

分布式水文模型构建理论与方法述评

张金存^{1,2}, 芮孝芳^{1,2}

(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. 河海大学水资源环境学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 回顾了分布式水文模型的发展历程, 分析总结了分布式水文模型的构建理论与方法, 并对其关键内核——“物理基础”的含义做了深入而新颖的分析。分析了两类当前比较活跃的模式——分布式物理模型与分布式概念性模型中存在的问题及发展前景, 并探讨了综合二者之长的具有物理基础的松散型分布式水文模型的构建思路, 以及学者们期待中的基于确定性与随机性耦合的分布式水文模型。

关键词: 分布式水文模型; 物理基础; 分布式物理模型; 分布式概念性模型

中图分类号: TV213.4; G853.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2007)02-0286-07

近年来, 随着计算机、遥感和地理信息系统等信息技术的发展, 人们容易地获取流域的空间变化信息(如地形、土壤和植被类型等)已成为可能。同时, 社会发展促使环境系统分析的需求(如水质模拟、土壤侵蚀, 土地利用变化的影响等)不断增加, 这使得分布式水文模型成为水文学研究的热点之一。传统的集总式与分散式水文模型对产汇流过程(尤其是产流过程)进行不同程度的概化描述, 在生产应用中简单易行, 具有资料易于获取、成本低、效率高等优点, 但对流域响应的物理机理和空间变异性考虑不足, 导致模型参数的物理意义不明确、甚至“异参同效”等缺陷。在分布式水文模型的研制中, 人们力求克服集总式流域水文模型物理基础薄弱的缺点, 希望对水文物理过程的时空变化给予更贴近真实过程的描述, 具体体现在两个方面: 在模型结构上一般是基于数字高程模型对流域作细致的离散化处理, 希望通过对单元尺度水文过程的刻画汇总得到流域尺度上的总响应。对降雨分布、地形坡度、土壤各向异性、地表覆被等的描述都是镶嵌在网格之上的; 寻求物理意义明确、可以通过实测直接得到或者通过确定性方法由实测资料推算得出的参数。

1 分布式水文模型的兴起与发展

1.1 基于过程描绘的模型

国外分布式水文模型的研究一般认为起于 1969 年 Freeze 和 Harlan 发表的“一个具有物理基础数值模拟的水文响应模型的蓝图(FH69 蓝图)”^[1]。随后, 由于计算机功能的加强以及地理信息系统等相关技术的发展, 分布式水文模型得到了迅速发展。现有许多具有物理基础的分布式水文模型几乎都是基于 FH69 蓝图构建的, 如各种版本的 SHE 模型, 美国的 IHDM 模型, 澳大利亚的 CSIRO TOPOG 模型, 德国的 HILLFLOW 模型等。尽管它们的流域离散化方式和对描述水文过程的方程式(组)的求解方法各不相同, 但无一例外地皆以 FH69 蓝图作为径流过程描述的基本框架, 即以质量、能量和动量方程描述自然系统, 并考虑各变量和参数的空间变异性。这些参数原则上具有明确的物理意义, 并且可通过实测资料估计。与集总式概念模型相比, 这类模型不是直接量化流域中蓄水单元之间的水量交换, 而是通过连续性的控制方程直接计算水量和能量的流动与增减。

这些模型运用数学物理方程在每一个网格单元内对地表径流和地下径流过程做了细致的刻画, 但迫于客观条件, 仍作了一些简化处理, 如忽略大孔隙中的优先流(因为没有在单元尺度内描述其物理方程), 把坡面径流粗略地简化为深度和流速均匀的层流来处理, 忽略土壤水分特性曲线的滞后作用等。尽管以 MIKE SHE 为代表

收稿日期: 2005-09-01; 修订日期: 2005-12-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50309002)

作者简介: 张金存(1977-), 女, 山东枣庄人, 博士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: zhangjincun@163.com

的分布式物理模型存在一定的局限性，但近年来也得到了一些应用，如 MIKE SHE 模型在工程规划项目中应用情况良好，为项目实施提供了一定的决策依据^[2]。

1.2 半分布式模型

另有一类降雨径流模拟方法也保存了对流域响应的分布式描述，但实现方式要简单得多。它不象 SHE 模型那样包含详细的过程描述，而是应用分布函数描述流域产流的空间变异性。应用比较广泛的有如下几类^[3]：

基于纯统计描绘的，如 PDM 模型^[4]；基于简单函数形式的，如新安江、ARNO、VIC 模型；基于由 GIS 导出的水文响应单元，如 SWAT 模型^[5]；基于简化物理推导得出的水文相似性指数的分布，如 TOPMODEL。这些模型都很重视流域响应的空间变异性，但在某一场降雨中确定流域中哪些地方在发生产流的确非常困难，因此，把目标定为在流域尺度上正确模拟响应是更可行的途径，即追求总体模拟的近似正确。这类模型的优势在于可以把流域下垫面中的某些影响水文响应的关键因子(如土壤蓄水容量、地形等)的空间变异性在分布式函数中反映出来，但却不必像全分布式模型那样引入那么多的参数，且模型参数确定也相对简单。

1.3 分布式模拟的发展趋势

计算机技术和各种信息技术无疑会越来越先进，这必然会促进水文模拟的发展，但对其将来发展的方向却主要存在着两种不同的观点。一种观点认为信息技术的进一步发展必然会使得分布式水文模拟更细致、更复杂^[2]，尽管对于径流预测而言，复杂的分布式物理模型并不必要，但对于以水流流路为基础的环境影响分析(如土地利用变化、地下水提取等人类活动影响预测以及水质、土壤侵蚀模拟等)除了对分布式物理模型进行改进，别无他法，而且认为这方面所需要的方法将会更加全面和复杂。另一种观点认为这样的发展趋势未必能取得好的预测效果，因为更复杂意味着更多的参数，更多的参数意味着更多的率定问题，更多的率定问题则会给预测带来更大的不确定性，尤其是在超出率定资料范围之时^[3]。后者更倾向于开发参数相对简约的分布式水文模型，认为发展分布式水文模型应直接基于大尺度测量的网格参数化，而不是小尺度集总理论的简单改进以及现有分布式水文模型参数值的改进。然而，近期冰雪水文模拟中一个基于过程的分布式水文模型^[6]又部分地否定了以上两种观点。该模型全部应用能量平衡方程简单地模拟溶雪过程来进行水量预估，其输入仅需和以温度为指数的传统模型一样的数据资料，而模型预测结果与实测资料的相关指数(平均 $R^2 > 0.9$)明显高于以温度为指数的传统模型。尽管这样的研究成果还很少见，但至少可以说明对于分布式水文模拟的方法目前还不能断言哪一种是最好的方式。

从根本上讲，各种模型的应用都要受限于水文系统的可用资料。著名水文学家 Beven 认为，即使测量技术非常完善之后，仍有必要区分两种模型：一种是用于辅助理解水文过程的，在小尺度上详细描述水文过程；另一种用于流域尺度上的预测预报^[3]。前者必然要依赖于水流流路的地形地质特性，而后者就不能要求那么多的输入数据，因为在需要预测的较大尺度上测量是不可行的或者不经济的，而用于预测目的模型所需数据必须是易于获得的。

分布式水文模拟的方式呈现多元化的蓬勃发展态势，各类模型在应用中的表现各有千秋，但都在保证模型效率的前提下努力追求模型结构和参数的物理基础。

2 何谓“物理基础”

在水文模拟中，通常把应用数学物理方程描述产汇流过程的水文模型称作“具有物理基础的水文模型”。这种模型有严密的物理概念与数学公式，看起来似乎科学性很强。从水文学的研究方法上来讲，数学物理方程、经验公式以及概念性模型等都是水文物理过程的描述语言，它们都是对自然现象的近似描述。经验公式和概念性模型通常是基于大量的数据分析归纳出的数据之间的函数关系，虽然其中大多数也符合“质量守恒”或者“能量守恒”原理，但并不一定能给出合理的物理解释。而描述水文过程的数理方程多经得起理论推敲或者试验验证，其参数多数可以由实测得到或者从实际资料推算得出，具有一定的物理意义，因此人们往往认为数理方程的描述更贴近真实的物理过程。但从分布式物理模型近三十年的研究与应用情况来看，其对水文过程的

模拟精度并不乐观,甚至不及简单的集总式模型,效果远远没有预想的那样好。问题出在哪里呢?多个分布式物理模型在穷尽现有资料条件的情况下,距离实际应用仍有很长的路要走。显然,以分布式和具有物理基础为最大优势的分布式物理模型并没有很好地重现自然过程,也就是说它的模拟结果不符合真实的物理过程。由此,一个从物理基础出发的方法最终却偏离了真实的物理实际,这就提示需要重新考察我们的出发点,同时有必要重新思考一下物理基础的涵义。

评价一个模型是否具有物理基础,往往是指该模型对径流形成机制的描述是否符合真实的水文过程,而仅仅把模型采用的形式语言作为判断依据显然是不够的。因为有时不合时宜的数理方程会使得看似具有物理基础的模型而与实测资料不符,甚至违背基本的物理守恒定律。这种经不起检验的模型显然根基不牢,并且与通常的期望(有物理基础的模型应当与水文实际过程拟合更好)相背离。而“物理基础”本应代表着客观现实,一个具有物理基础的模型应当是从客观现实出发的模型。因此,判断一个方法是否具有物理基础,应当以其对客观真实过程的再现能力为主要标准,而后才是其所采用的形式语言。

Beven 认为^[7],具有“物理基础”应当意味着该理论可以从已经建立的一些物理定律中推导出来,就像合理的假说和定理中所定义的那样。模型具有“物理基础”不仅要与既定的理论假设相容(但这仅仅是必要条件),而且还要保持与观测资料的一致性。如果不能证明模型满足这两个要求,那么这个理论就是有缺陷的,或者说其不能在实际中应用(否则就是观测资料有错或者仅有局部代表性)。在流域水文模拟中,对模型在理论上是否可以接受不大要求,但对模型在流域尺度上是否与实测值一致非常关注。而分布式物理模型对前者也非常关注,即首先追求模型的理论基础可靠、贴近真实过程。

综合以上分析,一个水文模型具有物理基础应包含三层含义:在理论上,模型结构不违反基本的物理原则,如质量守恒、能量守恒等;预测过程应与实测资料保持可以接受的一致性;模型的核心理论应当是从已经建立的一些物理定律中推导出来,就像合理的假说和定理中所定义的那样。

有些模型的建立是从大量的数据统计分析中寻找出降雨径流相关关系,而这种关系又往往是水文过程中的客观规律,再配套合适的模型结构与参数,就能够给出好的预测了。如新安江模型就是这样建立起来的,其在中国湿润、半湿润地区的广泛应用证明该模型很好地反映了相应地区的产汇流过程。从这个意义上说,新安江模型是基于客观存在的物理规律建立起来的,也应当说是具有物理基础的,只是相较以上物理基础的三层含义略弱一些。但是,基于海量数据分析找出的产汇流规律也是对客观世界的真实描述,虽然不象经典的数学物理方程那样有严密的物理概念与数学公式,看起来更具科学性,但其在水文学领域的应用中却更加奏效。也许我们不应该那么迷信经典的数理方程,而应该重视基于实际观测资料的规律挖掘。这两种方式理应具有同等的地位,都应该可以被称作物理基础。

3 基于水动力学的分布式水文模型的局限性

基于水动力学的分布式水文模型又被称作分布式水文物理模型,其应用于地下水和非饱和带水流的模拟已经有三十多年的历史。尽管分布式水文模型中的数学方程式在时间和空间上是连续的,但除非是在非常简单的条件下,否则很难得到解析解。因此,在实际情况下必须使用数值方法(有限差分、有限元,边界元等)。

3.1 对理论根基的质疑

分布式水文物理模型由于理论根基上的疑问和不容乐观的应用效果,导致许多学者对其可靠性持有怀疑。

我们必须承认的一个基本事实是水文学中有些情景的水流方程与其他流体动力学方程(如气象学、海洋学、湖沼学中的流体动力学方程)有着根本的不同:如坡面流和地下水运动主要受控于局地的地貌、地质条件和单个流路路径的局地边界阻力,而不是流体本身的动力^[7]。这就意味着要提高计算精度就不能只考虑水流的特性,还要考虑水流发生地即介质或者渠道的特性。

目前,所有的有物理基础的地下水分运动描述均依据达西定律和理查兹方程。Beven 认为,这里存在着一个基本的错误^[2,7],即理论方程对应的尺度与其应用情况下的尺度不一致。这是指假定点尺度方程可以应用在

块尺度上,再依据模拟总径流量与实测资料的对比来率定得出相应尺度变化后的“有效参数值”,作为模型的参数值。这种水文模拟中最常用的“反推法”显然不是很严谨的方法,它的出发点就可能与水文现象物理机制不符。Beven认为,达西定律对于这种土柱内局部范围内的有效性尚值得怀疑,而对土柱尺度和块尺度则绝对无效,对分布式水文模型的网格尺度当然也无效^[2,7]。分布式模型在应用这些方程时,要求其参数和变量在几十米甚至几公里的空间范围内一致。Refsgaad在很大程度上同意Beven的总结:“不能保证在以网格尺度描述水文实际时,分布式水文模型是基于正确的方程”,但认为这是一个非常悲观的观点,并认为基于现有知识研究模型规则和建立模型才更具有意义,等将来有条件时可再做改进^[2]。

达西定律和理查兹方程很好地描述了实验室土柱中的饱和水流和非饱和水流。天然孔隙含水层中地下水流的雷诺数和裂隙中地下水流的水力坡度,一般远小于临界雷诺数和临界水力坡度,大于临界雷诺数的流动很少出现,仅在喀斯特岩层中或井壁及泉水出口处附近可能见到^[8]。因此天然地下水多处于层流状态。当地下水低速度运动时,即雷诺数小于1~10的某个数值时,为粘滞力占优势的层流运动,适用达西定律^[8]。也就是说,大多数自然状态下,描述地下水水流运动是可以适用达西定律的。但使用尺度要接近实验土柱尺度,否则理论适用的尺度与使用中的实际尺度不匹配将会带来误差。但这种探索仍然是值得尝试与鼓励的。MIKE SHE在流域尺度上成功验证的实例^[2]说明物理基础分布式模拟方法能够通过内部状态变量的验证,并且允许使用严格而明晰的参数化方案。MIKE SHE的开发应用者Abbott和Refsgaad强调,模型能否被正确地使用、或者是非难辨是模型使用者的责任,而不应该与模型方法的可行性及其一般特征混淆^[2]。这说明复杂性限制了分布式物理模型的推广使用,其培训和使用成本很高,总体来说还不是理想的实用模型。

如果说存在这种基本的错误,那为什么这类模型还能凑效呢?这一方面可能是由于这些模型在一定程度上可以模拟出水文系统自然现象的重复性,即它的模糊而复杂的水文机制;另一方面,模型参数确定时所主要采用的率定方法在水文模拟中往往能够凑效,这在集总式模型中几乎是百试不爽。参数确定仍然要依靠反推法来率定,这说明分布式物理模型在这方面没有突破集总式模型的局限性。

3.2 参数问题

尽管物理方程与高分辨率的图像、数据资料在分布式模拟中广为采用,但这种远比集总式复杂的模型并没有必然地得到更好的结果。正如Seyfried和Wilcox所言^[9]:“物理基础模型的缺点之一是较集总式模型需要更多的输入资料,这样参数化和检验的工作量就大大加大了。尽管参数化、检验和运行模型需要更多的努力,而模拟结果往往只是略微好于甚至不如集总式模型。这就使很多人怀疑物理基础的模型是否值得去努力,至少在严谨的理论研究之外的努力值得怀疑……”。支持此观点的人很多,如Loague和Freeze^[10],Michaud和Soroshian^[11],Beven^[7]等等。

理论上,物理模型的参数可以实测或者由实测资料率定得出。但在实践中,由于水文系统的非线性和结构异质性,物理模型的参数往往并不能由实测物理量确定出来^[12]。这就导致需要率定所谓的网格尺度上的有效参数值,“有效”指的是可以由之得出合理的流域尺度上的模拟结果。这个率定过程很复杂,不如基于水文过程线分析率定集总参数那样易于识别,因为绝大部分有效参数代表的是局部特征。当调好的参数可以适应模型时,人们又要问这些参数是否仍有物理意义,或者此时模型是否又成了精致的“黑箱子”模型。

Loague和Freeze认为,对于物理基础模型而言,模型参数错误可能来源于基于点测量资料描述区域分布性特征手段的无力^[10];Beven认为所谓的物理基础模型并非建立在真正的物理机制之上^[7,13];Woolhiser认为如果一个模型是真正具有物理基础的,模拟者应当可以事先估计参数值或者直接在野外测量获得^[14]。

4 概念性分布式水文模型的开发价值

在模型开发的探索中,汲取传统之力量的循序渐进方式往往是一种很有效的途径,集总式概念性模型与分布式手段的结合正是这种思路的体现。集总式模型(如SAC-SMA、水箱模型等)有几十年的应用经验,已经成为水文工作中的实用方法。其大量的成功应用实例证明这些集总式模型对相应的流域响应作了比较正确的模拟,

而且水文学家在这面积累了丰富的使用经验,在这个基础上进一步加入分布式手段以加强对空间变异性的描述,正好可以集二者之长。虽然集总式模型并没有明确地使用经典的质量和动量守恒方程,但它们却综合了基于野外实验的基本的物理机制。由此,鉴于概念性模型在多级尺度上运行良好,故很有可能成为分布式模拟系统的建构元件。正如 Robinson 等所指:“发现物理基础和概念性模型之间联系的工作还做得很不够,尽管这恰好就是推进以预报为目的的水文模拟所需要做的”^[15],我们应当从概念性集总式模型与具有物理基础的分布式模型比较分析中衍生出有益的东西来,促使集总式模拟的经验在分布式模拟中得到全面地开发、利用。

分布式概念性模型将应用广泛的经典集总式概念性模型用于网格单元的产流,然后链接一个汇流模型,如美国天气局的 HL-RMS 模型^[16]、基于新安江模型的分布式模拟^[17]、TACD^[18]模型等。在实现方式中,有很多细节问题需要解决,比较突出的是集总式模型的适宜单元尺度问题以及网格参数的确定方法。当然,这也是各类分布式模型研究中的普遍问题。

经典的集总式模型在几十到上千平方公里的流域上应用成功,而在几百平方米或者几个、十几平方公里的小尺度上是否适用,究竟多大的网格单元(或者子流域)可以兼顾集总式产流模型的适用性与分布式手段描述流域空间变异性的优越性,这是分布式概念性模型要解决的首要问题。基于新安江模型的分布式模拟^[17]分别在不同分辨率的网格上进行了比较探讨,认为并非 DEM 的分辨率越高越好,这与土壤前期湿度以及降雨强度、流域尺度等因素都有一定的关系,而且径流模拟一定要与参数率定在同一分辨率下进行,否则会产生很大的误差。其模型效果与集总式新安江模型基本相当,有时还略差一些。在基于 SAC-SMA 的 HL-RMS 模型^[16]中应用的是 16 km² 的网格,且在 2002 年的国际分布式水文模型比较项目^[19]中,应用总体效果较好,在提高径流预报精度和空间分辨率、以及无资料地区水文预测方面表现出非常大的潜力。其初期的测试在几个源流域上进行,结果可与集总式模型相媲美,在降雨空间变异较大的地方甚至超过了集总式模型。长期以来,水文模拟中实际可用于率定模型参数的水文变量仅仅只是有限的局部区域响应,这种响应是区域空间变异的物理属性之综合体现,是分布式特征的综合效应。从这个层面上考虑,集总式模型反而更有优势,因其参数代表的就是流域属性的整体效应。为了发挥出集总式模型的这种优势,并考虑到其在流域尺度上的广泛适用性,在分布式概念性模型中选用较大的单元尺度(如十几平方公里)可能会获取最佳的模拟效果。

在网格参数的确定上,分布式概念性模型与分布式物理模型存在着相似的有效参数确定问题。二者的区别只不过前者是参数从大尺度过渡到较小的单元尺度,后者则是从小尺度的点过程到较大单元尺度的应用。对于分布式概念性模型,直接挪用在特征相似的较大区域尺度上率定好的集总式产流模型参数是否合适,如不合适又当如何确定所谓的“有效参数值”呢?在现有文献中,为了加强模型的物理基础,多是将产汇流参数与流域下垫面特征相关联^[16,20,21],建立其相关关系,作为确定“有效参数值”的重要依据。其中,HL-RMS 模型的做法非常值得借鉴。它的参数确定分两步进行:首先应用 1 km 的土壤属性数据推出各网格的 SAC-SMA 先验参数值,然后再用流域出口水文过程线校准先验网格参数。其基本思路是利用局地网格的特性和流域出口处的总响应分析出流域内部网格单元的参数分布。在 HL-RMS 模型的研究中发现^[16],当先验参数来源于尺度对比相对较小的集总模型率定区域时,模拟效果相对较好,即先验参数的率定区域尺度与参数应用尺度的比值下降时,模型误差会相应降低。这与基于新安江模型的分布式水文模拟研究^[17]中的相关结论一致。

5 期待中的分布式水文模型

5.1 折中方案的分布式水文模型的开发思路

由分布式水文模型近 30 年的开发应用经验,可以得出如下结论:如果要想实现面源污染、水土流失、土地利用和农业管理等环境分析功能,就有必要开发庞大的综合系统模型(例如 MIKE SHE, SWAT 等),但在强物理基础的描述方法上仍有待进一步探索;仅就径流预测而言,复杂的分布式物理基础模型并不必要,研究开发结构简单的物理基础水文模型是值得提倡的方向。

按采用的径流形成理论和方法,分布式流域水文模型分为概念性的和具有物理基础的两类;按流域出口断

面流量过程线的合成方法,可以分为松散结构的和耦合结构的两类。所谓松散结构,指的是分别计算各单元面积的产流量,然后叠加演算到流域出口得出整个流域响应。耦合结构是指通过一组水动力学的微分方程及其定解条件联立求解来描述流域降雨径流形成过程,确定流域响应。概念性松散结构的流域水文模型即分散式流域水文模型是一个准分布式水文模型,它具有与集总式流域水文模型类似的缺陷;而具有物理基础的耦合结构的分布式流域水文模型虽基于水动力学理论基础,但求解困难,其离实用还有很远的距离。芮孝芳认为具有物理基础的松散结构的分布式流域水文模型,是介乎以上两者之间的、值得花力气研究的一类模型^[22],其实现方式可以尝试应用基于水文学的、有物理基础的产流理论来构建水文模型。

5.2 基于确定性与随机性耦合的分布式水文模型的可行性

流域系统的水文现象在时间序列上具有规律性的反复和一定的随机性,在空间上也是既有一定的相似性,又有巨大的变异性。总体来说,降雨的流域响应既有确定性特征,又包含一定的随机色彩,这同时也造成了水文模型结构和参数的不确定性。基于这种特性,出现了一些考虑模型结构和过程不确定性的基于确定-随机耦合方法的模型。这类模型原则上由同等重要的两部分组成,即随机性的框架和包含其中的确定性内核^[2]。在分布式水文模型中,对相似下垫面特征的网格,通常赋予相同的参数值;在同一网格内也总是有确定性方法无法考虑的变异性。即使比较完善的模型,也难以充分考虑水文参数的空间变异性。而确定随机耦合模型却可以将水文参数的空间变异性考虑得比较全面。

确定-随机联合模拟在地下水文模拟中应用很广,一方面用于径流预估,另一方面是用于模型预测的不确定性估计。尽管确定-随机联合模拟在分布式水文模型中还很少见,但 M. B. Abbott, J. C. Refsgaard 和 K. J. Beven 都认为这是可行的^[3]。Robert Vertessy 等在一个 7500 m² 的小流域上初步实现了这种建模思路^[23],以有组织的随机场参数化方案在分布式模型中描述土壤水力属性的空间变异性,尽管只用了一个随机分布样本,结果仍然证明这种基于确定性与随机性耦合的方案虽然在总径流过程预测上与其它方案相差无几,但在坡面漫流空间分布的预测上却表现出绝对的优势。

6 结 论

在流域水文模拟中引入分布式手段的基本目的是为了精确描述流域响应的空间变异性,从而加强模型的物理基础与可靠性。对流域响应空间变异性的不同描述方法演绎着不同的建模思路。采用什么样的建模方式应当由模型的应用目的来决定:分布式水文物理模型似乎更适合用于研究降雨径流形成机理;而基于应用水文目的时,就目前的理论和资料条件来说,结构简单的分布式水文模型在实践应用中会更加奏效。具有物理基础的松散结构的分布式水文模型和基于确定性与随机性耦合的分布式水文模型是两个值得努力的新方向。

参考文献:

- [1] Freeze R A, Harlan R L. Blueprint of a physically-based digitally-simulated hydrologic response model[J]. Journal of Hydrology, 1969, 9:237 - 258.
- [2] Abbott M B, Refsgaard J C. 分布式水文模型[M]. 郑州:黄河水利出版社, 2003.
- [3] Beven K J. Rainfall-Runoff Modelling: the Primer[M]. Chichester: John Wiley and Sons, Ltd, 2000.
- [4] Moore R J, Clarke R T. A distribution function approach to rainfall-runoff modelling[J]. Water Resources Research, 1981, 17:1367 - 1382.
- [5] 王中根, 刘昌明, 黄友波. SWAT模型的原理、结构及应用研究[J]. 地理科学进展, 2003, 22(1):79 - 86.
- [6] Walter M T, Brooks E S, McCool D K, et al. Process-based snowmelt modeling: does it require more input data than temperature-index modeling? [J]. Journal of Hydrology, 2005, 300:65 - 75.
- [7] Beven K J. Towards an alternative blueprint for a physically based digitally simulated hydrologic response modelling system[J]. Hydrological processes, 2002, 16:189 - 206.
- [8] 薛禹群. 地下水动力学[M]. 北京:地质出版社, 1997. 15, 17.
- [9] Seyfried M S, Wilcox B P. Scale and the nature of spatial variability: field examples having implications for hydrologic modeling[J]. Water Re-

- sources Research , 1995 , 31(1) :173 - 184.
- [10] Loague K M, Freeze R A. A comparison of rainfall - runoff modeling techniques on small upland catchments[J]. Water Resources Research , 1985 , 21 (2) : 229 - 248.
- [11] Michaud J , Sorooshian S. Comparison of simple versus complex distributed runoff models on a mid-sized semiarid watershed[J]. Water Resources Research , 1994 , 30 (3) :593 - 605.
- [12] Beven KJ. Linking parameters across scales : subgrid parameterizations and scale dependent hydrological models , in Scale Issues in Hydrological Modeling[M]. edited by Kalma J D , Sivapalan M S: Wiley , New York , 1995. 263 - 282.
- [13] Beven KJ. Changing ideas in hydrology : the case of physically - based models[J]. Journal of Hydrology , 1989 , 105 :157 - 172.
- [14] Woolhiser D A. Search for physically based runoff model-a hydrologic El Dorado ? [J]. ASCE Journal of Hydraulic Engineering , 1996 , 122 (3) :122 - 129.
- [15] Robinson J S , Sivapalan M. Catchment-scale runoff generation model by aggregation and similarity analysis , in Scale Issues in Hydrological Modeling[M]. edited by Kalma J D , Sivapalan M: Wiley , New York , 1995. 311 - 330.
- [16] Koren V. Hydrology laboratory research modeling system (HL-RMS) of the US national weather service[J]. Journal of Hydrology , 2004 , 291 : 297 - 318.
- [17] 魏林虹. 时空尺度对洪水模拟的影响研究[D]. 南京 : 河海大学 , 2005 :
- [18] Uhlenbrook S. Hydrological process representation at the meso-scale : the potential of a distributed conceptual catchment model[J]. Journal of Hydrology , 2004 , 291 :278 - 296.
- [19] Reed S , Koren V , Smith M , *et al.* Overall distributed model intercomparison project results[J]. Journal of Hydrology , 2004 , 298 :27 - 60.
- [20] 俞鑫颖 , 刘新仁. 分布式冰雪融水雨水混合模型[J]. 河海大学学报 , 2002 , 30(5) :23 - 27.
- [21] 郑红星 , 王中根 , 刘昌明 , 等. 基于 GIS/RS 的流域水文过程分布式模拟 - 模型的校验与应用[J]. 水科学进展 , 2004 , 15 (4) :506 - 510.
- [22] 芮孝芳. 分布式水文模型的现状与未来[J]. 水利水电科技进展 , 2004 , 24(2) :55 - 58.
- [23] Vertessy R , Elsenbeer H , Bessard Y , *et al.* Storm runoff generation at La Cuenca , in Spatial Patterns in Catchment Hydrology : Observations and Modelling[M]. edited by Grayson R , Bloschl G: Cambridge University Press , 2000. 247 - 271.

Discussion of theory and methods for building a distributed hydrologic model^{*}

ZHANG Jin-cun^{1,2} , RUI Xiao-fang^{1,2}

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

2. College of Water Resources and Environment , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract : The evolution processes of the distributed hydrologic models are reviewed , and their building ways are analyzed. The physical basis is a key kernel of the distributed hydrologic models. A new and comprehensive explanation is given for the connotation of “physically-based”. Two kinds of popular models , the distributed physically-based models and the distributed conceptual models , are discussed , especially about their existing problems and future. Finally , two new promising developmental directions are discussed : one is a physically-based incompact structure distributed hydrologic model that integrates the advantages of the above two kinds of popular models ; the other is a deterministic-stochastic coupled distributed hydrologic model.

Key words : distributed hydrologic model ; physically-based ; distributed physically-based model ; distributed conceptual model

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50309002).