

岩溶流域水文模型研究进展

蒙海花,王腊春

(南京大学地理与海洋科学学院,南京 210093)

摘 要:岩溶地区含水介质结构的多重性和岩溶地貌形态的高度复杂性,使岩溶系统的水文效应和水资源的评价与预测一直都成为水文研究的重点和难点。在岩溶含水介质特点和岩溶水文形成过程的基础上,本文着重评述了黑箱模型、概念性模型、物理性模型和分布式水文模型在岩溶水文模拟中的应用。其中黑箱模型包括基于核函数的算法、回归模型、人工神经网络和小波分析;概念性模型包括蓄泄模型和流量过程线衰减函数;物理性模型主要包括达西定律、Darcy-Weisbach 方程、有限元法和等效连续多孔介质;分布式水文模型主要是 SWMM 模型,并分别对各类模型的概念、方法、应用效果以及存在的优缺点等进行了分析。最后指出了研究中存在的一些不足,并就岩溶流域水文模拟的进一步研究提出了相应的建议,这对于解决岩溶区的水资源可持续利用问题有重要意义。

关 键 词:岩溶流域;水文模型;展望

1 前言

全球现有岩溶地区面积 $2200 \times 10^4 \text{ km}^2$, 约占陆地面积的 15%, 居住着约 10 亿人口。集中连片的岩溶主要分布在: 欧洲中南部、北美东部和中国西南地区^[1], 其中中国境内岩溶区面积达 $344 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占国土面积的 35.93%。岩溶流域内裂隙、洞穴迂回曲折, 纵横交错, 致使雨水迅速渗漏到地下, 难以建库拦蓄雨水, 造成很多地区工农业严重缺水, 阻碍了经济发展并影响到人民生活, 因此研究岩溶流域的水文模拟可以为岩溶水资源开发与生态环境治理提供科学和技术依据。

由溶隙、溶洞及管道等多重介质所构成的岩溶含水系统是一个不断演变的复杂动态系统, 其与大气降水、地表水、土壤水之间的水文循环过程复杂, 此外岩溶含水介质中的水流具有裂隙流和管道流并存、层流和紊流并存、线性流和非线性流并存、连续流和孤立水体并存的特点, 至今还没有一套系统完整的研究模型, 能够准确描述岩溶含水介质中水流的流动规律^[2]。针对这些问题需从分析岩溶区含水介质不均匀性、三水转化关系和径流形成过程入手, 以揭示岩溶区水循环规律, 这将使岩溶区水文过程模拟具有实际意义。

本文讨论了岩溶流域水文模型国内外研究动态, 追溯其研究进展, 分析其存在的问题并且展望其发展趋势, 总结了这些模型的优缺点。对岩溶流域水文模型的深入研究不仅很有必要而且有一定的理论和应用价值, 研究成果可对岩溶山区生态重建规划、生态模式设计提供科学依据。

2 岩溶流域水文过程

岩溶流域含水介质有 3 类: ①岩溶发育最为强烈的石灰岩组成的含水介质, 以发育管道为主; ②岩溶发育较弱的白云岩组成的网状裂隙为主的含水介质; ③由岩性不一的可溶岩发育的管道和网状裂隙共同的含水介质。不同含水介质的空间结构控制三水转化和水资源形成过程。发育于含水介质中的地下河常为中小径流的输移通道, 地表河仅为雨季暴雨时的排洪通道。岩溶流域由可溶岩组成的非均匀含水介质, 构成了特有的二元三维流域空间系统, 该系统在岩性和构造控制之下, 由水流的差异溶蚀和侵蚀作用产生的地表、地下两子系统组成。地表子系统主要由溶沟、溶隙、石芽、峰丛、天窗、漏斗、落水洞及溶洼等组成; 地下子系统主要由溶洞、管道、伏流及地下河等组成。地表是岩溶

收稿日期: 2010-01; 修订日期: 2010-07.

基金项目: 国家自然科学基金项目(40571024)。

作者简介: 蒙海花(1983-), 女, 山西朔州人, 博士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: haihuameng@gmail.com

通讯作者: 王腊春, 男, 教授, 博士生导师, 主要从事水文水资源研究。E-mail: wang6312@263.net.cn

径流的形成场和分配场,地下是岩溶径流的输移场和调蓄场。岩溶流域二元三维空间结构系统特征,表征了流域下垫面的“三维”立体性,不同于非岩溶流域的下垫面的“平面性”。因此岩溶含水层的水循环分为2类,一类为管流,主要发生在洞穴和管道;一类称为散流或者基流,主要发生在节理或裂隙中,而且在饱和区遵循达西定律^[3]。

3 岩溶含水层水文模型研究进展

应用于岩溶含水层的水文模型大体可以分为3类:经验模型或黑箱模型、概念模型、理论或物理模型^[4]。这种划分是基于是否考虑输入—输出之间的物理过程,即水文过程是经验性描述、概念性描述还是完全物理描述^[5]。

3.1 经验模型或黑箱模型

系统理论方法的引入为岩溶水径流的形成、转化及水量分配研究提供了有效的工具,它只着眼于输出与输出之间变换函数的建立,不考虑岩溶系统复杂的介质结构及水动力机理,模型中的方程和变量没有物理意义,因而可视其为一个黑箱。黑箱模型是最简单模型,其在岩溶地区应用最多的是核函数、回归模型、人工神经网络和小波分析。

3.1.1 核函数

Dreiss 于1982年^[6]根据密苏里州东南部两个岩溶泉的历次暴雨期流量资料,采用反褶积法求得岩溶水系统的核函数(特征因素为瞬时单位过程线)。其中,含水层被概化为输入 $I(t)$ (渗透)和输出 $Q(t)$ (泉流量)的时间矩系统,输入输出之间用线性微分方程来表示,通过卷积积分 $Q(t)=(I \times u)(t)$ 来解方程。式中: $u(t)$ 表示核函数或响应函数,通过反卷积获得。

这为核函数分析法在岩溶水系统中的应用和进一步研究奠定了基础。之后,核函数的线性和非线性卷积积分的非预期形式在岩溶水文模拟中得到广泛应用^[7-14]。之所以将核函数模型引用到岩溶水系统中,是因为岩溶水系统的结构和地下水的补给,径流和排泄关系是极其复杂的,岩溶水系统具有明显的平滑,阻尼和调蓄能力强,线性时不变特征。因此用一阶线性核函数模型可以描述岩溶水系统接受降水补给—地下径流—泉排泄输出的转换过程。而对一些非线性特征明显,动态变化大的岩溶水系统,应该采用二阶或高阶非线性核函数模

型来模拟^[15]。也有学者认为线性统计模型虽然在某些方面模拟准确,但是在枯水期和丰水期模拟效果并不是特别好,而且线性卷积积分的离散形式在岩溶含水层的应用受到质疑,因为对线性和时不变性的假设从来没有完全达到,同时Volterra非线性形式有重大的缺陷而且不适合应用于岩溶含水层,这是因为代表数学解决方案的高阶核没有明确的物理意义和足够的预测能力,尤其是在分析长时间序列时^[13]。

3.1.2 回归模型

自1984年Zaltsberg^[16]采用简单回归模型来预测岩溶含水层的水位,之后各种类型的回归模型开始迅速发展。已经提出的岩溶泉水流量拟合及预测的回归模型有简单回归模型、多元回归模型^[17-19]、多元回归—残差自回归模型、门限自回归模型^[15]。

降雨量与径流量回归方程通式为:

$$R_t = a_0 \times P_t + a_1 \times P_{t-1} + \cdots, a_n \times P_{t-n} - aE_t \quad (1)$$

式中: R_t 为 t 月径流深(mm); P_t 为 t 月降雨量(mm); E_t 为 t 月蒸发量(mm); P_{t-n} 为 t 月前第 n 个月的降雨量; a, a_0, \cdots, a_n 为待定系数。

回归模型结构较为简单,且通过权重系数可以确定主要影响因素,但由于泉水是由大气降水通过岩溶含水层系统的裂隙流、孔洞管流及其他形式的渗流最终汇集而成,因此大气降水与泉水流量未必完全符合线性关系,预测精度必然受到影响。门限自回归是一种分段线性的非线性时间序列模型,对于岩溶泉水流量这种非平稳序列的模拟精度较高。但门限自回归模型只是数学上的模拟手段,无法取代扎实的水文地质调查工作。只有对岩溶水系统边界条件和水文地质结构调查清楚的基础上,才可能由门限自回归模型得到符合实际的结果^[15]。

3.1.3 人工神经网络

前人的研究表明神经网络的多变性结构可以为水文学提供简单和合理的解决方案,例如降雨—径流模拟、河流流量预测、降雨预测、地下水模拟和水资源管理模型,近年来神经网络也在不断的应用于岩溶流域水文模拟中^[20-25]。

人工神经网络可以通过简单的计算而不需要复杂的微分方程模拟降雨和泉流量过程的非线性,可以很好的解决水文系统的非线性问题,且其计算精度较高操作简便。但神经网络模型需要的样本较大,缺乏物理意义,网络算法,训练公式和错误确定经常是根据以前的经验和表现选择的,而不是根

据问题的自然过程进行选择。

3.1.4 小波分析

小波分析提供了一种能量在整个尺度分布的简单解释,通过把时间序列分解到时间频率空间,可以来确定变异的主要节点和变异节点在时间上的分布。小波分析的主要特点是可以提取时间尺度,可以用来评估水资源量的变化趋势,小波分析可以表征和阐明岩溶流域降雨和径流间关系的空间变异度^[26-28],对指导岩溶地区水资源规划及可持续利用有借鉴意义。

此外,一些随机模型也已经应用于岩溶流域,如相关图和波谱分析^[29-32]。上述工作主要集中于根据稳定随机过程确定和模拟水文过程,这些稳定随机过程使用稳定自相关和互相关函数(时间域)或者谱密度(频率域)。支持向量机^[33]和灰色系统法^[34]也逐步应用到岩溶流域径流量预测。

黑箱模型的优点是所需的参数少,瞬时单位线或脉冲响应函数可以反映系统的响应特性,能适用于复杂的岩溶过程,在模拟岩溶地区特殊的水文过程方面具有独特的优势。缺点是模型所分析出的变换关系只表示系统各部分综合的“模糊”结果,不涉及含水层的物理或水文机制,不能获取水量、能量转换的详细信息,也不能考虑人为干扰等作用,无法进行真正的预测;黑箱模型无法应用于其他流域,当流域内部发生变化不能再使用原来的模型参数,需对模型参数重新率定;黑箱模型需要长时间序列的输入和输出数据,这对于资料贫乏的岩溶地区是比较困难的,因此限制了黑箱模型的应用。

3.2 概念性模型

概念性模型是以水文现象的物理概念作为基础进行模拟,它所模拟的不完全是真实的物理实体,而是把流域径流过程作为一个整体的系统来研究,诸如降水、蒸发、截留、下渗、地表径流、壤中流、地下径流以及调蓄和流量演算,分别用数学方法作定量描述,是对复杂水文现象的一种概化。

3.2.1 蓄泄模型

蓄泄模型是从水文学中引用过来的,它利用若干个串并联的水箱来代表岩溶含水系统介质的空间层结构,并用串联水库之间的水量交换来模拟岩溶含水介质中裂隙—管道之间的水力联系,给模型参数赋予了具体的物理意义。

袁道先等于1996年提出的桂林丫吉模型是该种方法中研究较为成功的代表^[35]，“丫吉模型”在水

箱模型的基础上改进了水箱结构。管道接受地表径流直接补给及上层包气带上部的流量补给;裂隙流与管道流有水量交换,这与实际水文过程是比较相符的。之后,连续线性或非线性水库被广泛用来描述不同岩溶含水层在径流形成中的作用^[36-40],各水库是通过简单的转移方程联系起来,水库填满和排空就是把降雨转化为径流的过程,这些模型的结果一般是基于生成函数和转移函数。

水库模型优点是可以考虑含水层不同部分的功能,融合干流水系中的高流量,记住每一个水库的前期的水头和模拟流体力学的主要步骤。该模型在一定程度上克服了岩溶水运动的紊流特征带来的问题,可以较方便地模拟出各调蓄层内部以及各调蓄层之间任意时间段的调蓄量的变化,大体能刻画岩溶管道的地下水动态。总之,这类模型模拟无资料地区的水文过程比较理想,但是不能得到水位波动的区域化信息。

3.2.2 流量过程线衰减函数

流量过程线衰减函数法是基于Maillet开发的假设变化,其中水文过程曲线的退水曲线和含水层的水力学参数有连贯指数响应关系^[41]。出流量 $Q=cH$,而连续性方程是 $Qdt=AdH$,其中 c 是一个常数, H 是水库水位, A 是水库面积,解微分方程得到:

$$Q(t)=Q_0e^{-a(t-t_0)} \quad (2)$$

式中: Q_0 表示在时间 t_0 时的泉流量; $a=c/A$ 。

这个模型可以扩展为包括表征管道和含水层基质的泄流的多指数回归响应模型(随着变量 a 的变化特征曲线在不断变化),其中,最大衰减系数 a_1 代表管道快速补给的流量;最小衰减系数 a_i 反映从低渗透率的裂隙中补给管道的基流。相关系数 a 不仅取决于含水层的水力特性,而且取决于整个含水层的面积和形态,管网的高水力传导能力,主要反映含水系统中控制流量衰减的不同类型含水介质^[30]。这类模型一般对模拟缺乏数据的实例比较理想,但是不能模拟水位功能。

除了上述两类主要适用于岩溶流域的概念性水文模型外,集总式模型在岩溶流域也得到广泛应用^[42-46](图1)。集总式模型特点是结构简单、所需数据要求相对较低、计算方便,这是由于对水文过程、输入变量、边界条件的概化和对流域特征空间变异性的忽略。

概念性水文模型使用一系列相互串联或并联

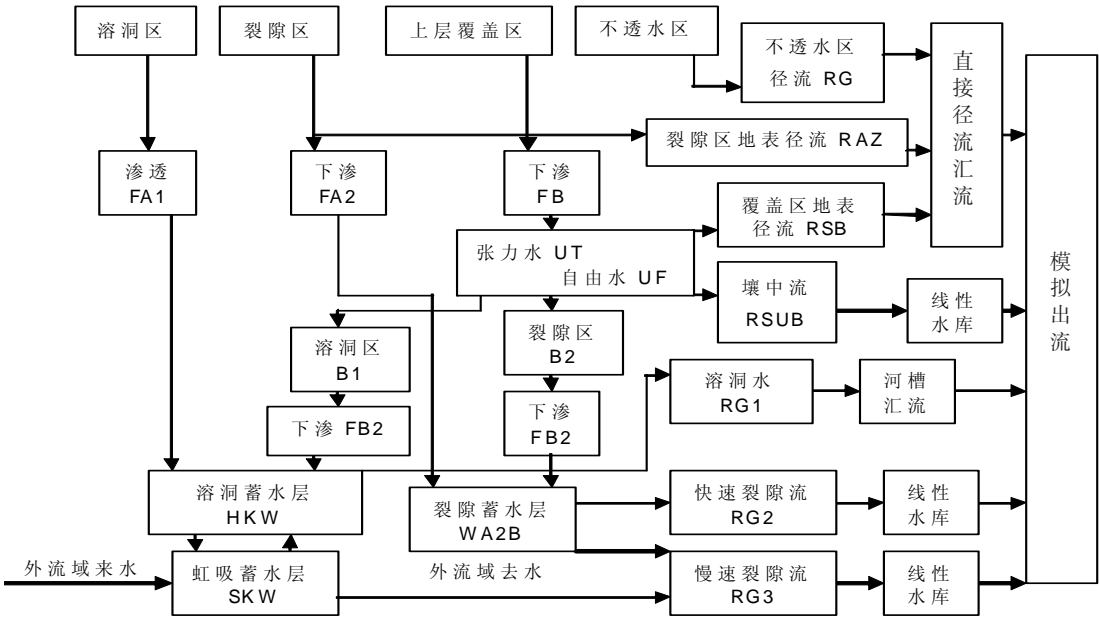


图 1 岩溶流域集总式水文模型流程图^[46]

Fig.1 A flow chart for the integrated hydrological model for the basins in the karst areas

的存储单元来模拟流域上发生的水文过程,偏重于系统的总体特性及功能,对系统的结构和水动力特征定量研究不够,其参数没有明确的物理意义。尺度问题是限制其应用的一个重要问题,流域内部气候的空间变化使其很难应用于较大的流域。

3.3 理论模型或者物理性模型

物理性模型是指依据水流的连续方程和动量方程来求解水流在流域的时间和空间变化规律,需要确定真实的水动力和地理参数,这需要大量的水文、地理和地质调查来获得模型的输入资料。受水文过程的复杂性、下垫面的多变以及人类对水文过程认识的限制,目前尚没有任何一种模型能够完全描述实际的水文物理过程,而是或多或少地基于一定的假设。Eisenlohr 等首先提出根据含水介质中层流和紊流的水动力条件来模拟基质中的散流和管道中的管流^[30]。一种方法为双重连续法,其中管道流和基质流遵守达西定律,但是基质流的水力传导性高^[47]。另一种方法是管流遵循 Darcy-Weisbach 方程^[48]。两种方法都需要描述水流在管道和基质中的流动状况,模型对流域结构需求很高,而且需要率定的参数很多。此后,有限元法被广泛应用于多重介质中^[30,49-50],Eisenlohr^[30]指出如果对系统的地理结构和水力特征有足够的了解,则使用有限元模

型可以很好的模拟这个系统的水文特征。等效连续多孔介质(EMP)方法被也被广泛应用,它是半物理半概念单连续模型,模型的基本假设是裂隙内部紧密联系而且属于高渗透区域,管道和裂隙被概化为原生孔隙,忽略孔隙的尺度差异。

到目前为止,岩溶含水层物理模型的研究都基于 Darcy 或者 Darcy-Weisbach 方程。Darcy 方程应用于含水层的饱和基质中水流,但是对于能否模拟管道系统的出口泉的流量还值得商榷。Darcy-Weisbach 方程应用于紊流压力流,但是管道系统中的水流并不是都是加压的,当含水层的水位低时,一些管道中的水流可能是自由表面流。

物理性模型可用于非均质及复杂边界的区域,可以刻画系统的水文地质背景条件改变、考虑人工干扰因素的影响,从理论上讲是最为理想的一种方法。但在岩溶流域可能是困难的,因为有关的物理参数(土壤、植被、裂缝、管道、溶洞)的详细和量化信息常常是不可见的。而且这类模型不能应用在岩溶大尺度区域上,因为岩溶含水层的空间异质性较大,对于大尺度的区域不可能获得所有需要的数据和他们的空间分布。一些研究也表明高参数流域模型与简单,少参数模型相比较有时包含更多的信息是没必要的,其结果很少或没有改进。

4 分布式岩溶水文模型

近年来,随着计算机、空间、遥感和地理信息系统等技术在水文模拟中的应用,给流域水文模拟的研究提供了新的思路,分布式水文模型正是在这种背景下提出的。

分布式水文模型因为能够考虑流域内水文要素的时空变异,能够反映流域各处地形、土壤、植被、土地利用和降水等的空间分布特征,在弄清岩溶与岩溶水之间关系的基础上,把分布式水流域文模型引入岩溶流域的水文模拟中,将是岩溶流域水文模型的发展方向。目前,已经有学者将分布式和半分布式水文模型应用于岩溶地区的水文模拟中,如地表水模型 HEC-HMS、HSPF、SWAT^[51-52]、WetSpa^[53]、TOPMODEL^[54]、管道流模型 SWMM^[55-61] 以及 Fe-Flow 等,其中应用最多的是 SWMM 模型。

岩溶管道水文系统的特征与 SWMM 模型结构有一定的相似性,应用 SWMM 对以管道为主的岩溶泉域降雨径流的模拟是合适的,多集中于地表水的入渗损失、地表产流模拟和参数敏感性分析,而且对于分析流域下垫面变化引起的生态、环境效应具有重要的参考作用。但分布式模型的建立需要对实际水文过程有十分深入的理解,对地形、地貌、地质、植被、土壤、气象等基本要素资料的要求也比较严格,而这对于岩溶地区比较困难。同时,该模型还存在很多不足之处,如对暴雨的径流响应明显,陡涨陡落,基流补给比例较小,入渗模型估算的产流偏大^[62],参数的设置较多,且一些参数不能反映岩溶含水介质的特征。

5 模型存在的问题和展望

5.1 岩溶流域水文模型模拟面临的问题

由于岩溶水文过程在时间和空间上复杂多变,岩溶实测资料相对贫乏,在岩溶流域建立流域水文模型存在实际困难,以下是岩溶流域水文模型存在的问题:

(1) 在地表水与地下水之间耦合、管道流和扩散流之间相互作用的具体机制、以及人类活动对水文过程的影响作用等方面的研究比较欠缺,对能准确表达岩溶含水层特点的有效参数如孔隙度、渗透速率及水力参数较难获取。

(2) 岩溶区域水文过程和流域特征空间变异性十分明显,而集总式模型忽略了水文过程、输入变量、边界条件的概化和流域特征空间变异性。

(3) 分布式水文模型在建模理论上是适用于具有复杂条件的岩溶地区的,就目前而言,分布式水文模型在岩溶地区的应用还不多,需要更多的实践经验进行完善。

(4) 模型的真实性问题。由于岩溶水文现象的复杂性,而且受测量技术的限制,一些水文过程和边界条件并不确定。因此,模型中做的假设性假设,导致模型并不一定能反映真实岩溶水文过程。

综上所述,目前的方法进行岩溶水资源定量评价都具有一定的局限性。它们无法反映岩溶流域水资源形成的完整过程,更不能完全反映岩溶水资源形成的各个要素的作用,特别是以流域为单元的岩溶水资源评价时,这些方法在理论、方法和技术手段等方面都遇到了挑战。

5.2 模型展望

岩溶流域由于结构的复杂性、径流成分多样性,对岩溶流域的水文模拟还有很多方面需要突破。作者认为需要在以下 6 个方面着重开展研究:

(1) 如何让集总式模型更接近客观实际,提高模型的准确度和可靠度,是集总式模型在岩溶地区应用需要解决的主要问题。

(2) 受制于岩溶发育程度和特点的区域差异,具体岩溶水文模型的建立一般难于推广,通过加大对不同地区、各种类型的岩溶含水层的定量分析、比较研究和总结,以系统的科学论和方法论为指导,利用先进的技术方法手段,将有可能建立可应用的专门岩溶流域水文模型。

(3) 分布式水文模型能够准确刻画流域内影响因素变化所产生的水文效应,对人类活动对流域水文状况和水资源等多方面的影响敏感,可以用于诸如预测人类活动对水、沙、农业、化学物质的长期影响,如面源污染、土壤侵蚀等。因此,运用 GIS、RS 的新技术获取流域分布式参数,提高分布式水文模型的在岩溶地区的应用具有十分重要的价值。

(4) 参数优化问题。通过对几种典型类型的岩溶流域建立模型,通过率定参数和验证过程,建立一种经验性的参数数据库,这样的数据库对于无监测资料区域的模型建模时参数的移用有很重要的意义。

(5) 岩溶流域水文模型的径流模拟只是基本功能,要建立水资源评价模型,以及耦合环境、生态的水文响应将是未来研究的一个重要方向。

(6) 水文现象的非线性问题研究是探索岩溶水文复杂性最为重要的理论问题,应用非线性理论及方法解决环境变化下水文规律问题将为构建岩溶流域黑箱模型提供新的思路。

参考文献

- [1] 李阳兵, 邵景安, 王世杰, 等. 岩溶生态系统脆弱性研究. 地理科学进展, 2006, 25(5): 1-9.
- [2] 雒征, 胡彩虹, 郝永红. 岩溶泉水的研究现状与进展. 水资源与水工程学报, 2005, 16(1): 56-59.
- [3] Bonacci O. Karst hydrology. New York: Springer, 1987: 184.
- [4] Denić-Jukić V, Jukić D. Composite transfer functions for karst aquifers. Journal of Hydrology, 2003, 274(1-4): 80-94.
- [5] Singh V P. 水文系统: 降雨径流模拟. 赵卫民, 戴东, 译. 郑州: 黄河水利出版社, 1999: 480.
- [6] Dreiss S J. Linear kernels for karst aquifers. Water Resources Research, 1982, 18(4): 865-876.
- [7] Dreiss S J. Linear unit-response functions as indicators of recharge areas for large karst springs. Journal of Hydrology, 1983, 61(1-3): 31-44.
- [8] Dreiss S J. Regional scale transport in karst aquifer: 1. Component separation of spring flow hydrographs. Water Resources Research, 1989, 25(1): 117-125.
- [9] 曹以临, 张永祥. 利用频谱响应函数进行淄博流域地下水评价. 中国岩溶, 1991, 10(4): 253-260.
- [10] Labat D, Ababou R, Mangin A. Rainfall-runoff relations for karstic springs. Part I: convolution and spectral analyses. Journal of Hydrology, 2000, 238(3-4): 123-148.
- [11] Lambrakis N, Andreou A S, Polydoropoulos P, et al. Non-linear analysis and forecasting of a brackish karstic spring. Water Resources Research, 2000, 36(4): 875-884.
- [12] Pinault J L, Plagnes V, Aquilina L, et al. Inverse modeling of the hydrological and the hydrochemical behavior of hydrosystems: Characterization of karst system functioning. Water Resources Research, 2001, 37 (8): 2191-2204.
- [13] Denić-Jukić V, Jukić D. Nonlinear kernel functions for karst aquifers. Journal of Hydrology, 2006, 328(1-2): 360-374.
- [14] Olsthoorn T N. Do a bit more with convolution. Ground Water, 2008, 46(1): 13-22.
- [15] 何宇彬, 韩宝平, 徐超, 等. 中国喀斯特水研究. 上海: 同济大学出版社, 1996: 165-169.
- [16] Zaltsberg E A. Forecast of karst water levels. Heise: Hydrogeology of Karstic Terraines, 1984: 40-42.
- [17] Yobbi D K. Effects of tidal stage and ground water levels on the discharge and water quality of springs in coastal Citrus and Hernando Counties, Florida. USGS Water Resources Investigations Report, 1992: 4069.
- [18] Felton G K, Currens J C. Peak flow rate and recession curve characteristics of a karst spring in the Inner Bluegrass, Central Kentucky. Journal of Hydrology, 1994, 162 (1-2): 99-118.
- [19] 王茂枚, 束龙仓, 季叶飞, 等. 济南岩溶泉水流量衰减原因分析及动态模拟. 中国岩溶, 2008, 27(1): 19-31.
- [20] Kurtulus B, Razack M. Evaluation of the ability of an artificial neural network model to simulate the input-output responses of a large karstic aquifer: The La Rochefoucauld aquifer (Charente, France). Hydrogeology Journal, 2007, 15(2): 241-254.
- [21] Hu C H, Hao Y H, Yeh J, et al. Simulation of spring flows from a karst aquifer with an artificial neural network. Hydrological Processes, 2008, 22(5): 596-604.
- [22] 李根义, 朱学愚, 钱家忠, 等. 实数编码遗传算法优化的神经网络模型在岩溶水位预报中的应用. 南京大学学报, 2001, 37(3): 323-327.
- [23] 陈南祥, 黄强, 曹连海. 基于偏最小二乘回归与神经网络耦合的岩溶泉预报模型. 水利学报, 2004(9): 68-72.
- [24] 陈宏峰, 朱明秋, 夏日元, 等. 湖南洛塔干河猪场表层岩溶泉 BP 人工神经网络分析. 中国岩溶, 2005, 24(4): 300-304.
- [25] 李贵明. 基于相空间重构与神经网络耦合的岩溶泉流量预测模型. 工程勘察, 2006(4): 30-32.
- [26] Labat D, Ababou R, Mangin A. Rainfall-runoff relations for karstic springs. Part II: continuous wavelet and discrete orthogonal multiresolution analyses. Journal of Hydrology, 2000, 238(3/4): 149-178.
- [27] Labat D, Ababou R, Mangin A. Introduction of wavelet analyses to rainfall/runoffs relationship for a karstic basin: The case of Licq-Atherey karstic system (France). Ground Water, 2001, 39(4): 605-615.
- [28] 孔兰, 梁虹, 黄法苏, 等. 基于喀斯特流域径流量多时间尺度小波分析. 人民长江, 2008, 39(5): 17-26.
- [29] Padilla A, Pulido-Bosch A. Study of hydrographs of karst aquifers by means of correlation and cross-spectral analysis. Journal of Hydrology, 1995, 168(1-4): 73-89.
- [30] Eisenlohr L, Kiral L, Bouzelboudjen M, et al. Numerical simulation as a tool for checking the interpretation of

- karst spring hydrographs. *Journal of Hydrology*, 1997, 193(1-4): 306-315.
- [31] Labat D, Ababou R, Mangin A. Linear and non-linear input/output models for karstic springflow and flood prediction at different time-scales. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 1999, 13(5): 337-364.
- [32] Panagopoulos G, Lambrakis N. The contribution of time series analysis to the study of the hydrodynamic characteristics of the karst systems: application on two typical karst aquifers of Greece (Trifila Almyros Crete). *Journal of Hydrology*, 2006, 329: 376-398.
- [33] 杨军耀, 赵涛. 岩溶水系统支持向量机泉流量预报模型研究. *工程勘察*, 2007, 12: 29-42.
- [34] 郝永红, 王学萌. 娘子关泉灰色系统模型研究. *系统工程学报*, 2001, 16(1): 39-44.
- [35] 袁道先, 戴爱德, 蔡五田, 等. 中国南方裸露型岩溶峰丛山区岩溶水系统及其数学模型的研究: 以桂林丫吉村为例. 桂林: 广西师范大学出版社, 1996: 88-118.
- [36] Barrett M E, Charbeneau R J. A parsimonious model for simulating flow in a karst aquifer. *Journal of Hydrology*, 1997, 196(1-4): 47-65.
- [37] Halihan T, Wicks C M. Modelling of storm responses in conduit flow aquifers with reservoirs. *Journal of Hydrology*, 1998, 208(1-2): 82-91.
- [38] Fleury P, Plagnes V, Bakalowicz M. Modelling of the functioning of karst aquifers with a reservoir model: application to Fontaine de Vaucluse. *Journal of Hydrology*, 2007, 345(1-2): 38-49.
- [39] Padilla A, Pulido-Bosch A. Simple procedure to simulate karstic aquifers. *Hydrological Processes*, 2008, 22(12): 1876-1884.
- [40] Le Moine N, Andreassen V, Mathevet T. Confronting surface and groundwater balances on the La Rochefoucauld Touvre karstic system (Charente, France). *Water Resources Research*, 2008: 44.
- [41] Maillet E. *Essai d'hydraulique souterraine et fluviale*: Librairie scientifique. Paris: Hermann, 1995: 304.
- [42] 严启坤. 一个岩溶地下河流域模型及其应用. *中国岩溶*, 1988, 7(2): 111-120.
- [43] 张健云, 庄一鸽. 岩溶地区流域水文模型的探讨及应用. *河海大学学报*, 1988, 16(3): 68-79.
- [44] Wanakule N, Anaya R. A lumped parameter model for the Edwards Aquifer, Technical Report No. 163, Texas Water Resources Institute, Texas A and M University, College Station Texas, 1993: 83.
- [45] 王腊春, 史运良. 非闭合流域岩溶水模型. *水科学进展*, 1995, 6(4): 318-324.
- [46] 缪韧, 林三益. 非均匀下垫面流域径流模拟与径流分析: 岩溶地区水资源研究之一. *四川水力发电*, 1995, 2: 17-23.
- [47] Kiraly L. A three dimensional model for groundwater flow simulation. NAGRA report, 1985: 84-89.
- [48] Mohrlok J, Sauter M. Modelling groundwater flow in a karst terrace using discrete and double-continuum approaches: importance of spatial and temporal distribution of recharge//Proceeding 6th conference on limestone hydrology and fissured media, La Chaux-de-Fonds, Switzerland, 1997: 167-170.
- [49] Csepregi A. Computer simulation of the karst water table in the Transdanubian Mountain Range, Hungary//Gunay G, Johnson A I. *Karst Waters and Environmental Impacts*, Proceedings of Fifth International Symposium on Karst Waters and Environmental Impacts, Antalya, Turkey, 1997: 343-352.
- [50] Larocque M, Banton O, Ackerer P, et al. Determining karst transmissivities with inverse modeling and an equivalent porous media. *Ground water*, 1999, 37(6): 897-903.
- [51] Schomberg J D, Host G, Johnson L B, et al. Evaluating the influence of landform, surficial geology, and land use on streams using hydrologic simulation modeling. *Aquatic Sciences*, 2005, 67(4): 528-540.
- [52] 任启伟. 基于改进 SWAT 模型的西南岩溶流域水量评价方法研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2006: 45-59.
- [53] Liu Y B, Batelaan O, De Smedt F, et al. Test of distributed modeling approach to predict flood flows in the karst Suoimuoi catchment in Vietnam. *Environmental Geology*, 2005, 48(7): 931-940.
- [54] 索立涛, 万军伟, 卢学伟. TOPMODEL 模型在岩溶地区的改进与应用. *中国岩溶*, 2007, 26(1): 67-70.
- [55] Campbell C W, Sullivan S M. Simulating time-varying cave flow and water levels using the Storm Water Management Model. *Engineering Geology*, 2002, 65(2-3): 133-139.
- [56] 章程, 蒋勇军, Lian Y Q, 等. 利用 SWMM 模型模拟岩溶峰丛洼地系统降雨径流过程: 以桂林丫吉试验场为例. *水文地质工程地质*, 2007, 34(3): 10-14.
- [57] 吴月霞, 薛勇军, 袁道先, 等. 岩溶泉域降雨径流水文过程的模拟: 以重庆金佛山水房泉为例. *水文地质工程地质*, 2007, 34(6): 41-47.
- [58] 贾晓青, 杜欣, 赵旭峰, 等. 改进 SCS 产流模型在岩溶地区径流模拟中的应用. *人民长江*, 2008, 39(11): 25-30.
- [59] Peterson E W, Wicks C M. Modeling groundwater through branch work conduit systems using the storm water management model (SWMM). *EOS Transactions of*

- the American Geophysical Union, 2000, 81(48): 529.
- [60] Peterson E W, Wicks C M. Assessing the importance of conduit geometry and physical parameters in karst systems using the storm water management model (SWMM). *Journal of Hydrology*, 2006, 329(1-2):294-305.
- [61] Zaghoul N A, Abu Kiefa M A. Neutral network solution of inverse parameters used in the sensitivity-calibration analyses of the SWMM model simulations. *Advances in Engineering Software*, 2001, 32(7): 587-595.
- [62] John C L. Stormwater management design in karst terrane adjusting hydrology models and using karstic features. <http://www.planetrussell.net/fdg/fdg-demo-red>.

Advance in Karst Hydrological Model

MENG Haihua, WANG Lachun

(School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: The aquifer system of karst has features of complexity and multiplicity, and the researches on karst hydrological effects and water resources forecast are difficult. A number of models have been developed in the karst areas to simulate surface runoff, underground dynamics and transfers between them since the 1960s, which include black-box models, conceptual models and physical models. Each type can address specific issues in the field of simulating runoff, and meanwhile, has its own drawbacks and limits. (1) Blank-box models, including kernel function, regression equation, stochastic models, artificial neural network and wavelet theory, are often well adapted to decipher their overall behavior, but they have the disadvantage of not providing any understanding of the physical mechanisms of the aquifer and lacking predictive power. (2) Conceptual models are based on simplified physical interpretation of the processes of transforming input to output, including reservoir models and multiple exponential recession response elements. In general, the molders of this category are ideal in modeling cases with insufficient data, but they cannot apply localized information for water level fluctuation. (3) Physical models are considered to be those which can simulate both diffuse flow in the matrix and the flow in the pipes, these models require very good knowledge of the aquifer systems and they have too many parameters need to be calibrated. At present, in terms of spatial/temporal complexity, data scarcity and physical aquifer properties, a variety of common issues still trouble karst hydrological modelers. The tendencies of future karst hydrological models mainly manifest themselves in the following aspects: addressing problems in terms of physical features of hydrologic behavior and nonlinearity of karst aquifers, studying karst water cycle, analyzing the characteristics and regional differentiation of all storage forms, applying new technology, methods and distributed models to define quantitatively and precisely the distribution of subsurface drainage, developing hydrological models which can be applied to many karst areas, establishing optimum parameters database, and incorporating the eco-hydrology response and water resources assessment in hydrological models.

Key words: karst basin; hydrological model; research progress

本文引用格式:

蒙海花, 王腊春. 岩溶流域水文模型研究进展. *地理科学进展*, 2010, 29(11): 1311-1318.