



# 分布式水文模型的发展及其在我国水问题研究中的应用\*

牛存稳 王 浩 贾仰文

(中国可持续发展研究会水问题专业委员会,北京 100044;中国水利水电科学研究院水资源研究所,北京 100044)

**摘要** 水资源短缺、水生态环境恶化、水污染加剧,水土流失严重是我国可持续发展中所面临的主要水问题,而水文模型始终是研究解决水问题的重要手段与方法之一。本文总结了分布式水文模型的诞生、发展及其日渐成熟的过程。由于分布式水文模型能够把单一的水量变化的模拟扩大到广泛的水文水资源与生态环境问题模拟,涵盖了地表与地下水计算、水资源数量与质量的联合评价、非点源污染、土壤侵蚀与水土流失、洪水预报、土地覆盖与土地利用变化对水文过程的影响、生态需水、水生物与生态系统修复、农田灌溉与农业节水、城市水文水环境的模拟计算,并且可以通过尺度转换与大气环流模式耦合来预测全球变化对水文水资源的影响。分布式模型对于解决我国各种水问题,实现水资源的可持续利用将具有越来越重要的意义。

**关键词** 可持续发展;水资源;水环境;水生态;分布式水文模型

## 1 我国主要的水问题

水是人类社会发展的基础性自然资源、战略性经济资源和公共性社会资源。水资源的可持续利用,是实现经济社会可持续发展极为重要的保证。在全世界致力于应对水问题的 21 世纪,我国作为经济高速发展的人口大国,面临着更为紧迫的压力。

我国水资源总量丰富,但人均水资源占有量仅相当于世界平均水平的 1/4,位列世界第 121 位,是联合国认定的“水资源紧缺”国家。不仅如此,水资源在全国范围的分布严重不均,占全国面积 1/3 的长江以南地区拥有全国 4/5 的水量,而面积广大的北方地区只拥有不足 1/5 的水量。目前全国 668 座城市中有 400 多座缺水,日缺水量达 1 600 万  $m^3$ ,年缺水总量达 60 亿  $m^3$ ,影响工业产值达 2 300 亿元,干旱缺水已成为制约中国经济社会发展的最重要因素之一。

由于城市和工业用水剧增,废污水大量排放,污水处理未能及时跟上,水污染加剧、江河湖库的水质下降;西北干旱地区水土资源过度开发,促使荒漠化的发展,生态环境严重恶化,引起了国内外的关注。目前的海河、淮河以及辽河等“三河”,太湖、巢湖以及滇池等“三湖”的水环境污染问题急待治理,也是我们国家“十一五”发展规划的重点治理区域;我国还面临着水土流域严重的问题,黄河流

域的黄土高原产沙量世界闻名,黄河流域每年要 200 亿冲沙水量维持河道的正常生态。

水文模型始终是研究解决水问题的重要手段与方法之一。21 世纪以来水资源危机日益突出,为了深入探讨自然变化和人类活动影响下的水文循环与水资源演化规律,基于 DEM 的分布式水文模型成为当今水文界研究的热点。特别是近年来,随着 GIS 技术与 WEB 技术的逐步成熟与推广,分布式水文模型在水资源规划、管理中发挥着越来越重要的作用。

## 2 分布式水文模型的昨天、今天和明天

流域水文模型的研究开始于 20 世纪 50 年代中期。伴随计算机的出现,人们开始把水文循环的整体过程作为一个完整的系统来研究,并在 50 年代后期提出了“流域水文模型”的概念,随即有 SSARR 模型(1958 年)和 Stanford 模型(1959 年)、新安江模型、Sacramento 模型、Tank 模型、HEC-1 模型、SCS 模型、API 连续演算流域水文模型等。随着社会经济的快速发展,气候变化和人类活动对水文循环的影响不断加剧,大部分流域水文模型由于其自身存在着许多不足和局限性,不能很好地反映经济社会发展(工农业用水、城市化与土地覆盖利用变化等)的人类活动的影响以及水文水资源要素在空间上的变化。在这种情况下为了识别这种空间变化的影响,人们开始对分布式水文模型发生兴趣。

\* 科研院所社会公益研究专项《南水北调西线工程水源区水资源评估技术研究》,国家中长期基础研究计划(2006CB403404)资助项目。

## 2.1 分布式流域水文模型的昨天

流域分布式水文模型(又称数字水文模型)是指以流域面上分散的水文参数和变量来描述水文时空变化特性的数学模型。它构建在 GIS/RS 基础之上,先由 GIS/DTM 建立数字高程流域水系模型,再与产流模型和汇流模型进行有机结合。

1969 年 Freeze 和 Harlan 发表了《一个具有物理基础数值模拟的水文响应模型的蓝图》的文章揭开了分布式水文模型研究的序幕。Hewlett 和 Troenale 在 1975 年提出了森林流域的变源面积模拟模型(简称 VSAS)。在该模型中,地下径流被分层模拟,在坡面上的地表径流被分块模拟。第一个真正、最有代表性的分布式水文物理模型是由丹麦、法国及英国的水文学者(Beven 等,1980 年;Abbott 等, Bathurst,1986 年)研制与改进的 SHE(System Hydrologic European)模型,发表于 1986 年。

在 90 年代,计算机技术,地理信息系统(Geographic Information System,简称 GIS),数字化高程模型(Digital Elevation Model,简称 DEM)和遥感(Remote Sensing,简称 RS)技术迅速发展,为研制和建立分布式水文模型提供了强大和及时的技术支撑,使得分布式水文模型成为水文学家研究的前沿热点之一。1994 年,Jeff Arnold 为美国农业部(USDA)农业研究中心(ARS)开发了 SWAT 模型。该模型是一个具有很强物理机制的、长时段的流域水文模型。1995 年,Grayson 等提出了 THALES 模型,它是一个基于矢量高程数据的分布式参数模型。Huaxia Yao 等(1998 年,1999 年,2001 年),提出了基于网格的集降雨空间输入估计,降雨~蒸发~径流过程模拟,河流演算和空间参数校准为一体的分布式水文模型。此外,USGS 模型(Dawdy 等,1970 年,1978 年)、WATFLOOD 模型(Kouwen 等,1993 年,2000 年)、SLURP 模型(Kite,1995 年)和 PRM 模型(Leavesley & Stannard 1990 年)等等都属于分布式水文模型的范畴。

以上模型的研究与应用,极大地促进了流域分布式水文模型的发展。但是,却未能取得振奋人心的成果。“拟合的情况并不特别好,也不特别差,这大概便是这类复杂的理论模型用于资料有限、率定过程存在不确定性,且情况复杂的流域中所能期待的结果。”(Freeze 语)。

## 2.2 我国分布式水文模型的今天

分布式水文模型的昨天基本发生在国外,国内在分布式水文模型的研制方面起步较晚,目前还没有比较成熟或者得到国际上普遍认可的分布式水文模型。国外的模型也不太适用于中国的国情,许多模型在具体引用时还存在很多的问题。因此,我们急需在借鉴国外先进模型的基础上,利用现代科学技术(尤其是计算机和“3S”技术),研制适合我们国情的分布式水文模型。

今天在“国家 973”,中科院知识创新工程,国家自然科学基金等的支持下,我国的一些学者进行了分布式流域水文模型的探索性研究工作。同时也涌现出了一大批专家,如中国水利水电科学研究院的王浩(二元水循环)、贾仰文(WEP)、周祖昊(分布式水文模型的向上、向下尺度化问题)等,清华大学(开发清华模型)的胡和平、杨大文、倪广衡等,中国科学院地理科学与资源研究所的刘昌明(HIMS 模型)、夏军(TVGM)、王纲胜(DTVGM)、王中根(主要研究 SWAT 模型)、郑红星(分布式水文模型的尺度问题)等,武汉大学(原武汉水利电力大学)的郭生练(两参数分布式水文模型)、熊立华、李兰(LL-1,LL-2 模型)、彭定志、林凯荣、叶爱中(DTVGM-MON)等,北京师范大学的郝芳华、杨胜天等,河海大学的芮孝芳、任立良、刘新仁等,水利部水文局刘志雨(TOPKAPAI 模型应用)等,中国科学院寒区旱区环境与工程研究所的康尔泗等,郑州大学的左其亭、张成才等,其它还有沈晓东、黄平、唐丽华等。

今天在我国国内还有一些开展陆面模式研究专家,主要从事是继承和发扬 VIC 模型,VIC 模型是由原毕业于我国四川大学的现美籍华人梁旭博士(女)开发的。国内从事陆面模式研究的专家其中以中国科学院大气科学研究所的谢正辉为代表,还有大气科学研究所的林朝晖等,中国水利水电科学研究院的贾仰文等,河海大学苏凤阁等,北京师范大学的戴永久等,中国科学院地理科学与资源研究所的王纲胜等,武汉大学宋星原、张利平、李兰等。针对分布式水文模型与陆面模式的优缺点,国内一些专家对分布式水文模型和陆面过程模型耦合进行了研究,如武汉大学宋星原、李丹颖等对 VIC 模型在解决洪水预报问题方面进行了积极的探索。

今天,国内有如此多的优秀学者在从事分布式水文模型的研究,相信分布式水文模型在我国的明天会更好。

## 2.3 分布式水文模型的明天

分布式水文模型,尤其是具有物理基础的分布式水文模型,由于它们明显优于传统的集总式水文模型,能为真实地描述和科学地揭示现实世界的降雨径流形成机理提供有力工具,因此是一种发展前景看好的新一代水文模型。

综合国内外最新研究动态,分布式水文模型的未来发展呈下述倾向:

首先要积极开展针对分布式水文模拟的室内和室外试验,单纯的数字游戏无法发现水文循环过程的真理,分布式水文模型因涉及到缺乏水文气象资料情况下确定模型参数的问题,故必将激发水文学家应用实验手段和数理分析手段研究水文学基本理论的兴趣。尤其是降雨径流形成机理与地形、地貌、土壤、植被、地质、水文地质和土地利



用之间定量关系的揭示将受到水文学家的格外重视;

地理信息系统是用数字化方法描述具有复杂空间变化的水文过程的必要技术支持.加强水文学与地理信息系统技术的结合,不断开发地理信息系统技术在水文学理论与应用中的领域是水文学家的一项重要任务;

测雨雷达可以直接测得降雨的空间分布,提供流域或区域的面雨量,并具有实时跟踪暴雨中心走向和暴雨空间变化的能力.尽管在当前科学水平下,测雨雷达的精度还有待提高,但它仍然是测雨技术必然的发展方向之一.雷达测雨只是遥感测雨技术中的一种,应用卫星遥感测雨技术也在研究之中.大力发展雷达和卫星遥感测雨技术已势在必行;

分布式水文模拟不局限于径流模拟,与其它学科交叉耦合研究和解决广泛的资源、环境与生态问题,等等.分布式水文模型在水资源开发、利用、保护、洪水预报、人类活动对水文影响等方面,必将得到越来越广泛的应用。

### 3 结 语

基于 DEM 的分布式水文模型代表了水文模型的发展方向.虽然,经过近 30 年的研究,但分布式水文模型仍处于初级阶段.目前,单纯地就模拟与预报结果而言,分布式水文模型并不比集总式水文模型有太多的优势.但是,分布式水文模型所揭示的水循环物理过程越来越接近客观世界.在研究人类活动和自然变化对区域水循环时空过程的影响,研究区域水资源生成与演变规律方面,具有独特的优势。

清华模型还在胡和平教授夜、杨大文教授以继日的奋斗中大踏步的向前走;中科院地理所还在夏军教授的努力下积极推进创建中国特色的系统理论的分布式水文模型(DTVGM),以及刘昌明院士一直倡导大而广的 HIMS 系统;中国水科院水资源所在总工贾仰文的带领下,正在积极努力积极发展和推广 WEP 分布式水文模型,努力尝试以下 9 个方面的基础研究和应用推广工作:

- \* 分布式水文模型的土壤水评价(杨贵羽博士);
- \* 分布式水文模型与地下水模型的耦合(洪梅博士);
- \* 分布式水文模型与 RCM(例如 MMS)的耦合(周祖昊博士);

- \* 分布式水文模型与动态水资源评价(仇亚琴博士);
- \* 分布式水文模型与水质模型的耦合(牛存稳博士);
- \* 分布式水文模型的组建式开发(梁籍博士);
- \* 分布式水文模型与水资源调配模型的耦合(韩春苗硕士);
- \* 分布式水文模型与泥沙运移模型的耦合(李娟硕士);
- \* 分布式水文模型与洪水预报(梁钟元硕士)

分布式水文模型有着太多的优势,同时又有太多无法解决的问题。

#### 参考文献

- [1] Freeze R A, Harlan R L. Blueprint for a physically - based, digitally - simulated hydrologic response model. *Journal of hydrology*, 1969, 9:237 - 258.
- [2] 水利部水文司,中国水资源质量评价,北京:中国科学技术出版社,1997 年.
- [3] 水利部水文司,水资源评价论文集,北京:水利电力出版社,1989 年.
- [4] 钱正英,张光斗,2001,中国可持续发展水资源战略研究(综合报告及各专题报告),北京:中国水利水电出版社.
- [5] 陈家琦、王浩,水资源学概论,中国水利水电出版社,1996, pp1 - 6,北京.
- [6] 刘昌明,何希吾等.1996.中国 21 世纪水问题方略.北京:科学出版社.
- [7] 张岳,2000 年,中国水资源与可持续发展,南宁:广西科学技术出版社.
- [8] 张国良,21 世纪中国水供求,北京:中国水利水电出版社.
- [9] 王纲胜,夏军,牛存稳,分布式水文模拟汇流方法及应用,地理研究,2004,(23):2.
- [10] 王浩,贾仰文,王建华,秦大庸,周祖昊,仇亚琴,严登华,人类活动影响下的黄河流域水资源演化规律初探,自然资源学报,2005, 20:2.
- [11] 芮孝芳,黄国如,分布式水文模型的现状与未来,水利水电科技进展,2004,24:2.

作者简介:牛存稳(1979 - ),男,汉族,河南安阳人,博士,主要从事水文水资源研究。