

新安江模型的起源及对其进一步发展的建议

芮孝芳 凌 哲 刘宁宁 梁 霄

(河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098)

摘要 :回顾新安江模型产生的历史背景,缅怀以赵人俊教授为代表的中国水文学界的先辈们对模型的创建所做的杰出贡献。深入剖析新安江(三水源)模型不同于世界上其他流域水文模型的特点。从模型发展的世界趋势、模型发展中必须引起注意的一些问题和重视数字流域技术开发三方面提出进一步发展新安江流域水文模型的建议。

关键词 :新安江模型 ;水文模型 ;数字流域 ;水文预报 ;水文计算

中图分类号 :TV11 ,P33 **文献标志码** :A **文章编号** :1006-7647(2012)04-0001-05

Origin of Xin 'anjiang model and its further development//RUI Xiao-fang ,LING Zhe ,LIU Ning-ning ,LIANG Xiao(College of Hydrology and Water Resources , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract :The Xin 'anjiang model has been used around the world for 32 years. In order to honor the great contributions to this model made by Chinese hydrological ancestors , as represented by professor Zhao Ren-jun , the historical background of the Xin 'anjiang model is reviewed in this paper. The different characteristics of the Xin 'anjiang (three water resources) model and other watershed hydrology models are deeply analyzed. Suggestions for further development of the Xin 'anjiang model are given in three categories :the model development trend in the world , some problems that should be avoided in the model development and the attention that should be paid to the development of digital watershed technology.

Key words :Xin 'anjiang model ; hydrology model ; digital watershed ; hydrological forecasting ; hydrological calculation

1 模型的起源及走向世界

英国水文和气象学家 Penman 在 1961 年曾言简意赅地指出,从某种意义上说,水文学就是一门回答“降水后将发生什么”的学科^[1]。在 20 世纪 60 年代之前,水文学家处理这个基本科学问题的主要思路是将流域降雨径流形成分成“产流”和“汇流”两个阶段来考察,在“汇流”阶段有时又分成“坡面汇流”和“河网汇流”两个阶段。先分后合,最终达到由降雨过程推算流域出口断面洪水过程的目的。大约在 20 世纪 20 年代至 50 年代,这种处理流域降雨径流形成的思路达到了一个高潮:1921 年 Ross 提出了时间-面积曲线;1932 年, Sherman 提出了单位线, Horton 提出了指数型下渗曲线,维利加诺夫提出了径流成因公式;1935 年 Horton 提出了均质包气带的产汇流理论;1938 年 MaCarthy 提出了 Muskingum 法;1945 年 Clark 提出了时间-面积曲线与线性水库串联结构的流域汇流计算方法;1951 年 Kohler 和

Linsley 提出了前期影响雨量 P_a 为参数的合轴相关图形式的降雨-径流相关图;1957 年加里宁提出了特征河长理论, Nash 提出了基于线性水库串联的流域瞬时单位线公式;1958 年加里宁提出了所谓“成因汇流”理论。

1945 年世界上第一台电子计算机在美国 Pennsylvania 大学诞生,由此引发的信息革命对世界的发展产生了极其深刻而深远的影响,仅在相关学科领域,计算机科学与经典的水力学相结合于 1957 年产生了计算水力学,计算机科学与经典力学相结合产生了计算力学。在这样的背景下,20 世纪 60 年代初在美国 Stanford 大学诞生了世界上第一个真正意义上的流域水文模型——Stanford 模型,实现了计算机科学与经典水文学的结合^[2]。流域水文模型不仅将传统的产流和汇流分析计算程序化,达到快速计算的目的,而且为解决降雨径流形成中遇到的较为复杂的问题提供了新的重要的工具,在当时确有“柳暗花明又一村”的感觉,受到了水文学家的

青睐。之后,流域水文模型很快进入了一个蓬勃发展时期,截至目前,全世界已有数以百计的流域水文模型,其中应用价值较大的流域水文模型就有 15 个^[1]。20 世纪 80 年代一些水文学家关于 21 世纪将是“模型世纪”的预言现在似乎得到了证实。

中国水文学家对降雨径流形成进行系统的研究,大约要比国外迟 20 a,直到 20 世纪 50 年代初,由于大规模水利建设之急需,主要在水文设计和水文预报的推动下开始迅速发展,至 20 世纪 60 年代中期,就获得了一批重要的研究成果^[3-6]。在产流方面,改进了降雨-径流相关图,创建了蓄满产流模式和超渗产流模式,提出了考虑流域蓄水容量空间分布不均对产流影响的流域蓄水曲线,在大量实验基础上构建了蒸散发计算的三层模式,吸收了 Horton 产流理论,提出了用稳定下渗率 f_c 划分地面径流和地下水径流的方法,吸收了 Dunne 产流理论,提出了用具有侧、底孔的线性水库概念来划分地面径流、壤中水径流和地下水径流的方法;在洪水演算方面,根据特征河长理论探讨了 Muskingum 法的物理意义,创造了 Muskingum 法连续演算,导出了连续演算公式;在流域汇流方面,发展了 Sherman 单位线法,提出了一些能处理降雨空间分布不均对流域汇流影响的经验方法,在划分单元流域的基础上将流域汇流和洪水演算结合起来,发展了所谓“成因汇流理论”。以赵人俊、华士乾为代表的中国水文学家在 20 世纪 50 年代初至 60 年代中期所获得的上述成果,就成为日后创建新安江模型的重要理论基础^[7]。

20 世纪 70 年代初,因中国自主设计、自主施工、自主管理的第一座大型水力发电站——新安江水电站开展洪水预报调度、保障防洪安全、提高发电效率之急需,以赵人俊为首的水文学家和工程师,在上述成果基础上,整合成体现“流域分单元、蒸散发分层次、产流分水源、汇流分阶段”的产流和汇流计算方法,并通过程序设计在计算机上得到实现,获得了令人满意的精度及防洪发电调度效果,成为当时国内水利科学领域一项具有重大影响的科学研究成果。

至 20 世纪 70 年代,虽然在国外流域水文模型的应用已经比较普遍,但在中国由于“文革”原因,却仍鲜为人知。中国改革开放伊始,水文学界迎来了两大任务:一是为即将在英国牛津召开的国际水文预报学术讨论会撰写论文;二是为世界气象组织和联合国教科文组织即将在河海大学举办的国际洪水预报讲习班编写教材。这两大任务为中国水文学走向世界无疑提供了重要机会。为了与国际接轨,很有必要将中国所取得的上述水文学成就整合成一个流域水文模型推向世界。通过对当时国际

上给流域水文模型命名的情况分析,发现流域水文模型的命名无非是下列 4 种方式之一:一是以发明人命名模型,如 Nash 模型、Dooge 模型等;二是以发明者所在的工作单位命名模型,如 Stanford 模型、HEC 模型等;三是以首先应用的流域或河流命名模型,如 Sacramento 模型等;四是以模型结构特征命名模型,如水箱(Tank)模型等。因此,当时赵人俊教授毅然选择上述第三种命名方式将模型命名为“新安江流域水文模型”(下称“新安江模型”),并通过 1980 年在牛津召开的国际水文预报学术讨论会推向世界^[8]。

现在,新安江模型不仅在国内广泛使用,成为中国最具影响力的流域水文模型,而且受到世界气象组织的推荐,纳入其水文业务综合系统(HOMS)的分件,向世界各国介绍,美国国家天气局也在采用,爱尔兰国立大学 Galway 学院还将其作为研究生教材内容。

2012 年是新安江流域水文模型走向世界 32 周年纪念。新安江模型的研制成功并被广泛使用,是中国在 20 世纪对世界水文科学做出的重要贡献之一。

2 模型结构的主要特点

图 1 为新安江(三水源)模型的结构框图,表 1 所列是其所含参数的定义或物理意义。新安江模型结构的特点之一是将流域降雨径流形成过程划分为流域产流和流域汇流两个阶段^[7]。在流域产流阶段认为,只有包气带缺水量得到满足后才能产流。若为均质包气带,则会产生地下水径流和超稳定下渗能力的地面径流,流域产流量由地下水径流和地面径流组成。若为具有一个相对不透水层的包气带,则除了产生地下水径流外,还会有壤中水径流产生,而且所产生的地面径流一般为饱和地面径流^[9]。这种所谓“蓄满产流”是新安江模型区别于其他模型的

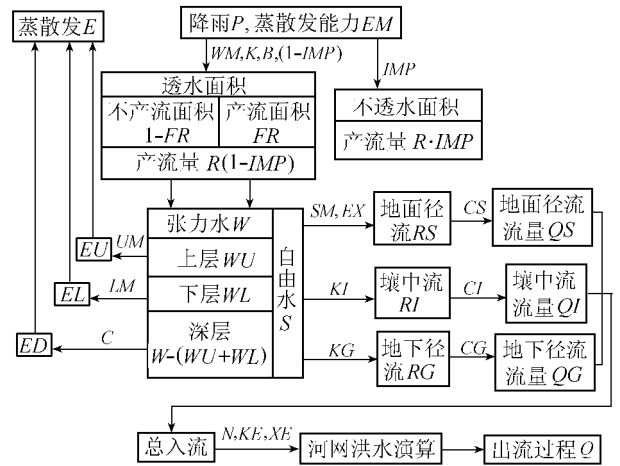


图 1 新安江(三水源)模型的结构

表 1 新安江(三水源)模型参数的定义或物理意义	
参数	含义
K	蒸发能力折算系数
WM	流域蓄水容量
UM	上层蓄水容量
LM	下层蓄水容量
C	深层蒸散发系数
IMP	不透水面积占全流域面积之比
B	蓄水容量曲线指数
SM	流域自由水蓄水容量
EX	自由水蓄水容量曲线指数
KI	壤中水径流出流系数
KG	地下水径流出流系数
CS	地面径流消退系数
CI	壤中水径流消退系数
CG	地下水径流消退系数
N	子河段数
KE	子河段洪水波传播时间
XE	子河段流量比重因子

核心标志,均质土层和具有一个相对不透水层的不均质土层分别为二水源新安江模型和三水源新安江模型适用的包气带结构^[10]。后来发现,这种对“蓄满产流”的理解似乎有点苛刻,因为事实上只要一场降雨终止时包气带缺水量得到满足就行了。这两种对“蓄满产流”的理解,区别在于前者认为不存在“蓄满”前的超渗地面径流,而后者则认为既有“蓄满”后超稳定下渗率产生的地面径流或饱和地面径流,又有“蓄满”前超地面下渗能力产生的地面径流。后一种情况可能发生在湿润地区的久旱之后或一些半湿润半干旱、半干旱半湿润地区。这两种理解在计算流域产流量和确定水源比重时虽并无区别,但地面径流的时间分配将不相同。如果将后一种情况错当成前一种情况,那么那些在“蓄满”前产生的超渗地面径流的时间分配就被人为地延后了,这样必然造成推算的洪水过程线和洪峰滞后的不合理现象。在流域汇流阶段认为,可以将流域汇流分成河网汇流和子流域汇流两种类型,若干个子流域经由河网的串并联就完整地体现了流域汇流。子流域的汇流一般采用 Sherman 单位线,但也可以采用其他方法,如 Clark 方法等。河网汇流一般采用分段连续演算的 Muskingum 法,但也可以采用其他方法。新安江模型在处理流域汇流时有很强的容他性。

新安江模型结构的特点之二是采用三层蒸散发计算模式^[7]。用“蓄满产流”观点处理流域产流量虽然可以回避对下渗动力过程的考量,但却不可能回避包气带的蒸散发问题。新安江模型蒸散发计算模式的理论根据是来自人们对土壤蒸散发实验结果的认知和升华。早先人们采用“二层”蒸散发计算模式,现在比较普遍采用“三层”蒸散发计算模式。这

里的“层”均以土壤水分常数作为“门槛”来划分。在“二层”蒸散发计算模式中,当土壤含水量大于或等于田间持水量时,按土壤蒸散发能力蒸散发;当土壤含水量小于田间持水量时,按与土壤含水量成正比的规律蒸散发。在“三层”蒸散发计算模式中,当土壤含水量大于或等于田间持水量时,按土壤蒸散发能力蒸散发;当土壤含水量小于凋萎系数时,按远小于土壤蒸散发能力的一个定值蒸散发;当土壤含水量小于田间持水量、大于凋萎系数时,按与土壤含水量成正比的规律蒸散发。计算流域蒸散发除了需要上述提及的土壤含水量“门槛”值外,土壤蒸散发能力也是一个重要参数。因土壤蒸散发能力难以通过直接观测来确定,故在新安江模型中采用由实测水面蒸发,经修订并经流域水量平衡验证来确定的方法,从而避免用经验公式计算蒸散发,提高了计算精度。这种处理蒸散发的思路和方法是国外模型所没有的。

新安江模型结构的特点之三是必须设置分水源的计算结构^[7]。在新安江模型中,分水源或划分径流成分,是为了使模型推算出的洪水过程能符合实际情况。因为组成流域产流量的不同径流成分具有不同的汇流速度,因此,分水源采用相应的汇流速度才能使流域汇流计算更加合理。新安江模型采用的分水源结构有二:一是按稳定下渗率将蓄满产流模式求得的流域产流量划分为地表径流和地下径流,这里的地表径流可能只是地面径流,也可能是地面径流和浅层壤中水径流之组合;地下径流可能只是地下水径流,也可能是地下水径流和深层壤中水径流之组合。二是按线性水库的“溢出”、“侧孔流”和“底孔流”将按蓄满产流模式求得的流域产流量划分为地面径流、壤中水径流和地下水径流。前者为二水源新安江模型采用的分水源结构,后者为三水源新安江模型的分水源结构。新安江模型之所以要设置分水源结构,是因为它采用“向下(downward)”的分析思路,而国外模型几乎无一例外地采用“向上(upward)”的分析思路。

新安江模型结构的特点之四是采用了具有统计意义的流域蓄水容量曲线和流域自由水容量曲线^[7]。有人说,指数小于1的抛物线型的流域蓄水容量曲线和指数大于1的抛物线型的流域自由水容量曲线是新安江模型的核心部分。笔者认为这种说法并不恰当。事实上,前者是为了考虑下垫面条件空间分布不均匀对蓄满产流的影响,而后者是为了考虑下垫面条件空间分布不均匀对饱和地面径流形成的影响。具体地说,前者是考虑包气带缺水量空间分布不均匀对蓄满产流的影响,后者是考虑包气

带自由水蓄水容量空间分布不均匀对饱和地面径流形成的影响。由于影响产流面积变化除了下垫面条件空间分布不均匀外,还有降雨空间分布的不均匀性,所以,新安江模型采用的统计意义上的流域蓄水容量曲线和流域自由水容量曲线,只适用于分析降雨空间分布均匀情况下,仅由于下垫面条件空间不均匀引起的产流面积变化问题。至于对这两条统计分布曲线为什么选择抛物线型,至今仍难以作出理论解释,笔者发现的流域蓄水容量曲线与地形指数分布曲线之间的关系仅是对其作理论解释的初步尝试^[11]。此外,对于闭合流域,其流域蓄水容量曲线和流域自由水容量都应该是上端有限的,只有对非闭合流域,其上端才是无限的。虽然在 Stanford 模型中设置有下渗容量面积分配曲线^[2],用于考虑下垫面条件不均匀对超渗地面径流形成的影响,但是,在流域水文模型中设置流域蓄水容量曲线和自由水容量曲线,新安江模型是先于国外其他流域水文模型的。

新安江模型结构特点之五是确定模型参数的方法采用“客观优选法”^[12]。以三水源新安江模型为例,它包含有 17 个参数(表 1),为便于研究,可对这些参数依据一定原则进行分类。若按在降雨径流形成中的作用,可将这些参数分为产流参数、分水源参数、汇流参数等 3 类;若按参数的物理意义分,可将这些参数分为几何参数、物理参数、经验参数等 3 类;若按确定这些参数的方法分,可将这些参数分为直接量测、物理推算、率定等 3 类;若按其对于模拟结果的影响,可将这些参数分为敏感参数和不敏感参数两类。新安江模型参数的客观优选法的具体含义是:对那些不敏感参数和物理概念明确的参数,先根据以往的经验或通过有关分析计算给出其值或合理范围,然后通过微调定出;而将其余依靠率定方法确定的参数,分成产流参数和分水源及汇流参数两组,然后分别拟定不同的目标函数和相应的约束条件,再通过最优化方法求出。在率定产流参数时,以流域产流量离差平方和最大为目标,而在率定分水源及汇流参数时以确定性系数最小为目标。这样就可使每个目标函数包括的待定参数尽可能少一些,以避免由于参数之间的相依性带来的“异参同效”问题。新安江模型采用的这种物理分析、专家经验和最优化方法相结合的“客观优选法”,在国外流域水文模型中至今几乎未见到过。

3 进一步发展模型的建议

从哲学上说,新安江模型是“向下”思维指导下产生的流域水文模型^[13],具有重要代表性。从物理上说,新安江模型各环节都有或多或少的产汇流理

论基础。从包容性上说,新安江模型现在是、将来仍是水文学中产汇流计算方法之集成。因此,人们后来所做的大部分工作几乎均可视为对新安江模型发展所作的贡献。新安江模型在产汇流研究中开启的思路是永存的,这就是笔者对新安江模型科学价值的基本看法。如何发展新安江模型?笔者尝试提出三方面建议。

要正确认识流域水文模型的发展趋势^[14-15]。经过半个多世纪的发展,流域水文模型正从集总式和分散式向分布式发展,从“黑箱子”和“概念性”向“具有物理基础”发展,从仅模拟降雨径流形成向集成模拟多种水文过程发展,从单纯考虑确定性或随机性向同时考虑确定性和随机性发展、从传统的研制方式向以数字流域平台为支撑发展。

要注意克服一些值得警惕的问题。20 世纪 80 年代以来,在流域水文模型的研制和应用中,笔者认为或多或少存在一些值得商榷、甚至是错误的思维或做法。这些问题,概括起来是^[16-17]:

a. 将提出或使用流域水文模型看作是水文学研究的主要追求,甚至是唯一追求,不适当地夸大其作用,不重视、甚至忽视对水文现象物理过程机理的揭示和探求。

b. 将在某种特定条件下研制出来的流域水文模型“普适化”,甚至“万能化”,只要国外有什么模型,就会有追随者生搬硬套地到处套用,不认真、甚至不去考虑具体使用条件。

c. 将模型就是“结构+参数”这一形象化的提法绝对化,提出“只要参数搞准了,结构越简单越好”的有害主张,殊不知结构和参数虽然是流域水文模型的两个重要方面,但并非独立无关,而是互为密切关联的,不符合水文物理过程的模型,结构越简单,参数的物理性就越成问题。

d. 将分布式流域水文模型与集中式流域水文模型的主要区别不适当地归纳为流域是否被网格化了,不清楚所谓分布式流域水文模型应该是指那些能考虑现实世界中降雨、蒸散发等气象要素空间变异性 and 地形地貌、土壤、植被、水文地质条件等下垫面条件空间变异性的流域水文模型。

e. 盲目使用最优化算法率定模型参数,有过分迷信数学方法的倾向,不太顾及、甚至几乎不顾及模型结构和参数的物理意义,对“异参同效”现象熟视无睹,也不打算克服这一问题。

f. 将“参数化”不恰当地替代“模型参数区域或地区规律”的提法,“参数化”是针对“非参数”而言的,“模型参数区域或地区规律”与“参数化”事实上是风马牛不相及的两个概念,在寻求“模型参数区域

或地区规律”时,又常常停留在“统计综合”这种十分单一的思路上,甚至将一定条件下通过“统计综合”得到的经验公式不适当地“移用”或“外延”,甚至当作理论公式来用。

g. 只注意拟合历史资料的效果,不注意模型的检验和用于预测的效果,一些研究者仅获得一次或少数几次洪水的合格的拟合效果,就宣布模型研制或使用成功,不愿公布模型参数确定的结果,也不愿意对所使用参数做一些合理性分析。

h. 为了说明模型的拟合效果好,有人竟不用顺时序的洪水过程线而改用按大小排列的流量历时曲线来判断模型的模拟效果,甚至以经验公式的结果作为参数率定的判据。

这些问题都是违背基本的科学精神的。

要重视数字流域技术^[18-21]。“数字流域”是相对于“纸质流域”而言的。传统的“纸质流域”来自用图纸表示的地形图;“数字流域”则是一种将现实世界的真实流域通过数字化技术变成虚拟世界中“流域”的技术。建立“数字流域”的基础是数字高程模型(DEM)。因为DEM表达的是地面高程的空间分布,因此据此就容易获得流域的地形地貌特征。如果将植被、土壤、地质、水文地质、土地利用和水文气象要素的空间分布图叠加在数字流域上,那么还可以方便地将这些特征值或要素的空间分布用数字化方式描述出来。虽然数字流域技术目前还存在一些关键问题需要攻关,但笔者认为,它对流域水文模型进一步发展将有深远影响,因为数字流域技术,不仅在模型中考虑下垫面条件和各种影响因素空间分布不均匀的作用提供了支撑,有利改变模型主要依赖于水文资料,而忽略对下垫面资料应用的不正常的情况,而且为在虚拟环境中进一步研究和发展流域水文模型提供了可能。笔者通过虚拟世界的“网格水滴”证明了R-V地貌瞬时单位线的正确性就是一例^[18]。

参考文献:

[1] SINGH V P, WOOLHISER D A. Mathematical modeling of watershed hydrology[J]. J Of Hydrologic Engineering, 2002, 7(4): 270-292.

[2] LINSLEY R K, KOHLER M A, PAULHUS J L H. Hydrology for Engineers[M]. New York: Mc Graw-Hill, 1982.

[3] 赵人俊. 流域汇流的计算方法[J]. 水利学报, 1962(2): 1-9.

[4] 华东水利学院. 水文预报[M]. 北京: 中国工业出版社, 1963.

[5] 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(1): 53-68.

[6] 华东水利学院. 中国湿润地区洪水预报方法[M]. 北京: 水利电力出版社, 1978.

[7] 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.

[8] ZHAO Ren-jun, ZHUANG Yi-lin, FANG Le-run, et al. The xinanjiang model[C]//IAHS 129, Hydrological Forecasting Proceeding, Oxford Symposium, Paris: IAHS, 1980: 351-356.

[9] KIRKBY M J. Hillslope hydrology[M]. New York: John Wiley and Sons, 1978.

[10] 芮孝芳, 宫兴龙, 张超, 等. 流域产流分析及计算[J]. 水力发电学报, 2009, 28(6): 146-150.

[11] 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.

[12] 赵人俊. 流域水文模型参数的客观优选方法[J]. 水文, 1993(4): 21-24.

[13] 刘新仁. 流域水文模型的研究途径[C]//中国水文科学与技术研究进展. 南京: 河海大学出版社, 2004: 189-192.

[14] 芮孝芳. 流域水文模型研究中的若干问题[J]. 水科学进展, 1997, 8(1): 94-98.

[15] 芮孝芳. 流域水文模型的发展[J]. 水文, 2006, 26(3): 22-26.

[16] 芮孝芳. 流域水文模型精度验证及进一步发展模型的建议[J]. 水文, 1999(增刊): 20-28.

[17] 芮孝芳, 梁霄. 水文学的现状与未来[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(2): 1-4.

[18] 芮孝芳, 石朋. 数字水文学的萌芽与前景[J]. 水利水电科技进展, 2004, 24(6): 55-58.

[19] 李致家, 姚成. 栅格型新安江模型研究[J]. 水力发电学报, 2009, 28(2): 25-34.

[20] 张超. 流域水文模型参数自动优化率定及不确定性研究[D]. 南京: 河海大学, 2010.

[21] 朱君君. Nash模型异参同效问题及参数确定方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2011.

(收稿日期: 2012-06-05 编辑: 马敏峰)

