

考虑次网格水文过程的区域气候—水文耦合方法

陈 星^{1,2},余钟波^{1,2},崔广柏^{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.河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098)

摘要 针对气候—水文耦合模型采用的计算网格较粗,不能很好地描述小尺度陆面水文过程的不足,以美国萨斯奎那西支子流域为研究区域,构建了考虑水力传导度和降雨次网格空间非均匀性的区域气候—水文耦合模型,从而在较粗的计算网格中描述较细的小尺度次网格水文过程.数值模拟结果表明,考虑次网格水文过程的耦合模型精度更高,模拟径流过程与实测过程拟合更好,并且提高了模型对水文物理过程的代表性.

关键词 水文模型 区域气候模型 次网格 空间非均匀性 产流机制

中图分类号 P339 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2008)03-0291-04

区域气候变化对于水文、环境、生态系统都有很重要的影响,近期的一个研究热点就是探讨区域尺度下人类活动对气候变化的影响^[1-3].这类研究的一个重要的部分就是耦合气候模型与分布式水文模型,然而将水文模型与气候模型耦合存在着很大的困难,主要是由于两者间的尺度差异,气候模型的网格尺寸较大,水文模型的网格尺寸较小^[4],若耦合模型采用较粗的网格,则模拟得到的水文过程不足以反映水文变量的时空变化^[5-6].

本研究耦合了区域气候模型(regional climate model,RCM)与水文模型系统(hydrologic model system,HMS),RCM模拟得到的降雨量用于驱动HMS进行水文过程的模拟,耦合方法属于单向耦合.与传统水文模型相比,HMS是一个基于物理机制的分布式水文模型,耦合了地表水文过程、地下水文过程与土壤水文过程^[7].另外,本研究成功地运用指数分布^[7-8]将RCM在较粗网格下的模拟降雨量细分到HMS较细的计算网格中,使用同样的方法将土壤饱和和水力传导度分配至更细的水文次网格系统中,不仅大大提高了模拟的精度,同时也为气候与水文过程的耦合机理研究打下了一定的基础.

1 研究方法 with 数据集

1.1 研究区域简介

研究区域为美国东部萨斯奎那河流域的西支子流域,西支子流域面积 14 710 km²,大部分位于阿巴拉契亚高原内,是被众多的深窄峡谷所切断的扁平丘陵地,平均高程为海平面上 400 ~ 500 m.西支子流域的主要土地利用为林地,城市和农业用地较少,主要分布在子流域的东部和南部.

1.2 气候模型简介

本研究使用的RCM(图1)是由MM5改进而来的^[2],MM5是一个三维的中尺度气象模型,能够模拟并预测大量的气象变量,并产生四维、具有动力学意义的高精度数据集.RCM同MM5相比具有较细的计算网格.RCM具有多级Blackadar型全球边界层参数与Grell积云参数^[9],在本研究中用于非流体静力学模式计算,从地表垂直向上到0.1 kPa的高度内,不均匀地分为20个层,距离地表处分层间隔较小,在4 km × 4 km的分辨率上计算小时降雨量供水文模拟使用.

收稿日期 2007-06-13

基金项目 国家自然科学基金(50239030 50679018) 教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT0717) 美国国家自然科学基金(ATM9972956; ATM0002637)

作者简介 陈星(1980—),女,新疆伊宁人,博士研究生,主要从事水文模型及环境水文研究.

1.3 HMS 简介

HMS 包含 4 个模块(图 1),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-地下水交互模块(CGI)^[2,7]. HMS 能够直接利用遥感数据和数字资料获取降雨、土壤、地形等输入数据及变量的空间分布信息.

HMS 利用数字高程模型(DEM)提取河网,生成流域边界,计算地形属性(例如坡度、坡向);THM 利用 Green-Ampt 方法计算时段降雨的产流量与入渗量,根据运动波方法与马斯京根方法分别进行坡面汇流计算与河道演算;SHM 利用有限差分法求解一维(垂向)理查德方程来描述土壤水的垂直运动;GHM 模块利用有限差分法求解描述多孔介质地下水运动的二阶微分方程,模拟地下水位的时空变化过程;CGI 模块利用达西定律计算河道与地下水的交换通量. HMS 中各模块模拟的物理过程之间是相互联系的,能够较全面地模拟流域水文循环过程.

1.4 输入数据的处理

处理不同形式的源数据得到模拟需要的数据格式是研究的重要基础.在西支子流域共有 33 个美国气象局(NOAA)布设的雨量站点,气象站网的观测数据经过插值处理后得到研究区域 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 分辨率的降雨数据.从美国地质调查局(USGS)地球资源数据系统(Earth Resources Observation Systems,EROS)获得的 AVHRR 卫星影像和 Landsat TM 图像经过校正大气衰减,提取辐射量和温度值,转化为常用的 UTM 地图坐标,并基于网格分辨率重新取样,根据基本的植被覆盖分类提取出研究区的土地利用信息.通过美国国家自然保护局(NRCS)的土壤地理数据库(STATSGO)获得土壤数据.通过美国地质调查局 3 s 分辨率的数据集生成研究流域的 DEM,并重新投影,与其他数据集保持同样的网格分辨率($1\text{ km} \times 1\text{ km}$).

1.5 降雨和水力参数的次网格空间变异性

水文物理过程的空间变异性远大于大气环流过程的空间变异性,在气候-水文耦合模型中描述陆面水文过程的这种小尺度空间变异性,能够更好地模拟水文物理过程,更精确地得到水文过程对大气的反馈响应^[8,10-11].水文响应的空间变异性很大程度上取决于降雨和土壤水力特性的空间变异性,而由 RCM 模拟的降雨代表的是大尺度的空间平均值,无法描述降雨在大网格中的空间分布^[2].在 HMS 中应用概率密度分布作为 RCM 模拟降雨在网格内空间变化的一阶近似,通过实测数据分析得出降雨量的空间分布符合指数分布,由此将每个 RCM 网格中的模拟降雨量进一步细分到更高分辨率的水文计算网格中^[8,12],如式(1)所示.

$$f(p_i) = \frac{c}{P} e^{-\frac{cp_i}{P}} \quad \int_0^\infty f(p_i) dp_i = 1 \tag{1}$$

式中: $f(p_i)$ ——某个 RCM 网格内降雨量 p_i 所占的面积分数; P ——RCM 模拟的网格平均降雨量; p_i ——细分后的网格降雨量; c ——转换系数($0.3 \sim 1$,雨强空间分布越均匀,取值越大).细分后的降雨量随机分配至每个 RCM 网格所包含的若干水文计算网格中.

同理,根据实测值的拟合结果,用指数分布将网格($1\text{ km} \times 1\text{ km}$)平均水力传导度细分到次网格中:

$$f(k_i) = \frac{1}{K} e^{-\frac{k_i}{K}} \quad \int_0^\infty f(k_i) dk_i = 1 \tag{2}$$

式中: $f(k_i)$ ——某个水文网格中水力传导度 k_i 所占的面积分数; K ——根据土壤数据得到的网格平均水力传导度.

HMS 使用上述方法将 RCM 模拟降雨量分配到水文网格系统中,土壤水力参数值分配到水文网格的次网格系统中.每个次网格都具有一套水文参数值,在次网格系统中进行降雨产流计算,将一个水文计算网格所包含次网格上的径流量和下渗量叠加后,用来进行坡面汇流、河道演算以及土壤水运动模拟.

2 数值模拟

2.1 模型率定

本研究采用 Yu 等^[13]率定分布式流域水文模型的方法,通过调整各参数在其取值范围内的数值来优化

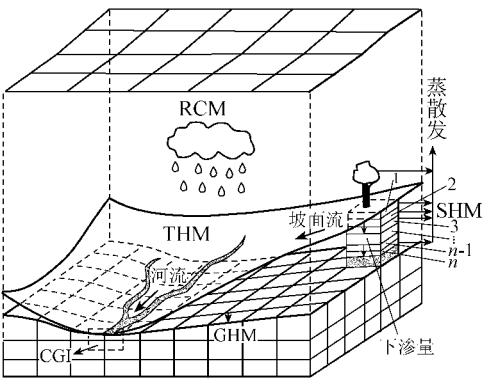


图 1 气候-水文耦合模型结构^[2]

Fig.1 Structure of the regional climate-hydrology coupled model^[2]

模型模拟值与观测值的拟合度,根据拟合目标函数,通过多个目标(土壤含水量、地下水位和流域出口处的流量)来率定模型.在之前的研究中对西支子流域做过模型率定的工作,率定后的模型表现说明使用耦合模型系统可以描述该流域的水文响应^[2],并且能够基于很细的空间步长(10 m,水文次网格系统)和时间步长(10 min)来模拟各种水文过程(如坡面流、土壤水、地下水).

2.2 模拟结果

1986 年 4 月 14 日研究区域受到波动性气旋的影响,从 4 月 15 日开始出现持续降雨,4 月 18 日结束.西支子流域的平均雨强大约为 2 mm/h,最大雨强不超过 7 mm/h. RCM 模拟得到的降雨量与实测降雨量的对比如图 2 所示.

从图 2 可以看出,RCM 模拟降雨与实测降雨同时发生,在初始模拟时期产生的降雨量要比实测值大,模拟的降雨峰值也比实测峰值提前了 3~5 h,RCM 的模拟降雨量表现出较强的坦化效应,分析其原因,主要是由于 RCM 的模拟空间步长较大,得到的降雨量是网格平均降雨量,造成总模拟降雨量较总实测降雨量偏小,这也从另一角度说明在水文模拟中考虑降雨量空间变化的重要性.

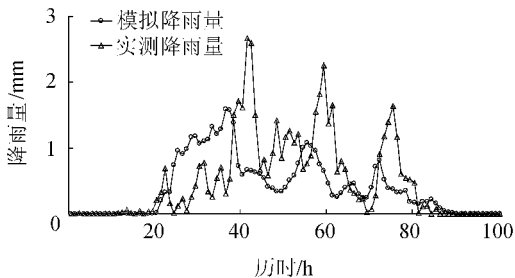


图 2 RCM 模拟降雨量与实测降雨量对比
Fig.2 Comparison of observed rainfall with rainfall simulated by regional climate model

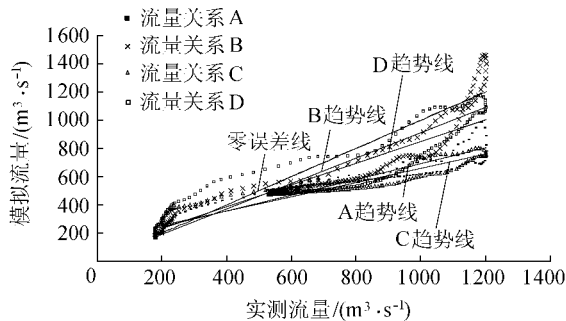


图 3 模拟流量与实测流量关系

Fig.3 Relationship between the observed and simulated discharge

可以看出,流量关系 A 所示的模拟误差很大,主要是由于未考虑参数在网格内的空间变化,小尺度的水文响应过程不能够在大尺度的网格中清楚地得到描述,由此导致低估了径流量.低估径流量还可能因为时间步长取得较大.流量关系 B 与流量关系 A 相比模拟精度得到了提高,是因为在模拟中将土壤水力参数在次网格上进行了细分.流量关系 C 的误差可能是由以下 2 个原因造成的:一是 RCM 模拟得到的降雨量比实测降雨量小,导致模拟的径流量偏小;二是由于没有将 RCM 模拟降雨量按照指数分布在次网格中细分,空间上的平均减小了雨强,也使得模拟径流量偏低.由流量关系 D 可以看出,当考虑了降雨量和水力传导度的次网格效应后,流量模拟精度有了很大提高,由此也可以看出降雨量数据的精度对流量模拟有很大影响.如图 3 所示,虽然大部分模拟值都比实测值要小,但仍有部分模拟值在低流量和高流量处超过实测流量值,分析这种现象的原因,一方面是由于坡面汇流和河道演算的平滑作用,另一方面可能由于模型算法中没有考虑到流域内的水工建筑物对水流的调节作用.

比较流量关系 B 与流量关系 D,可以看出 D 所示的模拟流量比 B 所示的模拟流量总体偏小,分析其原因主要是由于 RCM 模拟降雨量比实测降雨量总体偏小. B 和 D 所示的模拟流量均比实测流量总体偏小,说明虽然考虑了降雨量和土壤水力参数的次网格非均匀性提高了模拟精度,但研究区域的产流机制主要为近河流饱和带扩张机制(variable source area, VSA)^[14],即降雨过程中饱和带面积扩张是导致产流的主要原因,本研究中所使用的产流模拟方法还不能很好地在此机制的自然时空尺度下模拟这一物理过程,由此给模拟结果带来一定的误差.

3 结 论

气候变化对水文循环的影响是不可忽视的,水文过程与气候过程的耦合研究以及在区域模型中考虑降

雨及土壤水力参数的次网格效应,对于提高模拟精度、反映大气与水文过程的物理机制是很重要的。

本文对气候模型和水文模型的耦合方法做了研究,结果显示由于 RCM 的计算网格较大,模拟得到的降雨量比实测降雨量总体偏小,并且降雨量和土壤水力参数的次网格空间变异性对产流起着很重要的作用,将这种空间变异性在模型中进行描述后,流域出口流量过程线的模拟精度得到了很大的提高。近河流饱和带扩张机制是该地区的主要产流方式,如果能将这一过程在模型中进行参数化,在保持径流响应时空尺度的基础上简化其动力学过程,对提高水文响应的模拟精度以及描述物理过程是十分必要的,由此也能提高气候-水文耦合模型的模拟精度,本文的研究结果为此奠定了一定的基础。

参考文献:

- [1] 刘国纬. 水文循环的大气过程[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [2] YU Zhong-bo, LAKHTAKIA M, YARNAL B, et al. Simulating the river-basin response to atmospheric forcing by linking a mesoscale meteorological model and a hydrologic model system[J]. Journal of Hydrology, 1999, 218: 72-91.
- [3] 芮孝芳, 朱庆平. 分布式流域水文模型研究中的几个问题[J]. 水利水电科技进展, 2002, 22(3): 36-58.
- [4] 郭生练, 刘春葵. 大尺度水文模型及其与气候模型的联结耦合研究[J]. 水利学报, 1997(7): 37-41.
- [5] THOMAS G, HENDERSON S A. An evaluation of proposed representations of subgrid hydrologic processes in climate models[J]. Journal of Climate, 1991(4): 898-910.
- [6] 李丽, 郝振纯, 杨向辉. 三门峡—小浪底区间分布式水文模型构建[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2004, 32(6): 648-651.
- [7] YU Zhong-bo, SCHWARTZ F W. Application of integrated Basin-Scale Hydrologic Model to simulate surface water and ground-water interactions in Big Darby Creek Watershed, Ohio[J]. Journal of American Water Resources Association, 1998, 34: 409-425.
- [8] ENTEKHABI D, EAGLESON P S. Land surface hydrology parameterization for atmospheric general circulation model including subgrid scale spatial variability[J]. Journal of Climate, 1989(2): 816-831.
- [9] GRELL G A. Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations[J]. Monthly Weather Review, 1993, 121: 764-787.
- [10] 任立良, 刘新仁. 基于数字流域的水文过程模拟研究[J]. 自然灾害学报, 2000(4): 45-52.
- [11] BEVEN, K. Changing ideas in hydrology—the case of physically-based models[J]. Journal of Hydrology, 1989, 105: 157-172.
- [12] COSBY B J, HORNBERGER G M, CLAPP R B, et al. A statistical exploration of the relationship of soil moisture characteristics to the physical properties of soils[J]. Water Resources Research, 1984, 20: 682-690.
- [13] YU Zhong-bo, SCHWARTZ F W. Automated calibration applied to constrained ground water flow modeling[J]. Hydrologic Processes, 1999, 13: 191-209.
- [14] BERNIER P Y. Variable source areas and storm-flow generation: an update of the concept and simulation effort[J]. Journal of Hydrology, 1985, 79: 195-213.

Incorporation of sub-grid-scale hydrological processes into regional climate-hydrology coupled models

CHEN Xing^{1,2}, YU Zhong-bo^{1,2}, CUI Guang-bai^{1,2}

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

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

Abstract: Climate-hydrology coupled models, which are run at coarse spatial resolutions, cannot typically describe small-scale land surface hydrological processes precisely. However, when they consider the sub-grid spatial variability of hydraulic conductivity and precipitation, new regional climate-hydrology models can describe the sub-grid hydrological processes, even when their grid cell sizes are coarse. Application of a model to the western part of the Susquehanna River Basin in the United States indicates that, compared with the existing models, the new coupled models can simulate the sub-grid hydrological processes with higher precision. Their simulation results are more coincident with the field data and hydrophysical processes can be more accurately reflected.

Key words: hydrologic model; regional climate model; sub-grid; spatial variability; runoff-generating mechanism