.第三系始新统:砂岩,砂岩夹泥岩 4.石炭系:以碳酸盐岩为主,底部夹 碎屑岩 5.泥盆系:碳酸盐岩,中部夹砂、页岩 6.震旦系:上部上段为碳 酸盐岩;下段为砂岩、冰磧砾岩,下部砂岩夹砾岩 7.志留系:砂岩、页岩 8.断层 9.地层界线 10.地下水流方向

图 2 巴江流域区域地质及地下水运动方向图 Fig.2 The geological features and direction of groundwater movement in the Bajiang catchment 体上是由东向西、西南方向运动。受巴江下游由南向北 溯源侵蚀的影响,水系进一步开始向南偏转运动<sup>[14]</sup>,该 区源头区的地下水运动过程由 Janja Kogovsek 等人 1998 年的示踪实验得到详细描述<sup>[15]</sup>,地下水通道穿越 了碎屑岩层,流向该流域出口(见图 2)。

## 3 研究内容与方法

#### 3.1 岩溶含水层的概念结构及模型构建

巴江流域含水层的补给主要来源于降水、无外源 性补给。据云南省水文地质普查报告及 1977 年云南省 地质局水文地质工程地质队区测一分队实测资料,该 流域为一个封闭小流域、东山与西山领脊分别为巴江 流域的自然分界,与外界水分交换微弱,大致呈北东-南西向贯穿石林,沿途纳石林地区各地表水、地下水。 充足的降水过后,大量的下渗水主要通过大的管道,快 速的排除,缓速流一般发生在水量逐渐空后的细孔、小 裂隙、裂缝中。一快一慢的两个过程构成了流域水文主 要特点。快速流在模型中是通过管道流直接模拟的,当 净雨量通过不饱和带渗入到弱透水层时、由于该层渗 透性较弱,地下水位会迅速抬升,抬升至管道处会直接 排向黄家庄水文站出口,也是该研究区域的唯一出口, 而慢速流则通过概化成裂隙流进行模拟,主要由饱和带 三维控制流方程进行描述。模型的概念性示意图见图 3。模型中研究区域被划分为 581 个 1km×1km 的分布 计算网格,模型的边界定义为零通量边界。虽然模拟区 域存在着不同的水文条件、但是研究区中碳酸岩区占 到 65%以上, 所以本文以碳酸岩区作为代表型区域, 将研究区的水文地质条件概化为该区域的水文地质条 件。模型中不饱和带主要分为土壤层与表层岩溶带。

在每一个土壤单元选取典型的土壤类型,包括土

壞剖面的厚度信息及质地信息,通过土壤转化模块的 计算,直接转化成水力参数,该功能主要是通过 Rosette 软件来实现的,从而得到巴江流域详细的地区 土壤资料。在模拟过程中地表水与地下水之间的转换 主要是通过模型中不同模块的组合来实现的。含水层 与河道的水量交换是利用达西定律,并考虑水流通过 河流底部时的水头损失来计算的。

#### 3.2 模型描述

水 文

MIKE-SHE 模型是一个确定性模型,以物理模型 为基础,是完全分布式的完整模型,可以用来描述水文 循环中陆地部分的重要流态过程,模型由各种模块或 组件构成,每一个组件或者模块都可以处理水文循环 中的单个部分,每个模块可以单独使用也可以整合起 来使用。MIKE-SHE 模型可以调用水动力模型 MIKE11,从而成为一个综合地表水与地下水的模型系 统,在模拟巴江流域的水文过程中,要使用以下4个模 块:坡面流模块、饱和带模块、包气带模块、蒸散发模 块。关于各个模块的详细介绍可参考 Abbott 等人的文 章<sup>[17-18]</sup>。

在 MIKE-SHE 中不饱和带的水流采用理查德一 维方程来处理。渗透水中的一部分旁流直接流入潜水 层,其可用一个经验公式来表达:

$$Q_{bypass} = P_N \cdot byp \sqrt{\alpha_{10} \beta_{50}} \tag{1}$$

式中: $P_N$ 为净降雨量 (mm/h);byp 为净降雨量通过孔 隙的最大值; $\alpha_{10}\beta_{50}$ 为取值在 0~1 之间,表示在更干燥 的条件下总旁流的减少量,其取值取决于饱和带 10 和 50cm 处的实际含水量, $\alpha_{10}\beta_{50}$ 的计算是在模型内部利 用线性关系自动生成的。当含水量处于用户定义的  $\theta_1\theta_2$ 之间时, $\alpha_{10}\beta_{50}$ 取 0~1 之间的值,含水量小于  $\theta_2$ 时,  $\alpha_{10}\beta_{50}$ 取 0,含水量大于  $\theta_1$ 时  $\alpha_{10}\beta_{50}$ 取 1(见图 4)。



图 3 模型概念性示意图 Fig.3 Scheme of the modeling concept



图 4  $\alpha_{10}\beta_{50}$ 与土壤含水量关系图(DHI 2000) Fig.4 The relationship of  $\alpha_{10}$  and  $\beta_{50}$  with the soil moisture(DHI 2000)

饱和带地下水模拟采用三维流控制方程求解:

 $\frac{\partial}{\partial x} \left( k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - Q_e = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$ (2) 式中: $k_{xx}, k_{yy}, k_{zz}$ 分别为x, y, z轴方向的水力传导率;h为水头(m); $Q_e(s^{-1})$ 为水源下渗部分的每个单元的体积 通量; $S_s$ 为特定的存储系数。该方程可用迭代隐式差分 法进行求解。

MIKE-SHE 能够模拟饱和层中水位高于排水点 时,仅发生在顶层的排水过程。该排水过程可以理解 为基于网格的概念模型,其出水量取决于水位的高度 与时间段,一般按照线性水库方程进行计算,排水方 程如下:

$$q = (h_n - z dr_n) c dr_n (m/s)$$
(3)

式中:*h*<sub>n</sub>为排水点的水头;*zdr*<sub>n</sub>为排水点水位;*cdr*<sub>n</sub>为排水时间段,表征排水的频率。

3.3 模型输入

模型中较多的空间输入信息的获取以及模型参数的确定,是通过 RS 与 GIS 技术手段得到的<sup>[19-21]</sup>。表 1 列出了各项数据要求、来源以及相应的属性。模型使用的是分辨率为 12.5m 的 DEM,并在此基础上使用 ARCSWAT 提取得到了流域边界及水系图。

# 表 1 MIKE-SHE 模型输入数据格式以及属性

Table 1 The input data formats and properties of MIKE-SHE

	数 据	来源	属性	
	流域边界	由 DEM 提取得到	1km×1km 网格	
分	地形	分辨率为 12.5m 的 DEM	1km×1km 网格	
布	河网水系	由 DEM 提取得到	1km×1km 网格	
式	土壤类型	数字化土壤类型图	矢量图	
地	植被	LandSat TM 土地利用分类	矢量图	
冬	LAI	TM Ndvi 反演计算得到	1km×1km 网格	
	根深	由 LAI 数据推导	0~9m	
时	降雨	2000~2005 年的日观测数据	5 站	
间序	潜在蒸发	2000~2005 年的日观测数据	5 站	
列	流量	2000~2005 年的日观测数据	1 站	

土壤类型图是利用南京土壤研究所 1985 年土壤 类型分类纸质图进行数字化得到的,用来表征土壤特 性的空间分布。土壤类型有 4 大类:红壤、紫色土、冲积 土和水稻土。其中红壤占整个地区的 60%以上。

植被类型是参照全国第二次土地调查分类系统, 根据土地资源经营特点、利用方式和覆盖特征,将巴江 流域的土地利用/覆被类型分为耕地、林地、建筑用地、 水域、荒草地和难利用地(包括石林地和裸露石砾地)。 叶面积指数是由 landsat TM 数据提取出的 NDVI 值经 过反演计算得到<sup>[22]</sup>,而植被根深的年变化与 LAI 的时 空分布相关。

降雨以及蒸发数据来源于流域内各个测量站的观 测数据,流域内的测雨站空间分布详见图 1,本次模拟 主要使用黄家庄站、绿芳塘站、团结站、小屯站、石林站 的观测数据,采用泰森多边形方法生成每个站点的控 制区域,从而实现模型中降雨的分布式降雨输入。黄家 庄水文站的径流观测数据(2000~2005)用来率定和验 证模型。

3.4 模型的率定及验证

本次研究主要进行了 2000~2005 年的连续模拟 计算,其中 2000~2002 年共 3 年为模型的率定期,模 型参数的率定是在反复试验的基础上,通过手动校准 的,率定的主要参数包括土壤饱和导水系数、河床材料 导水系数和 Manning 糙率、地下含水层的传导系数及 给水度等。在校准与验证过程中,同时使用了图表和数 值方法,用以下 4 个评判参数<sup>[23]</sup>来判别:观测平均值与 模拟平均值的比值、均方根误差、Nash-Sutcliffe 系数 和相关系数。

模型率定后,对 2003~2005 年的黄家庄水文站逐 日径流时间序列进行模型验证。

### 4 研究结果

#### 4.1 参数率定及模拟结果

MIKE-SHE 模型在模拟中数据和参数主要分为两 大类:一类是通过实测或者根据 GIS/RS 数据计算推导 得到的数据,如;降雨、蒸散发、气温、土地利用等,其不 需要率定;另一类是模型中非测量或者计算得到的参 数,如上文中提到的土壤饱和导水系数、河床材料导水 系数和 Manning 糙率等<sup>[24]</sup>。通过 2000~2002 年这 3 年 数据的连续计算率定,率定出的参数如表 2 所示。

#### 表 2 参数率定结果

Table 2 The calibrated values of the main parameters

参数	率定值
Manning 糙率系数	0.13
河床透水系数	2.3×10 <sup>-5</sup>
饱和土壤导水系数	4.7×10 <sup>-1</sup>
给水度	0.083
河道糙率系数	0.027

图 5 图 6 是模拟与实测的巴江流域日流量时间 序列对比,使用的模型能够再现短时间内(以日为步 长)流域的水文模拟,模型的模拟遵循实测流量大幅





图 5 流域流量的观测值与模拟值散点图 a)率定期;b)验证期

Fig.5 The correlation between the simulated and observed discharges in calibration (a) and validation period (b)



the validation period

表 3 率定与验证期性能参数表

Table 3 The calibration and validation results

时段	$F_{\rm dal}$ / %	$RMSE \ / \ m^3 \cdot s^{-1}$	$R^2_{NS}(-)$	<i>r</i> (-)
率定期	02	4.47	0.743	0.80
(2000~2002 年)	92			0.89
验证期	04.2	1.32	0.84	0.06
(2003~2005年)	94.2			0.90

度波动的时空演变规律,模拟的峰值、谷值能够很好 的吻合。

对比率定与验证期的数值性能(见表 3)发现,模 拟结果比较合理、这就在最大程度上减小了模型结构 中不合理以及水文系统参数概念模糊所带来的误差。 4.2 降雨量输入的敏感性分析

为了确定降雨数据对模型的影响。需要对降雨量 及其空间分布进行敏感性分析、分析结果显示当降雨 量增加10%会导致流域流量增加17%。降雨空间分布 对流域流量的影响主要通过依次使用 5 个降雨站中的 数据逐个进行模拟,其结果性能参数见表4。

表 4 结果表明依次使用逐个降雨站点得到的模拟

单独雨量站的性能参数值 表 4

Гal	bl	le 4	The	performance	parameters	for	the	stations
-----	----	------	-----	-------------	------------	-----	-----	----------

雨量站点	$F_{ m dal}$ / %	$RMSE \; / \; \mathrm{m^3 \cdot s^{\text{-1}}}$	$R^{2}_{NS}(-)$	<i>r</i> (-)
1	89	3.65	0.843	0.90
2	91	3.94	0.76	0.88
3	76	4.76	0.81	0.85
4	90	2.93	0.91	0.93
5	67	5.03	0.66	0.81

值与实测值的差异要比使用 5 个站点数据得到的结果 要大的多,由表4可以看出,由评判参数公式计算出的 值之间的差异较大,甚至达到了25%。由此可知,降雨 量是模型中的一个关键变量、其空间分布的复杂性对 模拟结果产生比较大影响。

#### 4.3 结论

(1)MIKE-SHE 模型融入了现有数据之长,很多数 据可以通过 GIS/RS 手段获得,虽然这些数据存在一些 不确定性,但缺少或者无长时间序列数据地区的模拟 提供了可能性;同时该模型简化了一些不能准确描述 的环节、更加详细地描述了蒸散发过程及不饱和上层 的水流过程。模型模块中得到的重要参数值及其空间 分布均来自于实测数据或者间接来源于现有数据。在 模拟岩溶含水层中的地下水流量运动时使用了一个概 念模型、模拟方法的评估结果表明其能够在极其复杂 的岩溶地况与多变的水文条件下模拟水文过程。该模 型在研究有着复杂的水文条件的岩溶地区还有诸多限 制性因素,例如在高排放速率(20m<sup>3</sup>/s)与低速率(小于 10m<sup>3</sup>/s)相比的条件下,高排放速率时模拟结果欠佳。 这种差异说明了在高排放速率时存在不同的流动机制 或者存在双重机制,从而使两种不可能同样准确,差异 的另一个原因可能与水流量的测量方法准确与否有 关,如测量方法,极端流通常不直接测量而是通过测量

第34卷

第1期

水位,再利用速率曲线进行推算得到。

(2)巴江流域是典型的径流汇流盆地,基本无外 源性补给,属于雨养性流域。流域内水文地质条件虽 然空间差异较大,但是通过进一步概化,可以运用分 布式模型进行水文模拟。但由于流域内的水文特征较 为复杂,在实际模拟时需注意水文地质参数空间变异 性的处理。

(3)由于研究流域的典型特征,降雨量在该地区基 础性研究中的地位举足轻重,目前研究区雨量站偏少, 建议增加新降雨观测站以供使用。从而为分析该类区 水资源问题提供更具价值的基础性资料。

参考文献:

- Bonacci O. Ground water behaviour in karst: example of the Ombla spring(Croatia) [J]. Journal of Hydrology,165(1-4):113-134.
- [2] Palmer AN, Palmer MV, Sasowsky ID. Karst Modeling [M]. Charles Town: Karst Water Institute, 1999:(1–162).
- [3] Sasowsky ID, Wicks CM. Ground Flow and Contaminant Transport in Carbonate Aquifers[M]. Roterdam: A.A.Balkema Publisher, 2000: 23–120.
- [4] Denic Jukic V, Jukic D. Composite transfer functions for karst aquifers [J]. Journal of Hydrology, 2003, 274(1-4):80-94.
- [5] Dreiss SJ. Regional-scale transport in a karst aquifer (part 1): component separation of spring flow hydrographs[J]. Water Resource Research, 1989,25(1):117–130
- [6] Dreiss SJ. Regional-scale transport in a karst aquifer (part 2): component separation of spring flow hydrographs [J].Water Resource Research, 1989,25(1):127–135
- [7] Labat D, Ababou R, Mangin A. Rainfall-runoff relations for karstic springs (part 1): convolution and spectral analyses [J]. Journal of Hydrology, 2000,238(3-4);123-148
- [8] Fleury P, Plagnes V, Bakalowicz M. Modeling of the functioning of karst aquifers with a reservoir model: application to Fontaine de Vaucluse (south of France) [J]. Journal of Hydrology, 2007,345(1-2):38-49.
- [9] Barrett ME, Chaarbebeau RJ. A Parsimonious model for predicting flow in a karst aquifer[J]. Journal of Hydrology, 1997,196(1-4):47-65.
- [10] Halihan T, Wicks CM. Modeling of storm response in conduit flow aquifers with reservoirs[J]. Journal of Hydrology, 1998,208(1-2):82-91.
- [11] Halihan T, Wicks CM, Engeln JF. Physical response of a karst drainage basin to flood pulses: example of the Devil's Icebox cave system (Missouri-USA)[J]. Journal of Hydrology, 1998, 204 (1-4):24-36.
- [12] 张发明,耿弘,李玉辉,等.中国路南石林喀斯特研究[M].昆明:云南科技出版社, 1997.(ZHANG Faming,GENG Hong,LI Yuhui,et al. Study on the Lunan Stone Forest Karst China [M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 1997. (in Chinese))
- [13] PW Huntoon. Hydrogeologie characteristics and deforestation of the

stone forest Karst aquifers of aouth China [J]. Ground Water, 1992,30(2):167-176.

- [14] 彭建,杨明德,梁虹. 基于 GIS 的路南巴江喀斯特流域地貌演化定量研究 [J]. 中国岩溶, 2002,21 (2):89-94. (PENG Jian, YANG Mingde, LIANG Hong. A quantitative study on Bajiang karst drainage basin in Lunan county, Yunnan province based on GIS [J]. Carsologica Sinica, 2002,21(2):89-94. (in Chinese))
- [15] Janja Kogovsek, Liu Hong. Water tracing test in the Tianshengan region, China at low water level in November 1998 [J]. Acta Carsologica, 1999,28(2):241-253.
- [16] 梁福源,宋林华,唐涛. 石林地区土壤性质及喀斯特洼地发育[J]. 地理研究,2004, 23 (3):321-328. (LIANG Fuyuan, SONG Linhua, TANG Tao. Soil physical and chemical properties and their relationship with the doline development in Lunan stone forest national park [J]. Geographical Research, 2004,23 (3):321-328. (in Chinese))
- [17] Abott MB,Bathurst JC, Cunge JA, et al. An introduction to the European hydrological system –system hydrologique Europeen, "SHE"1: history and philosophy of a physically–based, distributed modeling system[J]. Journal of Hydrology,1986a,87(1–2):45–59.
- [18] Abott MB, Bathurst JC, Cunge JA, et al. An introduction to the European hydrological system –system hydrologique Europeen, "SHE",2: structure of a physically –based, distributed modeling system [J]. Journal of Hydrology, 1986b,87(1–2):61–77.
- [19] Refsgaard JC. Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological model [J]. Journal of Hydrology, 1997,198: 69–97.
- [20] Henriksen HJ, Troldborg L. Methodology for construction, calibration and validation of a national hydrological model for Denmark [J]. Journal of Hydrology, 2003,280:52–71
- [21] Jakeman AJ, Hornberger GM, Littlewood IG, et al. A systematic approach to modeling the dynamic linkage of climate, physical catchment descriptors and hydrological response components [J]. Math Computer Simul, 1992,33(3):59–66.
- [22] 常学向,赵文智,赵爱芬.黑河中游二白杨叶面积指数动态变化及其 与耗水量的关系[J].冰川冻土, 2006,28(1):85-90. (CHANG Xuexiang, ZHAO Wenzhi, ZHAO Aifen. Variation of leaf area index of Gansu poplar and its relation to water consumption during growing season in the middle reaches of Heihe River [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006,28(1):85-90. (in Chinese))
- [23] E.xevi, K.Christiaens, et al. Calibration, validation and sensitivity analysis of the MIKE-SHE model using the Neuenkirchen catchment as case study [J]. Water Resources Management, 1997,11: 219-142.
- [24] 黄粤,陈曦.开都河流域山区径流模拟及降雨输入的不确定性分析[J].冰川冻土,2010,32(3):566-572. (HUANG Yue, CHEN Xi. Distributed hydrological modeling in Kaidu basin: MIKE-SHE model calibration and uncertainty estimation [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010,32(3):566-572. (in Chinese)) (下转第6页)

57

- [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, H?rmann 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,冯德锃,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 charateristics of hillslope curvature and its effects on hydological 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>

State Key Laboratory of Hydrology–Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
 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 Hydroscience, 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 patters 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 Huangjianghzuang 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

6