

## 气候变化对沅江流域径流影响研究\*

陈 喜<sup>1</sup> 苏布达<sup>2,3</sup> 姜 彤<sup>2</sup> 施雅风<sup>2</sup>

(1: 河海大学水资源环境学院, 南京 210098;

2: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; 3: 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**提 要** 温室气体排放量增加造成气候变化, 对全球资源环境产生重要影响. 本文在水量平衡基础上, 建立考虑气象要素和地形变化的月水文模型, 利用实测径流资料对模型在时空尺度上进行验证. 利用全球气候模型 (GCMs) 预测的未来气候变化情形, 对处于湿润区的沅江流域径流过程进行预测. 分析结果表明, 该区域径流过程对降雨和气温变化十分敏感. 根据英国 Hadcm2 模型对本世纪中叶气候变化预测结果, 沅江流域未来年降雨量减少 0.43% 气温升高 1.55°C, 丰水期降雨增加, 而枯水期将有较大幅度减少. 年径流量相应减少 6.8%, 丰水期径流量增大 11%, 枯水期径流减少 47%, 不利于防洪和水资源开发利用.

**关键词** 气候变化 全球气候模型 月水文模型 径流 沅江流域

**分类号** P467 P333.1

近年来, 温室气体排放量增加引起的全球环境问题, 如气温升高、降雨时空特征的改变等已成为各国政府、社会公众和科学界普遍关注的问题. 预测 CO<sub>2</sub> 和其它温室气体排放量的增加对全球气候的影响主要基于全球气候模式 (GCMs). 这些模式预测结果表明, 本世纪全球气温将会上升 1.4-5°C, 且降雨时空分布也会有较大改变, 这也意味着区域水平衡、河川径流和水资源将发生变化<sup>[1]</sup>. 因此, 评估气候变化对防洪、区域水资源和水环境的影响, 对未来水资源的评价、规划、开发利用和管理等具有重要意义.

未来全球气候变化预测结果还存在很多不确定性因素, 政府间气候变化组织 (IPCC) 对气候变化预测结果的评价为: 气温升高预测结果较为可靠, 而降雨预测结果还存在很大不确定性. 目前, 气候变化对水文水资源影响研究主要采用两种模式, 一种是假设气温和降雨变化情形, 另一种是根据 GCMs 预测出未来气象因素 (如气温、湿度和风速等), 用作为水文模式的输入, 模拟出气候变化情形下流域径流过程. 全球气候模式空间尺度较大, 如英国 HADCM2 模式空间尺度为 2.5×3.75°C, 而传统水文模型研究的流域尺度在 1-104km<sup>2</sup>, 气候模型尺度与流域尺度不匹配, 因此在进行气候变化影响评价时, 需把 GCMs 大尺度空间预测的未来气候变化资料系列解集到流域空间上, 得出流域尺度上未来气候时空变化过程 [2]. 在时间尺度上, 尽管 GCMs 可以预测出月以下更小尺度气候变化过程, 但较小时间尺度预测结果可靠性很差, IPCC 也只公布出月尺度气候变化因子, 因此, 通常在月尺度上或根

\*中国科学院知识创新工程重要方向项目 (长江中下游洪水孕灾环境变化、致灾机理与减灾对策, KZCX3-SW-331) 和国家自然科学基金项目 (历史时期长江中下游平原早涝序列时空格局与风险评价, 40271112) 联合资助.  
2003-07-08 收稿; 2003-12-05 收修改稿. 陈喜, 男, 1964 年生, 教授, email: xc2000@hotmail.com.

据月尺度 GCMs 预测结果在更小尺度上进行解集,以分析模拟全球气候变化对水文水资源的影响。

本文建立具有分布式特征的月水文模型,利用沅江流域水文、气象、地形等资料,对模型进行时空尺度上的验证.分析了流域径流对降雨、气温变化的敏感程度.利用英国气候预测研究中心的全球气候模型(HADCM2)预测结果作为该水文模型的输入,模拟未来气候变化对沅江流域径流的影响。

## 1 研究区水文气象特征及未来气候变化情景分析

沅江源于贵州省都匀市云雾山,干流全长 1033km.本研究选择沅陵站以上流域,控制面积 78595km<sup>2</sup>,多年平均降雨量 1302mm(1971-1985 年),蒸发量 1152mm(Φ20 蒸发皿),河川径流深 695mm.每年 5-7 月为洪水期,3-4 月间及 8-10 月间为中水期,11 月至次年 2 月为枯水期<sup>[3]</sup>.该流域内地形变化大,上游山区海拔高程达 2000m 以上,下游小于 90m.区域降雨分布极不均匀,年降雨空间变化 927-1657mm.因此,地形和降雨空间分布对流域水文过程影响显著。

本次计算采用 1971-1985 年 121 个降雨站月降雨量、5 个气象站蒸发量和月平均气温以及四个水文站径流资料系列进行模型参数率定和验证。

按 IPCC 报告中温室气体排放量标准,本世纪末全球地表气温将升高 1.4-5℃,降雨特征也随之改变<sup>[1]</sup>.由此将对区域水文过程和生态系统产生巨大影响.对于特定区域,未来气候变化主要采用气温升高和降雨变化组合的假设情景(即 WHAT-IF)和全球气候模式(GCMs)预测结果进行解集,各模型预测结果还存在很多不确定性成分<sup>[4]</sup>.表 1 为 IPCC 公布的由 GCMs 预测的沅江流域本世纪中叶气候变化情形.可以看出,五个 GCMs 预测的年气温上升幅度为 1.55-2.73℃,各模式预测的降雨变化幅度较大,无一致性.从各模式模拟的历史气温、降雨与实测资料系列比较来看,英国 Hadcm2 较为接近,因此,本文选择该模式预测结果进行影响评价。

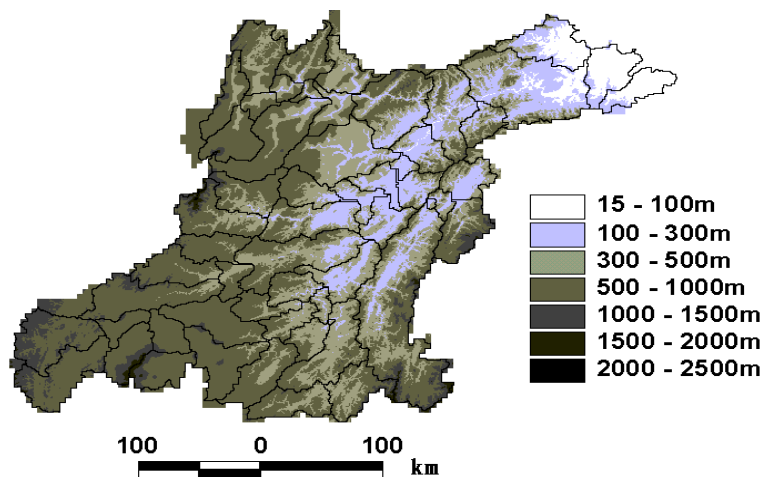


图 1 沅江流域地形及子流域划分

Fig. 1 Topography and sub-basins in Yuanjiang area

表 1 GCMs 预测未来气候变化情景 (2050 年)\*

Tab.1 Future climate change scenarios predicted by GCMs, 2050

月份	降雨变化 (%)					气温升高 (°C)				
	Cgcm1	Csiro	Echam4	Gfdl	Hadcm2	Cgcm1	Csiro	Echam4	Gfdl	Hadcm2
1	-11.3	5.86	-3.46	-9.37	-18.59	5.34	2.2	2.91	2.31	-0.06
2	4.88	-1.95	3.94	5.59	-3.44	5.15	1.9	3.01	3.38	1.55
3	7.67	-19.19	21.68	8.58	17.91	6.89	1.55	2.99	3.26	0.43
4	-22.2	-5.13	11.17	-19.25	1.76	7.67	1.58	2.11	2.75	2.03
5	-35.7	-11.42	20.82	1.94	20.76	4.62	1.95	1.69	2.18	2.03
6	-9.36	17.23	-13.4	3.97	7.48	2.75	1.35	2.7	1.76	0.55
7	-3.65	6.32	1.41	21.92	-13.89	2.47	1.49	2.89	1.8	0.89
8	-32	-5.81	2.1	-26.17	2.4	1.8	1.52	3.44	1.96	1.3
9	-34.7	-1.11	29.04	-16.86	-27.31	1.56	1.29	3.19	3.15	2.14
10	-5.43	-0.15	-5.41	4.07	-24.71	1.15	1.35	1.79	2.59	2.96
11	-50.6	-14.66	1.73	-11.98	-28.75	0.64	2.19	2.13	3.12	3.1
12	-28.9	-0.33	9.09	-2.29	21.76	3.83	3.23	3.77	3.36	1.66
年平均	-19.7	-3.2	7.54	-3.06	-0.43	3.66	1.8	2.72	2.63	1.55

\*Cgcm1: 加拿大气候模拟及分析中心模式; Csiro: 澳大利亚科学与工业研究机构模式; Echam4: 德国气候研究所模式; Gfdl: 美国地球物理流体动力学实验室模式; Hadcm2: 英国 Hadley 气候预测研究中心模式.

## 2 分布式月水文模型

随着全球气候变化对水文水资源影响研究的开展, 推动了水文模型的发展, 与 GCMs 相匹配的水文模型具有两个特点: 分布式和参数化. 陆面地形、土壤和植被等不仅对水文过程产生影响, 而且是气候模型中热量和能量计算的一个重要部分. 与大气过程相比, 陆面的空间变化更为明显, 因此, 需建立能描述陆面空间变化的分布式水文模型. 模型参数化规律是分布式水文模型应用的关键, 也是无实测水文资料地区水文水资源计算需要解决的实际问题.

在沅江流域, 地形和降雨空间变化对降雨径流过程起着主导作用. 本文利用数值地面高程模型 (DEM) 进行流域分区, 利用郭方等提出的不易产流度表示子流域蓄水容量的空间分布<sup>[5]</sup>:

$$f = \frac{\max(\ln(a/\tan\beta)) - \ln(a/\tan\beta)}{\max(\ln(a/\tan\beta)) - \min(\ln(a/\tan\beta))} \quad (1)$$

式中,  $\ln(a/\tan\beta)$  为 Topmodel 中的地形指数. 以 50m 网格精度 DEM 把沅陵站以上控制流域划分为 49 个子流域, 各子流域不易产流度见图 2.

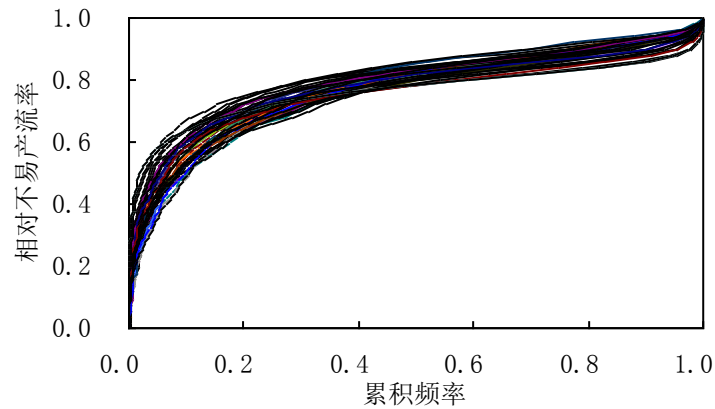


图2 沅陵以上 49 个子流域不易产流度分布图

Fig.2 Distribution of degrees of runoff-generating difficulty in 49 sub-catchments in the upper reaches of the Yuanling station

采用数值法求解土壤含水量和产流量, 设蓄水容量  $WM'$  在流域上变化范围为  $0-WMM'$ , 如分为  $N$  个间隔, 第  $i$  间隔  $WM'$  则为  $i \times WMM' / N$ , 不易产流度为  $f_i / F$ , 流域平均蓄水容量  $WM$  为:

$$WM = \frac{WMM'}{N} \sum_{i=1}^N (1 - \frac{f_i}{F}) \quad (2)$$

设流域初始土壤含水量为  $W$ , 相应的蓄水容量  $A$  为:

$$A = N_A \frac{WMM'}{N} \quad (3)$$

$N_A$  根据下式推求:

$$W = \sum_{i=1}^{N_A} (1 - \frac{f_i}{F}) \frac{WMM'}{N} \quad (4)$$

当净雨量  $(P-E) > 0$ , 则产量, 产流量  $R$  计算为:

当  $(P-E+A) < WMM'$  时:

$$R = \int_A^{P-E+A} \frac{f}{F} dWM' \approx \sum_{N_A}^{N_P} \frac{f_i}{F} \frac{WMM'}{N} \quad (5)$$

以  $P-E+A$  替代方程 (3) 和 (4) 中的  $A$ , 求得  $N_P$ .

当  $(P-E+A) \geq WMM'$  时:

$$R = P - E - (WM - W) \quad (6)$$

进入土壤和饱和含水层的径流调蓄时间长, 本模型采用线性调蓄方程计算流域对月径流的调蓄过程, 调蓄系数为  $\alpha$ .

非饱和带土壤水分计算基于水平衡方程, 土壤蒸散发量计算采用下式<sup>[6]</sup>:

$$E = \eta E_p \left[ 1 - \left( 1 - \frac{W}{WM} \right)^{1/Be} \right] \quad (7)$$

式中,  $\eta$ 为 $\Phi 20$  蒸发皿观测值转换为蒸发能力的转换系数, Ripple<sup>[6]</sup>等人通过率定得出  $Be \approx 0.6$ .

因此,建立的月模型共有三个参数需要率定,即流域平均蓄水容量  $WM$ 、蒸散发转换系数  $\eta$ 、土壤水和地下水调蓄系数  $\alpha$ . 在 49 个子流域上,对降雨进行分区,分别进行产流计算,再经线性调蓄方程演算得到流域出口断面流量. 模型参数率定采用 1971—1978 年实测降雨、蒸发和流量资料,以沅陵站观测流量和模型计算流量的 Nash-Sutcliffe 效率系数 ( $NSC$ ) 最大为目标函数,采用单纯形加速法自动率定. 模型再利用 1979—1985 年沅陵站资料和内部三个子流域(锦平、安江、浦市) 1971—1985 年观测资料进行时间和空间尺度上的验证,此外,模型还计算了平方根误差 ( $RMSE$ ). 模型率定参数为  $WM=133mm$ ,  $\eta=0.55$ ,  $\alpha=0.991$ . 验证结果见表 2,除上游锦平站拟合结果较差外,其它站计算结果与实测系列的验证结果都较好.

表 2 模型率定和验证结果

Tab.2 Model calibration and validation results

站名		沅陵	锦平	安江	浦市	
控制面积(km <sup>2</sup> )		78595	13483	40305	54144	
年径流 (mm)	计算	716*	664	642	620	642
	实测	710*	678	647	620	646
$NSC$		0.91*	0.87	0.75	0.89	0.89
$RMSE(mm)$		16.2*	17	22.8	15.7	15.8

\*为模型率定结果;  $NSC$  为 Nash-Sutcliffe 系数;  $RMSE$  为平方根误差

### 3 未来气候变化对沅江流域径流过程影响分析

根据未来气候变化情形,应用水文模型分析沅江流域径流过程的变化,需要解决下列两个问题:一是未来气候变化资料系列,包括降雨、气温等时空分布,另一是气候变化对流域蒸散发影响.因此,需要把大尺度上 GCMs 预测结果解集到流域站点尺度上,并建立气象要素与蒸散发关系.本文利用表 1 中 Hadcm2 预测的未来降雨和气温资料,假设未来降雨和气温时空变化与现状(1971-1985 年)变化相同,即按比例进行系列放大和缩小,进行降雨系列空间解集.以月平均气温和蒸发皿实测蒸发量建立统计关系,以便分析气温变化对流域径流的影响.

为了了解气候因子变化对流域径流的影响,本文首先进行敏感度分析(见图 3).当降雨增加或减少 5%,径流量相应地增加或减少约 8.6%;气温升高 1℃,径流量减少约 4.5%.因此,降雨和气温对该区域径流影响显著.

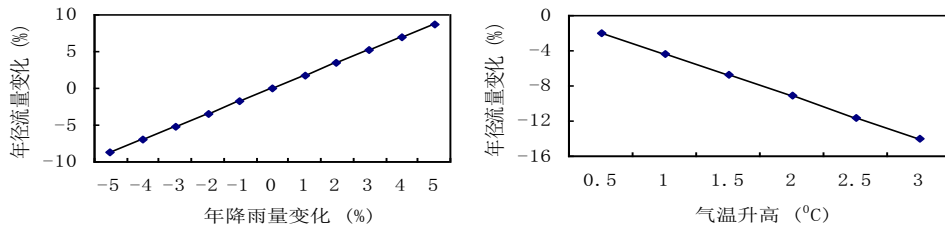


图3 降雨和气温变化对流域径流影响的灵敏度分析

Fig.3 Sensitivity analysis of precipitation and air-temperature related to runoff

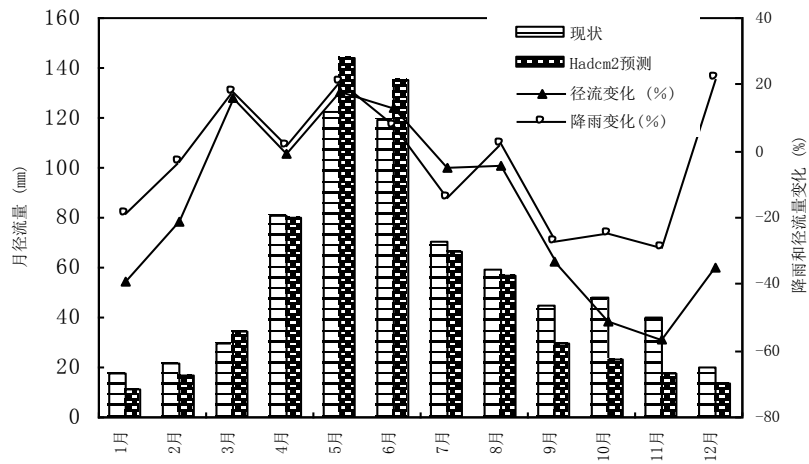


图4 气候变化对月平均径流影响预测结果

Fig.4 Predicting results of influence of climate change on monthly mean runoff

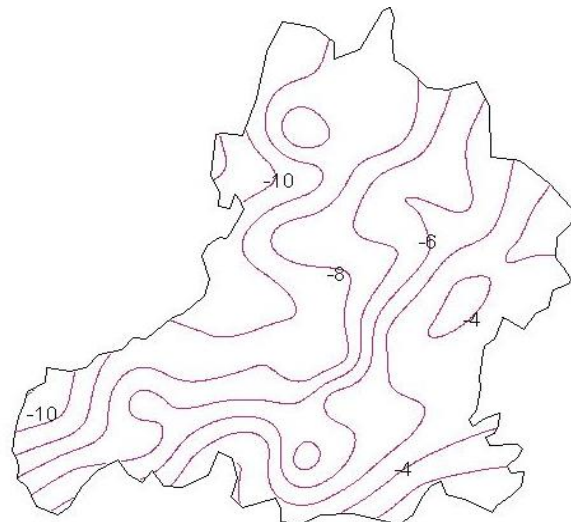


图5 年平均径流量相对变化值的空间分布 (%)

Fig.5 Spatial distribution of relative change of mean annual runoff

模拟结果表明,如未来年降雨量减少 0.43%,气温升高 1.55℃(表 1 中 Hadcm2 预测结果),年径流量将减少 6.8%。图 4 为模拟径流量的年内变化,丰水期的 5-7 月份,径流量增加 11%,枯水期 11、12、1 月份径流将大幅减少 47%。图 4 还可以看出,丰水期径流量变化与同期降雨量变化相近,而枯水期径流量减少比同期降雨量减少幅度要大得多,因为枯期气温升高所造成的蒸散发量增加影响显著。

此外,该模型还可以模拟出径流的空间变化过程,图 5 表明,未来年径流量东部减少量达 10%,西部仅为 4%。

## 4 结论

本文在月水量平衡基础上,考虑地形空间分布的不均匀性,建立月分布式水文模型,根据 GCMs 预测未来气候变化情形,分析了沅江流域径流量的变化。分析结果表明:该流域对降雨和气温变化非常灵敏,当降雨增加或减少 5%,径流量相应地增加或减少约 8.6%。气温升高 1℃,径流量减少约 4.5%。根据英国 Hadcm2 对本时间中叶气候变化预测结果,未来年降雨量减少 0.43%,气温升高 1.55℃,丰水期降雨增加,而枯水期将有较大幅度减少。模型计算的年径流量将减少 6.8%,同时,丰水期径流量增大 11%,枯水期径流减少 47%,对流域水资源利用、航运和发电造成不利的影

响。当然,由于未来气候变化预测的不确定性和气候与水文模型的尺度匹配等问题,未来气候变化及其影响分析需要在掌握更多信息基础上,多学科综合进一步加以研究。

## 参 考 文 献

- 1 Climate change 2001. Impacts, adaptation, and vulnerability, A Report of Working Group II of the Intergovernmental Panel On Climate Change, 2001
- 2 陈喜,陈永勤.水文过程中的尺度问题.见:刘昌明主编.21 世纪中国水文科学研究的新问题新技术和新方法.北京:科学出版社,2001
- 3 水利部长江水利委员会编著.长江流域水旱灾害.北京:中国水利水电出版社,2002
- 4 江涛,陈永勤,陈俊合等.未来气候变化对我国水文水资源影响的研究.中山大学学报,2000,39(2):12
- 5 郭方,刘新任,任立良.以地形为基础的流域水文模型—TOPOMODEL 及其拓宽应用.水科学进展,2000,11(3):296—301
- 6 Ripple C D, J Rubin, T E A, et al. Estimating steady-state evaporation rates from bare soils under conditions of high water tables, U.S. Geol Surv Water Supply Paper, 1972:2019-A

# Impacts of Climate Change on the Streamflow in the Yuanjiang River Basin

CHEN Xi<sup>1</sup>, SU Buda<sup>2, 3</sup>, JIANG Tong<sup>2</sup> & SHI Yafeng<sup>2</sup>

*(1: College of Water Resources and Environment, Hohai University, Nanjing 210098, P.R.China; 2: Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, P.R.China; 3: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, P.R.China)*

## Abstract

Global warming induced by an increasing concentration of greenhouse gases in the atmosphere would change global and regional climate and take a significant influence on natural resources and environment. On the basis of water balance equation in unsaturated zone and digital elevation model, a monthly hydrological model characterizing heterogeneity of soil moisture content is developed. The model is calibrated and validated using monthly streamflow in the Yuanjiang basin in different spatial and temporal scales. Future possible runoff changes in the Yuanjiang basin is then simulated on the basis of the future climate scenarios predicted by global climate model (GCM). Simulation results demonstrate that annual runoff in the Yuanjinag basin is very sensitive to temperature rises and rainfall changes. From prediction results in the middle of 21th century presented by Hadley Centre for Climate prediction and Research HCCPR,UK (HADCM2), we know that mean annual temperature would increase 1.55°C and precipitation decrease 0.43% in the Yuanjiang basin, and monthly rainfall would increase in flood season but decrease dramatically in drought season. Simulated results indicate that annual runoff would decrease 6.8 percent, and runoff in flood season increase 11% and in drought season decrease 47%, which results are not beneficial for flood defense and water resources utilization in the region.

**Keywords:** Climate change, global climate models (GCMs), runoff, monthly hydrological model