

兰江流域气候与水文模拟研究^{* 1}

王守荣¹ 康丽莉² 石 英^{3,4}

WANG Shourong¹ KANG Lili² SHI Ying^{3,4}

1. 中国气象局,北京,100081
2. 浙江省气象科学研究所,杭州,310017
3. 国家气候中心,北京,100081
4. 中国气象科学研究院,北京,100081

1. *China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*
2. *Zhejiang Institute of Meteorological Sciences, Hangzhou 310017, China*
3. *National Climate Center, Beijing 100081, China*
4. *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*

2007-06-21 收稿,2007-09-27 改回.

Wang Shourong, Kang Lili, Shi Ying. 2008. A study on climatic and hydrological modeling in Lanjiang basin. *Acta Meteorologica Sinica*, 66(3):320–328

Abstract A climatic and hydrological nesting model system was established to simulate the climate and hydrology conditions under the SRES A2 scenario and assess impacts of climate change on water resources in the Lanjiang basin. Two sets of 30-year integral experiments i. e. the control experiment and the future prediction experiment, were conducted in the Eastern China by using the 20 km high resolution regional climate model RegCM3 coupling with the atmosphere part of global climate model FvGCM. The results of the control experiment from 1961 to 1990 indicate that both the simulated annual averaged temperature and precipitation in Zhejiang province have distinct topographic characters and agree with the observations since the detailed topography of Zhejiang province is incorporated into the high resolution RegCM3. The simulated annual averaged temperature of Lanjiang basin is quite consistent with the observed one, but the simulated annual precipitation is less than the observed, especially in summer. In the future prediction experiment, the climate change scenario of Lanjiang basin from 2071 to 2100 was set up under the SRES A2 scenario. Then the distributed hydrological model DHSVM was calibrated and validated using observed data. The hydrological model could reproduce the past runoff process of Lanjiang basin quite well, reflecting its high modeling ability. At last, the two sets of simulated results by RegCM3 were put into DHSVM to drive the hydrological simulation in Lanjiang basin. The simulated results show that the averaged temperature in each month will all rise from 2071 to 2100 compared to the one from 1961 to 1990, and the annual temperature will increase by 2.84 °C. The annual precipitation will also increase especially in the flood season from April to July, which could results in the rising of flood frequency in the basin. The annual runoff will also increase in step with more annual precipitation, especially in the flood season. Under the global persistent warming scenarios, the climate extreme events such as high temperature, heat waves and floods will probably be more severe in the basin.

Key words Climate change, Climate modeling, Hydrology modeling, Water resources assessment

摘 要 该文建立了气候-水文嵌套模式,用于气候变化情景下流域气候、水文模拟,并在此基础上进行水资源评估。首先应用 20 km 高分辨率的区域气候模式 RegCM3,嵌套全球环流模式 FvGCM 的大气部分,在中国东部地区进行了两组 30 a 积分的模拟试验,即控制试验和未来预测试验。控制试验(1961—1990 年)结果表明,RegCM3 能较细致地刻画浙江省的地形分

* 资助课题:国家科技部重大基础研究前期研究专项(2003CCC00300)、浙江省重点科研社会发展项目(2004ZD06)。

作者简介:王守荣,主要从事区域气候模式与水文模式耦合模拟研究。E-mail: wangsr@cma.gov.cn

布,模拟的浙江省的多年平均气温和降水均呈现出明显的地形特征,与实况较为符合。兰江流域年平均气温模拟较好,但夏季降水模拟量明显偏低。在未来预测试验中,构建了 SRES A2 排放情景下兰江流域 2071—2100 年的气候变化情景。然后,用兰江流域的历史观测资料对分布式水文模型 DHSVM 进行了率定和验证,该模型较好地再现了兰江流域的历史径流过程,具有较好的模拟特性。最后,将 RegCM3 的两组试验结果输入到 DHSVM 中,驱动模型进行水文模拟。模拟结果表明:相对于 1961—1990 年,兰江流域 2071—2100 年各月的平均气温均呈上升趋势,年平均气温上升幅度达 $2.84\text{ }^{\circ}\text{C}$;年降水量也将增加,主要发生在 4—7 月的汛期,可能会导致汛期洪涝灾害发生频率上升;年径流深变化与年降水量变化基本一致,汛期径流将明显增加。在全球持续变暖的背景下,兰江流域未来高温热浪和洪涝等气候、水文极端事件有可能进一步加剧。

关键词 气候变化,气候模拟,水文模拟,水资源评估

中图法分类号 P46

1 引言

IPCC 第二工作组第四次评估报告(2007)指出,全球气候变暖将加剧水资源时空分布失衡,部分干旱地区愈加干旱,洪涝地区愈加洪涝。目前 IPCC 正在撰写“气候变化与水技术报告”,评估气候变化对全球和区域水文、水资源影响(2007)。深入研究全球气候变化的区域响应,评估气候变化对重要流域水文、生态影响,是当前气候和水文领域研究的重要课题。将全球气候模式 GCMs 与基于网格的且具有明确物理机制的分布式水文模型耦合,是开展气候变化对流域水文水资源影响评估的有效方法,如郝振纯等(2006)利用 IPCC 第三次评估中 7 种全球气候模式在两种情景(A2, B2)下的预测结果,驱动大尺度分布式水文模型评估了黄河源区未来的水资源。然而,以往 GCMs 的水平分辨率通常为数百公里,虽然可以很好地描述大气环流和全球气候的大尺度特征,但描述山地和海岸带等区域尺度的地形特征和陆面物理过程其分辨率显然偏低。因此,用低分辨率的 GCM 的情景预测结果进行气候变化的影响评估时需要进行降尺度分析。目前高分辨率的 GCMs 尚不成熟,而高分辨率的 RCMs 可以较好地反映影响局地气候的地面特征量及其气候本身未来的波动规律,因而被认为是获取高分辨率的局地气候变化信息的有效降尺度分析方法。中国学者已尝试利用区域气候模式 PRECIS(许吟隆等, 2005, 2006)和 RegCM 类(高学杰等, 2002, 2007)来开展这方面的研究,袁飞等(2005)则将区域气候变化影响评估模型 PRECIS 与大尺度陆面水文模型 VIC 相嵌套,对气候变化情景下海河流域水资源的变化趋势进行预测。

利用 RCMs 作动力降尺度分析,前期研究由于模式的复杂性及计算资源的限制,模式水平分辨率

不高,一般取为 $50\text{ km}\times 50\text{ km}$ 。近年来,随着计算机技术的发展,国际上开始使用 20 km 或更高分辨率的区域气候模式作年代际时间尺度的气候模拟和预测,如 Leung 等(2004)、Christensen 等(2004)和 Gao 等(2006)对欧洲和北美地区的研究。利用高分辨率的区域气候模式对亚洲地区进行模拟的工作相对较少,主要有日本 Kusunoki 等(2006)和 Oouchi 等(2006)使用其 20 km 分辨率全球模式进行的 $2\times 10\text{ a}$ 长度的时间段试验(time slice experiment)。

分布式水文模型又称数字水文模型,是构建在 DTM(数字地形模型)或 DEM(数字高程模型)基础之上的一种水文模型,分布式水文模型用严格的数学物理方程表述水文循环的各子过程,参数和变量中充分考虑空间的变异性,并着重考虑不同单元间的水平联系。因此,在模拟土地利用、土地覆盖、陆面过程、气候变化影响评估等方面显出优势。目前中国使用较多的有从国外引进的 SWAT 模型(刘昌明等, 2003)、VIC 模型,还有一些中国学者自行设计的模型(夏军等, 2003),这些模型已被成功的应用于多个流域水文过程的研究中(郑红星等, 2004; 李道峰等, 2004)。DHSVM 模型(Wigmosta, et al, 1994)与 VIC 模型都是在水平方向上将流域划分为多个面积相等的网格单元来进行水文计算,与区域气候模式连接方便。VIC 模型一般用于大尺度流域的水文模拟,而 DHSVM 模型用于中小尺度流域的水文模拟,其分辨率一般在几十到几百米之间,适用于开展气候变化对中小流域径流影响的模拟研究。过去几年里, DHSVM 已经在国外的许多研究领域里得到了应用(Leung, et al, 1999)。在中国,王守荣等(2002)已将该模型应用到半干旱半湿润地区的海河和滦河流域,取得较好的模拟结果。

本文采用 20 km 高分辨率的区域气候模式 RegCM3,单向嵌套一个全球环流模式(FvGCM),

进行两组 30 a 积分的模拟试验,构建中国东部地区的气候变化情景,来驱动分布式水文模型 DHSVM 进行水文模拟,开展气候变化对钱塘江支流——兰江流域水文水资源的影响评估研究。

2 研究区概况

兰江流域位于钱塘江上游,高程范围从 60 m 到 1702 m,流域内海拔 200 m 以下是著名的金衢盆地,200 m 以上分布着丘陵山地。流域干流长 303 km,集水面积达 19468 km²,90% 以上在浙江省

境内(图 1)。流域森林覆盖率 50% 以上,研究区地处亚热带季风区,流域年平均气温为 17 °C,1 月月平均气温为 5 °C,7 月月平均气温为 29 °C。多年平均降水量为 1545 mm。流域降水的空间分布为西多东少,西部多年平均降水量超过 1700 mm,东北部多年平均降水量约为 1400 mm。流域年平均径流量为 172.8×10⁸ m³,其中 55%—60% 出现在 4—7 月。流域水资源虽比较丰富,但红壤植被稀薄,涵养水源能力较差,洪涝和干旱灾害频繁,属浙江防汛重点地区。

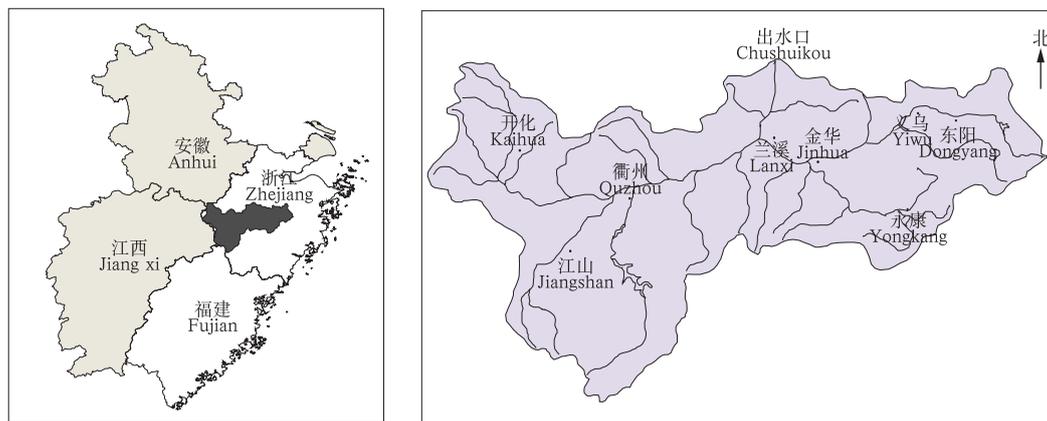


图 1 兰江流域地理位置和流域水系分布

Fig. 1 Geographic location and river network system of Lanjiang catchment

3 RegCM3 模式简介

本文采用意大利国际理论物理中心(The Abdus Salam International Center for Theoretical Physics)于近年间研制开发的区域气候模式 RegCM2(陈明等,1997)的改进版 RegCM3。较之以往版本,RegCM3 在物理过程等多方面有了许多改进,模拟性能也有所提高(高学杰等,2002)。

3.1 试验方案设计

模式中心点取为 33.5°N, 116°E。模式水平分辨率为 20 km×20 km,南北方向的格点数为 109,东西向的格点数为 100,计算区域包括了我国东部地区。模式垂直方向取 18 层,模式顶层的气压为 10 hPa。湿度方案为显式方案,辐射采用 NCAR CCM3 方案,海表通量参数化方案使用 Zeng 方案,行星边界层方案使用 Holtslag 方案,积云对流参数化方案选择基于 Arakawa-Schubert 闭合假设的 Grell 方案。时间积分步长取为 60 h。模式所用地

形资料由美国地质勘探局(United States Geological Survey, USGS)制作的 10'×10' (经度×纬度)地形资料插值得到,植被资料使用 USGS 基于卫星观测反演的 GLCC(Global Land Cover Characterization)资料。NASA-NCAR 的 FvGCM(high-resolution Finite-volume General Circulation Model)全球环流模式为区域气候模式提供模拟所需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。FvGCM 的大气部分的水平分辨率大约为 1°×1.25°(经度×纬度),层数也为 18。

文中共设计了两组试验,第 1 组是控制试验,模式中的 CO₂ 值取为现代值,模拟时段为 1961 年 1 月 1 日—1990 年 12 月 31 日;第 2 组是在 IPCC SRES A2 温室气体排放情景下的未来预测试验,模式中 CO₂ 取 A2 排放情景中设定的值,模拟时段为 2071 年 1 月 1 日—2100 年 12 月 31 日,试验的积分时间均为 30 a。SRES A2 是一个高排放情景,至

2100 年 CO₂ 的含量达到 850×10⁻⁶ (工业革命前为约 280×10⁻⁶, 2006 年为 379×10⁻⁶)。文中以模式控制试验与未来预测试验结果之差, 作为 SRES A2 排放情景下的未来中国东部地区的气候变化。

3.2 RegCM3 模拟能力验证

将模式控制试验阶段的模拟结果与实测资料进行对比, 来考察模式对兰江流域的模拟能力。基于兰江流域绝大部分位于浙江省, 故先分析模式对浙江省的模拟情况。由于区域气候模式具有 20 km 的高水平分辨率, 所以能够较细致地刻画海岸带和地形分布(图 2)。气温随高程的变化而降低, 大致每升高 100 m 气温下降 0.5 °C。多年平均年降水量为 1200—2200 mm。总的分布趋势自西南向东北递减, 但地形影响极为显著, 山区降水大于丘陵区, 丘陵区大于滨海平原区。

浙江省实测的多年平均气温分布(图 3)基本呈南高北低, 但也有明显的地形特征, 在海拔较高的浙南、浙西北和受海洋影响的浙东沿海地区分别有 3 个低值中心, 而中部丘陵地区则是同纬度气温比较高的地区。RegCM3 模拟的多年平均气温的分布与实况比较吻合, 较好地再现了浙江省气温分布特征, 还模拟出浙南山区和浙西北山区的两个气温低值中心。不足之处, 一是年平均气温的模拟值比实况低 1—3 °C, 这说明模式本身还存在冷偏差, 但也可能与浙江省大部分气象站位于海拔较低的地区, 实测

气温不能反映山区的气温分布特征有关; 二是没有模拟出浙东沿海的低值中心, 说明模式对海气耦合的模拟能力还有欠缺。

浙江省上空的水汽来源主要有两支, 一支为西南暖湿气流的输送, 在遇到海拔较高的山地时, 便在迎风坡形成丰沛的降水, 如浙江西北部和浙江南部的降水高值区, 此外浙江西部与江西交界的地区正好处于水汽输送通道, 降水也较多; 另一支是台风从海洋带来的水汽, 在浙东沿海形成一个降水高值区。从 RegCM3 模拟的多年平均的降水量与实况(图 4)

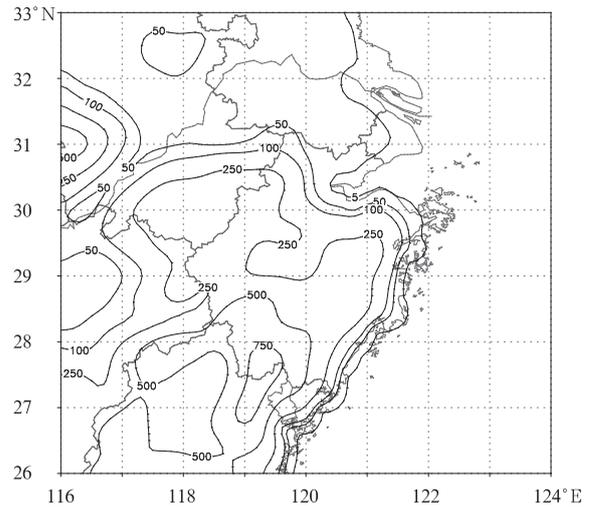


图 2 模式地形分布 (单位: m)

Fig. 2 Distribution of model topography (unit: m)

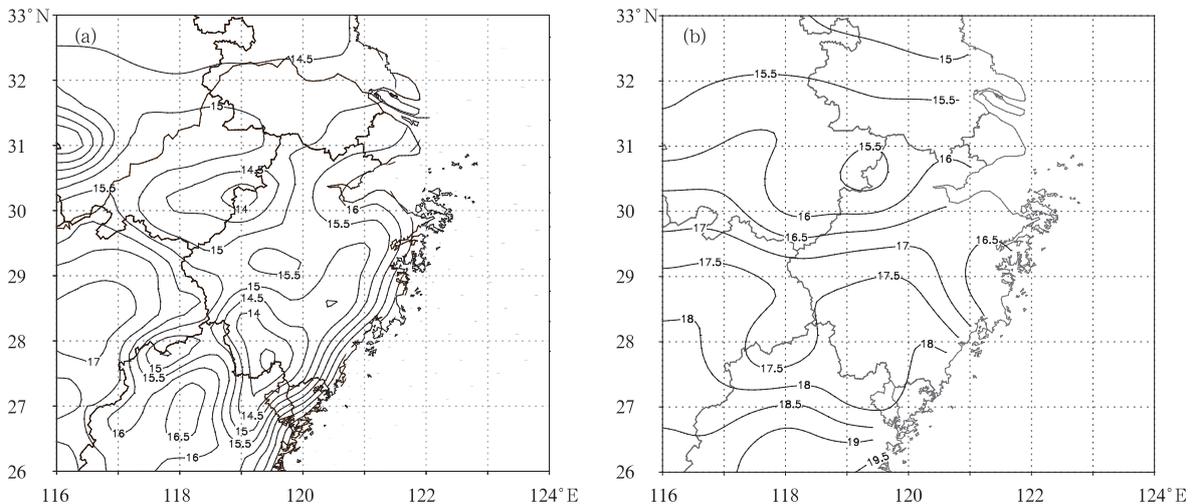


图 3 浙江省年平均气温

(a. 区域模式的模拟, b. 实况; 单位: °C)

Fig. 3 Annual mean surface air temperature over Zhejiang province

(a. RegCM3-simulations, b. observations; unit: °C)

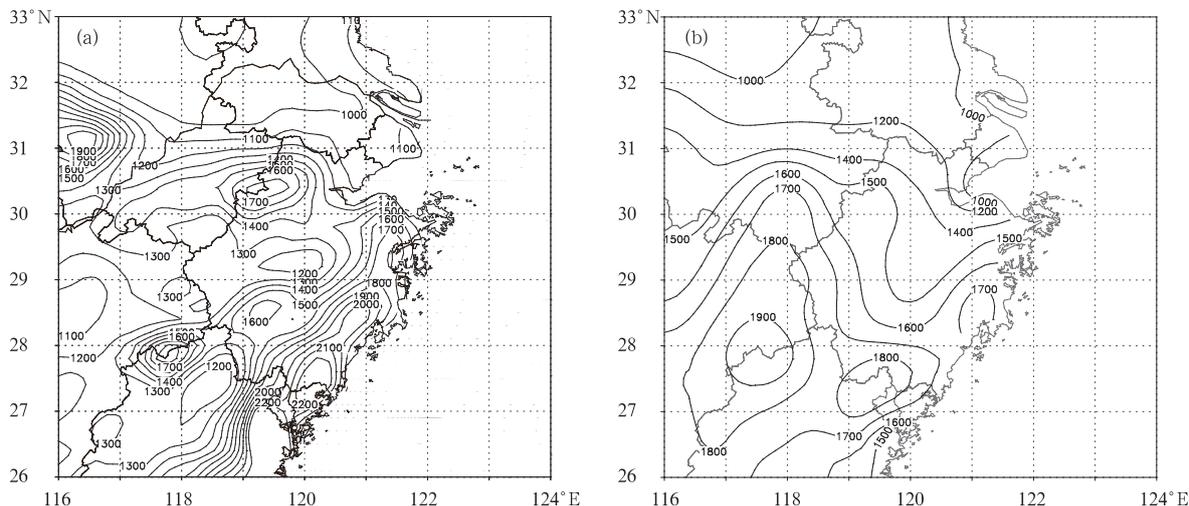


图4 中国东部地区年平均降水量

(a. 区域模式的模拟, b. 实况; 单位: mm)

Fig. 4 Annual mean precipitation over Zhejiang province

(a. RegCM3-simulations, b. observations; unit: mm)

的比较可以看出, RegCM3 模拟的降水分布较好地体现了浙江省的地形特征, 与实况分布比较相似, 较成功地模拟出了浙江西北部山区, 浙江南部山区和浙江东部沿海地区的 3 个降水高值区, 对浙江北部和浙江中部降水低值区的模拟也较好, 但浙江西部降水高值区模拟的降水量值明显偏低。区域气候模式模拟能力的不足往往表现在对降水的模拟上, 尤其是对位于季风区的东亚地区, 而浙江省就处于东亚季风区, 所以就总体而言, RegCM3 对浙江省降水有较强的模拟能力。

将 RegCM3 模拟的模式格点上 1961—1990 年的各气候要素(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)插值到兰江流域的 8 个站点上, 与兰江流域内 8 个气象站的观测资料进行对比分析。采用双线性插值方

法, 具体做法是先找到距各站点最近的 4 个格点, 取它们距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。

RegCM3 模拟的兰江流域 8 个站点的 30 a 平均的月平均气温与实况(图 5a)相比, 模拟的气温年内变化趋势与实况比较接近, 尤其是 1—6 月的月平均气温的模拟几乎与实况一致, 但 7—12 月月平均气温的模拟值均比实况偏低 2—3 °C, 如上所述存在冷偏差。兰江流域 8 个气象站 30 a 平均各月降水量的模拟值与多年平均的观测值(图 5b)相比, 春、冬两季模拟效果较好, 夏、秋两季的模拟值明显偏低, 尤其是 5、6 两个月的模拟效果较差, 这与区域气候模式把握副热带高压系统进退的能力较弱有关, 也是目前所有区域气候模式在东亚季风区模拟中普遍存在的问题, 属于区域气候模式的系统误差。

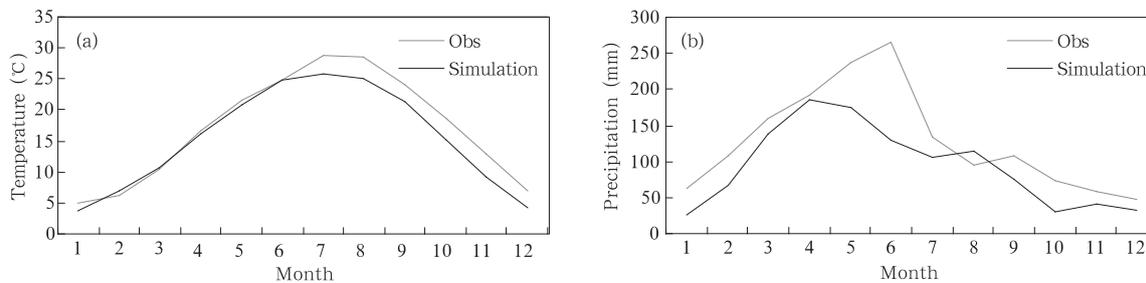


图5 兰江流域 1961—1990 年月平均气温(a)和降水量(b)

Fig. 5 Monthly average (a) temperature and (b) precipitation in the Lanjiang catchment over 1961—1990

4 DHSVM 模型

4.1 模型简介

水文模型 DHSVM 基于流域数字高程模型 DEM 对蒸散发、雪盖、土壤水和径流等水文过程进行动态描述。它以 DEM 的节点为中心, 流域被分成若干计算网格单元。流域的每个网格都被赋予了各自的土壤特性和植被特性。在整个流域上, 这些特性随空间位置的不同而变化。在每一计算时段内, 模型对流域内各网格的能量平衡方程和质量平衡方程提供联立解。各网格之间则通过坡面流和壤中流的汇流演算建立水文联系。地形特性用于模拟流域地形对短波辐射吸收、降雨、气温和坡面流的作用。

DHSVM 已由最初的 5 个模块发展为 7 个模块, 分别为: 蒸散发、地面降雪和融雪、冠层截雪和积雪融化、非饱和土壤水运动、饱和壤中流、饱和坡面流和河道流量演算, 各模块将流域水量和能量平衡联立起来。DHSVM 模型采用 GIS ARC/INFO 软件自动建模, GIS 用于获取模型中 DEM 网格的输入参数, 包括土地利用图、植被、土壤、河道等。ARC/INFO 软件将河网细分成若干段, 计算各段的局部坡度和水流流向, 给河道排定正确的水流路径。

4.2 模型输入

本研究用 DHSVM 的逐网格法计算流域产流, 在兰江流域的模拟网格距取为 $500\text{ m} \times 500\text{ m}$, 模型输入 3 类数据: (1) 地形数据, 由高分辨率的流域数字高程模型 DEM 生成流域河网及地形参数; (2) 土壤类型、植被类型以及土地利用类型数据, 模型地形和植被、土壤资料均处理成 $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ 分辨率

的资料格式; (3) 气象数据, DHSVM 模型既可输入气候观测资料驱动, 也可用区域气候模式模拟结果驱动。对于前一种情况, 模式发展了一套内插方案, 可将气象台站观测资料内插到水文模型的网格点, 获得流域各个网格点上的气温、降水、风速、相对湿度和辐射等各种要素资料。对于后一种情况, 模式也设计了一套插值方案, 即把区域气候模式输出的格点资料按照不同地形高度转换成水文模型网格点上的资料。本研究输入的气候资料集为: 兰江流域 8 个气象站(兰溪、金华、义乌、永康、东阳、开化、衢州和江山) 1978—1999 年日资料基础上生成每日 3 h 的气象数据, 站点资料再根据流域 DEM 插值到模型网格上。

4.3 兰江流域模型参数的确定

模型选 1978—1988 年确定模型参数, 1989—1999 年进行模型验证。分别对模型校正期(1978—1988 年)和验证期(1989—1999 年)的月均径流量的实测值和模拟值进行对比验证(图 6)。模拟结果表明, 通过调整模型参数, 模型较准确地模拟出了校正期和验证期的径流量。模型在 1978—1988 年校正期模拟的月平均流量除 1978 年谷值比实测略高和 1988 年峰值比实测略低外, 其他年份模拟的结果与实况基本一致, 月平均流量模拟效率系数 R_2 为 0.88, E_r 为 -0.046; 模型在 1990—2000 年验证期模拟的月平均流量与实测吻合程度也较好, 只在个别丰水年模拟的峰值比实测偏低, 月平均流量模拟效率系数 R_2 达到 0.87, E_r 为 -0.077。

兰江流域兰溪水文站 1978—1999 年 22 年的年平均流量对比验证结果显示, 模拟值与实测值符合的也较好, 除了少数年份, 如 1993—1995 年模拟值

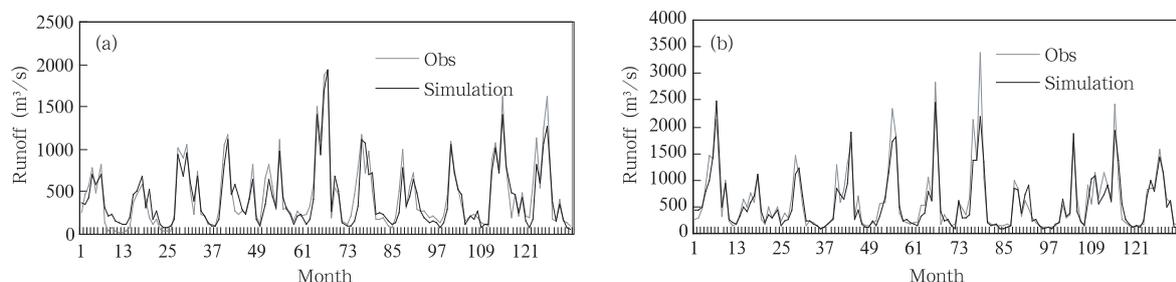


图 6 兰溪水文站月径流模拟率定和验证

(a. 模式率定期(1978—1988), b. 模式验证期(1989—1999))

Fig. 6 Calibration (a) and validation (b) of the monthly runoff of Lanxi hydrologic station

(a. Calibration phase from 1978 to 1988, b. Validation phase from 1989 to 1999)

比实测偏低,其他年份模拟结果均在可接受范围内。兰溪水文站 22 a 的年平均流量实测值为 $529.25 \text{ m}^3/\text{s}$,模拟值为 $494.68 \text{ m}^3/\text{s}$,模拟值比实测值低 6.5%。

从以上的分析看,模型对兰江流域的径流模拟与实测一致性较好,说明 DHSVM 在湿润地区有一定的适用性,基本能再现兰江流域的月径流过程,可以用于兰江流域的水文模拟。

5 兰江流域未来气候变化及水文响应

由于文中以模式控制试验与未来预测试验结果之差,作为 SRES A2 排放情景下的未来兰江流域的气候变化,模式的系统误差已被消除,因此没有再对模拟结果进行修正。分别将 RegCM3 控制试验与未来预测试验结果输入 DHSVM,驱动模型对兰江流域进行水文模拟。

对模式两次试验的结果之差的统计分析见表 1。若 CO_2 浓度按照 A2 情景增加,RegCM3 预测的兰江流域 2071—2100 年 30 a 平均的年平均气温将上升,年降水量、年蒸散发和年径流深均是增加的,增幅比较明显。4—7 月(为兰江流域汛期)的统计结果与年变化趋势一致,汛期增幅占年增幅分别为,降水量占 69%,径流深占 68%,蒸散发占 34%。可见,未来年降水量和径流增加主要发生在汛期,可能会导致兰江流域汛期洪涝灾害发生频率增加,不利于水资源利用。汛期气温上升幅度低于年平均气温的上升幅度,与汛期降水显著增加是对应的;气温对

蒸散发量起主导作用,汛期气温上升幅度低于年平均,所以汛期蒸散发量增幅相对较少。

表 1 兰江流域 2071—2100 年相对于 1961—1990 年气温、降水量、蒸散发量和径流深的变化

Table 1 Changes of temperature, precipitation, runoff depth and evapotranspiration in the Lanjiang catchment for 2071—2100 relative to 1961—1990

项目	气温 ($^{\circ}\text{C}$)	降水 (mm)	径流深 (mm)	蒸散发 (mm)
30 a 平均	2.84	203.15	136.57	64.73
4—7 月(汛期)	2.63	141.03	92.81	21.90

从模拟的 2071—2100 年 30 a 平均的各要素的年变特征(图 7)可以更清楚的看出,各月的气温都是上升的,上升幅度均在 $2.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,尤其是秋季,升温最为明显;降水量除 3 月、9 月和 11 月的月降水量基本不变外,其他月份的降水量均是增加的,其中 4—7 月(汛期)的降水量增加最为显著;兰江流域径流深变化与降水量变化有对应关系,径流深增幅最大的阶段也是汛期,但比降水量略有滞后,符合径流的产生规律;2071—2100 年 30 a 平均的蒸散发量各月均呈可增加趋势,主要是受气温上升的影响,而模拟的月蒸散发年变化比气温变化复杂,是因为蒸散发不仅与气温升幅有关,也与土壤湿度和近地层风速有关,模拟的 7 和 8 月的蒸散发量增幅最大,可能与这两月径流增加较多,有较充足的可蒸腾水量有关。

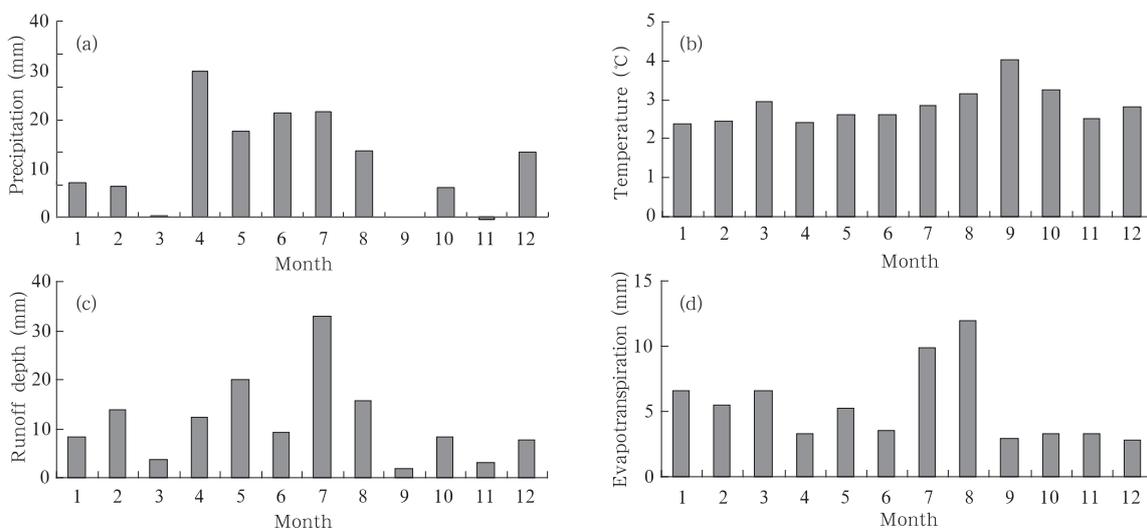


图 7 兰江流域 2071—2100 年相对于 1961—1990 年降水量(a)、气温(b)、径流深(c)和蒸散发量(d)的月变化

Fig. 7 Changes of monthly average precipitation (a), temperature (b), runoff depth (c) and evapotranspiration (d) in the Lanjiang catchment for 2071—2100 relative to 1961—1990

6 结论和讨论

(1) 应用 20 km 高分辨率的区域气候模式 RegCM3, 嵌套全球环流模式 FvGCM 的大气部分, 在中国东部地区进行了两组 30 a 积分的试验, 即控制试验(1961—1990 年)和未来预测试验(2071—2100 年)。控制试验结果表明, 由于具有高水平分辨率, RegCM3 能较细致地刻画浙江省的地形分布, 多年平均气温和降水模拟值均呈现出明显的地形特征, 与实况一致性较好, 但也存在气温系统性偏低和浙西降水量模拟值显著偏低等问题。模式在兰江流域 8 个气象站的降尺度结果表明, 多年平均气温的模拟比较成功, 多年平均降水量模拟值虽然总体趋势与实测值一致, 但夏季(5—7 月)明显偏低。在未来预测试验中, 构建了 SRES A2 排放情景下兰江流域 2071—2100 年的气候变化情景。

(2) 使用兰江流域的历史观测资料驱动分布式水文模型 DHSVM 作水文模拟, 模型在率定期效率系数为 0.88, 在验证期也达到了 0.87, 对兰江流域多年平均径流量的模拟误差为 6.5%。DHSVM 模型较好地再现了兰江流域的历史径流过程, 可以用于未来兰江流域径流的模拟和预测。

(3) 将 RegCM3 的模拟结果输入到分布式水文模型 DHSVM 中, 驱动模型在兰江流域进行水文模拟, 分析气候变化情景下兰江流域水文水资源的变化趋势。模拟结果表明: 在 SRES A2 排放情景下, 兰江流域 2071—2100 年各月的平均气温均是上升的, 年平均气温上升幅度达 2.84 °C; 未来年降水量将增加, 主要发生在 4—7 月的汛期, 将会导致汛期洪涝灾害发生的机率上升; 未来年径流深变化与年降水量变化基本一致, 略有滞后, 汛期径流的明显增加将加大防汛压力, 也不利于对水资源的有效利用; 由于气温对蒸散发起主导作用, 未来各月蒸散发同气温一样, 均有所增加。以上数据说明, 在全球持续变暖的背景下, 兰江流域未来高温、洪涝等气候、水文极端事件将呈增加趋势。

(4) 本文建立了气候-水文嵌套模式, 不仅可用于气候变化情景下流域气候、水文模拟, 而且可用于流域月季年气候、水文预测, 并在此基础上开展水资源评估。该项研究的关键在于气候模式对降水的模拟和预测能力, 因此, 或者是提高区域气候模式对降水的模拟精度, 或者是发展高分辨率全球气候模式,

应是下一步研究重点。

References

- Bryson Bates, Zbigniew W Kundzewicz, Wu Shaohong. 2007. IPCC Technical Paper on Climate Change and Water
- Chen Ming, Fu Congbin. 1997. A nest procedure between global and regional climate model and its application in regional climate change [Report for Postdoctoral] (in Chinese), Beijing: Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences
- Christensen O B, Christensen J H. 2004. Intensification of extreme European summer precipitation in a warmer climate. *Global Planet Change*, 44:107-117
- Gao Xuejie, Zhao Zongci, Giorgi F. 2002. Changes of extreme events in regional climate simulations over East Asia. *Adv Atmos Sci*, 19(5):927-942
- Gao Xuejie, Zhang Dongfeng, Chen Zhongxin. 2007. Simulation of land use effects on climate over China by RegCM3. *Sci China (Series D)* (in Chinese), 37(3):397-404
- Gao X J, Pal J S, Giorgi F. 2006. Projected changes in mean and extreme precipitation over the Mediterranean region from a high resolution double nested RCM simulation. *Geophys Res Lett*, 33:L03706, doi:10.1029/2005GL024954
- Hao Zhenchun, Wang Jiahu, Li Li. 2006. Impact of climate change on runoff in source regional of Yellow river. *J Glaciology Geocryology* (in Chinese), 28(1):1-7
- Kusunoki S, Yoshimura J, Yoshimura H, et al. 2006. Change of Baiu rain band in global warming projection by an atmospheric general circulation model with a 20 km grid size. *J Meteor Soc Japan*, 84: 581-611
- Leung L R, Wigmosta M S. 1999. Potential climate change impacts on mountain watersheds in the Pacific Northwest. *J American Water Res Association*, 5(6):1463-1471
- Leung L R, Qian Y, Bian X, et al. 2004. Mid-century ensemble regional climate change scenarios for the western United States. *Climat Change*, 62:75-113
- Li Daofeng, Tian Ying, Liu Changming. 2004. Distributed hydrological simulation of the source regions of the Yellow river under environmental changes. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 59(4):563-573
- Liu Changming, Li Daofeng, Tian Ying, et al. 2003. An application study of DEM distributed hydrological model on macroscale watershed. *Progress in Geography* (in Chinese), 22(5):437-445
- Mizuta R, Oouchi K, Yoshimura H, et al. 2006. 20 km-mesh global climate simulations using JMA-GSM model: Mean climate states. *J Meteor Soc Japan*, 84:165-185
- Oouchi K, Yoshimura J, Yoshimura H, et al. 2006. Tropical cyclone climatology in a global-warming climate as simulated in a 20 km-mesh global atmospheric model: Frequency and wind intensity analyses. *J Meteor Soc Japan*, 84: 259-276

- Wang Shourong, Huang Ronghui, Ding Yihui, et al. 2002. Improvement of a distributed hydrology model DHSVM and its climate-hydrology off-line simulation experiment. *Acta Meteor Sinica*(in Chinese), 60(3):290-300
- Wang Shourong, Huang Ronghui, Ding Yihui, et al. 2002. Numerical simulation experiments by nesting hydrology model DHSVM with regional climate model RegCM2/China. *Acta Meteor Sinica*(in Chinese), 60(4):421-427
- Wigmosta M S, Vail L W, Lettenmaier D P. 1994. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. *Water Resource Res*, 30(6):1665-1679
- Working Group II Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report. 2007. *Climate Change 2007: Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability. Summary for Policymakers*
- Xia Jun, Wang Gangsheng, Lv Aifeng, et al. 2003. A research on distributed time variant gain modeling. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 58(5):789-796
- Xu Yinlong, Huang Xiaoying, Zhang Yong. 2005. Statistical analyses of climate change scenarios over China in the 21st century. *Adv Climate Change Res* (in Chinese), 1(2):80-83
- Xu Yinlong, Zhang Yong, Lin Yihua. 2006. Analyses on the climate change responses over China under SRES B2 scenario using PRECIS. *Chinese Sci Bull* (in Chinese), 51(17):2068-2074
- Yuan Fei, Xie Zhenghui, Ren Liliang. 2005. Hydrological variation in Haihe Basin due to climate change. *J Hydraulic Engineering* (in Chinese), 36(3):274-279
- Zheng Hongxing, Liu Changming, Wang Zhonggen, et al. 2004. Simulation of hydrological processes in Lushi Basin basing distributed hydrological model. *Geographical Res* (in Chinese), 23(4):447-454
- 陈明,符淙斌. 1997. 区域和全球模式的嵌套技术及其在区域气候和气候变化研究中的应用[博士后研究报告]. 北京: 中国科学院大气物理研究所
- 高学杰,张冬峰,陈仲新. 2007. 中国当代土地利用对区域气候影响的数值模拟. *中国科学(D辑)*,37(3):397-404
- 郝振纯,王加虎,李丽. 2006. 气候变化对黄河源区水资源的影响. *冰川冻土*,28(1):1-7
- 李道峰,田英,刘昌明等. 2004. 黄河河源区变化环境下分布式水文模拟. *地理学报*,59(4):563-573
- 刘昌明,李道峰,田英等. 2003. 基于 DEM 的分布式水文模型在大尺度流域应用研究. *地理科学进展*,22(5):437-445
- 王守荣,黄荣辉,丁一汇等. 2002. 分布式水文-土壤-植被模式的改进及气候水文 Off-line 模拟试验. *气象学报*,60(3):290-300
- 王守荣,黄荣辉,丁一汇等. 2002. 水文模式 DHSVM 与区域气候模式 RegCM2/China 嵌套模拟试验. *气象学报*,60(4):421-427
- 夏军,王纲胜,吕爱锋等. 2003. 分布式时变增益流域水循环模拟. *地理学报*,58(5):789-796
- 许吟隆,黄晓莹,张勇. 2005. 中国 21 世纪气候变化情景的统计分析. *气候变化研究进展*,1(2):80-83
- 许吟隆,张勇,林一骅. 2006. 利用 PRECIS 分析 SRES B2 情景下中国区域的气候变化响应. *科学通报*, 51(17):2068-2074
- 袁飞,谢正辉,任立良. 2005. 气候变化对海河流域水文特性的影响. *水利学报*,36(3):274-279
- 郑红星,刘昌明,王中根等. 2004. 黄河典型流域分布式水文过程模拟. *地理研究*,23(4):447-454

附中文参考文献