

## 气候变化对长江流域汉江和赣江径流的影响\*

陈德亮<sup>1,2</sup> 高歌<sup>1</sup>

(1: 中国气象局国家气候中心气候研究开放实验室, 北京 100081; 2: *Regional Climate Group, Earth Sciences Centre, Gothenburg University, Gothenburg, Sweden*)

**提 要** 近几年来, 国家气候中心已经建立了中国主要四大流域气候对水资源影响评估的模式框架. 本文拟进一步证明其中之一的两参数分布式月水量平衡水文模式对长江之上汉江和赣江两子流域径流的模拟能力, 结果表明该水文模式对目前气候条件下径流模拟效果较好, 运行稳定, 可用于实时业务运行. 在此基础上, 利用 ECHAM4 和 HadCM2 两 GCM (General Circulation Model) 未来气候情景模拟结果及目前实测气候情况, 对汉江和赣江两子流域的径流对未来气候变化的敏感性进行评估. 经检验, 两 GCM 对未来气候, 特别是降水情景模拟存在一定差异, 因此, 造成径流对气候变化的响应不同, 这充分反映了全球模式模拟结果不确定性在气候变化影响研究中的重要性.

**关键词** 气候变化 影响 径流 水文模型 长江 汉江 赣江

**分类号** P467 P333.1

长江是中国第一大江. 因受季风气候的影响, 流域内降水季节分配不均且年际变化较大, 干旱、洪涝灾害时有发生, 致使水资源状况不稳定, 增加了开发利用难度. 长期以来, 由于长江流域覆盖面积广, 人口、经济相对较密集, 气候灾害对沿江及周边地区的工农业生产和人民生活造成了很大的影响.

IPCC 报告中指出, 由于自然不断变化和人类活动的影响, 无论全球和区域气候未来都将有所改变<sup>[1]</sup>. 气候变化必将对该地区的水资源产生一定的影响. 在评估气候变化对水文变量变化影响的研究中, 水文模式起着非常重要的作用<sup>[2]</sup>, 通常由 GCM 来提供不同辐射强迫下的未来气候变化情景模拟结果<sup>[3]</sup>.

本文拟采用两参数分布式月水量平衡水文模型并结合两个全球模式提供的未来气候变化情景, 就未来气候变化对长江中游地区径流的影响进行分析探讨. 通过此研究, 将对该水文模式在长江汉江和赣江子流域的径流模拟能力进行验证, 并在此基础上就径流在未来气候情景下对气候变化的敏感性进行评估.

### 1 研究区域

具体研究区域包括汉水和赣江两个流域. 汉江是长江之上最长的一条支流, 该流域多年平均降水量不足 1000mm, 主要集中于每年的 5-9 月, 这一期间总降水量占全年降水量的 70%,

\*中国科技部“全球环境变化对策与支撑技术研究”项目资助, 部分由中国气象局国家气象气候中心“我国短期气候预测系统加强研究”课题 96-908-06-2-02、“科学主任启动资金”支持.

2003-07-08 收稿; 2003-12-15 收到修改稿. 陈德亮, 男, 1961 年生, 博士, 教授, email: deliang@gvc.gu.se.

暴雨洪涝常常发生,夏季(6-8月)尤为频繁.赣江流域常年降水量较汉江流域偏多,平均年降水量在1500mm左右,其中3-8月的降水量占全年的71%,5-6月降水集中,洪涝多.

## 2 资料、模式及方法

### 2.1 气候及水文站点资料

研究中,采用由国家气象中心气候资料室提供的全国730个气象站点1961-2000年逐月平均气温和降水资料,以及汉江和赣江干流上7个主要水文站点的1963-1988年逐月流量资料(表1).

### 2.2 全球模式模拟结果(目前和未来)

采用ECHAM4(由德国马普研究所研制)<sup>[3]</sup>和HadCM2(由英国Hadly气候预测与研究中心研制)<sup>[4]</sup>两个全球海气耦合模式的月平均气温和降水量的模拟结果来估算研究区域未来气候变化情景.这两个模式试验均包括当前气候(1961-1990年)控制试验期的气候模拟和假定1990-2100年大气中二氧化碳浓度以每年增长1%的排放情景下(类似于IPCC制定的IS92a温室气体排放情景)未来气候的模拟.

基于全球模式输出结果,选取未来两个时段:2021-2050年和2051-2080年,分别计算两流域对应网格点的区域多年平均值作为这两个流域未来气候情景,通过与1961-1990年代表目前的基准气候模拟结果相减,即可获得未来两流域这两个时期气温和降水的变化值,然后与1961-1990年历年实测站点插值格点场相加,可得到未来两时段六十年的气候情景.

### 2.3 GCM控制试验期气候模拟与实测情况对比

为了检验两个全球模式控制试验期(1961-1990年)的气候模拟效果,这里还对其结果与实际观测值进行了比较.

### 2.4 站点气候资料的插值

鉴于水文模式对输入资料形式的需要,站点资料必须插值到网格.文中采用Cressman客观分析方法<sup>[5]</sup>,把站点气候资料插值到分辨率为30km×30km的网格系统上.针对全国730个站点分布状况采用相关函数方法<sup>[6]</sup>分析得到,Cressman方法中最小到最大影响经纬距离分别设为0.5°和2.0°为最佳.

### 2.5 水文模式

近几年来,中国气象局国家气候中心已经建立了中国四大流域气候异常对水资源的影响评估业务服务系统<sup>[7]</sup>.就该研究区域而言,水资源评估系统是以具有30km×30km网格分辨率的两参数月分布式水量平衡模式为核心<sup>[8]</sup>.该模式基于水量平衡原理,并结合考虑了土壤含水量的变化.模式中假定蒸发潜力为气温的函数,实际蒸发量采用O'ldkop公式计算,当蒸发潜力计算实际蒸发量时,引入一换算参数,该参数综合反映了蒸发和降水变化情况.计算月径流量时,假定其与土壤含水量具有双曲正切函数关系,其中涉及模式另外一个重要参数,即流域最大蓄水能力参数.应用等值线插值方法或建立模型两参数与地形地貌、土壤类型和植被分布等地理信息的相关和经验关系,将两参数移植到无资料地区和每一个网格.模式输入主要为网格化的月平均气温和月降水量,输出为在每一个网格点或每一个子流域出口的月径流(或流量)值,子流域出口的流量采用子流域内网格面积加权平均求算.

### 2.6 水文模式对气候变化的敏感性评估

两流域的径流将会随着未来气候的变化而发生变化. 文中在就径流对气候变化的敏感性进行评估时, 假设未来土地利用、地形等条件不发生改变, 也即假设水文模式中的两参数在模拟未来径流变化时基本保持不变, 仅考虑气候条件值的改变. 鉴于全球模式对目前气候模拟的效果, 采用目前的气候观测资料代替全球模式控制试验时期的气候模拟结果代入水文模式模拟当前的径流. 该处理方法从另一方面讲, 也可进一步对所用的水文模型做深入验证. 未来气候估算主要采用目前实测气候资料加上全球模式模拟的未来气候情景与控制试验期的气候差异得到, 此方法已广泛应用于气候变化影响评估中, 可以避免全球模式结果存在的系统误差对径流评估产生较大影响<sup>[2]</sup>.

### 3 分析与结果

#### 3.1 气候资料的网格化

气候资料插值结果将直接影响径流的模拟效果, 非常有必要对 30km×30km 网格插值结果与实测资料进行对比分析, 了解插值方法误差. 这里采用双线性插值方法, 把插值获得的网格结果资料回插到站点进行对比.

从图 1a 中我们看到, 研究流域各气象站点各月 1961-2000 年平均降水量的插值结果与实测值的相关系数非常高, 达 0.99, 且系统偏差可忽略. 月平均气温而言也是如此(图 1b). 月降水量的平均绝对误差有着明显的年内变化: 12 月最小, 为 1.5mm, 7 月份最大, 达 13.2mm(图 2a); 平均相对误差绝对值在 5%-9%之间波动, 冬夏大, 春秋小(图 2b). 月平均气温的平均绝对误差在 1、12 月的 0.3℃到 7、8 月的 0.5℃之间变化. 由上面对比分析可以确定, 文中采用的 Cressman 插值方法插值结果精度高, 适用于水文模式的输入和其它类似应用.

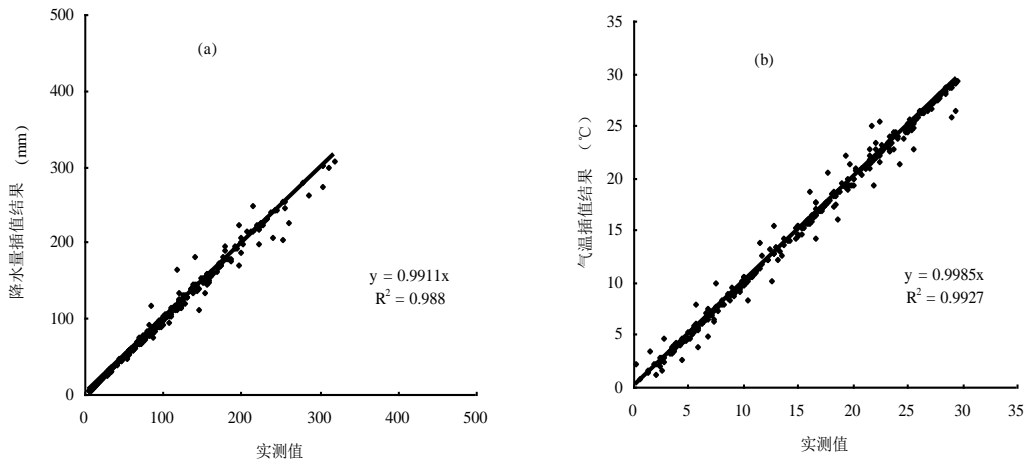


图 1 研究区域所有气象站点各月 1961-2000 年平均月降水量(a) 和月平均气温(b) 插值结果与实测值对比

Fig. 1 The interpolated of monthly precipitation (a) and temperature (b) averaged over 1961-2000 at all stations in the study area in comparison to the observed data

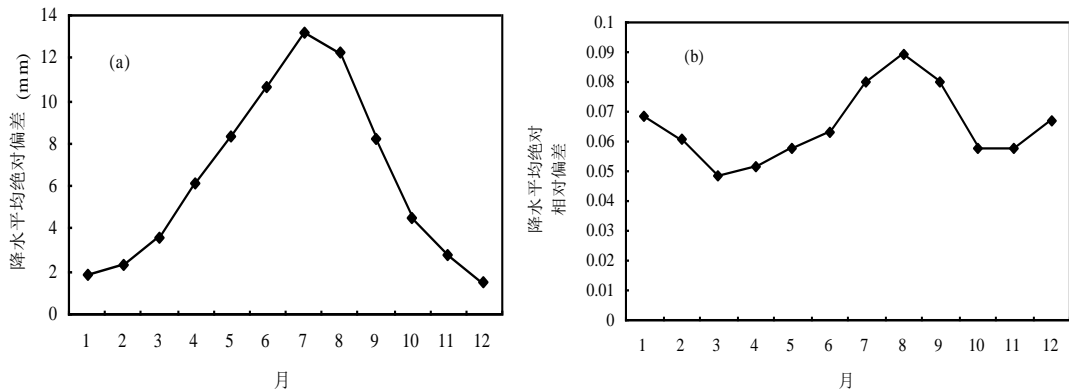


图 2 降水插值平均绝对误差和平均绝对相对误差月变化图

Fig. 2 The monthly variations of mean absolute difference of precipitation (a) and its mean absolute relative difference (b) for interpolation verification

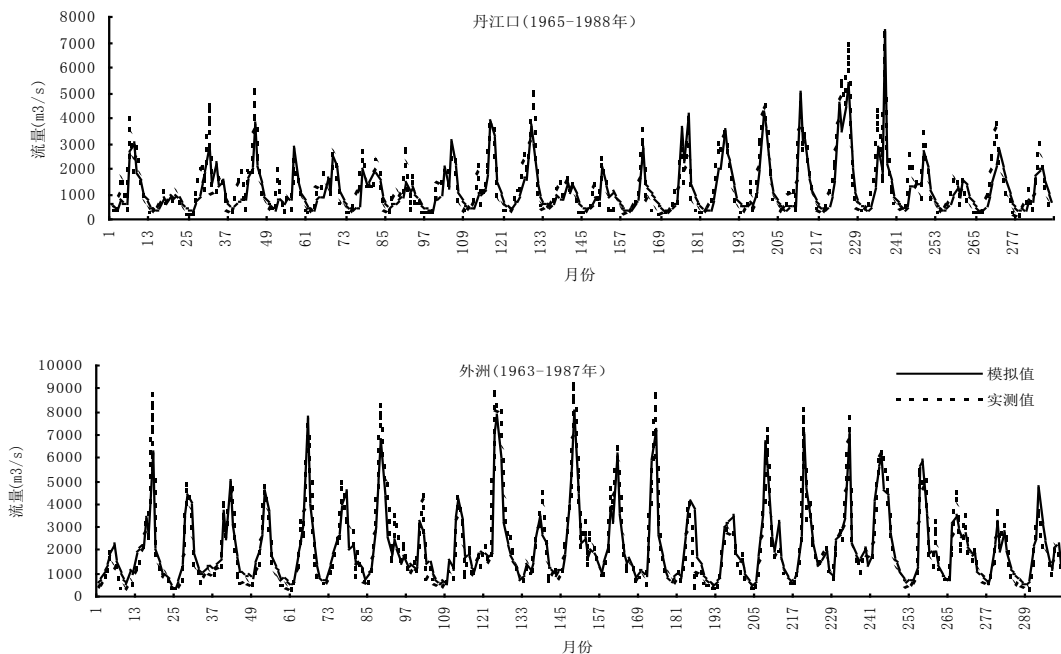


图 3 月流量模拟结果与实测值比较个例

Fig. 3 Examples of monthly stream flow ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) simulations in comparison to observations

### 3.2 水文模式在目前气候情况下的模拟性能

图 3 中给出个别水文站月平均流量模拟与实测值对比的例子, 可以看到月平均流量模式模拟值和实测值匹配较好, 模拟值能够正确地再现实际峰值情况. 各水文站的月 and 年的实测径流量与模拟值的相关系数分别达 0.92 和 0.93.

表 1 给出年和月径流模拟误差统计检验结果: 汉江流域月径流模拟平均误差为负, 表明历年各月径流模拟结果总体上较实测值略偏小, 赣江流域则呈现正的平均误差. 两个流域

月径流的平均绝对误差在 10-20mm 之间, 赣江流域月径流平均绝对相对误差小于 26%, 汉江流域为 40%-50%. 两个流域年径流的平均误差与月径流情况近似, 大部分站点的年径流的平均相对误差仅有 10%, 远远小于月径流. 经检验表明, 该水文模式对当前气候条件下径流的模拟具有相当满意的效果.

表 1 各水文站月和年径流模拟误差检验结果

Tab. 1 Verification of monthly and annual runoff at the hydrological stations

水文站点	汉江流域				赣江流域		
	石泉	白河	丹江口	栋背	吉安	峡江	外洲
月平均误差 (mm)	-5.6	-2.4	-0.5	1.0	3.5	4.0	3.6
月平均绝对误差 (mm)	18.1	11.6	10.2	11.9	13.0	13.9	15.1
月平均绝对相对误差 (%)	50	44	41	20	22	26	26
年平均误差 (mm)	-67.6	-29.1	-5.7	11.8	41.5	48.2	43.5
年平均绝对误差 (mm)	128.3	39.5	29.6	70.5	72.4	82.5	86.1
年平均绝对相对误差 (%)	28	9	7	9	9	11	11

### 3.3 GCM 对目前气候模拟结果检验

表 2 中所示, 汉江和赣江流域, ECHAM4 模式的 1961-1990 年月降水量和月平均气温的多年区域平均值模拟结果与实测值相关关系非常好, 这表明了 ECHAM4 模拟结果能够正确地反映实测降水和气温的季节变化. 由系统偏差参数可见, 汉江流域月降水量模拟为正, 气温为负; 赣江流域情况则相反. HadCM2 气温模拟结果效果较好, 但对降水的季节变化的反映较差, 与实测值相比, 模拟的雨季开始偏早.

由 HadCM2 对气温模拟具有较小的均方根误差可见, HadCM2 对气温的模拟能力好于 ECHAM4, 但如果综合考虑降水和气温的模拟, 很难说出那一种全球模式较好.

表 2 两个全球模式 1961-1990 年月降水量和月平均气温多年平均值模拟结果与实测值比较

Tab.2 The comparison between 30-year averaged (from 1961 to 1990) monthly temperature and precipitation of GCMs and observation in study area

统计参数	汉江流域		赣江流域	
	降水	气温	降水	气温
ECHAM4				
相关系数	0.93	0.99	0.81	0.99
系统偏差 (模拟值-观测值)	21mm	-3.1°C	-42mm	0.8°C
绝对/相对均方根误差	32mm/0.41	3.1°C	58mm/0.45	2.0°C
HadCM2				
相关系数	0.39	0.99	0.61	0.99
系统偏差 (模拟值-观测值)	40mm	-2.0°C	13mm	0.8°C
绝对 / 相对均方根误差	62mm/0.80	2.8°C	62mm/0.48	1.6°C

### 3.4 两流域未来区域气候变化情景

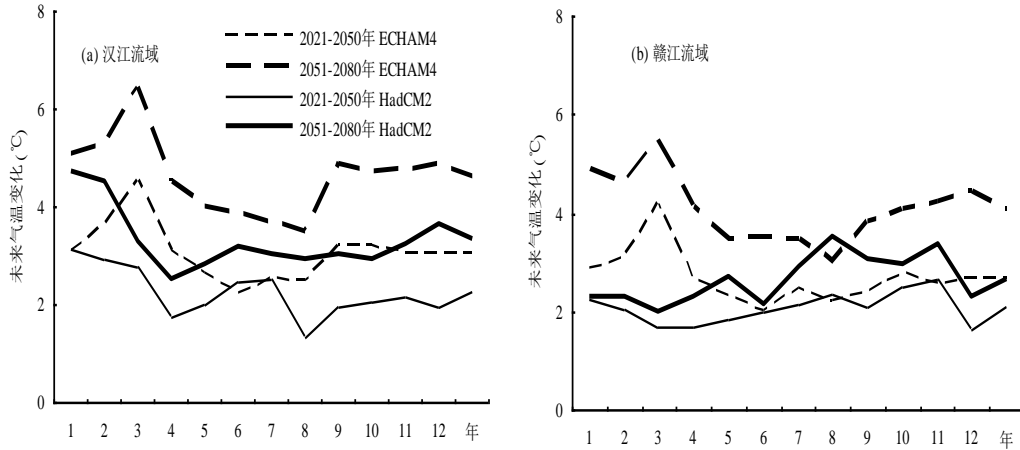


图 4 基于 ECHAM4 和 HadCM2 结果创建的汉江流域 (a) 和赣江流域 (b) 2021-2050 年和 2051-2080 年两时期月和年平均气温变化 (以 1961-1990 年时期为参考)

Fig.4 Changes of monthly and annual mean temperatures during 2021-2050 and 2051-2080 in Hanjiang (a) and Ganjiang (b) basins (the reference period is 1961-1990). The scenarios were constructed from ECHAM4 and HadCM2

**3.4.1 气温** ECHAM4 和 HadCM2 模拟结果均表明汉江和赣江流域未来 2021-2050 年和 2051-2080 年气候会越来越暖 (图 4)。以 1961-1990 年为参考, 2021-2050 年的平均月和年平均气温增量小于 2051-2080 年。大多数月份, ECHAM4 月平均气温增量大于同期 HadCM2 模拟结果。ECHAM4 的 2021-2050 年年平均气温增量模拟值在汉江和赣江流域较 HadCM2 结果分别偏高  $0.8^{\circ}\text{C}$  和  $0.6^{\circ}\text{C}$ 。2051-2080 年的两模式年平均气温的差异在汉江和赣江流域分别达到  $1.3^{\circ}\text{C}$  和  $1.5^{\circ}\text{C}$ 。

**3.4.2 降水量** 在未来两个时期, 两流域年平均降水均呈现增加趋势, 增量在  $0.13\text{--}0.7\text{mm/d}$  之间变化 (见图 5), 尤其是赣江流域在 2051-2080 年, HadCM2 的降水增量最大达  $0.7\text{mm/d}$ 。

汉江流域未来两时期, ECHAM4 的月平均降水在大多数月份多于目前 1961-1990 年参考时期的降水, 并呈现三个高峰期: 4 月、7 月和 10 月, 而冬季各月份降水略少于目前。与汉江流域一样, 赣江流域多数月份也较目前降水偏多且具有明显的月变化, 降水增量分别在 9 月、7 月和 4 月达到峰值, 3 月和 5-6 月降水较目前减少明显。

HadCM2 结果在两流域有着完全不同的月变化。在 2021-2050 期间, 汉江流域降水将在 5-7 月趋于减少, 7 月达最低值, 其它月份降水呈增加趋势, 特别是在 11、10、4 和 2 月增加明显; 赣江流域除 3 月和 7-8 月较当前有明显减少外, 其余各月降水将有增加趋势, 尤其是 4-5 月增加最多。2051-2080 年期间, 降水改变的年内变化幅度较 2021-2050 年大, 汉江流域月平均降水将在 6-7 月、1 月和 12 月减少, 其它月将会增加; 赣江流域只有在 6-9 月期间将出现减少。

由上述分析可见, ECHAM4 和 HadCM2 在大气二氧化碳浓度以每年增长 1% 的温室气体排放情景下的结果一致表明未来两个时期汉江和赣江流域的气候总体上趋于暖湿. 但是针对具体区域、月份及变化趋势和幅度来讲, 两模式结果又有很大不同. 这些区别可能部分地产生于各全球模式不同的性能, 同时也说明了它是气候变化情景存在不确定性的重要来源之一.

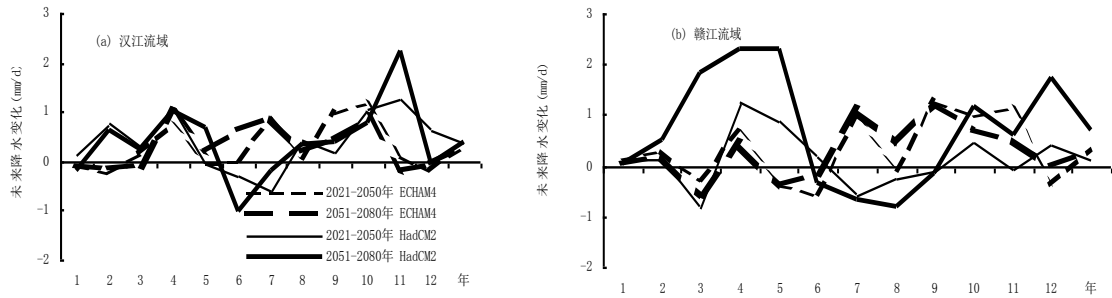


图 5 汉江流域 (a) 和赣江流域 (b) 2021-2050 年和 2051-2080 年两时期月 and 年平均降水量变化  
(参考期及情景来源同图 4)

Fig. 5 Changes of monthly and annual mean precipitation during 2021-2050 and 2051-2080 in Hanjiang (a) and Ganjiang(b) basins. The reference period and the scenarios are same as Figure 4

### 3.5 径流对气候变化情景的响应

3.5.1 年径流 与目前径流状况相比 (图 6), 未来两时期内, 汉江流域年径流将趋于增加, 在由 ECHAM4 结果计算的将来气候情景下, 年径流在 2021-2050 年期间将增加 10%, 2051-2080 年期间增加 2%. 采用 HadCM2 结果估算的将来气候情景下, 年径流在将来两时期内将逐渐增加, 2051-2080 年增长大约为 15%.

赣江流域, 在 ECHAM4 结果计算的将来两时期的气候情景下, 年径流将逐渐减少, 2051-2080 年平均年径流将减少 10%. HadCM2 结果估算的将来气候情景下, 年径流在将来的第一个时期将减少 2%, 但是在第二个时期将会陡增, 达 17%.

3.5.2 月径流 汉江流域 (图 6a), 在 ECHAM4 情景下, 2021-2050 年月径流较目前相比在多数月份将趋于增加, 尤其在秋季和 4 月增加显著, 汛期期间 (6-8 月), 月径流将在 7 月增加, 6、8 月出现减少; 2051-2080 年 4-7 月和 10 月月径流有不同程度的增加, 冬季各月及 3 月, 由于气温显著偏暖, 蒸发大, 导致月径流将会减少. HadCM2 情景下, 2021-2050 年时期月径流 7-9 月将会出现减少, 其它月份将会出现不同程度的增加; 2051-2080 年, 月径流在汛期将会减少.

赣江流域 (图 6b), 在 ECHAM4 情景下, 2021-2050 年月径流在春夏季趋于减少, 冬秋季增加; 2051-2080 年期间, 月径流除秋季各月增加外, 其余月份将减少, 多雨季节 (5-6 月), 将来径流将减少. HadCM2 情景下, 月径流变化趋势有所不同, 2021-2050 年时期, 除 4-5 月月径流出现增加外, 大部分月份将少于目前时期; 2051-2080 年, 月径流在 7-9 月将出现明显减少, 冬春季将会有 20%-50% 增加, 春季洪水暴发的可能性将会增加.

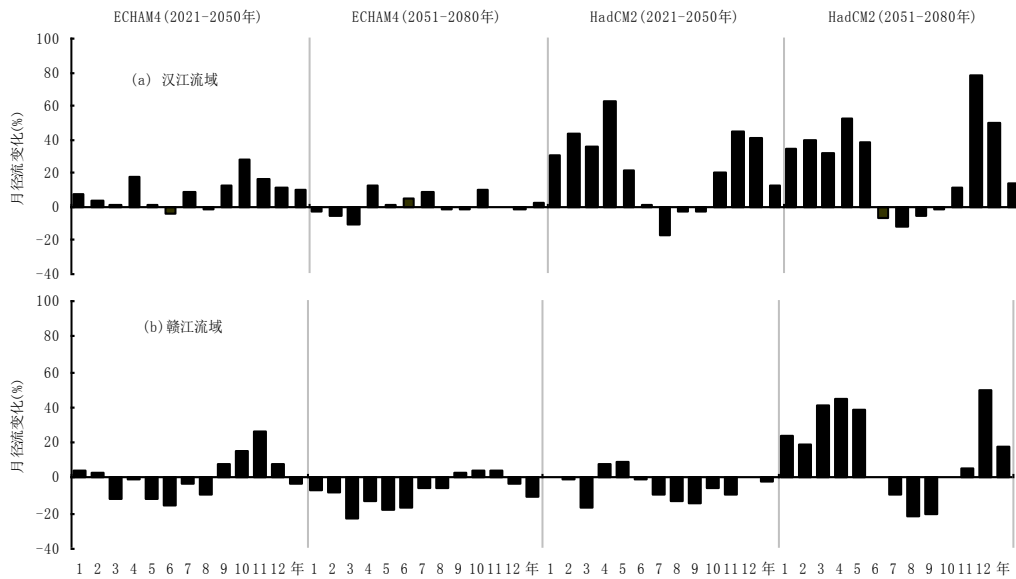


图 6 ECHAM4 和 HadCM2 气候变化情景下, 汉江流域 (a) 和赣江流域 (b) 2021-2050 年和 2051-2080 年平均月 and 年径流量变化百分率直方图

Fig.6 Percentage change of monthly runoff under climate change scenarios of ECHAM4 and HadCM2 during 2021-2050 and 2051-2080 in Hanjiang and Ganjiang basins

## 4 结论

(1) 研究区域1961-2000年月平均气温和降水的30×30公里的网格化资料精度高, 可以用来作为分布式水文模式的输入值以及其它方面的应用.

(2) 通过对1963-1988年研究区域水文模式模拟结果与实测值的验证表明, 两参数分布式月水量平衡模式的性能令人满意, 该系统可以用来进行气候敏感性研究和实时业务运行.

(3) 在未来温室气体浓度以1%增长的排放情景下, 研究区域气候将趋于暖湿. 然而, 当考虑不同的全球模式、区域和月份时, 结果又有很大的不同, 这充分反映了全球模式模拟结果的不确定性.

(4) 汉江和赣江流域, 月径流对基于ECHAM4和HadCM2结果和当前气候计算的未来气候变化情景的响应有所不同, 特别是在雨季. 降水变化是径流产生变化及表现不同变化程度的主要因子, 当然, 气温的影响也需考虑.

(5) 汉江流域径流对气候变化的响应与赣江流域明显不同 (以1961-1990年为参考). 未来两时期汉江流域的年径流将增加, 当在ECHAM4情景下, 2021-2050年的年径流增量大于2051-2080年的增量, HadCM2情景下, 结果相反. 赣江流域, 在ECHAM4情景下, 未来两时期径流将逐渐减小, 但在HadCM2情景下, 2021-2050年时期年径流将减小, 2051-2080年则趋于增加.

致 谢 感谢国家气候中心徐影博士提供的 GCM 资料.



## 参 考 文 献

- 1 IPCC. The Scientific Basis - Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of IPCC. In : Climate Change 2001. Port Chester: Cambridge University Press, 2001: 944
- 2 Bergström S, Carlsson B, Gardelin M, *et al.* Climate change impacts on runoff in Sweden-assessments by global climate models, dynamical downscaling and hydrological modeling. *Climate Research*, 2001, 16: 101-112
- 3 Roeckner E, Bengtsson L, Feichter J, *et al.* Transient climate change simulations with a coupled atmosphere-ocean GCM including the tropospheric sulfur cycle. *Journal of Climate*, 1999,12: 3004-3032
- 4 Mitchell J F B, Johns T C. On modification of global warming by sulphate aerosols. *Journal of Climate*,1997,10(2):245-267
- 5 Geroge P Cressman. An operational Objective Analysis System. *Monthly Weather Review*, 1959,87(10): 367-374
- 6 Belousov S L, Gandin L S, Mashovich S A. Computer processing of meteorological mata. Israel Program for Scientific Translations, 1971: 210
- 7 张建云. 气候异常对水资源影响评估分析模型. 见: 气候异常对国民经济影响评估业务系统的研究. 北京: 气象出版社, 2001:91-98
- 8 郭生练, 杨井, 王金星. 汉江和赣江流域水资源模拟预测研究. 水科学进展, 2000, (5): 46-50

# Impact of Climate change on the Runoffs from Hanjiang River and Ganjiang River in the Yangtze River Basin

CHEN Deliang<sup>1,2</sup> & GAO Ge<sup>1</sup>

*(1: National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, P.R.China;*

*2: Regional Climate Group, Earth Sciences Centre, Gothenburg University Gothenburg, Sweden)*

## Abstract

During the last few years, a modeling framework on the assessment of climatic impact on water resources for four main basins in China has been established at National Climate Center (NCC) of China. This work aims at demonstrating the capability of one of the hydrological models in simulating observed river flow and in assessing the sensitivity of the runoff to climate changes in two sub-basins of the Yangtze River. The study area includes Hanjiang River and Ganjiang River sub-basins. A distributed water balance model was used to simulate monthly water balance under present day and future climate scenarios. First, a control simulation for the period 1961-2000 using the observed climatic input was performed. A method to grid the station data into a 30 km × 30 km grid system is described and tested, which provides the input to the hydrological model. A comparison between the simulated and measured runoff demonstrates capability of the model. A baseline period from 1961-1990 is chosen to represent the current climate. The potential impacts of future climate change are simulated by perturbing the observed driving climate variables (rainfall and temperature) during the baseline period and re-running the model for another two 30-year periods (2021-2050 and 2051-2080) with climate change scenarios estimated by General Circulation Model (GCM). The scenarios were constructed from the output of ECHAM4 and HadCM2 experiments. The experiments assume a 1% per year increase in atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations from 1990 to 2100. Monthly differences between 2021-2050 and 1961-1990, as well as between 2051-2080 and 1961-1990 were used to force the hydrological model. The results for the two sub-basins were analysed, focusing on the changed runoff. While temperature changes are essentially consistent between the two GCMs, precipitation change shows a relatively large difference, which causes different response of runoff. This underlines the importance of uncertainties associated with GCM.

**Keywords:** Climate change, impact, runoff, hydrological model, Yangtze River