

文章编号: 1673 - 1212 (2007) 10 - 0017 - 05

国内外流域水文模型应用进展

赵串串¹, 张荔², 杨晓阳³, 王晓昌²

(1. 陕西科技大学 资源与环境学院, 陕西 西安 710021; 2. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055;
3. 西北大学 生命科学学院, 陕西 西安 710069)

摘 要: 基于国内外流域水文模型分类与特点, 针对目前广泛研究与应用的分布式水文模型, 总结并分析了国内外现有模型的结构与机理, 分析了模型在不同流域实践应用中的优越性以及存在的相关问题; 展望了流域水文模型的发展趋势, 为流域机构相关工作人员开展污染防治、规划管理工作提供有力的参考依据。

关键词: 流域; 水文; 水资源; 集总式水文模型; 分布式水文模型

中图分类号: X143 X52

文献标识码: B

Application of Water Hydrological Model to River Basin

Zhao Chuanchuan¹, Zhang Li², Yang Xiaoyang³, Wang Xiaochang²

(1. Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China;

2. Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

3. College of Life Sciences, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract: Based on the characteristics and types of hydrological model, its applied usages of the water resource model and simulation model for river basin issues was analyzed aiming at distributed hydrological model which was abroad studied and applied presently. Advantages and disadvantages of these applied models were also discussed. Finally, the direction of hydrological model was viewed. Some convincing evidences for the stuffs to deal with pollutions and planning and management problems were provided.

Key words: river basin; hydrology; water resource; lumped hydrological model; distributed hydrological model

流域水文模型, 是以流域为研究对象, 对流域内发生的降雨径流这一特定的水文过程进行数学模拟, 是进行流域水资源分析研究的基础。

目前流域水文模型主要有两种类型: 流域水文模拟模型和流域水资源管理模型, 其中流域水文模拟模型又分为集总式和分布式模型。集总式模型用空间参数的平均值计算整个流域。随着流域变量的增加, 模型预测的可信度和准确性下降, 其缺点在于不能对特定位置做出预测, 因此会忽略一些重要的潜在的环境问题。分布式流域水文模型是将流域划分成若干个小的计算单元, 清楚地考虑了流域下垫面及水文过程的空间变化, 它不仅能给出水文过程的结果, 而且能给出水文过程的动态变化, 这对于水

文过程的进一步认识及提高水文预测的准确性具有重要的意义。因而, 深入开展分布式模型的研究显得尤为重要。

1 流域集总式模型

集总式水文模型的框架主要是建立在流域水文过程的概念性理解之上。在过去相当长的一个阶段里, 因为计算能力和观测数据的限制, 人们应用集总式的方法描述水文过程, 发展了大量集总式水文模型。如 USLE、HEC - 1、中国的新安江模型、WRAP、WEAP 模型、日本的水箱模型等。

1.1 新安江模型

Xinan jiang model: 创始于 60 年代, 是分散性模型, 它把全流域分成多个单元流域, 在每一个单元流域内, 降水经过蒸散发的消耗后, 以蓄满产流的方式经产流量水源划分后对各单元流域进行产汇流计算, 得出单元流域的出口流量过程; 再进行出口以下的河道洪水演算, 把各个单元流域的出流过程相加, 就求得了流域的总出流过程。

收稿日期: 2007 - 07 - 19

基金项目: 日本科学技术振兴机构 (JST) 国际合作项目; 陕西省教育厅专项基金项目 (05JK249); 陕西省自然科学基金 (2006D06); 西安建筑科技大学青年基金项目 (QN0510)

作者简介: 赵串串 (1976 -), 女, 硕士, 讲师, 主要从事流域水资源与生态环境保护研究。

模型主要适应于湿润与半湿润地区^[1],其主要特点是应用了蓄满产流与马斯京根汇流概念,有分单元,分水源,分汇流阶段的特点,并且结构简单,参数较少,各参数具有明确的物理意义,计算精度较高,在国内外水文预报工作中有较好的应用。

1.2 WRAP模型

Water Rights Analysis Package^[2-3] (WRAP),为广泛的水管理应用提供了灵活的分析能力。

水权分析包模型是将一个流域的自然水文和人类水资源管理两方面的信息结合起来,把河流/水库/使用系统的空间配置模拟为一组控制点,模拟成果包括:所有控制点调节流量和非专用流量的月序列、水库蓄水量、水库净蒸发量、供水的引水和缺水量、所生产的电量和短缺量,以及其他变量。

1.3 WEAP模型

Water Evaluation and Planning model (WEAP),是由斯德哥尔摩环境署 (SEI)研发的,是按照月水资源平衡原理计算的,能够灵活适应各种用水单位的发展需要。

模型在南非 Olifants 河流域应用^[4]中,主要讨

表 1 分布式污染模拟模型

模型名称	主要研究对象	适用规模	时间尺度连续性	应用	流域离散化
AGNPS	评价和预测小流域农业非点源污染	200km ² 的流域	不连续	国外以及中国南方	任意划分小网格
ANSWERS	农业典型小流域中次降雨条件下的地表径流和土壤侵蚀量以及污染物流失量	200km ² 的流域	不连续	欧洲平原	任意划分小网格
MATSALU	农业流域海湾地区的富营养化管理	中尺度流域	连续	爱沙尼亚	据流域高程划分网格
SWAT	美国流域水量水质模拟	中尺度流域	连续	美国、德国	据流域高程划分网格
STREAM	水资源的分布以及供水情况管理研究	大流域	连续	南亚和欧洲多个流域	据流域高程划分网格
SW M	中尺度流域气候和土地利用类型变化对水质的影响分析	中尺度流域	连续	易北河流域(流经中欧)	据流域高程划分网格
TOPMODEL	湿润流域水文过程模拟	大流域	连续	英国山区、美国东部	地形指数 $\ln(a/\tan\beta)$
GBHM ₂	大流域水文过程模拟	大流域	连续	亚洲地区	子流域面积函数和宽度函数概化地形特性

2.1 全分布式水文模拟模型

2.1.1 AGNPS模型

Agricultural Non - point Source^[5-6] (AGNPS),

论了 14个灌区,2个城市,16个矿区和 1个水库的用水,对以上这些主要用水部门,再分别讨论以上每个用户的用水效率、年用水量、月用水量的变化情况。应用结果说明,在流域没有太多水库的情形下,用水部门和管理部门更依赖于流域水环境的流速流量。为此,在极端水文现象经常出现的南非地区,很难明确区别丰水年,平水年和枯水年这一概念,很难预测流域未来的水文现象,限制了模型的广泛应用。

2 流域分布式模型

与传统的集总式模型相比,分布式水文模型考虑了流域内部各地理要素的空间异质性,能够反映水文水资源要素在空间上的变化,能够进行下垫面变化条件下的计算,特别是它具有更多的模拟功能,即能够把单一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,而这些是基于经验与黑箱方法的集总式水文模型所难以实现的。最新发展的流域分布式模型有 AGNPS、ANSWERS、MATSALU、SWAT、STREAM、SW M等,各模型的特征如表 1所示。

美国农业研究局与明尼苏达污染防治局共同研制出的计算机模拟模型。模型由水文、侵蚀、沉积和化学传输四大模块组成,水文模块中采用径流曲线数



(SCS curve number) 方法计算径流总量;侵蚀模块采用改进的通用土壤流失方程计算土壤侵蚀量;泥沙传输模块采用稳态的连续性方程模拟流失的土壤

在流域内的传输情况,并计算流域最终泥沙的输出量。
AGNPS 模型^[7]在意大利 A l p o n e 流域的应用中,评价了流域径流、土壤侵蚀以及由此引发的面源污染问题,A l p o n e 流域 1992 - 1993 年 20 个径流事件的模拟结果表明,观察结果与预测结果有一定线性递减关系,而且径流事件观察结果的平均值与预测平均值的差值是 0.06; A l p o n e 流域的侵蚀事件观察结果的平均值与预测平均值的差值是 0.26; A l p o n e 流域 7 个营养元素污染事件考察,结果表明,N 和 P 观察结果的平均值与预测平均值的差值是 0.147 和 0.146。

AGNPS 模型在中国的应用目前还只限于南方地区^[8],这与中国南方地区人口密集,农业生产集约化程度高,由此引起的湖泊富营养化程度严重等特点有关。

AGNPS 在应用中虽然取得较好的效果,但由于它是单事件模型,在应用中有许多局限性,因此 20 世纪 90 年代初,美国农业部自然资源保护局与农业研究局转向开发连续模拟模型 - AnnAGNPS 模型。

2.1.2 ANSWERS 模型

A real Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation (ANSWERS),最早是 20 世纪 70 年代针对欧洲平原地区研发的,是时间尺度上不连续的空间分布模型。用于预报农业典型小流域中次降雨条件下的地表径流和土壤侵蚀量以及污染物流失量。但是,对于一些陡坡林地等特殊地类,模型的模拟误差较大,其模拟精度还有待于进一步提高。最初的 ANSWERS 模型只研究地表水文过程,随后又被附加了侵蚀和泥沙运动过程以及 N、P 营养元素的运移过程。

ANSWERS - 2000 是 ANSWERS 模型^[9]的最新版本,它是于 20 世纪 90 年代中期开发的连续性模拟模型。在这个版本中,养分模块对入渗进行了校正与改进,并加入了土壤湿度与植物生长部分,以允许进行长期而连续的模拟。2000 版本模拟了稳定性有机态氮、活性有机态氮、硝态氮和氨态氮 4 个氮源和稳定性矿化磷、活性矿化磷、土壤有机态磷与活性磷等四个磷源的转化与相互作用。

在 Watkinsville 和 Georgia 的两个流域,对模型的连续性版本 ANSWERS - 2000 进行了检验,结果表明模型在预报流域中径流、泥沙、NO₃ - N、溶解性 NH₄ - N、泥沙结合态 TKN 以及溶解性 P 的流失运

行良好。

以上介绍的 AGNPS 和 ANSWERS 模型的局限性在于,只能应用于约 200 km² 的小流域模拟研究。

2.1.3 STREAM 模型

Spatial Tools for River Basins and Environment and Analysis of Management Options (STREAM) 用于大流域水资源的分布以及供水情况管理研究^[10]。流域管理空间分析工具的核心模块是:基于 GIS 的降雨径流模型,其中降雨径流模型是最早 (1993 - 1994 年) 为研究莱茵河流域而开发的,称为 RHNEFLOW 模型,主要是评价气候变化对莱茵河流域水文循环的影响。

流域管理空间分析工具,利用 GIS 的栅格化命令计算研究流域内每个格子点的水资源平衡情况,用数字高程模型 DEM 计算水流方向,模型以月为时间步长,温度和降雨最为主要输入参数,模拟出模拟年月径流、地下水储藏量、融雪的变化量,能够模拟河流的可供水量和河流对污染物的承纳能力,分析气候变化、土地利用类型变化对流域水环境造成的影响,以及河流纳污能力与河流动力学之间的相互作用关系。

J. C. J. H. Aerts 等人^[11]应用基于 GIS 的 STREAM 工具,在 Ganges, Brahmaputra, Meghna (GBM) 流域,利用 GIS 将流域地图划分成 1391 行,600 列的栅格,每个栅格大小为 200 m² * 200 m²,重点讨论了干旱季节 (3, 4, 5 月份) 土壤侵蚀的区域大小和浓度分布,模型模拟结果分布在流域的一系列单元格内,模拟结果与观察结果有很高的相关性。

这种分析工具在南亚和欧洲多个流域 (如:贯穿西欧的莱茵河、印度恒河等) 得到广泛成功的应用。

2.1.4 SWAT 模型

Soil and Water Assessment Tool (SWAT), 1994 年,美国农业部 (USDA) 农业研究中心 (ARS) 开发的一种基于 GIS 基础之上的、长时段的流域分布式流域水文模型,该模型的发展经历了一系列流域模型的改进,从最早被开发为流域尺度的 CREAMS 模型,到 SWRRB 模型,结合 ROTO 模型后,最后形成了综合性的 SWAT 模型。

SWAT 模型近年来得到了快速的发展和应用,SWAT 模型^[12]能够利用遥感和地理信息系统提供的空间信息模拟多种不同的水文物理化学过程,如水量、水质、以及杀虫剂的输移与转化过程,可以用于几千平方英里的流域盆地的水质水量模拟。

SWAT^[13]属于第二类分布式水文模型,模拟的流域水文过程分为水循环的陆面部分 (即产流和坡

面汇流部分)和水循环的水面部分(即河道汇流部分)。SWAT模型代表了美国的水文响应单元,通常仅适合于美国的流域,应用于美国 18 个主要流域。SWAT模型在黑河流域的应用,说明该模型较适用于中国西北寒区。

SWAT99.2 模型^[14]在德国一个中尺度流域的应用说明,该模型在平原地区流域的径流模拟中,重现性很差。基于这一问题的解决,开发了 SWAT-G 改良模型。

SWAT 功能十分强大,还能够用来模拟和分析水土流失、非点源污染、农业管理等问题,是一个十分值得推广的综合性流域水文模型。

2.1.5 SW M 模型

Soil and Water Integrated Model (SW M):是在 SWAT 和 MATSALU 模型的基础上开发的,SW M 模型保存 SWAT 和 MATSALU 模型的优势和特色,主要目标是提供一种基于 GIS 的综合水文和水质的中尺度(100 - 10000 km²)流域模型。与 SWAT 模型相比,SW M 模型为日步长模型。

该模型^[15]集成了水文、植被、土壤侵蚀和 N 元素转移转化的动力学原理。其模块有来自 MATSALU 模型的三水平空间离散化和营养物 N 素模拟模块,有改良的 GRASS 界面,有水文模块,有从属于 SWAT 模型的河流演进模块。模型为中尺度流域的 N 元素模拟提供了一种有效的方法。在易北河(流经中欧)流域五个面积大小相差很大(64 - 2504 km²)的子流域开展了模型的可移植性研究,每个子流域具有不同土壤、不同空间分辨率等条件,结果表明模型对中尺度流域由于气候变化和土地利用类型变化而引发的水质问题,有很强的分析能力。

2.1.6 LL 模型

LL 模型,武汉大学李兰教授于 1997 年根据山坡水文学原理和流域的界面理论,开发出 LL - I 分布式降雨径流模型,在此基础上,增加雷达测雨、土壤结构、土地利用等信息提出 LL - II F 分布式流域水文模型。刘战友^[16]等人,将 LL - II 模型用于广东增江流域,结果表明,该模型数值计算稳定,效果良好,精度更高。

2.2 半分布式水文模拟模型

2.2.1 TOPMODEL 模型

TOPMODEL (Topgraphy based hydrological model) 模型,是一种以数学方式表示水文循环过程的基于物理过程的半分布式流域水文模型。模型基于 DEM 推求地形指数来反映流域水文响应特性,体现了降雨径流模拟的最新思想。

该模型结构明晰,参数较少且具有明确的物理

意义,不但适合于坡地集水区,还能用于无资料流域的产汇流估算。模型最初是用来模拟英国山区降雨径流的^[17],后来被广泛应用于美国东部、新西兰等温湿地区,均显示了很好的模拟结果及可信的变源产流贡献模拟。但是在中国, TOPMODEL 模型的应用还处于初步研究的阶段。

2.2.2 GBHM₂ 模型

GBHM₂ 模型^[18]首先将整个流域逐级划分为若干单元流域;然后利用面积函数和宽度函数概化流域地形特性,将每个单元流域划分为一系列“流带-坡面”单元。坡面流单元即是 GBHM₂ 中的基本计算单元。这样,一方面大大减少了计算单元的数目,另一方面又能够充分反映土地利用类型等除地形特性以外的流域空间特性。相对于 TOPMODEL 来说,GBHM₂ 对水文要素的空间变异性考虑更为完善,但是计算用时增加不多。

GBHM₂ 模型^[19]在黄河流域中的应用结果显示,它能较好地模拟河道流量、实际蒸发和土壤水分的空间分布及季节变化。将该模型扩展到包含灌溉和水库调节等人工作用,它将为水资源管理提供有力的辅助工具。

3 流域水资源综合管理模型

所谓流域水资源综合管理模型是将流域水环境视为一个整体,把那些关系十分紧密,又有成熟工作基础的流域模型结合起来,如土壤侵蚀模型、地表水文模型(处理坡面流和河槽流)、陆面模型(处理蒸发)、地下水模型相互耦合,组成流域水资源综合管理工具,在管理上统筹考虑,寻求整体最优的流域水资源开发模型。

3.1 WRM 模型

Watershed Resource Management model^[20] (WRM)是基于水文过程的、连续的、分布式参数模型。模型同时考虑超渗径流和蓄满径流,超渗径流指的是降雨强度大于地表下渗强度而产生的陆面流,超渗径流在降雨强度大的地区,是计算径流产生量的一个重要方面。蓄满径流是降雨在蓄满土层含水后产生的径流,一般发生在降雨强度小的地区。

CC Mbajjorgu^[21]将 WRM 模型在加拿大两个子流域(Curley's and Mayne's of the Upper Wilmot Watershed)中的应用,不仅准确模拟了流域的降雨、径流过程,同时还模拟了土壤侵蚀和沉积物的转移过程,模拟了流域管理和保护的全过程,模型的有效性得到了很好的检验。

3.2 MIKE BASIN

MIKE BASIN^[22]是应用于流域或区域的水资源

综合规划和管理工具。软件基于 GIS 平台,采用数学模型技术解决流域的地表水产汇计算,地下水资源的计算与评价,流域水环境状况分析等具体问题。模型包含进行水库的优化调度(单库、多库联调)和对水力资源进行模拟计算,对农业灌溉用水、城市工业、生活供水进行计划调配等功能模块。该软件可对未来流域复杂的水资源计算和多目标开发利用、水环境保护、制定工程规划等专项研究提供有效工具。

MIKE BASIN 通用性强,适于大、小流域和行政区域各种复杂条件水资源问题研究。综合性强。可进行水量、水质综合平衡研究,单库,多库联合优化调度等多目标问题研究。

4 流域模型的发展趋势

流域所面临的人口、资源、环境与发展(PRED)问题非常复杂,尤其是在人类活动对自然的影响力大大超过自然影响力本身的现代社会,其所面临的问题也比以往任何时期都更加严峻。对流域这样一个复杂系统,尝试在半分布式水文模型开发应用的基础上,建立集成的包含流域水量-水质-生态-经济-管理模块的耦合模型,实现供水、污水处理、水质保护、洪泛区管理、侵蚀控制、防治非点源污染、保护湿地、农业灌排以及娱乐休闲等等的综合管理,是流域水资源可持续利用管理的核心工具^[23-24],是流域综合管理实践的迫切需求。

参考文献:

- [1] 朱求安. 新安江模型在汉江江口流域的应用及适应性分析[J]. 水资源与水工程学报, 2004, 15(3).
- [2] Ralph A. Wurbs et al. Modeling river/reservoir system management, water allocation, and supply reliability[J]. Journal of Hydrology, 300(2005) 100 - 113
- [3] P. A. 沃伯斯美国得克萨斯州的流域水资源管理模型[J]. 水利水电快报, 25(17).
- [4] Hervé L. evite *, Hilmy Sally, Julien Cour. Testing water demand management scenarios in a water - stressed basin in South Africa: application of the WEAP model[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2003(28): 779 - 786
- [5] 陈国湖. 农业非点源污染模型 AGNPS 及 GIS 的应用[J]. 人民长江, 29(4).
- [6] 赵刚, 张天柱. 用 AGNPS 模型对农田侵蚀控制方案的模拟[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(5).
- [7] M. A. Lenzi, M. DiLuzio. Surface runoff soil erosion and water quality modeling in the Apone watershed using AGNPS integrated with a Geographic Information System[J]. European Journal of Agronomy, 1997(6): 1 - 14
- [8] 张玉斌. AGNPS 模型及其应用[J]. 水土保持研究, 2004, 11(4).
- [9] 张玉斌. ANSWERS 模型及其应用[J]. 水土保持研究, 2004, 11(4).
- [10] J. C. J. H. Aerts, M. Kriek and M. Schepel. STREAM (Spatial Tools for River Basins and Environment and Analysis of Management Options): 'Set Up and Requirements'[J]. Phys Chem. Earth(B), 1999, 24(6).
- [11] J. C. J. H. Aerts et al. Using GIS Tools and Rapid Assessment Techniques for Determining Salt Intrusion: STRE-MAM, a River Basin Management Instrument[J]. phys Chem. Earth(B), 2000, 25(3): 265 - 273
- [12] 王旭东. 布式水文模拟模型在流域水资源管理中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2004(1).
- [13] 王中根. SWAT 模型的原理、结构及应用研究[J]. 地理科学进展, 22(1).
- [14] K. Eckhardt, S. Haverkamp. SWAT - G, a version of SWAT99. 2 modified for application to low mountain range catchments[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2002(27): 641 - 644
- [15] Valentina Krysanova, Dirk - Ingnar Muller - Wohlfeil. Development and test of a spatially distributed hydrological water quality model for mesoscale watersheds[J]. Ecological Modelling, 1998(106): 261 - 289
- [16] 刘战友, 李兰. 分布式水文模型在洪水预报中的对比研究[J]. 水电能源科学, 2006, 24(2): 1 - 5
- [17] 余新晓, 赵玉涛. 基于地形指数的 TOPEX 研究进展与热点跟踪[J]. 北京林业大学学报, 24(4): 117 - 121
- [18] Dawen Yang. A continental scale hydrological model using the distributed approach and its application to Asia[J]. Hydrol. Process, 2003(17): 2855 - 2869
- [19] 杨大文. 分布式水文模型在黄河流域的应用研究[J]. 地理学报, 2004, 59(1): 143 - 154
- [20] CC. Mbajorgu et al. Watershed resources management (WRM) model 1. Model description. Computers and Electronics in Agriculture, 1995(13): 195 - 216
- [21] CC. Mbajorgu et al. Watershed resources management(WRM) model 2. An application to the Upper Wilmot watershed. Computers and Electronics in Agriculture, 1995(13): 217 - 226
- [22] J. R. Thompson, H. Refstrup Sorenson. Application of the coupled MIKE SHE/MIKE11 modelling system to a lowland wet grassland in southeast England[J]. Journal of Hydrology, 2004(293): 151 - 179
- [23] 雷玉桃, 谢建春. 中国水资源流域管理创新对策[J]. 水利经济, 2003, 21(6),
- [24] 张士乔, 吴小刚. 水资源流域管理实施中的相关问题探讨[J]. 水资源保护, 2003(4).