

文章编号 1001-8166(2006)08-0830-08

内陆河高寒山区流域分布式水热耦合 模型() MM5 嵌套结果

陈仁升,高艳红,康尔泗,吕世华,吉喜斌,阳勇
(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所,甘肃兰州 730000)

摘 要 利用中尺度气候模式 MM5 计算黑河山区流域 2003 年 2 月 11 日到 6 月 30 日的日降水量、2.0 m 高度的日平均气温和潜热,并将其嵌套到 DW HC 模型中。MM5 运行周期为 10 d,积分步长为 3 s,空间分辨率为 3 km。保持 DW HC 模型土壤参数、植被参数、经验参数和可调参数等不变,仅对模型初始参数进行了调整,利用最近距离法(nearest)将 MM5 输出结果插值到 1 km × 1 km 格点上,所计算的黑河干流出口日平均流量与实测序列的 $NSE = 0.79$, $B = -0.79$ (%), $EV = 0.79$, $R^2 = 0.81$ 。利用基于三角网格的立体插值法(cubic)所获结果与此相当, $NSE = 0.79$, $B = -0.65$ (%), $EV = 0.79$, $R^2 = 0.80$ 。这说明利用 MM5-DW HC 嵌套模型来模拟流域日平均流量是可行的。MM5-DW HC 嵌套模型在径流模拟方面,比利用地面资料驱动结果要好。MM5-DW HC 嵌套模型的计算结果表明,内陆河高寒山区流域存在明显的浅表产流特征,这与地面观测资料驱动结果一致。模型调试结果表明,MM5 输出结果存在某种奇异性,且输出的非汛期降水量明显偏大。

关键词 中尺度大气模式;气象因子;初始参数;奇异性
中图分类号 P343 文献标识码 A

多学科交叉和耦合研究是当今关注的热点。然而长期以来,水文学和大气科学经常是独立发展的。在全球变暖的背景下,出现了许多亟需解决的有关水资源方面的科学问题,如干旱半干旱地区未来水资源是如何变化的?全球变暖对湿润地区洪水灾害和水土流失的影响程度如何?这促使水文和大气科学界联合进行了众多的有关地—气相互作用的研究,如半干旱热带地区水文大气先行性研究计划(Hapex-Sahel)、半干旱区陆面—大气研究计划(SALSA)以及黑河地区地气相互作用观测试验研究计划(HELFE)。国际地圈生物圈计划(IGBP)也把“水循环的生物学方面(BACH)”作为核心计划之

一,以便为评估气候变化和土地利用变化对生物圈和地球可居住性的影响提供有关陆面水文—生态过程方面的知识。计算机技术的发展和上述研究计划的完成,促使了陆面过程模式的出现。陆面过程模式实现了地—气相互作用定量化的第一步。

然而,由于水文学和大气学在时空尺度上的重大差别,以及各学科研究程度的差异,实现水文模式与大气模式的完全耦合,从而高精度再现流域水文过程,并提高中长期天气预报的精度,还需要一段很长的时间。当前的陆—气耦合模式,在实现动量、热量和水汽因子交换方面取得了一些重大进展,但在流域径流模拟和预报方面,还存在许多需要解决的

收稿日期 2006-03-28,修回日期 2006-06-29.

* 基金项目 国家自然科学基金项目“内陆河流域高寒山区多年冻土活动层产流机制观测试验研究”(编号:40401012)和“长江源区冰雪水文过程及对气候变暖的响应研究”(编号:40301010),中国科学院寒区旱区环境与工程研究所知识创新前沿工程项目“黑河流域交叉集成研究的模型开发和模拟环境建设”(编号:2003102)和“内陆河流域高寒山区多年冻土活动层产流机制观测试验研究”(编号:2004112);中国科学院知识创新工程重要方向性项目“内陆河(黑河)水—土—气—生观测与综合研究”(编号:KZCX3-SW-329)资助。

作者简介 陈仁升(1974-),男,山东沂水人,副研究员,博士,主要从事寒区水文过程研究, E-mail: crs2008@lzb.ac.cn

问题。由于高时间分辨率,陆面过程模式需要对实际陆面过程进行严格的物理描述,从而需要众多的土壤、植被和地形参数。然而,由于下垫面类型的复杂性,多数地表参数无法详细获得,以及由于计算机时和计算机性能的限制,这迫使多数陆—气耦合模式采用低空间分辨率,即对地表过程进行概化。如假定地表是平坦的,地表水和土壤水在水平方向上是静止的等,即没有侧向汇流过程^[1],而且多数陆面过程模式仅仅考虑地表和浅层土壤的水热过程。所有这些均造成当前的陆—气耦合模式无法实现其时空分辨率的合理统一,从而无法合理的模拟和预报径流。

解决上述—水气耦合方面的问题,还需要开展大量的学科交叉和地面观测研究工作。本文尝试进行大气模式与水文模式的单向嵌套工作,以期能够利用大气模式输出结果来模拟、反演和预报径流,从而解决地面观测站点稀少的问题。

1 中尺度大气数值模式 MM5 简介

MM5 (Mesoscale Model version 5) 是美国宾夕法尼亚州立大学/国家大气研究中心 (PSU / NCAR), 于 20 世纪 80 年代以来共同开发的第 5 代中尺度大气数值模式。和上一代模式 MM4 相比,在模式动力框架上最大的改进之处在于引入了非静力平衡效应,从而使模式具备了描述较小空间尺度且波动剧烈的天气系统的能力,对于局地扰动的生成和发展的描述能力超过 MM4,并相应减少了为简化处理而采用的约束条件。该模式是具有数值天气预报业务系统功能和天气过程机理研究功能的综合系统^[2]。它一经发布就以其优良的性能赢得世界各国相关学科众多业务和科研部门科学家的关注,并自发参与到模式系统的进一步开发更新工作中去^[3]。目前 MM5 注册用户遍及全球数十个国家,我国是 MM5 的主要使用国家之一,在气象、环境、生态、水文等多个学科领域广泛使用^[4-9]。

MM5 模式主要由前处理、模式主体和模式后处理三部分组成。前处理为模式准备初始、边界场,后处理则对模拟结果进行分析处理。模式控制方程为非静力平衡方程,垂直结构为 σ 坐标,水平结构是 Arakawa-B 跳点网格,采用时间分裂积分方案,有多项物理过程可供选择。模式控制方程主要包括水平动量方程、垂直动量方程、热量方程、连续性方程和水汽预报方程。模式采用两种类型的水平扩散形式,设计多种可选择的参数化方案,对降水物理过

程、大气辐射过程、行星边界层物理过程和陆面过程进行参数化^[3]。MM5 对降水和辐射等的物理过程描述和处理更为周密合理^[10]。模式中加入了四维资料同化系统,可进一步改进模拟效果^[11,12],并具有良好的并行运算能力^[13]。

MM5 现在已经发展到第三版 (MM5 V3), 该版本去掉了流体静力部分,增加了一个陆面过程模式 (LSM)。LSM 通过行星边界层 (PBL) 与 MM5 模式耦合。行星边界层参数化提供动量、热量与水汽交换因子,用以计算地表与大气之间的物质与能量交换。这些交换因子和地表辐射强迫以及降水量一起由边界层模式 PBL 传递给陆面过程模式 LSM, LSM 返回给 PBL 的是地表的热量与湿度通量,以确定边界层的辐合、辐散通量,而边界层的辐合、辐散通量决定了大气温度和水汽的变化倾向^[14]。MM5 V3 的新地形程序有最新的全球 30 约 0.925 km) 地形资料选择,可以为 MM5 产生高分辨率的地形场,也提供全球 30 的植被数据和土地利用/土地覆盖数据^[2]。

2 MM5-DW HC 嵌套方法

鉴于当前的陆—气耦合模式在模拟降水、气温、植被冠层参数化和风场等方面具有一定的精度^[7-9]以及黑河流域地面气象观测站点的稀疏和不均匀性,拟利用 MM5 模式输出结果,来驱动内陆河高寒山区流域分布式水热耦合模型 (DW HC)^[15]。

要实现 MM5 模式与 DW HC 模型的合理嵌套,最关键之处在于二者需具有统一的时空尺度。DW HC 模型是一个纯粹的分布式水文模型,其时间分辨率为 1 日,空间分辨率为 1 km \times 1 km,气象输入变量为日降水量、日平均气温和日潜在蒸散发量^[15],其简单的气象因子输入,为模型推广和实现与大气模式的嵌套提供了方便。

MM5 V3 模式中物理参数化过程选择如下:

积云对流参数化: Grell 参数化方案^[2]。

行星边界层参数化: MRF PBL 边界层参数化方案^[2]。

大气微物理过程: 简单冰相过程^[2]。

大气辐射方案: 云辐射参数化^[2]。

陆面过程: 由 Pan 和 Mahrt^[16] 提出并经 Chen Fei^[17] 扩展的 OSULSM (Oregon State University Land Surface Model) 方案。

为尽可能获得与实际情况较为符合的气象输出变量,MM5 计算区域较大,为 96.786 ~102.284 E,

37.328 ~40.601 N(图 1)。地表状况资料取自美国 AVHRR 卫星反演资料,分辨率为 2 (约 4 km) 植被分类为美国 USGS 研究中心 25 类分类标准,土壤分类使用美国 USDA 分类。大尺度气象场资料选用 NCEP/NCAR 再分析资料。

为与地面观测资料驱动模型结果^[18]作对比,MM5-DW HC 嵌套模型运算时间应该为 1999 年或 2000 年。考虑到利用地面资料对 DW HC 模型进行校正和验证的结果相差不大^[18],以及其它各种原因,MM5 模拟起始时间为 2003 年 2 月 10 日 11 时(北京时间),积分步长为 3s,每次运算积分 10 d。由于运算极耗时,MM5 仅计算了 140d 作为尝试,模式运转结束时间为 2003 年 6 月 30 日。

在 1 km ×1 km 空间尺度上,MM5 模式极耗机时。另外,MM5 模式坐标(Lambert 投影)与水文模型 DW HC 坐标系(Alberts 投影)不匹配,由此造成格点数目和格点位置的不匹配。而 MM5 模式在空间分辨率为 3 km ×3 km 的时候,输出结果较好^[1]。因此,MM5 模式空间分辨率定为 3 km ×3 km,格点数 119 ×159。

将 MM5 输出的每 3h 的降水量(mm)、2 m 高度的平均气温()和潜热(W/m^2)资料(经纬度坐标)转换为日资料。把这些格网上的资料,按照地面站点观测资料处理,即根据其经纬度坐标,将其转换为 Alberts 坐标,然后按照一定的空间插值方法,插值为 1 km ×1 km 的资料,实现水文模式与大气模式的时空分辨率以及坐标体系的统一。

由于 MM5 模式计算区域较大(约 $17 \times 10^4 km^2$, 图 1)在实际嵌套过程中仅仅选用了黑河干流山区流域(面积 $10\,009 km^2$)以内及其附近的 MM5 模式输出结果(图 2 52 ×77 个格点数据)。

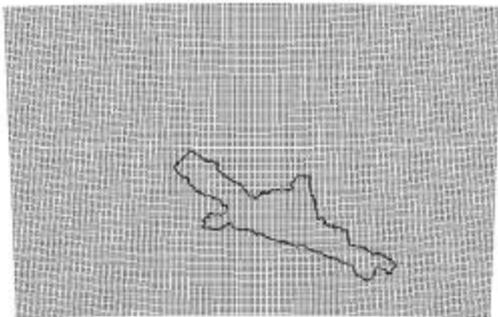


图 1 MM5 模式计算区域及其格点分布(地理坐标)
Fig.1 Calculated area of the MM5 model
(Geographical projection)

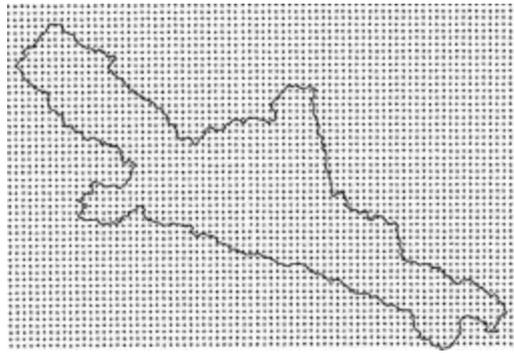


图 2 MM5-DW HC 嵌套过程中所应用的
格点数据(Alberts 投影)

Fig.2 Distribution of the used data out from the MM5 model in the DW HC model (Alberts projection)

3 MM5-DW HC 嵌套结果

保持模型土壤、植被参数以及模型经验参数和可调参数^[15,18]不变,将 MM5 模式输出结果直接嵌套到 DW HC 模型中。在利用地面资料驱动的过程中,由于模拟起始时间为 2000 年 1 月 1 日^[19],而 MM5 输出结果起始时间为 2003 年 2 月 11 日,初始地温参数和固液态含水量比例不同,因此,需要对模型初始参数进行调整。

MM5 模式空间分辨率越高,由于模式数值运算方面的问题,其计算的降水量会越大,因此,还需要对 MM5 模式计算的降水量进行统一调整。经过与黑河山区野牛沟气象站同期实测资料对比,发现 MM5 模式计算的气温和潜热与实测结果基本相当,而降水量则明显偏大。为此,模型增加了一个 MM5 模式降水统一调整系数,即将 MM5 模式输出的日降水量统一除以一个系数。

3.1 不同空间插值方法下的径流计算结果

利用基于三角网格的立体插值法(cubic)和最近距离法(nearest),在 Alberts 投影坐标下,将 MM5 模式输出的 3 km ×3 km 格点数据插值到 DW HC 模型中的每个格点上(1 km ×1 km, 166×218)^[15]。模型径流模拟结果如图 3 和图 4 所示。

利用最近距离法插值所计算的黑河莺落峡日平均流量,与实测流量吻合相对较好(图 3),NSE = 0.79, $\beta = -0.79(\%)$, EV = 0.79, $R^2 = 0.81$, 这比利用实测资料驱动结果要好^[18]。

利用基于三角网格的立体插值法(cubic)插值 MM5 输出结果,并作为 DW HC 模型的气象输入因

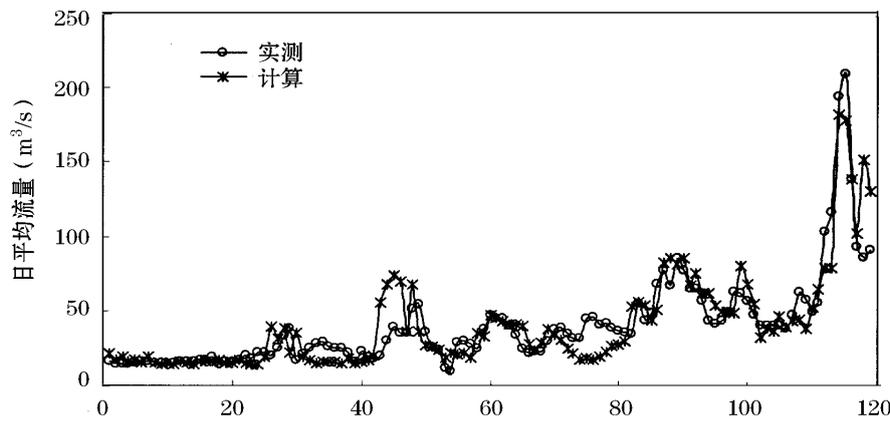


图3 自最长汇流时间开始的黑河莺落峡日均流量计算与实测对比结果(nearest插值法)

Fig.3 Simulated and measured daily averaged runoff at the Yingluoxia station in 2003, using the nearest interpolation method

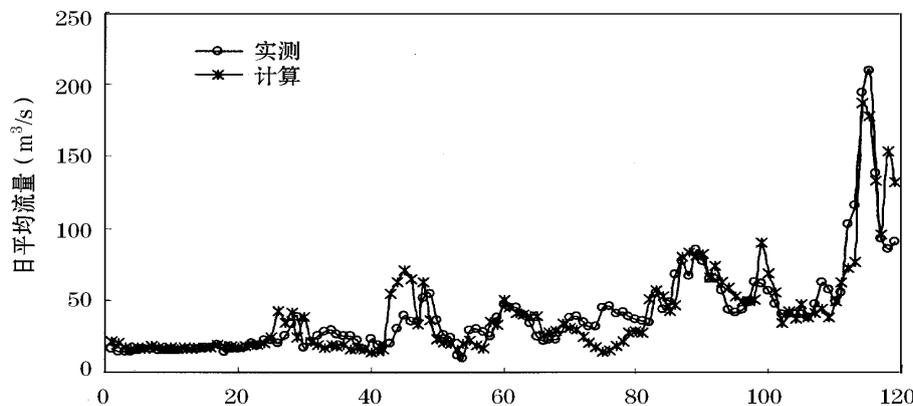


图4 自最长汇流时间开始的黑河莺落峡日均流量计算与实测对比结果(cubic插值法)

Fig.4 Simulated and measured daily averaged runoff at the Yingluoxia station in 2003, using the cubic interpolation method

子,所计算的黑河莺落峡日均流量与实测序列的 $NSE = 0.79$, $B = -0.65(\%)$, $EV = 0.79$, $R^2 = 0.80$ (图4)。该结果与利用最近距离法所获结果基本相当(图3)。

3.2 不同空间插值方法下的蒸散发计算结果

利用 nearest 法插值 MM5 输出结果,并作为 DW HC 模型的气象输入,所计算的黑河干流山区流域 2003 年 2 月 11 日至 6 月 30 日总蒸散发量为 66.9 mm,其中植被蒸腾量为 26.7 mm,土壤蒸发量为 37.0 mm,植被截留蒸发量(包含干树叶和干草截留蒸发量)为 3.2 mm。由图 5 知,在模型计算期间内,植被截留蒸发量很小,在 5 月底之前,土壤蒸发量大于植被蒸腾量,而在 5 月底到 6 月底,植被蒸腾

量则大于土壤蒸发量,这是因为,此时植被已经开始发芽生长。这些结果与野外实际考察结果基本一致。

利用 cubic 法插值 MM5 输出结果,并作为 DW HC 模型的气象输入,所计算的黑河干流山区流域 2003 年 2 月 11 日至 6 月 30 日总蒸散发量为 67.2 mm,其中植被蒸腾量为 26.8 mm,土壤蒸发量为 37.2 mm,植被截留蒸发量(包含干树叶和干草截留蒸发量)为 3.2 mm。图 6 中各蒸散发组分的年内变化,与图 5 基本一致。

3.3 流域浅表产流

在利用地面资料驱动 DW HC 模型的过程中,发现黑河山区流域主要为浅表产流^[19]。将 MM5 输出

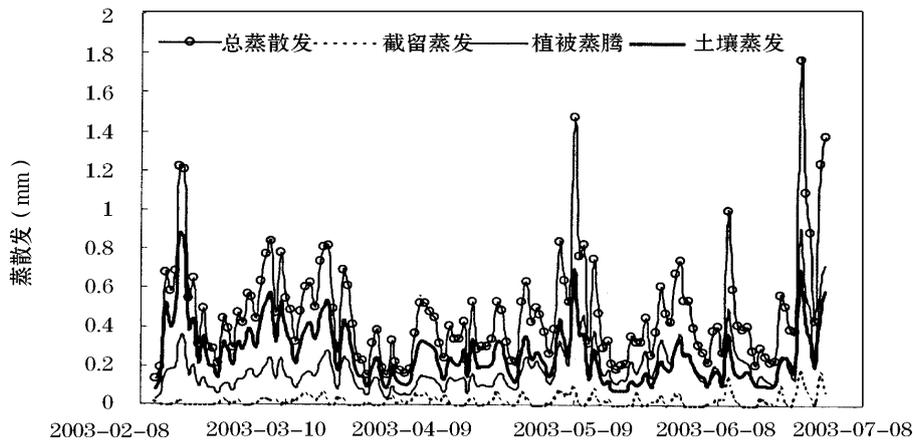


图 5 计算期间模型计算的不同蒸散发组分(nearest插值法)

Fig.5 Different evapotranspiration components of the Heihe mountainous river basin, from Feb 11 to June 30, 2003

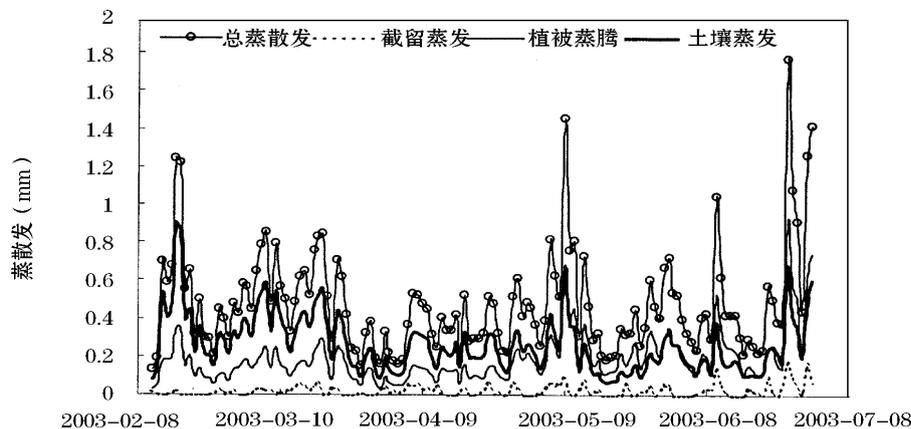


图 6 计算期间模型计算的不同蒸散发组分(cubic插值法)

Fig.6 Different evapotranspiration components of the Heihe mountainous river basin, from Feb 11 to June 30, 2003

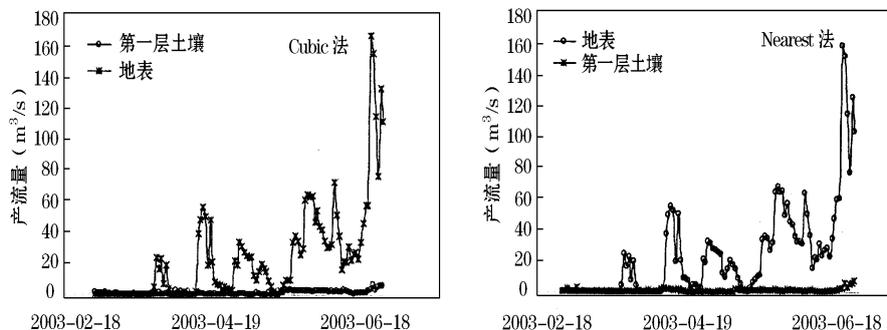


图 7 模拟期间黑河干流山区流域地表和第一层壤中流对比图

Fig.7 Surface runoff and the interflow in the first soil layer in Heihe mountainous river basin, March 4 ~ June 30, 2003

结果直接嵌套到 DW HC 模型中的计算结果表明,不管是利用 cubic 法还是 nearest 法插值计算 MM5 输出结果,流域均呈现浅表产流特征。即在自最长汇流时间开始的模拟期间内(2003 年 3 月 4 日到 6 月 30 日),流域主要是地表产流,另外还存在一部分浅层壤中流。在 3 月 4 日到 23 日之间,流域地表产流量基本为 0。3 月 24 日到 5 月底,主要为冰雪融水。从 5 月份尤其是 5 月底开始,地表产流量逐渐变小,第一层土壤的壤中流逐渐变大,而其它深层土壤,基本不产流(图 7)。这符合当前对流域水文循环过程的定性认识。当然,在此期间,流域基流是河道水量的主要补给源。

因篇幅所限,其它有关的模型输出结果不再讨论。

4 结果与讨论

(1) 利用中尺度气候模式 MM5 计算黑河山区流域及其周边地区的 2003 年 2 月 11 日至 6 月 30 日的水汽通量,运行周期为 10 d,积分步长为 3 s,空间分辨率为 3 km,并将其输出的日降水量、2.0 m 高度的日平均气温和潜热,利用最近距离法(nearest)插值到 1 km \times 1 km 格点上,从而嵌套到内陆河高寒山区流域分布式水热耦合模型(DW HC)中,所计算的黑河干流出口日平均流量与实测序列的 $NSE = 0.79$, $B = -0.79$ (%), $EV = 0.79$, $R^2 = 0.81$ 。而利用基于三角网格的立体插值法(cubic)插值 MM5 输出结果,最终模型计算与实测日平均流量的 $NSE = 0.79$, $B = -0.65$ (%), $EV = 0.79$, $R^2 = 0.80$ 。由于缺乏 2003 年地面观测资料,没有进行同期对比,但根据利用 1999 年和 2000 年地面观测资料驱动模型结果相差不大的情况分析^[18],利用 2003 年地面观测资料驱动 DW HC 模型,应该与 1999 年和 2000 年结果相差不大。因此,MM5-DW HC 嵌套结果,总体应该比利用地面观测资料驱动结果要好^[18]。利用 nearest 插值法所获结果与 cubic 法结果相当,这与利用地面资料驱动模型结果一致^[18]。

(2) MM5-DW HC 嵌套模型的建立,解决了地面气象观测站点稀少的问题,真正实现了将分布式模型移植到无资料地区的径流模拟、反演和预报中去的研究思路。

(3) 利用两种插值方法所计算的模拟期间的蒸散发量(2003 年 2 月 11 日到 6 月 30 日)基本相当,其变化规律也较为一致,与流域实际情况也较为吻合。即在植被发芽生长之前,流域蒸散发主要为土

壤蒸发,而在植被生长期内,则主要为植被蒸腾。

(4) 利用两种插值方法所计算的结果表明,内陆河高寒山区流域存在明显的浅表产流特征,这与地面观测资料驱动结果一致,并符合当前对寒区流域水文循环过程的一般认识。

(5) 在 MM5-DW HC 模型嵌套过程中,利用地面资料驱动所获得的模型经验参数和可调参数均没有再做进一步调整,流域土壤和植被参数也没有改变^[15,18],但由于二者模拟起始时间不一致(地面资料驱动起始时间为 2000 年 1 月 1 日,MM5 输出结果的起始时间为 2003 年 2 月 11 日),需对模型初始地温和含水量参数进行调试。最终模型结果比利用地面资料驱动结果要好得多。这说明进行 MM5-DW HC 嵌套模型来模拟流域日平均流量是可行的。由于 DW HC 模型基于严格的物理机制,而且缺乏流域详尽的土壤和植被参数,且模型时间分辨率较高,因此,模型最终能够获得这样一个结果,是值得肯定的。如果在月或更长的时间尺度上,把一个相对简单的分布式模型^[19]或降水—径流模型与 MM5 结果嵌套,其输出结果应该会更好,曾涛等^[20]的研究结果证明了这一点。

(6) MM5 输出结果与地面实际情况有较大的偏差。具体表现在:降水量明显偏大。在计算期间的非汛期(2003 年 2 月 11 日~5 月 31 日),MM5 输出的流域平均降水量为 227.3 mm,而同期黑河高山区野牛沟气象站(99°35'E,38°25'N,3320 m)观测降水量不足 90 mm,但在汛期的 6 月份,降水量偏大幅度较小;MM5-DW HC 嵌套模型所计算的地温出现异常值。尽管 MM5-DW HC 嵌套模型所计算的出口日平均流量与实测值有一定的一致性,但模型所计算的地温在部分格点上出现极大和极小异常值,而在利用地面观测资料驱动的过程中,没有出现这种现象,且所计算的地温和含水量的时空分布符合对流域水文过程的一般认识。这说明 MM5 输出结果可能存在某种奇异性。导致这些现象的主要原因是由于 MM5 模式的原理缺陷。大气模式包括全球大气模式(GCMs)、区域大气模式和中尺度大气模式在内,在描述空气动力学方面是较为成熟的,但在陆面过程方面存在较多的缺陷。由于下垫面过程与大气过程是相互作用、相辅相成的,为提高大气模式的精度,在大气模式中增加了各种陆面过程模式,但是,为能够实现陆面过程模式与大气模式耦合,一般的陆面过程均具有高时间分辨率和粗空间分辨率,而且所涉及的地面信息极为有限,

这就使一般的陆面过程模式在描述实际陆面过程尤其是水文过程方面无能为力,由此造成大气模式无法合理的容纳地面反馈信息,从而最终造成大气模式结果与实际情况有较大的差距,诸如中长期天气预报的不确定性等,这也是当前大气学和水文学界试图实现水—气完全耦合的初衷。

参考文献(References):

- [1] Gao Yanhong, Lu Shihua, Cheng Guodong. Simulation of rainfall-runoff and watershed convergence process in the upper reaches of Heihe river basin, July 2002 [J]. Science in China (Series D), 2004, 47(suppl.1): 1-8.
- [2] MM5 community model. <http://www.mmm.usar.edu/mm5/>
- [3] Zhang Jinsan, Zhang Zhong, Huang Jin. An introduction to meso-scale model mm5 [J]. Marine Forecasts, 2005, 22(1): 31-40. [张金善, 钟中, 黄瑾. 中尺度大气模式 MM5 简介 [J]. 海洋预报, 2005, 22(1): 31-40.]
- [4] Cui Bo, Wang Jianjie, Guo Xiaorong. Real-time forecast experiments using MM5 in national meteorological center [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 1999, 10(2): 129-140. [崔波, 王建捷, 郭肖容. MM5 在国家气象中心 CRA Y2C92 的实时预报试验 [J]. 应用气象学报, 1999, 10(2): 129-140.]
- [5] Liu Dong. Performance verification of mesoscale model MM5V3 to regional climate simulation [J]. Plateau Meteorology, 2003, 22(1): 71-77. [刘栋. MM5 模式对区域气候模拟的性能试验 [J]. 高原气象, 2003, 22(1): 71-77.]
- [6] Wang Jianjie, Hu Xin, Guo Xiaorong. Comparison experiments on cumulus parameterization schemes of the MM5 [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 2001, 12(1): 41-53. [王建捷, 胡欣, 郭肖容. MM5 模式中不同对流参数化方案的比较试验 [J]. 应用气象学报, 2001, 12(1): 41-53.]
- [7] Wang Chenxi. Comparison experiments on the effects of different cumulus parameterization scheme in MM5 on precipitation prediction [J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2004, 24(4): 168-176. [王晨稀. MM5 模式中不同对流参数化方案对降水预报效果影响的对比试验 [J]. 气象科学, 2004, 24(4): 168-176.]
- [8] Li Xiaoli, He Jinhai, Bi Baogui, et al. The design of urban canopy parameterization of MM5 and its numerical simulations [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2003, 62(5): 526-539. [李晓莉, 何金海, 毕宝贵, 等. MM5 模式中城市冠层参数化方案的设计及其数值试验 [J]. 气象学报, 2003, 62(5): 526-539.]
- [9] Gong Qiang, Yuan Guoen, Wang Hongyu. Simulation experiments on surface gale process with MM5 model [J]. Meteorology, 2005, 31(4): 53-57. [龚强, 袁国恩, 汪宏宇. 应用 MM5 模式对地面大风过程的模拟试验 [J]. 气象, 2005, 31(4): 53-57.]
- [10] Zhao Zhen, Lei Hengchi, Wu Yuxia. A new explicit microphysical scheme in MM5 and numerical simulation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2005, 29(4): 609-619. [赵震, 雷恒池, 吴玉霞. MM5 中新显式云物理方案的建立和数值模拟 [J]. 大气科学, 2005, 29(4): 609-619.]
- [11] Wang Dongliang, Shen Tongli, Tian Hongjun. The four-dimensional variational data assimilation system of mesoscale numerical model MM5 [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2002, 25(5): 603-610. [王栋梁, 沈桐立, 田洪军. 中尺度数值模式 MM5 的四维变分资料同化系统 [J]. 南京气象学院学报, 2002, 25(5): 603-610.]
- [12] Zeng Zhihua, Ma Leiming, Liang Xudong, et al. Forecasting and evaluation of MM5 numerical prediction in Shanghai with grapes-3dvar scheme [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 2004, 15(5): 534-542. [曾智华, 马雷鸣, 梁旭东, 等. MM5 数值预报引入 GRAPES 三维变分同化技术在上海地区的预报和检验 [J]. 应用气象学报, 2004, 15(5): 534-542.]
- [13] Liu Yanxian, Liu Zhong, Huang Jie. The analysis and tuning parallel performance of MM5 model [J]. Computing Technology and Automation, 2004, 23(4): 96-98. [刘艳贤, 刘钟, 黄洁. 中尺度数值气象预报模式 MM5 并行性能分析与优化 [J]. 计算技术与自动化, 2004, 23(4): 96-98.]
- [14] Yin Dashong, Chen Jiayi. Development and coupling a land surface parameterization in MM5 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2000, 24(2): 177-186. [殷达中, 陈家宜. 一个陆面过程参数化模式与 MM5 的耦合 [J]. 大气科学, 2000, 24(2): 177-186.]
- [15] Chen Rensheng, Lu Shihua, Kang Ersi, et al. A distributed water-heat coupled (DWHC) model for mountainous watershed of an inland river basin (): Model structure and equations [J]. Advances in Earth Science, 2006, 21(8): 806-818. [陈仁升, 吕世华, 康尔泗, 等. 内陆河高山山区流域分布式水热耦合模型()模型原理 [J]. 地球科学进展, 2006, 21(8): 806-818.]
- [16] Pan H L, Maht L. Interaction between soil hydrology and boundary-layer development [J]. Boundary-Layer Meteorology, 1987, 38: 185-202.
- [17] Chen Fei. Modelling of land-surface evaporation by four schemes and comparison with FIFE observations [J]. Journal of Geophysical Research, 1996, 101: 7251-7268.
- [18] Chen Rensheng, Kang Ersi, Lu Shihua, et al. A distributed water-heat coupled (DWHC) model for mountainous watershed of an inland river basin (): Model results using the measured data at the meteorological & hydrological stations [J]. Advances in Earth Science, 2006, 21(8): 819-829. [陈仁升, 康尔泗, 吕世华, 等. 内陆河高山山区流域分布式水热耦合模型()地面资料驱动结果 [J]. 地球科学进展, 2006, 21(8): 819-829.]
- [19] Chen Rensheng, Kang Ersi, Yang Jianping, et al. A distributed runoff model for inland river mountainous basin of north-west China [J]. Journal of Desert Research, 2004, 24(4): 416-424. [陈仁升, 康尔泗, 杨建平, 等. 内陆河流域分布式水文模型——以黑河干流山区建模为例 [J]. 中国沙漠, 2004, 24(4): 416-424.]
- [20] Zeng Tao, Hao Zhenchun, Wang Jiahu. Modeling the Response of Runoff to Climate Change [J]. Journal of Glaciology and Cryology, 2004, 26(3): 324-332. [曾涛, 郝振纯, 王家虎. 气候变化对径流影响的模拟 [J]. 冰川冻土, 2004, 26(3): 324-

332.]

A Distributed Water-Heat Coupled (DWHC) Model for Mountainous Watershed of An Inland River Basin() : Model Results Using the Results from MM5 Model

CHEN Ren-sheng, GAO Yan-hong, LI Shi-hua,
KANG Er-si, JI Xi-bin, YANG Yong
(Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Using Mesoscale Model version 5 (MM5) to calculate the daily precipitation, daily averaged air temperature at the 2.0m heights and daily latent heat, from Feb. 11 to June 30, 2003, of the Heihe mountainous river basin and its near area, with a geographical boundary of 96.786° \sim 102.284° E, 37.328° \sim 40.601° N and an area of $17 \times 10^4 \text{ km}^2$, which was much larger than the area of the Heihe mountainous river basin (10009 km^2), the DHWC model was calibrated. The spatial resolution of the MM5 is 3km, the integral timescale is of 3s, and the calculated cycle is about 10d. In the MM5 model, the Grell scheme cumulus parameterization method, the Dudhia option, the explicit moisture scheme (IMPHYS), the cloud-radiation scheme, MRSPBL option, and the modified Oregon State University Land-surface model (OSULSM) were chosen to use. According to the geographical position of the MM5 results and projection transform methods, the MM5 results were projected into Albers coordinate, which was the coordinate of the DWHC model, and were interpolated into $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$, using nearest and cubic methods. The results showed that, when the nearest method was used, the Nash-Sutcliffe equation value of the daily averaged runoff was of 0.79, the balance error was of -0.79%, and the R^2 value was of 0.81. When the cubic method was used, the Nash-Sutcliffe equation value, the balance error and the R^2 value was of 0.79, -0.65% and 0.80, respectively. Though the evaluation criterion values are not very high, the model results are much better than the model results using the data at the meteorological and hydrological stations, with a Nash-Sutcliffe equation value as 0.61. The model results are not very good because of the lack of the detailed soil and vegetation data. The MM5-DWHC model results also showed that the runoff production processes mainly occurred on the soil surface and in the shallow soil layers. The calibration results showed that, the MM5 results were singular to some extent.

Key words: Mesoscale climatic model; Meteorological factors; Initial parameters; Singular feature.