

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2012.01.004

太湖流域典型丘陵区分布式水文模拟

陈 星^{1,2}, 余钟波^{1,2}, 许 钦^{2,3,4}

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098;

2. 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;

3. 南京水利科学研究院水文水资源研究所, 江苏 南京 210029;

4. 水利部应对气候变化研究中心, 江苏 南京 210029)

摘要:针对水文过程对降雨、土壤、植被、地形等参数的空间变化十分敏感且具有很强的时空变异性的特点,应用基于物理机制的分布式水文模型系统模拟太湖流域典型丘陵区的次降雨事件水文响应过程.该模型耦合了垂直方向的水流运动(土壤水、河道-地下水水量交换)与水平方向的水流运动(坡面流、河道汇流、地下水流)过程.在产流模块中分别采用了经验的 SCS 曲线数方法和具有物理机制的 Green-Ampt 方法.结果表明,模型能较好地模拟研究区域降雨事件的水文响应过程,Green-Ampt 方法的模拟结果优于 SCS 曲线数方法的模拟结果.

关键词:分布式水文模型;水文模拟;Green-Ampt 方法;SCS 曲线数方法;丘陵区;太湖流域

中图分类号: P333.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2012)01-0019-04

Distributed hydrological simulation for a typical hilly watershed in Taihu Basin

CHEN Xing^{1,2}, YU Zhong-bo^{1,2}, XU Qin^{2,3,4}

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

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

3. Hydrology and Water Resources Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

4. Research Center for Climate Change, Ministry of Water Resources of
the People's Republic of China, Nanjing 210029, China)

Abstract: Hydrological processes are sensitive to the spatial variation of hydrological parameters, including rainfall, soil, vegetation, and landforms in watersheds, and show significant spatial and temporal variation. According to these features, a distributed hydrological model based on physical mechanisms was used to simulate the hydrological response of the rainfall events in a typical hilly watershed in the Taihu Basin. The flow movements in the vertical direction (the soil water, and water exchange between channel water and groundwater) and in the horizontal direction (the overland flow, concentrated flow of river channels, and groundwater flow) were coupled by the model. The SCS curve number method and the physical mechanism-based Green-Ampt method were applied in the runoff generation mode. The results show that the model can well simulate the hydrological response of the rainfall events in the study area and the Green-Ampt method has better simulation results than the SCS curve number method.

Key words: distributed hydrological model; hydrological simulation; Green-Ampt method; SCS curve number method; hilly area; Taihu Basin

水文模型已经成为研究水文循环机理以及进行水资源管理不可缺少的工具^[1-3],分布式水文模型充分利

收稿日期: 2011-02-25

基金项目: 国家自然科学基金(50979022) 水利部公益性行业科研专项(201001030) 河海大学自然科学基金(2009423211) 中央高校基本科研业务费专项(2009B05914) 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y510001) 水利部科技推广计划(TG0921)

作者简介: 陈星(1980—),女,新疆伊宁人,讲师,博士,主要从事水文模型及环境水文研究. E-mail: chenxing@hhu.edu.cn

用 3S 技术,能够考虑水文变量与水文响应的空间分布^[4-5],获得流域各研究变量的空间分布信息^[6-9].尽管分布式水文模型相对于集总式水文模型在模拟结果精度上提高并非十分明显,但是其对于认识水文循环的物理机理,研究人类活动对水文循环的影响,阐释水资源的形成与演变过程有着不可替代的作用^[10-13].

本文针对太湖流域典型丘陵实验区梅林流域,应用分布式水文模型系统(HMS),耦合坡面径流、壤中径流、地下径流及河道水流过程,考虑水流在各个过程中的运动^[10,13],验证分布式水文模型模拟小尺度水文过程的适用性,并比较了 Green-Ampt 方法与 SCS 曲线数方法在梅林流域的模拟结果.

1 分布式水文模型系统

分布式水文模型系统(HMS)具有 4 个计算模块,分别为产汇流模块(THM)、土壤水文模块(SHM)、地下水水文模块(GHM)和地表水地下水交互模块(CGI)^[5,13].

THM 中具有 2 种计算降雨下渗量的模式,一种是 SCS 曲线数方法(式(1)),另一种是具有物理机制的 Green-Ampt 方法(式(2)).坡面汇流与河道汇流过程分别采用动力波与马斯京根-康吉算法进行计算.

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \tag{1}$$

式中: Q ——产生的地表径流量,mm; S ——持水能力,mm; P ——降水量,mm; I_a ——初始截留水量,mm.

$$f = K \left(1 + \frac{EM}{F} \right) \tag{2}$$

式中: f ——下渗能力,mm/min; t ——入渗时间,min; K ——饱和渗透系数,mm/min; E ——土壤湿润前后毛细管压力差; M ——土壤湿润前后土壤含水率差; F ——累积下渗量,mm.

SHM 根据一维理查德方程计算土壤水垂向通量;GHM 使用二元偏微分方程描述非稳态的二维潜水运动规律;CGI 通过达西定律模拟河流与地下水之间的水量交换过程.

2 模型应用

2.1 研究区域

梅林流域位于宜兴市东南(31°20'N,119°51'E),流域边界清楚,面积为 56.5 km².该流域距离太湖约 9 km,为典型的太湖流域低山丘陵区.

流域位于北亚热带南缘海洋季风气候区,受季风环流控制,全区气候温和湿润,四季分明,雨量充沛,光照充足.多年平均降雨量 1 198 mm.梅林流域属于构造剥蚀残丘区,山坡较缓,坡度 5°~15°,高程为 3~46 m,土壤类型为红黄壤和水稻土.梅林流域以农业耕作为主,农业种植占流域面积的 78.2%.

在流域出口处修建矩形薄壁堰,并在堰上安装水位自动监测仪,利用薄壁堰流量公式计算出口断面的流量过程.梅林流域安装有翻斗式雨量计,因研究流域较小,忽略雨量在梅林流域内的空间变化,认为梅林流域各处的雨量都能用该雨量计测得的雨量来代表.

2.2 输入数据处理

地形特征是影响水文响应最重要的因素之一,对于具有物理机制的分布式水文模型来说,建立研究区域的数字高程模型(DEM),得到流域特征参数是十分重要的.综合梅林流域 1:10 000 的地形图与测得的 427 个高程点数据,生成梅林流域的 DEM.考虑到对地形的描述能力以及模型的计算要求,DEM 栅格采用 5 m×5 m 的分辨率.

对梅林流域内土地利用、植被覆盖以及土壤情况逐项进行调查,并数字化为模型可输入的栅格文件,栅格分辨率与 DEM 保持一致,为 5 m×5 m.

2.3 模型率定

模型中的大多参数具有物理意义,可以通过野外观测数据直接确定,其他参数采用试错法进行率定,在参数取值范围内调整参数值来优化模拟结果,如水力参数(K)的确定.选取梅林流域不同季节的 4 场降雨事

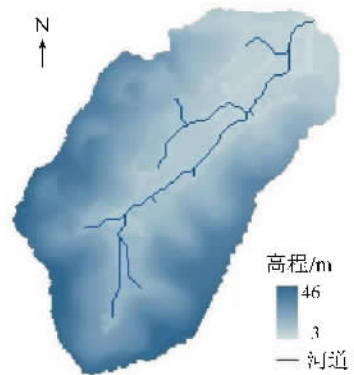


图1 梅林流域 DEM 图
Fig. 1 DEM of Meilin Watershed

件用于模型率定,模拟时间步长为 5 min.表 1 所示为率定期不同产流模式下模型系统的模拟相对误差与确定性系数.

率定结果表明,模拟流量过程线与观测流量值拟合良好,率定后的分布式水文模型与其参数集能够用来模拟梅林流域的水文响应过程.

3 Green-Ampt 与 SCS 曲线数方法分析

HMS 的降雨下渗模拟采用 SCS 曲线数方法和 Green-Ampt 方法,这 2 种计算模式是目前降雨产流模拟研究中较为成熟及常用的方法.SCS 曲线数方法需要的流域资料较少,计算结构较为简单.Green-Ampt 方法根据达西定律发展而来,具有一定的物理基础,对输入资料要求较高,需要流域的土壤资料与土壤水力特性.图 2 所示为梅林流域某一场次降雨事件的模拟结果.

本次降雨事件开始于 2006 年 9 月 11 日,持续了 32 h,降水总量为 24 mm,雨强较小且时程分布较为均匀,因而流域出口流量过程线涨落较缓.模型较好地模拟了本次降雨事件的水文响应过程,可以看出 Green-Ampt 方法比 SCS 曲线数方法模拟的流量过程总体更为精确,涨水段与落水段 2 种方法的模拟精度相差不大,但对于峰值的模拟 Green-Ampt 方法要优于 SCS 曲线数方法,后者模拟值较小,且峰现时间早于实际峰值出现时间.对于其他 3 场次降雨事件的模拟也可得出同样的结论.对于面积较小的梅林流域,在资料满足条件的前提下,具有物理机制的 Green-Ampt 方法在模拟降雨下渗量方面是具有优势的.

4 结 论

水文循环各环节的模拟对于进一步理解水文过程间的相互作用是十分必要的,能够为水资源规划与管理提供更加坚实的科学基础.本文中的分布式水文模型耦合了水流在地表、河道、土壤中的运动过程,并用于实验区梅林流域的水文模拟,这种多过程耦合的分布式模拟方法能够更加真实地模拟水文响应,提高了对产流过程的描述能力.对于梅林流域,产流模拟采用 Green-Ampt 方法和 SCS 曲线数方法均取得了较好的模拟结果,但 Green-Ampt 方法模拟精度更高.在梅林流域,超蓄产流是地表径流产生的主要机制,特别是在降雨事件过程中饱和面积的扩张引起的产流,如何在水文模型中反映这种小尺度的水文响应过程需要进一步研究.

参考文献：

[1] 刘昌明.流域水循环分布式模拟[M].郑州:黄河水利出版社,2006.

[2] 熊立华,郭生练.分布式流域水文模型[M].北京:中国水利水电出版社,2004.

[3] 徐宗学,李景玉.水文科学研究进展的回顾与展望[J].水科学进展,2010,21(4):450-459. (XU Zong-xue,LI Jing-yu. Progress in hydrological sciences :past,present and future[J]. Advances in Water Science,2010,21(4):450-459. (in Chinese))

[4] BEVEN K J. Rainfall-runoff modeling[M]. New York :John Wiley & Sons,2000.

[5] 余钟波,潘峰,梁川,等.水文模型系统在峨嵋河流域洪水模拟中的应用[J].水科学进展,2006,17(5):645-652. (YU Zhong-bo,PAN Feng,LIANG Chuan,et al. Application of hydrologic model system to the flood simulation in the Emei Stream Watershed[J].

表 1 率定期分布式水文模型系统次洪过程模拟结果

Table 1 Flood simulation results of distributed hydrologic model system during calibration period in Meilin Watershed

计算模式	相对误差/%	确定性系数
Green-Ampt 方法	5.3	0.93
SCS 曲线数方法	7.2	0.88

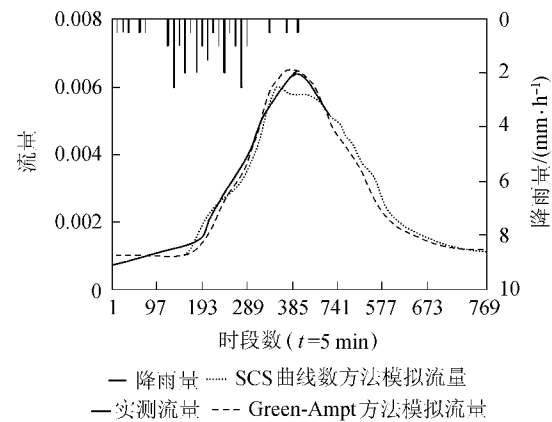


图 2 2 种产流模式下梅林流域 2006-09-11—14 次降雨事件模拟结果

Fig. 2 Simulation results of rainfall events in Meilin Watershed from September 11 to 14, 2006 in two runoff generation modes

- Advances in Water Science,2006,17(5) :645-652. (in Chinese))
- [6] WISE S M. Effect of differing DEM creation methods on the results from a hydrological model[J]. Computers & Geosciences,2007,33 : 1351-1365.
- [7] 赵君,张晓民. 改进的 TOPKAPI 模型及其在洪水预报中的应用[J]. 河海大学学报:自然科学版,2011,39(2) :131-136. (ZHAO Jun,ZHANG Xiao-min. Application of improved TOKAPI Model to flood forecast [J]. Journal of Hohai University :Natural Sciences,2011,39(2) :131-136. (in Chinese))
- [8] 王莉莉,李致家,包红军. 基于栅格的分布式超渗产流水文模型构建及比较[J]. 河海大学学报:自然科学版,2010,38(2) : 123-128. (WANG Li-li,LI Zhi-Jia,BAO Hong-jun. Development and comparison of Grid-based distributed hydrological models for excess-infiltration runoffs[J]. Journal of Hohai University :Natural Sciences,2010,38(2) :123-128. (in Chinese))
- [9] 王贵作,任立良. 基于栅格垂向混合产流机制的分布式水文模型[J]. 河海大学学报:自然科学版,2009,37(4) :386-390. (WANG Gui-zuo,REN Li-liang. Distributed hydrological model based on grid vertically-mixed runoff generation [J]. Journal of Hohai University :Natural Sciences,2009,37(4) :386-390. (in Chinese))
- [10] 陈星,余钟波,崔广柏. 考虑次网格水文过程的区域气候-水文耦合方法[J]. 河海大学学报:自然科学版,2008,36(3) :1-4. (CHEN Xing,YU Zhong-bo,CUI Guang-bai. Incorporation of sub-grid-scale hydrological processes into regional climate-hydrology coupled models[J]. Journal of Hohai University :Natural Sciences,2008,36(3) :1-4. (in Chinese))
- [11] 许继军,杨大文. 基于分布式水文模拟的干旱评估预报模型研究[J]. 水利学报,2010,41(6) :739-747. (XU Ji-jun,YANG Da-wen. New model for drought estimation and prediction based on distributed hydrological simulation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010,41(6) :739-747. (in Chinese))
- [12] 王船海,闫红飞,马腾飞. 分布式架构水文模型[J]. 河海大学学报:自然科学版,2009,37(5) :550-555. (WANG Chuan-hai, YAN Hong-fei,MA Teng-fei. Distributed hydrological model [J]. Journal of Hohai University :Natural Sciences,2009,37(5) :550-555. (in Chinese))
- [13] YU Z, GUO Y, VOORTMAN J, et al. Stormflow simulation using a geographical information system with a distributed approach [J]. Journal of American Water Resources Association,2001,37(4) :957-971.