水文模式 DHSVM 与区域气候模式 RegCM2/China 嵌套模拟试验*

王守荣
(国家气候中心, 北京, 100081)

黄荣辉
(中国科学院大气物理研究所, 北京, 100080)

于汇
(国家气候中心, 北京, 100081)

L. R. Leung M. S. Wigmosta L. W. Vail
(*Pacific Northwest National Laboratory, USA*)

摘 要

本研究在改进水文- 土壤- 植被模式 DHSVM, 用气候观测资料驱动 DHSVM 进行模拟试验的基础上, 建立了区域气候模式 RegCM2/China 与水文模式 DHSVM 的嵌套系统, 将区域气候模式对中国和东亚地区控制试验(目前气候情景)和敏感性试验(未来 2× CO_2 气候情景)结果用双线性插值方法降尺度(downscaling)到滦河、桑干河流域的 8 个气象站点, 然后再用数字高程模式 DEM 插值到 DHSVM 的细网格点, 驱动水文模式进行嵌套模拟试验。试验结果表明, 滦河、桑干河流域在未来大气中 CO_2 浓度加倍情况下, 地面气温呈一致的增加趋势, 年平均气温增加 2.8 ℃; 两流域未来降水也呈增加趋势, 滦河、桑干河流域年降水量分别增加 6 mm 和 46 mm; 两流域未来蒸发量有所增加, 年均蒸发量增加 29 mm; 未来滦河流域年径流深减少 27 mm, 流量减少 $14.72\times10^8 m^3$, 桑干河流域径流深增加 26 mm, 流量增加 $12.22\times10^8 m^3$, 两流域合计, 流量减少 $2.5\times10^8 m^3$; 未来滦河、桑干河流域径流深趋向一致, 分别为 74 和 71 mm, 约为全国目前平均径流深 284 mm 的 1/4。可见, 两流域未来总体上仍呈现暖干化趋势。本研究发展的嵌套模式系统具有一定的预测能力, 而且通过参数移植, 可应用于中国其他流域。

关键词: 区域气候模式, 水文模式, 嵌套试验, 预测分析。

1 引 言

20 世纪 70 年代以来, 中国科学家研制了许多水文模式(如著名的新安江模式等), 并应用这些模式模拟了气候变率和气候变化对中国水文、水资源的影响, 取得了重要的研究成果。中国关于气候变化对水文、水资源影响的研究, 长期使用的主要是概念性水文模式, 模式参数多按流域集总算出, 基本没有考虑陆面不均匀性。最近几年随着 GIS 的应用, 开始考虑下垫面不均匀性对模式参数的影响, 在水文模拟中采用了分布式参数, 但水文模式的物理过程仍然薄弱, 未能充分反映气候、植被、雪盖、土壤、水文相互作用和相互反馈的机理, 尚未实现水文过程的动力模拟[1, 2]。

关于未来气候变化对水文、水资源影响的研究, 气候情景的选择是先决条件。中国目前选择气候情景通常采用两种方法: 一是假想的气候情景, 即假定到未来某一特定时期气候要素(温度、降水等)的变化量, 如 ΔT = 1 ℃, 2 ℃ …; ΔP = 0%, ±10%, ±20% …。二是取自 GCMs 模拟的气候情景, 通过降尺度(downscaling)方法[3]输入水文模式。无论用何方法得到的气候情景, 都是用其修正选定的水文基准系列(如 1961~ 1990 年), 再用修正后的温度、降水、辐射、风速等系列值输入水文模式, 得到气候均值变化导致的年径流变化。用第一种方法得到的假想气候情景驱动水文模拟, 从本质上讲是一种敏感性试验, 而不具有气候、水文预测功能。用 GCMs 模式得到的气候情景, 因其预测精度较差, 空间分辨

* 初稿时间: 2001 年 6 月 18 日; 修改稿时间: 2001 年 10 月 23 日。
资助课题: 中国气象科学技术研究课题项目(96-908-03-04)。

率较低,很难与高分辨率的动力水文模式嵌套或耦合。与 GCM 模式相比,区域气候模式具有更高的精度和分辨率[4,5],其模拟输出的 Downscaling 资料在时空尺度上更易于与水文模式嵌套或耦合。所以,国际上新一代的动力水文模式大多实现了与分辨率高、物理过程较全面的区域气候模式的嵌套或耦合,以提高模拟结果的可信度,发展大气- 水文预测能力。这一动态值得我们跟踪。

正是基于上述的分析和考虑,本研究在引进先进的分布式水文- 土壤- 植被动力模式 DHSVM,并针对中国有关流域的气候、水文、地理特征进行改进和检验的基础上,发展了水文模式与区域气候模式的嵌套技术,实现了 DHSVM 模式与区域气候模式 RegCM2/ China[6] 的嵌套模拟。以下首先简单介绍嵌套模拟设计,然后给出区域气候模式 RegCM2/ China 对滦河、桑干河流域的 Downscaling 模拟结果,接下来重点阐述气候- 水文嵌套模拟试验得出的两个流域在 CO_2 浓度倍增情景下水文、水资源的变化结果,最后是结论和讨论。

2 嵌套模拟设计

本研究在对水文模式 DHSVM 进行改进并用实测资料对模拟结果进行检验[7] 的基础上,实现了水文模式与区域气候模式 RegCM2/ China 的嵌套,旨在建立大气- 水文预测模式系统。嵌套设计如图 1 所示,先用 RegCM2/ China 生成未来气候变化情景[8,9],再用 Downscaling 方法内插到滦河、桑干河流域的气象站点,然后再用数字高程模式 DEM 插值到水文模式的细网格,驱动水文模式模拟滦河、桑干河流域未来水文、水资源变化。

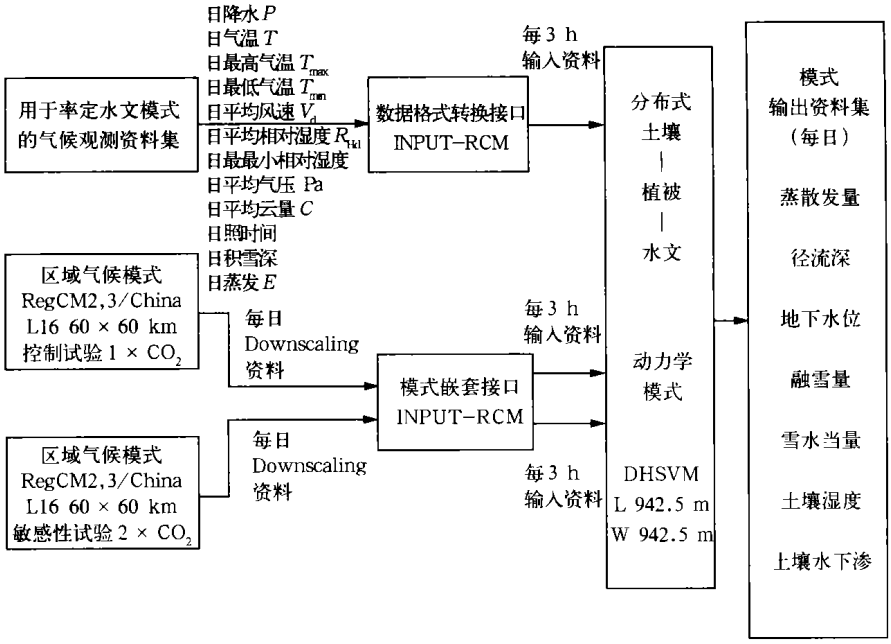


图 1 水文模式与区域气候模式嵌套设计

区域气候模式 RegCM2/ China 中心点取为 37.5°N, 110°E,模式水平分辨率取为 60 × 60 km,南北方向的格点数为 80,东西向的格点数为 150,计算区域包括了整个中国大陆及周边地区。模式垂直方向取 16 层,模式顶层的气压为 10 hPa。湿度方案为显式方案,时间积分步长取为 180 s,陆面过程采用 BATS 方案,对流参数化选用 Grell 方案。

嵌套区域模式需要给出模式的初始场及随时间变化的侧边界场,包括各层风场、温度场、湿度场及地面气温、气压场等。这些变量和初始场从澳大利亚 CSIRO AOGCM $R_{21}L_9$ 海气耦合模式[9] 中得到。大气部分水平分辨率约为 5.6°(经度) × 3.2°(纬度),垂直方向采用 σ 坐标,层数为 9 层。

区域模式共进行了两个试验,一是控制试验,模式中的 CO_2 值取为现代值;二是敏感性试验,模拟 2 × CO_2 结果。控制试验和敏感性试验的积分时间均为 5 a,将两个试验的差值作为未来中国区域气候在 CO_2 加倍情况下的变化。使用双线性内插方法将区

域模式模拟结果插值到滦河、桑干河流域的 8 个站点(承德、围场、丰宁、多伦和张家口、大同、怀来、五台山), 生成每日的 Downscaling 资料。嵌套接口 INPUT—RCM 将每日 Downscaling 资料转换为 3 h 资料, 并驱动水文模式 DHSVM 进行模拟运算[10, 11]。区域气候模式 RegCM2/China Downscaling 资料集包括每日 U 风速(m/s)、V 风速(m/s)、地表气温(℃)、地表相对湿度(%)、地面气压(Pa)、降水累加值(mm)、地表入射太阳辐射(W/m^2)、地表向上长波辐射(W/m) 等数据, 水文模式输出逐日蒸散发、径流深、地下水位、融雪量、雪水当量、土壤湿度、土壤水下渗速率等水文要素量值。

3　区域气候模式 RegCM2/China 模拟试验及 Downscaling 结果

3.1　控制试验

首先应用 RegCM2/China 进行积分时间为 5 a 的控制试验, 并将模拟结果与观测资料进行比较。其结果表明, 由于区域气候模式具有较高的分辨率, 对中国地区温度和降水的模拟结果较用于嵌套的全球模式结果有了较大的提高(图 2)。然后采用双线性插值 Downscaling 方法, 将位于 60 km × 60 km 区域模式格点上的各气候要素(包括逐日平均降水、地面气温、最高最低气温、风速、相对湿度、地面气压和云量等) 插值到滦河、桑干河流域的 8 个站点上。具体做法是先找到距各站点最近的 4 个格点, 取它们到站点的距离为权重系数, 然后得到各站点上各气候要素的值。

3.2　敏感性试验

根据 RegCM2/China 的模拟结果, 在 CO_2 倍增情景下, 在中国全国范围内均呈增温趋势。南方增温稍低, 一般在 2.0~ 2.5 ℃之间; 北方稍高, 一般在 2.5~ 3.0 ℃之间, 其中滦河、桑干河流域平均增温 2.8 ℃。

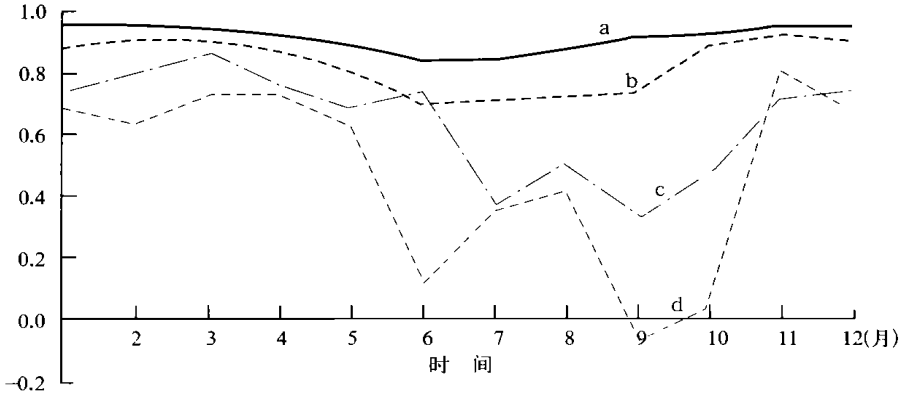


图 2　中国地面气温、降水模拟与实况的相关系数[6]

(a. 区域模式模拟的气温, b. 全球模式模拟的气温, c. 区域模式模拟的降水, d. 全球模式模拟的降水)

模拟结果表明, 在 CO_2 加倍情况下, 中国多数地区的降水普遍增加, 但东北南部至华北北部为惟一降水减少的地区。对于滦河和桑干河流域, 区域北部和西部的降水将会增加, 中南部几个站点的降水将有所减少, 具体如图 3 所示, 图中的数据为各站点年平均降水变化的百分率分布。

3.3　未来气候要素变化

敏感性试验与控制试验的差值即为未来 CO_2 加倍情景下气候要素的变化值。图 4 给出滦河、桑干河两个流域的降水变化(mm), 图中实线为滦河流域, 虚线为桑干河流域。从总体上看, 在 CO_2 加倍情况下, 两个流域降水变化特点比较一致, 均是在盛夏的 7~ 8 月及 9 月呈减少趋势, 而在暮春的 5 月、初夏的 6 月以及秋季的 10 月有一定的增加。但

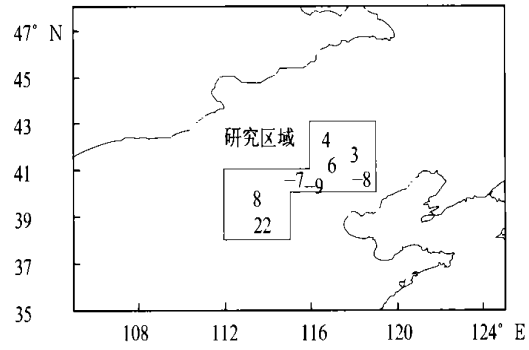


图 3　滦河、桑干河流域在 CO_2 加倍情景下降水变化(%)

变化幅度略有差异, 如桑干河流域降水在 9 月份减少较多, 在 10 月份增加较少等。全年平均降水量均有一定的增加, 滦河和桑干河流域分别增加 6 mm 和 46 mm。

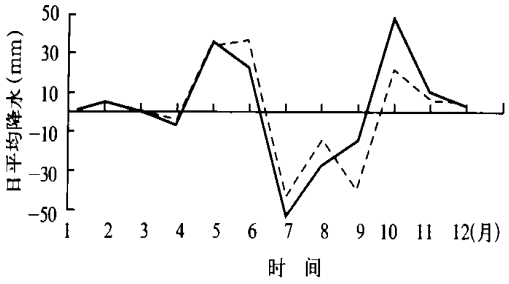


图 4 滦河(实线)、桑干河(虚线) 在 CO_2 加倍情景下月平均降水变化

因年平均气温的变化总体上在各站点分布比较均匀, 因此不再给出其在滦河和桑干河流域平面上的分布。图 5 给出 8 个站平均地面气温在全年各月的变化情况。从图中可以看出, 在 CO_2 加倍的情况下, 两个流域的地面气温全年呈一致的增加趋势, 其中冬季 12 月份的增加幅度最大, 达到 4.1℃, 其他月份如 1, 5, 8, 9 月的增加也都在 3 ℃以上; 3 月和 11 月增加较少, 不到 2℃。全年平均气温增加 2.8℃。

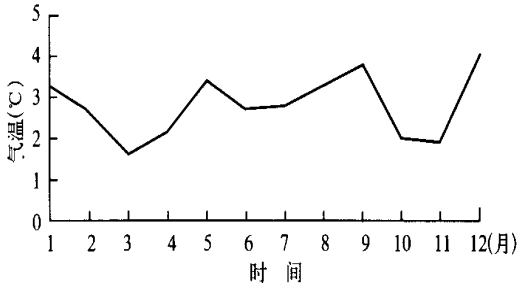


图 5 滦河、桑干河流域在 CO_2 加倍情景下气温变化

4 DHSVM 与 RegCM2/China 的嵌套模拟试验及预测结果分析

分别选用区域气候模式 RegCM2/China 敏感性试验与控制试验各 5 a 的模拟结果, 驱动水文模式得出滦河、桑干河流域目前和未来 CO_2 加倍情景下 5 a 的水文模拟结果[12~15], 其年均差值即为未来 CO_2 加倍情景下流域水文要素的变化值。

4.1 滦河流域嵌套模拟试验

滦河流域目前及 CO_2 加倍情景下蒸散发年变特征分别见图 6a 和 6b, 未来变化趋势见图 6c。从图 6a 可见, 控制试验情景下蒸散发量年变特征与观测结果基本一致, 只不过 5~ 6 月的峰值不明显, 这可能有两方面的原因: 一是月平均值掩盖了峰值的起伏, 二是区域气候模式风速模拟值有误差。从图 6b 可见, 未来 CO_2 加倍情景下年蒸发也只有一个峰值, 因而敏感性试验与控制试验的差值亦即未来的蒸散发变化可克服模式的系统误差。从图 7c 可见, 未来 4~ 6 月蒸发将增加 2~ 8 mm; 7 月稍有减少, 减幅为 1~ 2 mm; 8~ 10 月有所增加, 增幅为 4~ 11 mm; 冬季变化不大, 变幅小于 1 mm。全年平均呈增加趋势, 增幅为 29 mm 左右。

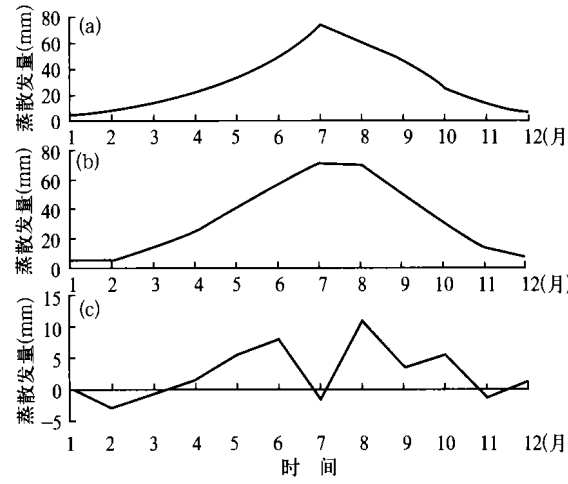


图 6 滦河流域 CO_2 加倍情景下月平均蒸散发量变化趋势

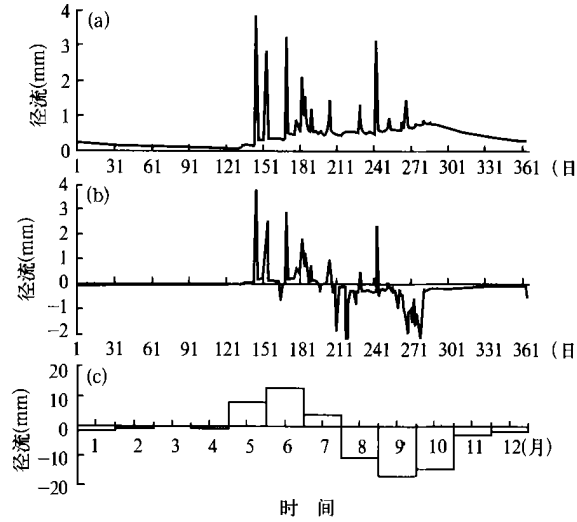


图 7 滦河流域未来 CO_2 加倍情景下径流预测

(a. 径流日变化, b. 月变化, c. 特征)

滦河流域未来 CO_2 加倍情景下径流预测及其相对于目前径流的日变化和月变化分别见图 7a, b 和 c[16~17]。从图中可见, 在未来 CO_2 加倍情景下, 滦河流域 1~ 4 月径流变化较小, 月径流深变幅小于 2 mm; 5~ 7 月径流有所增加, 增幅为 11~ 13 mm; 8 ~ 10 月, 径流减少较多, 减幅为 11~ 17 mm; 11~ 12 月稍有减少, 减幅为 2~ 3 mm。年均径流深有所减少, 减幅为 27 mm 左右。

4.2　桑干河流域嵌套模拟试验

华北地区蒸散发的变化主要取决于温度和风速的变化[18, 19]。根据区域气候模式的模拟结果, 桑干河流域和滦河流域未来温度、风场变化的趋势大致相同, 所以水文模式模拟的桑干河流域和滦河流域未来蒸散发的变化趋势亦基本一致, 在此不再赘述。

桑干河流域未来 CO_2 加倍情景下径流预测及其相对于目前径流的日变化和月变化分别见图 8a, b 和 c。从图 8 可见, 在未来 CO_2 浓度倍增的情景下, 桑干河流域的径流深将有所增加, 年均增幅为 26 mm 左右, 这与前述该流域年降水量增加较多的趋势相一致。从径流年变特征看, 1~ 4 月径流量变化不大, 5~ 6 月径流深增加3~ 6 mm, 7~ 8 月径流深减少2~ 12 mm, 减幅较大, 9~ 12 月径流深增加 3 ~ 14 mm。

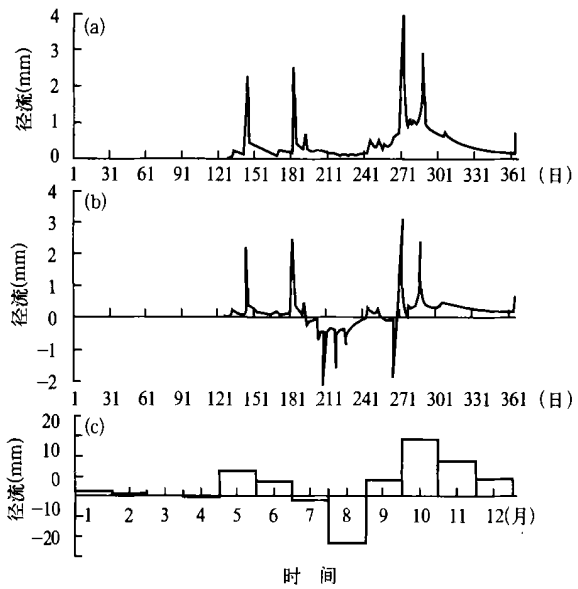


图 8　桑干河流域未来 CO_2 加倍情景下径流预测
(a. 径流日变化, b. 月变化, c. 特征)

5　总结与讨论

(1) 区域气候模式试验结果表明, 滦河、桑干河流域在未来 CO_2 加倍情况下, 地面气温全年呈一致的增加趋势, 年平均气温增加 2.8 ℃; 其中冬季 12 月增幅最大, 达到 4.1 ℃; 3 月与 11 月增幅较小, 不到 2 ℃; 其他月份增幅为 3 ~ 4 ℃。未来两个流域降水年变特征比较一致, 7~ 9 月降水呈减少趋势, 5 ~ 6 月和 10 月呈增加趋势, 滦河、桑干河流域年均降水总量分别增加 6 mm 和 46 mm。

水文模式模拟结果表明, 两个流域未来蒸散发变化趋势相同, 全年平均增加 29 mm, 其中 4~ 6 月、8~ 10 月呈增加趋势, 增幅范围为 2~ 11 mm; 2~ 3 月有所减少, 减幅为 1~ 3 mm; 冬季变幅不足 1 mm。滦河、桑干河流域在未来 CO_2 加倍情景下, 5 ~ 6 月径流增加, 而夏、秋季径流减少, 两个流域的年径流深分别减少 27 mm 和增加 26 mm。滦河、桑干河未来 $(P - E)$ 差值分别为 − 23 (mm) 和 + 17 (mm), $(P - E)$ 值和径流深变化有很好的对应关系, 说明水文模式的结果比较合理。

对模拟结果的综合分析表明, 滦河、桑干河流域未来气温进一步升高, 降水虽然有一定增加, 但由于蒸发量增加, 两流域流量合计却减少 2.5 亿 m^3。未来滦河、桑干河流域径流深趋向一致, 分别为 74 mm 和 71 mm, 约为目前全国平均径流深的 1/4, 可见两流域未来总体上仍呈现暖干化趋势[20, 21]。

(2) 本研究建立了区域气候模式与分布式水文模式的嵌套系统, 将区域气候模式对中国和东亚地区的模拟结果降尺度到滦河、桑干河流域, 驱动水文模式模拟、预测未来 CO_2 浓度加倍情景下水文变化趋势。该系统突破了以往敏感性分析的局限性, 发展了大气− 水文预测能力, 既能模拟或预测日、月、季、年的大气、水文过程, 也能模拟或预测长期气候变化背景下的水文变化。该模式系统不仅适用于华北地区的流域, 而且通过参数移植和率定, 也可应用于其他地区的流域。

(3) 目前, 区域气候模式对降水模拟、预测的准确率还不高, 局部地区的模拟还存在着系统误差[22, 23], 区域气候模式降水模拟精度制约了水文模拟的效果。从近期看, 亟待发展云分辨模式 (Cloud Resolving Model) 并加入区域气候模式, 模拟云系降水落区、时间和强度, 提高区域气候模式对降水过程模拟精度, 从而改进径流、地下水位和土壤湿度等水

文模拟效果。从长远看,需跟踪国际前沿,深入开展区域气候模式与水文模式的双向耦合试验,研究大气- 植被- 土壤- 水文系统的交互影响[24~26],从根本上提高大气、水文模拟、预测水平。

致谢:感谢赵宗慈、刘春蓁、季劲钧教授对研究工作的精心指导和高学杰博士对模式嵌套试验的鼎力相助。

参考文献

1 陈宜瑜. IGBP 未来发展方向. 地球科学进展, 2001, 16(1):15~18

2 Soroosh Sorooshian. GEWEX moving ahead scientifically and reaching out across disciplines/organizations. GEWEX News, 2001, 11(1):2

3 刘春蓁. 气候变化对我国水文水资源的可能影响. 水科学进展, 1997, 8(3):220~225

4 赵宗慈, 罗勇. 二十世纪九十年代区域气候模拟研究进展. 气象学报, 1998, 56(2):225~246

5 刘永强, 丁一汇. 区域气候模拟研究. 应用气象学报, 1995, 6(2):228~239

6 高学杰. 人类活动对中国气候变化影响的数值检测研究:[学位论文]. 北京:中科院大气所. 2000

7 王守荣. 滦河、桑干河流域分布式水文模式及其与区域气候模式嵌套模拟研究:[学位论文]. 北京:中国科学院大气物理研究所, 2001

8 Giorgi F. et al. Development of a second- generation regional climate model(RegCM2). Part Ⅰ: Boundary- layer and radiative transfer processes. Mon Wea Rev, 1993, 121:2794~2813

9 Giorgi F, et al. Development of a second- generation regional climate model (RegCM2). Part Ⅱ: Convective processes and assimilation of lateral boundary conditions. Mon Wea Rev, 1993, 121: 2814~2832

10 Gordon H B, Farrell P O. Transient climate change in the CSIRD coupled model with dynamic sea ice. Mon Wea Rev, 1997, 125: 875~907

11 Mark S. Wigmosta, Lance W Vail, Dennis P Lettermaier. A distributed hydrology- vegetation model for complex terrain. Water Resources Research, 1994, 30(6): 1665~1679

12 L R Leung, Wigmosta M S, et al. Application of a subgrid orographic precipitation/surface hydrology scheme to a mountain watershed. J Geophys Res, 1996, 101(D8): 12803~12817

13 Leung L R, Ghan S J. A subgrid parameterization of orographic precipitation. Theor Appl Climatol, 1995, 52: 95~118

14 Leung L R, Ghan S J. Parameterizing subgrid orographic precipitation and surface cover in Climate Models. Mon Wea Rev, 1998, 11

15 Leung L R, Wigmosta M S, Ghan S J, et al. Application of a subgrid orographic precipitation surface hydrology scheme to a mountain watershed. J Geophys Res, 1996, 101(D8): 12803~12817

16 施雅风, 刘春蓁, 张祥松. 中国气候与海平面变化及其趋势和影响(4):气候变化对西北华北水资源的影响. 济南:山东科学技术出版社, 1995. 159~177

17 宋正山, 杨辉, 张庆云. 华北地区水资源各分量的时空变化特征. 高原气象, 1999, 18(4):552~566

18 鲁学仁. 华北暨胶东地区水资源研究. 北京:中国科学技术出版社, 1992. 176~259

19 莫兴国. 区域蒸发研究综述. 水科学进展, 1996, 7(2):180~185

20 吴以熬等. 中国水资源利用. 北京:水利电力出版社, 1989. 19~26

21 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报, 1999, 1~6

22 黄荣辉, 徐宁红, 周连童. 我国夏季降水的年代际变化及华北干旱化趋势. 高原气象, 1999, 18(4):465~476

23 Leung L R, Ghan S J, Zhao Z C, et al. Intercomparison of regional climate simulations of the 1991 summer monsoon in eastern Asia. J Geophys Res, 1999, 104(D6): 6525~6454

24 罗勇, 赵宗慈. NCAR RegCM2 对东亚区域气候的模拟试验. 应用气象学报, 1997, 7(增刊): 124~133

25 季劲钧, 余莉. 地表面物理过程与生物地球化学过程耦合反馈机理的模拟研究. 大气科学, 1999, 23(4):439~448

26 丁一汇, 张晶, 赵宗慈. 一个改进的陆面过程模式及其模拟试验研究第二部分:陆面过程模式与区域气候模式的耦合模拟试验. 气象学报, 1998, 56(4):385~400

NUMERICAL SIMULATION EXPERIMENTS BY NESTING HYDROLOGY MODEL DHSVM WITH REGIONAL CLIMATE MODEL RegCM2/ China

Wang Shourong

(National Climate Center, Beijing 100081)

Huang Ronghui

(Institute of Atmospherics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Ding Yihui

(National Climate Center, Beijing 100081)

L. R. Leung M. S. Wigmosta L. W. Vail

(Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington 99352, USA)

Abstract

Based on improvement of the distributed hydrology- soil- vegetation model DHSVM and its application to North China, a nested regional climatic- hydrologic model system is developed by connecting DHSVM with RegCM2/ China. The simulated climate scenarios, including control and $2 \times CO_2$ outputs, are downscaled to 8 stations in Luanhe River and Sanggan River Basins to drive the hydrology model. According to simulation results, under double CO_2 conditions, temperature and evapotranspiration will rise 2.8 ℃ and 29 mm, respectively; precipitation also increases but with different values for each basin, 6 mm for Luanhe River while 46mm for Sanggan River; runoff change for the two basins is different too, 27 mm decrease for Luanhe River Basin while 26 mm increase for Sanggan River Basin. As a result, the runoff in future for Luanhe River Basin and Sanggan River Basin is 74 mm and 71 mm, respectively, which is approximately a quarter of mean annual runoff (284 mm) of the whole country. Total streamflow for the two basins will decrease about $2.5 \times 10^8 m^3$. All these indicate that the warm and dry trend will continue in the two river basins under double CO_2 scenarios. The nested model system, with both climatic and hydrologic prediction ability, could also be applied to other basins in China by parameter adjustment.

Key words: Regional climate model, Hydrology model, Nested simulation experiment, Prediction analysis.