

基于不同气候变化情景的东江流域水资源量预测研究*

邓晓宇¹, 张强^{1,2}, 李剑锋³, 孙鹏¹, 陈晓宏¹

- (1. 中山大学地理科学与规划学院//华南地区水循环与水安全广东省普通高校重点实验室, 广东 广州 510275;
2. 宿州学院地球科学与工程学院, 安徽 宿州 234000;
3. 香港中文大学地理与资源管理系, 香港 沙田)

摘要: 采用半分布式水文模型 HSPF, 结合 1978-1998 年东江流域实测气象数据和 5 个气候模式在 3 种 RCP 气候情景 (RCP8.5, RCP4.5, RCP2.6) 下基准期 (1960-2000 年) 和未来时期 (2020-2070 年) 降水、蒸发情景模拟结果, 在对东江流域径流模拟检验基础上, 对 2020-2070 年东江流域水资源量做了深入分析。结果表明, HSPF 模型能很好模拟东江流域年、月径流以及洪水期径流变化, 博罗站的 NASH 系数均超过 0.81, PBIAS 低于 10%, RSR 低于 0.45; 所选取气候模式能很好的反映研究流域气象数据在年内分布情况。对未来气候和东江流域水资源量模拟结果表明: ① 2020-2070 年不同气候变化情景下东江流域降水及蒸发量在 RCP2.6 和 RCP4.5 情景下均呈上升趋势, 而在 RCP8.5 情景下, 东江流域蒸发量则呈现下降趋势; ② 未来东江流域多年月均径流量呈增加趋势; ③ 未来东江流域不同频率下的洪水和枯水流量均呈不同程度的增长。相对于基准期, 未来时期的洪水天数呈增长趋势, 洪水灾害有加剧态势。

关键词: 气候模式; HSPF 模型; 东江流域; 水文模拟; 径流预测

中图分类号: P339 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2015) 02-0141-09

Forecasting Evaluations of Water Resources under Climate Scenarios in the East River Basin

DENG Xiaoyu¹, ZHANG Qiang^{1,2}, LI Jianfeng³, SUN Peng¹, CHEN Xiaohong¹

- (1. School of Geography and Planning // Key Laboratory of Water Cycle and Water Security in Southern China of Guangdong High Education Institute, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
2. School of Earth Sciences and Engineering, Suzhou University, Anhui 234000;
3. Department of Geography and Resource Management, Chinese University of Hong Kong, Hong Kong, China)

Abstract: The East River basin is the principle source of water supply for megacities in/in the vicinity of the Pearl River Delta. In this study, water resources during 2020-2070 are evaluated under different climate scenarios based on outputs of 5 GCMs. The climate scenarios are RCP8.5, RCP4.5 and RCP2.6. Besides, downscaling procedure was done based on observed data covering the period of 1960-2000. The period of 1960-2000 was taken as the base period. HSPF model was used in hydrological modeling. The results indicate that: ① The HSPF model performs well in the hydrological simulation practice with NASH coefficient of over 0.81, PBIAS and RSR less than 10% and 0.45. The scenarios

* 收稿日期: 2014-04-14

基金项目: 新疆维吾尔自治区科技计划资助项目 (201331104); 国家杰出青年科学基金资助项目 (51425903)

作者简介: 邓晓宇 (1990 年生), 男; 研究方向: 流域水文过程模拟; 通讯作者: 张强; E-mail: zhangq68@mail.sysu.edu.cn

can well mirror the annual distribution of meteorological variables. ② The precipitation and evaporation during 2020 – 2070 under the RCP2.6 and RCP4.5 scenarios increase and evaporation decrease under RCP8.5 scenario. ③ The period of 2020 – 2070 will witness increasing monthly streamflow and also high/low flow regimes. Besides, when compared to the base period, the period of 2020 – 2070 will witness increasing flooding days. Flood risk will be significantly enhancing.

Key words: climate model; HSPF model; the East River basin; hydrological modeling; streamflow forecasting

全球气候变化影响流域水循环过程, 进而引起水资源时空分布变化以及水资源总量的改变^[1]。IPCC 第 5 次评估报告指出, 未来气候情景下, 降水和气温变化将会导致河川径流以及流域可用水量发生改变, 同时洪水、干旱等极端水文事件发生频率也会增加^[2]。一般而言, 研究气候变化对陆地水循环系统的影响, 基本采用气候模式输出产品再驱动陆地水文模型的方法^[3-7]。东江是珠江流域的 3 大水系之一。流域内包括河源、惠州、东莞、深圳、广州、香港等珠江三角洲核心地带 6 个城市, GDP 总量约两万亿元, 占全省 GDP 总量的 7 成, 在全省政治、社会、经济中具有举足轻重的地位。东江流域担负着流域内 6 个城市 4 000 万人生产、生活、生态用水的供水任务。因此, 研究未来气候变化对东江流域水文与水资源的影响, 具有重要的现实意义。与以往研究不同的是^[8-9], 本文拟采用气候模式 (GCM) 预测未来气候情景下东江流域降水、蒸发等气候要素的变化情况, 同时采用陆-气耦合模型预测东江流域径流对未来气候变化的响应。具体将选用 6 种气候模式, 预测未来不同气候情景下东江流域降水和蒸发的变化情况; 同时采用具有较强物理机制的半分布式水文模型 HSPF, 探究未来气候变化对东江流域径流量的影响。以期对未来时期东江流域水资源管理提供理论基础和科学依据。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域

东江发源于江西省寻邬县, 干流从东北向西南流经龙川、河源、紫金、惠阳、博罗、东莞等县市进入南海 (图 1)。干流全长 562 km, 流域总面积 35 340 km², 其中广东省境内 31 840 km², 占流域总面积的 90%。东江流域属亚热带季风气候, 具有明显的干湿季节。流域内多年平均降水量为 1 500 ~ 2 400 mm, 1956 – 2000 年多年平均值为 1 795 mm。降水在空间上呈现西南多, 东北少, 由南到北递减趋势。流域内多年平均水面蒸发量在

1 000 ~ 1 400 mm 之间, 1956 – 2000 年多年平均值为 1 100 mm。

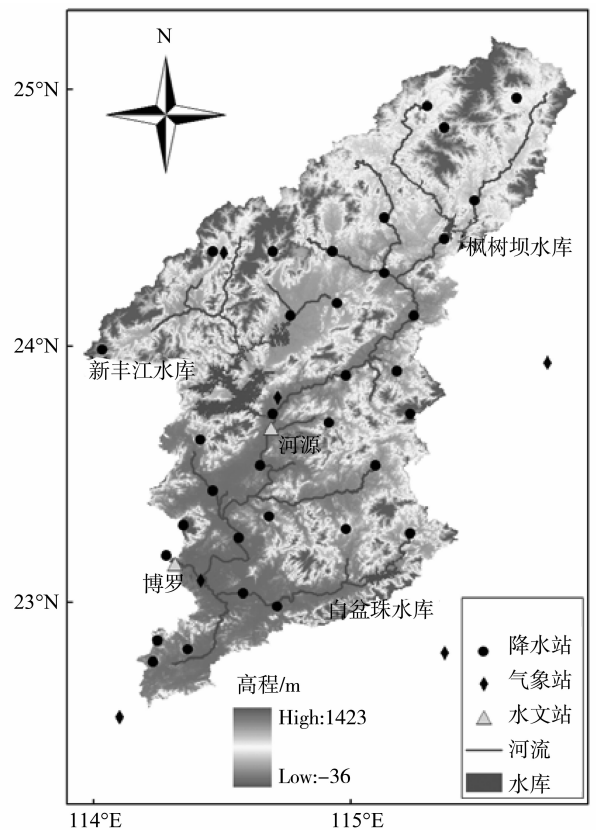


图 1 东江流域水文气象控制站点及主要水库示意图

Fig. 1 Location of the hydro-meteorological stations, reservoirs in East River basin

1.2 HSPF 水文模型

HSPF 水文模型是美国环保署 (EPA) 开发的一个能够长时间模拟水质与水量的半分布式水文模型, 最初起源于斯坦福模型 (SWM)。目前该模型是国际认可的模拟流域非点源污染效果最好的模型之一, 在国际水旱灾害防治、水环境监测、水资源开发利用中得到了广泛运用^[10-12]。

本文基于东江流域气象数据、地形高程数据 (DEM) 和 2000 年土地利用数据完成了东江流域水文模型建模工作。研究中所采用的数据包括流域

内 12 个气象站日降水数据, 5 个气象站日蒸发数据、2 个流量站日流量数据。数据来自 1978 - 1998 年共 21 a。东江流域气象站点分布均匀, 基本可以反映流域水文气象要素的空间变化。模型所需的地形高程数据 (DEM) 从中国科学院国际科学数据服务平台下载得到, 分辨率是 90 m × 90 m (<http://www.gscloud.cn/>)。2000 年土地利用数据从美国地质调查局网站下载得到 (<http://landcover.usgs.gov/>), 并进行重分类处理。在本研究中, 将 2000 年东江流域土地利用分成 5 种类型, 分别是森林、灌木、耕地、城市用地、水体。

1.3 气候模式、气候情景与数据

本文中气候变化情景采用 IPCC 第五次评估报告 (AR5) 中发布的典型浓度路径情景 RCPs^[2], 其更多考虑了气候变化的各种政策对未来排放的影响, 因而被广泛应用^[13-15]。本文选取典型浓度路径情景下 RCP8.5、RCP4.5 和 RCP2.6 情景分析当前气候条件和未来 2020 - 2070 年全球和区域的气候变化情况, 具体详见文献^[2,16]。日降水数据是 CMIP5 (the Fifth phase of the Couple Model Inter-comparison Project) 中 5 个全球气候模式输出的结果。5 个气候模式包括 CanESM2、GFDL-ESM2G、MIROC-ESM-CHEM、MPI-ESM-MR、NorESM1-M^[17]。新的气候模式由于更多的考虑了现实中的生物化学反馈机制, 因而对气候变化有更强的模拟能力^[18]。蒸发数据是 CCSM4.0 模式模拟得到的结果 (<http://pcmdi9.llnl.gov/esgf-web-fe/>)。由于 CCSM4.0 模式输出的是月蒸发数据, 不满足 HSPF 水文模型的输入要求, 故需对数据进行分解, 把月数据分解到日内以满足水文模型的建模要求, 详细分解方法见公式 (4)、(5)、(6)。

1.4 降尺度方法和误差修正

对于全球气候模式输出的模拟结果, 由于其空间分辨率较低, 对局地气候特征表现能力差, 故有必要对全球气候模式的输出结果进行降尺度处理。本文采用“天气发生器”统计降尺度方法对降水数据进行降尺度^[19]。降尺度后的结果表明, 该方法能够较好的反映降水在年内的分布, 降水的月均值与方差和实测值较接近。

一般而言, 气候模式模拟出的气象数据存在着系统误差, 因此需要对气象数据进行误差修正^[20]。本文以气象数据的月均值为基础, 使用以下方法对 GCM 输出的降水和蒸发数据进行误差修正工

作^[20-21]。

降水数据修正方法如下:

$$\Delta P(j) = \frac{P_{\text{obs}}(j)}{P_{\text{hist}}(j)} \quad (1)$$

$$P_{\text{cont}}(i, j) = P_{\text{hist}(i, j)} \times \Delta P(j) \quad (2)$$

$$P(i, j) = P_{\text{scen_orig}(i, j)} \times \Delta P(j) \quad (3)$$

式中 $i=1, 2, \dots, 31$; $j=1, 2, \dots, 12$; ΔP 是降水月修正系数, P_{obs} 是实测降水数据, P_{hist} 是气候模式输出的 1960 - 2000 年修正前的降水数据, P_{cont} 是修正后的 1960 - 2000 年降水数据, $P_{\text{scen_orig}(i, j)}$ 是气候模式输出的 2020 - 2070 年修正前的降水数据, P_{scen} 是 2020 - 2070 年修正后的降水数据。

蒸发数据修正方法和分解方法如下:

$$\Delta E(j) = \frac{E_{\text{obs}}(j)}{E_{\text{hist}}(j)} \quad (4)$$

$$E_{\text{cont}}(i, j) = E_{\text{obs}}(i, j) \times \Delta E(j) \quad (5)$$

$$E_{\text{scen}}(i, j) = E_{\text{obs}}(i, j) \times \frac{\Delta E(j) \times E_{\text{scen_orig}}(j)}{E_{\text{obs}}(j)} \quad (6)$$

式中 $i=1, 2, \dots, 31$; $j=1, 2, \dots, 12$; ΔE 是蒸发月修正系数, E_{obs} 是实测蒸发数据, E_{hist} 是气候模式输出的 1960 - 2000 年修正前的蒸发数据, E_{cont} 是修正后的 1960 - 2000 年蒸发数据, $E_{\text{scen_orig}}$ 是气候模式输出的 2020 - 2070 年修正前的蒸发数据, E_{scen} 是 2020 - 2070 年修正后的蒸发数据。

2 结果与分析

2.1 水文模型模拟效果检验

以 1978 - 1998 年河源站和博罗站日径流数据来校准 HSPF 水文模型参数, 其中 1978 年作为模型的预热期。东江流域水利工程较多, 对径流的影响较大, 为此收集了东江流域 3 大水库的入库流量、出库流量数据。通过径流还原方法, 将河源站和博罗站的实测径流还原为接近天然状态的径流。

在进行水文模型调参之前, 通过扰动分析法对参数进行灵敏度检验^[22-23]。经分析, 确定 6 个参数为敏感参数: LZSN、UZSN、INTFW、INFILT、IRC、AGWRC。模型调参从流域上游到流域下游依次进行, 采用手动调参结合 PEST (Model-Independent Parameter Estimation) 自动调参方式, 参数的有效取值范围参考官方技术手册 Technical Note 6^[24-25]。参数介绍和调参结果见表 1。

表 1 HSPF 参数调整结果
Table 1 Result of parameters-adjusting of HSPF

参数名称	调参范围/cm	实际取值范围/cm	涵义
LZSN	5.08 ~ 38.10	22.86 ~ 32.02	下土壤层理论蓄积水量, 控制年径流总量
UZSN	0.127 ~ 5.080	2.84 ~ 5.08	上土壤层理论蓄积水量, 控制月径流总量
INTFW	2.54 ~ 25.40	22.86	壤中流汇聚参数, 影响洪水过程线的形状
INFILT	0.003 ~ 1.270	0.965 ~ 1.270	饱和导水率, 控制降雨转化成地表径流和地下径流的比例
IRC	0.076 ~ 2.159	1.549 ~ 2.057	壤中流退水系数, 影响洪水过程线的形状
AGWRC	2.159 ~ 2.537	2.484 ~ 2.502	地下水消退系数, 控制地下水退水过程

东江流域的径流模拟效果见图 2 和图 3, 以下对径流量的统计分析均指的是博罗站

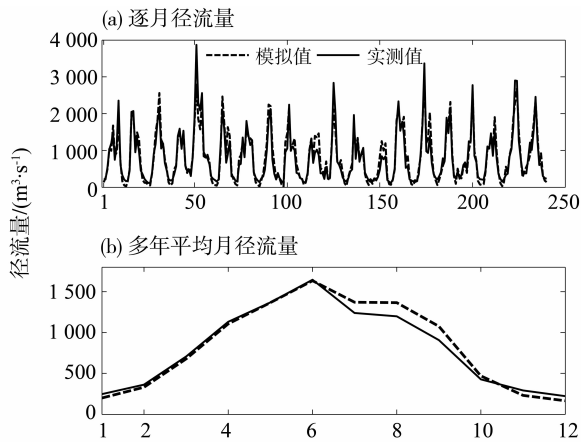


图 2 东江流域月径流拟合曲线

Fig. 2 Monthly streamflow simulation of the East River basin

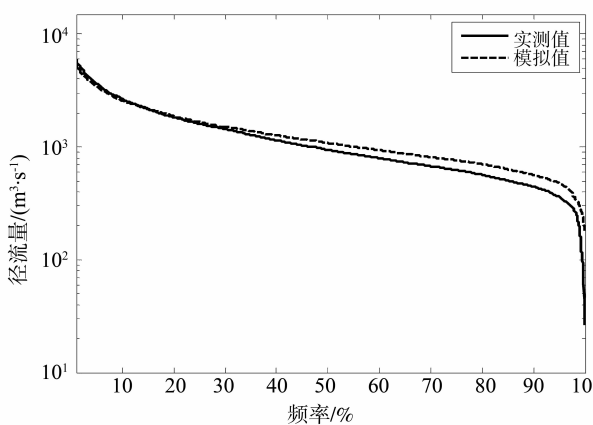


图 3 5-8 月洪水期实测和模拟流量历时曲线

Fig. 3 Observed and simulated flow duration curves during flood season from May to August

从图 2 和图 3 可看出, HSPF 水文模型能较好地模拟东江流域月径流和多年平均月径流, 模型对洪水期 (5-8 月) 的模拟效果也较好。表 2 是对径流的模拟效果评价 (NASH 表示纳什系数,

PBIAS 表示百分比偏差系数, RSR 表示均方根-测量标准偏差比)。结果表明, NASH 均超过 0.80, PBIAS 值不超过 10%, RSR 值则均小于 0.45。Moriasi 等^[26]研究表明, NASH 高于 0.80, PBIAS 小于 10%, RSR 小于 0.50 即表示 HSPF 水文模型对径流的模拟效果非常理想。这说明, 对于整个东江流域, HSPF 的水文模拟效果基本令人满意, 对博罗站径流的模拟效果也较好。该模型在东江流域有较好的适用性。

表 2 径流模拟效果评价
Table 2 Assessment of the streamflow simulation results by HSPF model

项目	NASH	PBIAS	RSR
年径流	0.81	-2.50	0.43
月径流	0.91	-2.49	0.30
日径流	0.84	-2.49	0.40
洪水期日径流 (5-8 月)	0.80	-5.14	0.45
枯水期日径流 (10-3 月)	0.82	7.97	0.42

2.2 气候模式模拟效果检验

图 4 是对多年平均月降水量和多年平均月蒸发量的统计。Obs 表示实测气象数据系列, Hist 表示气候模式输出的 1960-2000 年气象数据系列, RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 分别表示气候模式输出的 2020-2070 年对应情景下的气象数据系列。图 5 是对 Hist 相对于 Obs、RCP 情景相对于 Hist 情景气象数据变化率的统计。

从图 4 和图 5 可以看出, 对于多年平均月降水量和多年平均月蒸发量, 基准期模拟值与实测值较为接近。统计结果表明, 多年平均月降水量基准期模拟值较实测值增加 6.04%; 多年平均月蒸发量基准期模拟值较实测值增加 4.56%。这说明, 所选的气候模式模拟能力强, 能较好地体现东江流域气象要素多年月平均值在年内的变化情况。对于多年平均月降水量, 从图 4 (a) 和图 5 (a) 可以看

出，在未来时期，不同情景下降水量模拟值普遍高于基准期的模拟值，三种情景下月降水量的平均增加率分别是 7.15%、7.86% 和 8.77%。这说明，未来时期，东江流域降水将明显增加，并且增加幅度在枯水期（10 月 - 次年 3 月）尤为明显。对于多年平均月蒸发量，从图 4（b）和图 5（b）可以看出，在未来时期，不同气候情景下蒸发量在不同月份变化不同。在 RCP2.6 和 RCP4.5 情景下，相对于基准期，蒸发量基本全年增加，特别是在 1 - 3 月和 10 - 12 月增幅明显。而在 RCP8.5 情景下，蒸发量在 1 - 3 月增幅明显，而在 4 - 8 月降幅明显。统计结果表明，三种气候情景下多年平均月蒸发量平均增加率为 1.26%、1.98% 和 -0.62%。这说明，相对于降水，未来时期蒸发的变化幅度不大，且不同情景下变化趋势也不同。

本文选取的气候模式模拟结果与 IPCC5 报告中预测的结果相一致。IPCC5 决策者摘要报告中指出，在未来时期（1986 - 2005 年到 2081 - 2100 年）中国东南部区域降水量将增加 10% 左右，地表温度将上升 2 °C 左右^[2]。本文的计算结果也表明，对于降水量，未来时期多年平均月降水量的平均增长率是 7.93%。对于蒸发量，作者对气候模式模拟结果比较发现，RCP8.5 情景的东江流域蒸发量确实低于其他两种情形，说明该现象是直接由气候模式的模拟产生的。虽然气温上升会加快蒸发速率，但蒸发同时也受其他因素影响，如地表类型、云层覆盖程度、日照时数、风速等^[27]。在这些因素的综合作用下，未来时期东江流域多年平均月蒸发量在 RCP2.6 和 RCP4.5 情景下增大，在 RCP8.5 情景下减小。

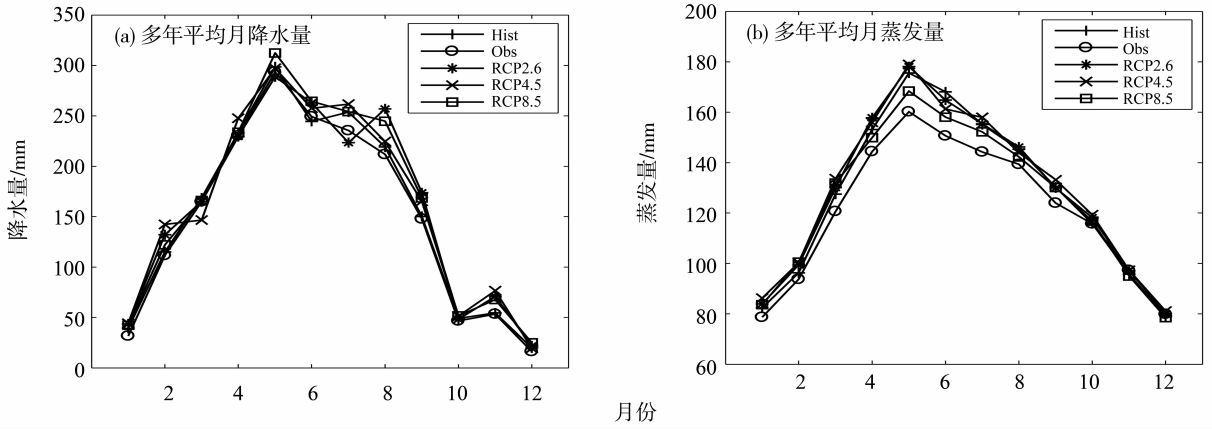


图 4 实测值与模拟值多年平均月降水和月蒸发数据统计图

Fig. 4 Mean monthly precipitation and evaporation for the observed and simulated values

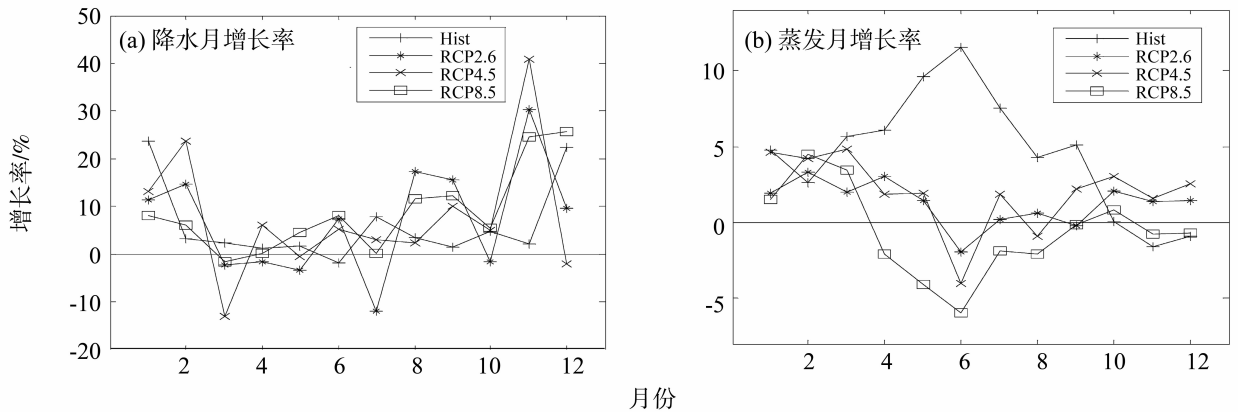


图 5 多年平均月降水和月蒸发数据增长率

Fig. 5 Percentage changes in mean monthly values of precipitation and evaporation

2.3 未来气候变化对东江流域年径流量的影响

本文基于 5 个全球气候模式模拟了 3 种气候情景下 2020–2070 年东江流域的降水、蒸发数据。再将气象数据模拟结果导入水文模型中,便得到 2020–2070 年东江流域径流序列。同时为了对径流序列进行对比分析,将当前气候条件下(1960–2000 年)模拟得到的气象数据也导入到 HSPF 水文模型中,得到“基准期”径流序列。从表 3 可以看出,基准期径流模拟效果较好,多年平均年径流量模拟结果与实测值较为接近,其偏差不超过 3.4%。在 2020–2070 年未来时期,不同气候情景下多年平均年径流量均呈上升趋势。相对于基准期,RCP2.6 情景下多年平均年径流量上升幅度最

小,为 7.5%;RCP8.5 情景下多年平均年径流量上升幅度最大,为 9.2%。

另外,相关的研究也表明,在东江流域,降水对径流的影响相对最大,蒸发对径流的影响相对最小^[28]。同时根据作者对 HSPF 水文模型的使用经验,也发现在湿润地区该模型对流域的降水输入较为敏感。因此,本文认为,虽然在 RCP8.5 情景下,蒸发量相对于基准期有所下降(相对于基准期,多年平均年蒸发量下降 1.11%),但降水量增幅更大(相对于基准期,多年平均年降水量增加 5.80%)。在二者的共同作用下,RCP8.5 情景下的多年平均径流量较基准期增加了 9.2%,增幅最大。

表 3 东江流域多年平均年降水量、年蒸发量、年径流量模拟结果和比较结果

Table 3 Mean annual observed and simulated values of precipitation, evaporation and streamflow in the East River basin

项目	多年平均 降水量/mm	多年平均 蒸发量/mm	多年平均 径流量/(亿 m ³)	$\Delta\%$ 径流量 (hist-obs)/obs	$\Delta\%$ 径流量 (rcp-hist)/hist
Observed (1978–1998 年)	1 792.8	1 448.7	244.1	–	–
Hist (1960–2000 年)	1 845.9	1 524.2	247.3	1.3	–
RCP2.6 (2020–2070 年)	1 916.8	1 541.1	266.0	–	7.5
RCP4.5 (2020–2070 年)	1 935.0	1 549.1	266.9	–	7.9
RCP8.5 (2020–2070 年)	1 953.0	1 507.3	270.0	–	9.2

2.4 未来气候变化对东江流域月径流量的影响

为分析气候变化对东江流域月径流量的影响,本文对未来时期不同情景下多年平均月径流量相对于基准期的变化率做了统计,结果见图 6。图 6 表明,在未来时期,多年平均月径流量相对于基准期整体呈现增加趋势,但不同月份之间增加幅度不同。在 RCP2.6 情景下,除了 5 月份和 7 月份月径流量呈减小趋势外,其他月份的月径流量均呈增加趋势,特别是在 1–3 月和 8–12 月增幅较大,平均增幅超过 10%。在 RCP4.5 情景下,全年月径流量均呈增加趋势,特别是在 1–2 月和 11–12 月枯水期增幅较大,而在其他月份增幅较小,增长率小于 10%。在 RCP8.5 情景下月径流量变化趋势和 RCP2.6 情景下的月径流量变化趋势类似,但 RCP8.5 情景下的月径流增长率基本小于对应月份 RCP2.6 情景下月径流增长率。在 RCP8.5 情景下月径流量在 1–2 月、6 月和 8–12 月均呈明显增加趋势,其他月份增加趋势不明显,增长率不超过 10%。

2.5 未来气候变化对东江流域洪水和枯水影响

东江流域地处亚热带,径流量在年内变化较大,流域内 70%–80% 的降水和径流集中在 5 月

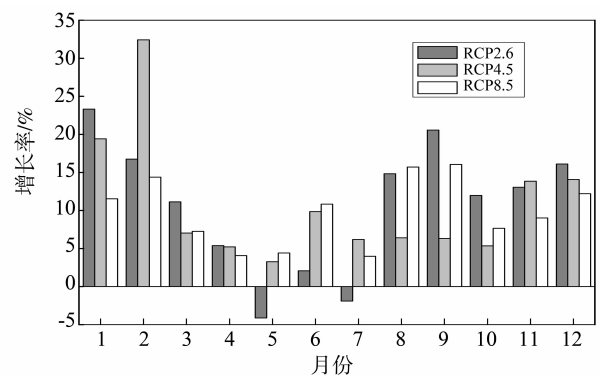


图 6 未来时期(2020–2070 年)东江流域多年平均月径流增长率

Fig. 6 Percentage changes of mean monthly streamflow in the future period (2020–2070)

–8 月,其余月份基本属于枯水季节。故本文将 5 月–8 月划分为东江流域洪水期,10 月–次年 3 月划分为东江流域枯水期。通过绘制不同情景下的流量历时曲线,分析未来气候情景下东江流域洪水期和枯水期径流的变化特征(见图 7)。同时为定量反映未来时期洪水、枯水流量的变化,以 1%、5%、50%、90%、95% 作为特征频率。通过计算特征频率下未来情景的流量值相对于基准期相同频

率下流量值的变化率，来表示未来时期径流的变化特征^[29]。对于东江流域，频率 5% 和 10% 下的流量代表高流量，频率 90% 和 95% 的流量代表低流量，50% 频率下的流量代表常流量。各情景不同特征频率下的流量变化率见表 4。

从图 7 和表 4 可以看出，无论是洪水期还是枯水期，未来气候情景下洪水流量和枯水流量均出现了不同程度的增长。对于洪水期，整体而言 RCP8.5 情景下径流量增加趋势较为显著，而 RCP2.6 情景下的径流量增加趋势相对不显著。在

高流量部分，RCP8.5 情景下的径流量增加幅度超过了 10% 以上，增加趋势最为显著；其次是 RCP4.5 情景下的径流量，增加幅度均超过 5%；增加趋势最小的是 RCP2.6 情景下的径流量。对于枯水流量，RCP4.5 和 RCP2.6 情景下的径流量增长较为显著，不同特征频率下的增长率均超过了 10%。另外可以看到，低流量部分的变化率小于高流量部分的变化率，这说明低流量部分的径流量增幅较小。三种情景下的枯水流量整体上保持一致的变化趋势。

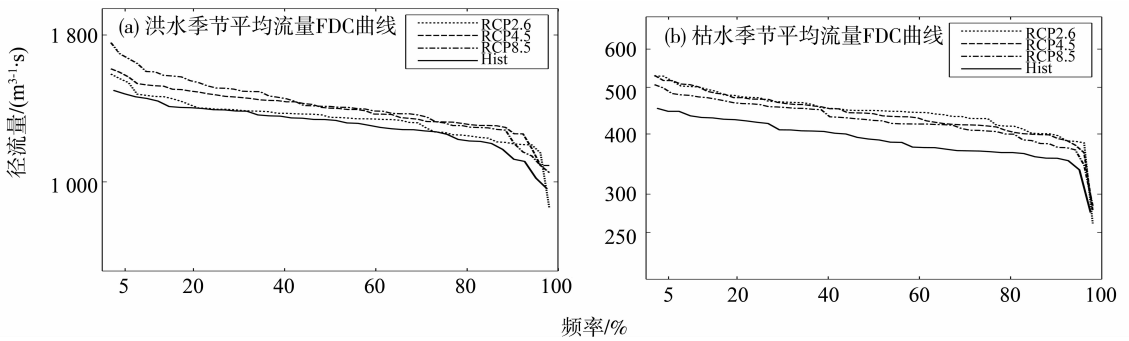


图 7 洪水期和枯水期平均流量流量历时曲线

Fig. 7 Flow duration curves of mean streamflow values in flood and low flow season

表 4 不同特征频率下流量变化率

Table 4 rate of streamflow change at different frequency

%

时期	项目	$Q_{5\%}/Q_{5\%_hist}$	$Q_{10\%}/Q_{10\%_hist}$	$Q_{50\%}/Q_{50\%_hist}$	$Q_{90\%}/Q_{90\%_hist}$	$Q_{95\%}/Q_{95\%_hist}$
洪水期	RCP2.6	5.4	1.3	1.1	6.3	19.3
	RCP4.5	8.0	5.6	4.8	10.8	13.7
	RCP8.5	16.3	11.4	5.6	6.5	12.0
枯水期	RCP2.6	17.0	14.9	14.8	11.5	14.2
	RCP4.5	15.8	16.0	13.1	10.0	10.5
	RCP8.5	10.4	10.2	9.5	5.3	6.1

尽管流量历时曲线可以描述流域径流过程，反映流域某一时段流量发生频次与流量之间的关系，但它不能确切的告诉人们流量高于某个指定流量所持续的时间，而这一点对于洪水期水资源调度尤为重要^[30]。基于此，本文将基准期 5% 和 10% 频率下的流量值 $Q_{5\%}$ 、 $Q_{10\%}$ 作为洪水期径流的特征值，对 3 种情景下的流量模拟值进行分析，统计出不同情景下每年日流量高于 $Q_{5\%}$ 和 $Q_{10\%}$ 发生的天数，结果见图 8。并对不同情景下洪水天数的多年平均值进行了统计，结果见表 5。从图 8 和表 5 可以看出，5% 和 10% 频率下的年洪水天数基本保持了一

致的变化趋势。相对于基准期，未来时期的洪水天数均呈现不同程度的增长，其中 RCP2.6 情景下的年洪水天数增幅最小，而 RCP8.5 情景下的年洪水天数增幅最大。对三种气候情景，RCP2.6 情景下的年洪水天数分布均匀，多年变化趋势不显著；RCP4.5 情景下的年洪水天数在 2020 - 2070 年初期先呈现缓慢减少趋势，2050 年以后又呈现缓慢增加趋势；而 RCP8.5 情景下的年洪水天数，在 2020 - 2070 年的前 10 年呈明显增加趋势，2030 年以后则呈现明显减少趋势。

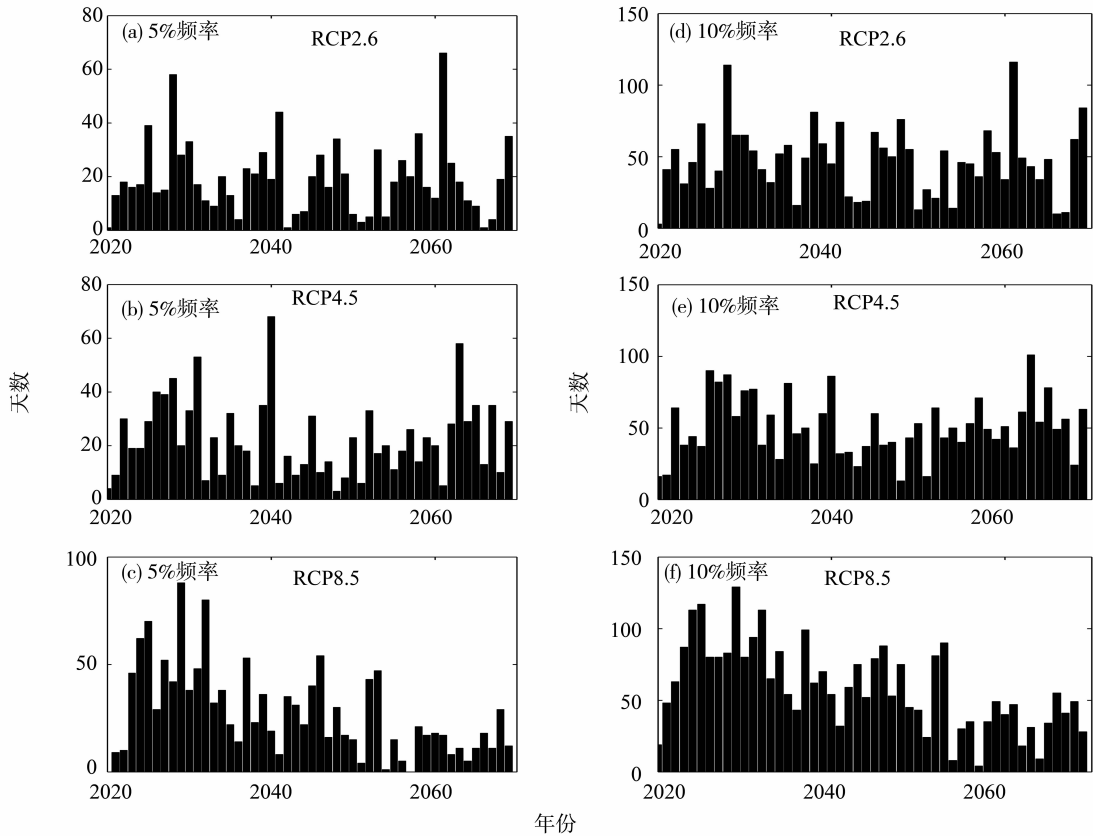


图 8 不同情景下 5% 和 10% 频率年洪水天数统计

Fig. 8 Number of flood days under different scenarios

表 5 多年平均年洪水天数统计

Table 5 Statistics of mean annual flood days d

项目	5% 频率下洪水天数	10% 频率下洪水天数
Hist	13.6	27.9
RCP2.6	19.2	47.1
RCP4.5	22.4	50.6
RCP8.5	27.4	58.9

3 结论

本文基于 CMIP5 中的 5 个全球气候模式, 模拟了 3 种气候情景下 2020 - 2070 年东江流域未来气候变化; 并结合半分布式水文模型 HSPF, 分析了东江流域径流对未来气候变化的响应。研究结果如下:

1) 水文模型的模拟结果表明, HSPF 水文模型能够较好的适用于东江流域的径流模拟。通过对比基准期气象数据的模拟值和实测值, 结果表明, 所选取的气候模式对东江流域气候模拟能力强, 能较好的反映气象数据的月均值、方差等统计特征。

2) 2020 - 2070 年 3 种情景下东江流域的降水

均呈上升趋势, 特别是在枯水期上升趋势显著。3 种情景下的蒸发量则呈现不同的变化趋势。在 RCP2.6 和 RCP4.5 情景下, 蒸发量整体呈全年上升趋势; 在 RCP8.5 情景下, 蒸发量则全年基本呈下降趋势。

3) 在未来时期, 3 种情景下的多年平均月径流量相对于基准期均呈增加趋势。在枯水期月径流量增幅较大, 而在洪水期增幅较小。

4) 对洪水期和枯水期的流量历时曲线分析表明, 在未来时期, 不同气候情景下的洪水流量和枯水流量均呈现不同程度的增长。相对于基准期, 未来时期的洪水天数呈明显增加趋势。

致谢: 本文成文过程中, 得到中国科学院大气物理研究所吴成来博士的大力帮助, 特此致谢。

参考文献:

- [1] 刘昌明, 刘小莽, 郑红星. 气候变化对水文水资源影响问题的探讨[J]. 科学对社会的影响, 2008(2): 21 - 27.
- [2] STOCKER T F, QIN D, PLATTNER G K, et al. IPCC, 2013: Summary for policymakers [M] // Climate change 2013: The physical science basis. New York: Cambridge

- University Pres, 2013.
- [3] 刘春蓁. 气候变化对陆地水循环影响研究的问题[J]. 地球科学进展, 2004, 19(1): 115 - 119.
- [4] GELENS D, Roullin E. Streamflow response of Belgian catchments to IPCC climate change scenarios [J]. Journal of Hydrology, 1998, 210(1): 242 - 258.
- [5] ARNELL N W, REYNARD N S. The effects of climate change due to global warming on river flows in Great Britain [J]. Journal of Hydrology, 1996, 183(3): 397 - 424.
- [6] SUN S L, CHEN H S, JU W M, et al. Assessing the future hydrological cycle in the Xinjiang Basin, China, using a multi-model ensemble and SWAT model [J]. International Journal of Climatology, 2013, 34(9): 2972 - 2987.
- [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[D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 2000.
- [8] 林凯荣, 何艳虎, 雷旭, 等. 东江流域 1959 - 2009 年气候变化及其对径流的影响[J]. 生态环境学报, 2011, 20(12): 1783 - 1787.
- [9] JIANG T, CHEN Y Q D, XU C Y, et al. Comparison of hydrological impacts of climate change simulated by six hydrological models in the Dongjiang Basin, South China [J]. Journal of Hydrology, 2007, 336(3): 316 - 333.
- [10] NASSIM A A, MUNJED A S. Hydrological Modeling of Zarqa River Basin-Jordan using the Hydrological Simulation Program-FORTRAN (HSPF) Model [J]. Water Resour Manage, 2008, 22(9): 1203 - 1220.
- [11] 李兆富, 刘红玉, 李燕. HSPF 水文水质模型应用研究综述[J]. 环境科学, 2012, 33(7): 2217 - 2223.
- [12] BICKNELL B R, IMHOFF J C, Jr KITTLE J L, et al. HSPF Version 12.2 User's Manual [R]. USA: Environmental Protection Agency, 2005.
- [13] MOSS R H, EDMONDS J A, HIBBARD K A, et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment [J]. Nature, 2010, 463(7282): 747 - 756.
- [14] JOERI R, MALTE M, RETO K. Global warming under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates [J]. Nature Climate Change, 2012, 2(4): 248 - 253.
- [15] 陶辉, 黄金龙, 翟建青, 等. 长江流域气候变化高分辨率模拟与 RCP4.5 情景下的预估[J]. 气候变化研究进展, 2013, 9(4): 246 - 251.
- [16] 陈敏鹏, 林而达. 代表性浓度路径情景下的全球温室气体排放和对中国的挑战[J]. 气候变化研究进展, 2010, 6(6): 436 - 442.
- [17] LI J F, ZHANG Q, CHEN Y Q D, et al. Changing spatiotemporal patterns of precipitation extremes in China during 2071 - 2100 based on Earth System Models [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118(22): 12537 - 12555.
- [18] COLLINS W J, BELLOUIN N, DOUTRIAU B M, et al. Development and evaluation of an Earth-System model-HadGEM2 [J]. Geoscientific Model Development, 2011, 4(2): 1051 - 1075.
- [19] WILKS D S. Multisite downscaling of daily precipitation with a stochastic weather generator [J]. Climate Research, 1999, 11(2): 125 - 136.
- [20] LIEKE V R, SNOOENBORG T O, KARSTEN H J. Impact of climate and land use change on the hydrology of a large-scale agricultural catchment [J]. Water Resources Research, 2009, 45(7): 1 - 18.
- [21] HANS T. The influence of climate change on stream flow in Danish rivers [J]. Journal of Hydrology, 2007, 333(2): 226 - 238.
- [22] 王中根, 夏军, 刘昌明, 等. 分布式水文模型参数率定及敏感性分析探讨[J]. 自然资源学报, 2007, 22(4): 649 - 655.
- [23] 董延军. 流域水文水质模拟软件(HSPF)应用指南[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2009: 1 - 150.
- [24] DOHERTY J. PEST Model-Independent Parameter Estimation User Manual: 5th Edition [R]. Australia: Brisbane, 2005.
- [25] BICKNELL B R. Basins Technical Note 6: Estimating Hydrology and Hydraulic Parameters for HSPF [R]. USA: Environmental Protection Agency, 2000.
- [26] MORIASI D N, ARNOLD J G, Van LIEW M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations [J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(3): 885 - 900.
- [27] 谢平, 陈晓宏, 王兆礼, 等. 东江流域蒸发皿蒸发量及其影响因子的变化特征分析[J]. 热带地理, 2008, 28(4): 306 - 310.
- [28] 何艳虎, 陈晓宏, 林凯荣, 等. 东江流域气象要素季节性变化与径流响应关系分析[J]. 水资源研究, 2012, 1(4): 227 - 233.
- [29] 穆兴民, 高鹏, 巴桑赤烈. 应用流量历时曲线分析黄土高原区水利水保措施对河川径流的影响[J]. 2008, 23(4): 382 - 389.
- [30] 黄国如, 陈永勤. 基于新安江水文模型的东江流域枯水径流模拟[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2006, 34(11): 93 - 98.