

基于多模式的乌江流域径流对 气候变化的响应研究

陈梓延¹ 王艳君¹ 苏布达^{2, 3} 黄金龙¹ 姜彤^{1, 31}

(1. 南京信息工程大学地理科学学院/灾害风险管理研究院, 江苏 南京 210044;

2. 中国气象局国家气候中心, 北京 100081;

3. 中国科学院新疆生态与地理研究所,

荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011)

【摘要】: 采用经统计降尺度与偏差订正的 4 种全球气候模式 (GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR 和 MIROC5) 1861~2005 年的历史气候模拟试验和 2006~2018 年的 RCP4.5 情景预估资料, 驱动 SWAT 水文模型, 分析了 1861~2018 年乌江流域气候变化特征及其对径流的影响。同时, 采用 1861~2018 年 4 种全球气候模式在工业革命前控制试验 (piControl) 数据, 对比分析了“自然”和“人为+自然”强迫下流域气候及径流变化的差异。研究结果表明: (1) 1861~2018 年乌江流域平均气温呈现显著上升趋势, 气温倾向率为 $0.03^{\circ}\text{C}/10\text{a}$; 降水呈显著下降趋势, 降水倾向率为 $-10.9\text{mm}/10\text{a}$ 。流域主要水文控制站武隆站年平均流量呈显著下降趋势, 倾向率为 $-20.8\text{m}^3/\text{s}/10\text{a}$; 四季平均流量倾向率分别为 -10.8 、 -46.1 、 -20.1 、 $-5.9\text{m}^3/\text{s}/10\text{a}$, 均呈显著下降趋势; 枯水极值流量倾向率为 $-7.6\text{m}^3/\text{s}/10\text{a}$, 丰水极值流量倾向率为 $-43.5\text{m}^3/\text{s}/10\text{a}$, 下降趋势显著。(2) “自然”强迫控制试验下, 1861~2018 年乌江流域年平均气温无明显变化趋势; 降水则为不显著上升趋势, 倾向率为 $1.9\text{mm}/10\text{a}$; 年平均流量呈微弱上升趋势, 倾向率为 $0.1\text{m}^3/\text{s}/10\text{a}$; 四季平均流量倾向率分别为 -1.1 、 -18.6 、 11.0 、 $8.9\text{m}^3/\text{s}/10\text{a}$, 春季平均流量不显著下降, 夏季显著下降, 秋季不显著上升, 冬季显著上升; 枯水极值流量倾向率为 $2.5\text{m}^3/\text{s}/10\text{a}$, 丰水极值流量为 $-9.5\text{m}^3/\text{s}/10\text{a}$, 变化趋势均不显著。(3) 相对“自然”强迫序列, 人类活动引起的气候变化导致 1861~2018 年乌江四季平均流量分别减少 7.1%、9.7%、8.7%、11.9%; 枯水与丰水极值流量分别下降 9.3% 和 5.0%。

【关键词】: 气候变化 径流 自然强迫 乌江流域

【中图分类号】: X823 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)08-1927-11

以全球变暖为主要特征的气候变化已经导致不同区域温度、降水等气象要素发生了显著改变^[1]。研究表明, 气候变化正在加

作者简介: 陈梓延(1996~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为气候变化与水文水资源. E-mail: chenziyan310@foxmail.com
王艳君 E-mail: yjwang78@163.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFA0603701); 国家自然科学基金委项目(41671211); 中国气象局气候变化专项“气候变化影响综合评估”(CCSF201810, CCSF201924)

速全球的水循环过程^[2],对径流造成了直接影响。全球范围的研究显示,1951~2002年,中亚和南亚主要河流年径流呈下降趋势,西亚为上升趋势;非洲大部分地区为下降趋势;欧洲环地中海区域下降趋势明显;北美则总体为上升趋势^[3~5]。中国不同地区径流变化差异较大,1950年以来长江、黄河、海河、淮河等流域的年径流均呈下降趋势,西北出山口径流则为上升趋势^[6~8]。气候变化背景下,区域河川径流变化特征的研究,可以为流域水资源管理提供理论依据。

气候模式是研究气候变化对径流影响的重要工具。很多学者已使用耦合模式比较计划第五阶段(CMIP5)的气候模式,开展了历史时期和典型浓度路径(RCPs)下不同流域径流对气候变化的响应研究^[9~11]。行业间影响评估模型国际比较计划(ISI-MIP)选择CMIP5气候模式中模拟要素最全的全球气候模式(GCMs),定量分析了相同气候情景下全球多个流域的径流变化规律,为评估不同区域受气候变化影响的敏感程度提供了有力支持^[12~14]。

乌江流域位于长江上游南岸,生态环境脆弱,易受气候变化的影响。学者们围绕乌江流域开展了多方面的研究,发现1960~2008年乌江流域年平均气温呈上升趋势,年降水呈下降趋势,年径流总体表现出下降趋势;不同RCPs情景下,乌江流域干旱的频率和强度预计有所增加^[15~20]。在已有研究基础上,本文采用经降尺度和偏差订正处理的4个全球气候模式(GFDL-ESM2M、HadGEM2-ES、IPSL-CM5A-LR、MIROC5)在工业化革命前控制试验(piControl)与历史模拟试验的输出(2006~2018年为RCP4.5情景模拟),驱动SWAT水文模型,模拟乌江流域1861~2018年的径流变化,定量分析人类活动引起的气候变化对乌江流域径流的影响。本文结果可与全球其他气候条件相近流域开展的气候变化影响评估研究结果进行比较,进一步发掘径流变化规律,为流域水资源管理提供参考依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

乌江是长江上游南岸支流,发源于贵州省威宁县,流经贵州省北部及重庆市东南部,于重庆市涪陵汇入长江(图1)。乌江干流全长1037千米,流域面积为87900km²,天然落差达2123m。流域地处亚热带季风气候区,年平均流量1650m³/s。径流年内分配不均,5~9月径流量占全年总量的80%左右^[21]。

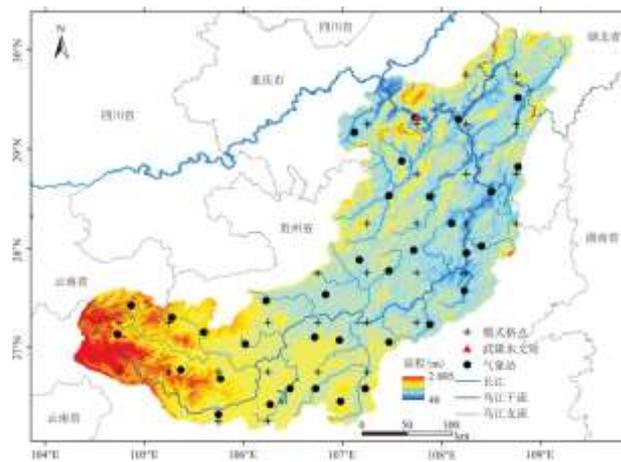


图1 乌江流域气象站、武隆水文站及气候模式格点分布

1.2 数据

乌江流域的地面观测气象数据来源于中国气象局国家气象信息中心,包括经过订正处理的35个气象台站1961~2018年的

逐日气温(平均、最高、最低)、降水、日照时数、风速、相对湿度等。

GFDL-ESM2M、HadGEM2-ES、IPSL-CM5A-LR、MIROC-ESM-CHEM 等 4 个全球气候模式数据由 ISI-MIP 计划提供, 包括逐日气温(平均、最高、最低)、降水、太阳短波辐射、风速、相对湿度等要素, 空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。CMIP5 气候模式历史模拟试验到 2005 年为止, 中等排放情景符合当前中国发展情况^[22], 因此, 用 RCP4.5 情景数据延长研究时段至 2018 年。文章还选择 1861~2018 年工业化革命前控制试验(piControl), 进而对比“自然”强迫和“人为+自然”强迫试验下气候变化对径流的定量影响。为减少气候模式本身带来的不确定性^[23], 研究采用多模式集合平均分析流域的气候变化。

乌江武隆水文站($107^\circ 45' N$, $29^\circ 19' E$)1961~1971 年的逐日流量观测数据, 来源于中华人民共和国水文年鉴。武隆水文站是乌江入长江的最后一个控制站, 控制流域面积 83035km^2 。

流域的地理空间数据包括数字高程模型(DEM)、土地利用土地覆盖数据、土壤数据。其中, DEM 数据来源于航天飞机雷达地形测绘任务(SRTM)数据服务网(<http://srtm.csi.cgiar.org/>), 分辨率为 90m; 1980 年的土地利用土地覆盖数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>), 分辨率为 $1\text{km} \times 1\text{km}$; 土壤数据来源于世界土壤数据库(FAO, 2009), 分辨率为 $1\text{km} \times 1\text{km}$ 。

1.3 研究方法

1.3.1 SWAT 模型

本文采用分布式水文模型 SWAT 确定降水-径流关系。模型具有较强物理机制, 可以模拟长时段的径流变化规律^[24], 适用于土壤种类和土地利用方式较多的复杂流域^[25]。由于乌江干流上第一座大型水电站——乌江渡水电站于 20 世纪 70 年代开始兴建, 为了避免大型工程对天然径流产生较大影响, 文中将 1962~1966 年和 1967~1971 年为水文模拟的率定期和验证期。采用决定系数 R^2 和纳什效率系数 E_{ns} 来评估水文模型的模拟结果。

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_{pi} - \bar{Q}_p)(Q_{oi} - \bar{Q}_o)]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{pi} - \bar{Q}_p)^2 \sum_{i=1}^n (Q_{oi} - \bar{Q}_o)^2}$$

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_p)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_o - \bar{Q}_o)^2}$$

式中: Q_o 是实测值; Q_p 是模拟值; n 是数据个数。 R^2 和 E_{ns} 值越大, 表明模拟的效果越高。通常取 $R^2 > 0.6$ 和 $E_{ns} > 0.5$ 作为径流模拟效率的评价标准^[26]。

本文使用 SWAT-CUP (Calibration and Uncertainty Programs) 方法进行参数敏感性分析和率定, 选出最敏感的 10 个模型参数。从 SWAT 模拟结果来看, 不论是率定期还是验证期, 模型都能较好地捕捉径流变化特征。率定期(1962~1966)与验证期(1967~1971), SWAT 水文模型对武隆站逐日流量模拟的纳什效率系数分别达到 0.80 和 0.79, 决定系数均在 0.8 以上(图 2)。

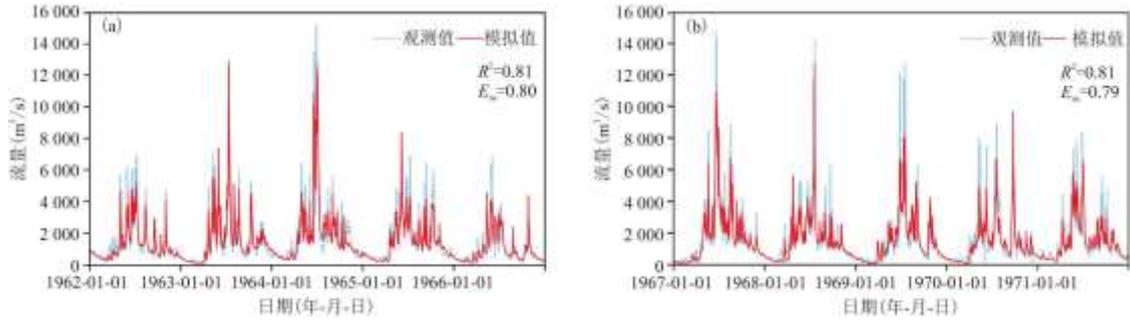


图 2 乌江流域率定期(a)和验证期(b)日流量观测值与模拟值比较

1.3.2 气候倾向率与显著性检验

气候倾向率用于表征气候变量随时间的变化规律。以 x_i 表示样本量为 n 的某一气候变量，以 t_i 表示样本对应的时间，则 x_i 与 t_i 之间的一元线性回归式为：

$$x_i = a + bt_i (i = 1, 2, \dots, n)$$

式中： a 为回归常数； b 为回归系数。 a 和 b 由最小二乘法估计得到，回归系数 $b \times 10$ 即气候倾向率。气候倾向率大于 0，表明变量随时间呈上升趋势，小于 0 为下降趋势。回归系数 b 的显著性用 t 分布进行检验，检验统计量构造如下：

$$t = \frac{b}{S(b)} \sim t(n-2)$$

式中： $S(b)$ 为 b 的样本标准差，对于给定的显著性水平 α ，若 $|t| > t_{\alpha/2}$ ，则回归系数通过检验。

2 结果与分析

2.1 GCMs 对乌江流域区域气候的模拟能力评估

气温、降水是影响径流变化的主要气候要素。气候模式对乌江流域气温、降水的模拟能力决定其是否适用于该流域。文中通过对比 1961~2018 年观测与模拟的气温、降水数据，评价气候模式的适用性(图 3)。

1961~2018 年乌江流域观测到的年平均气温为 15.2℃，变化倾向率为 0.12℃/10a；同期气候模式模拟结果为 15.0℃，变化速率为 0.18℃/10a，两者变化趋势均通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性检验。观测到的年降水量为 1130.9mm，气候模式模拟结果为 1057.7mm，二者均呈下降趋势，前者倾向率为 -9.7mm/10a，后者为 -24.5mm/10a(图 3)，均通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性检验。气候模式模拟的气温、降水略低于观测，相对偏差分别为 2.1%和 10.0%。气候模式可以描述流域气温、降水基本特征。

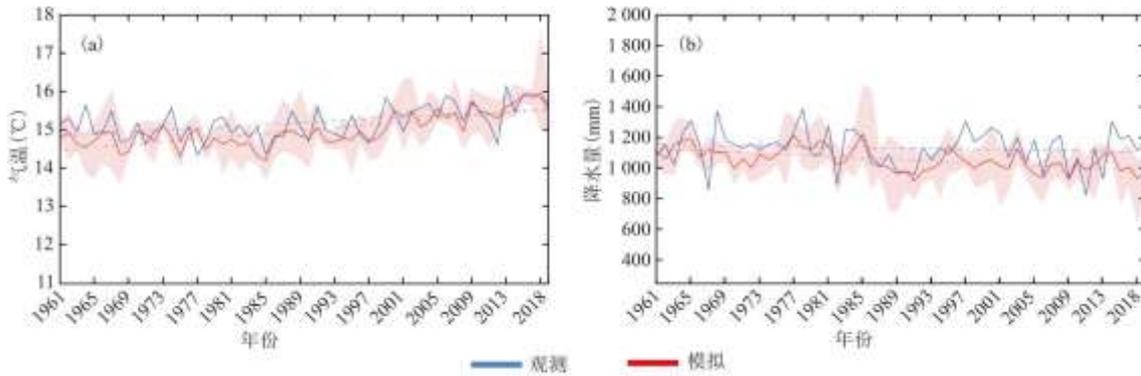


图3 乌江流域 1961~2018 年观测与模拟的气温(a)和降水(b)对比

注：阴影表示气候模式上下限.

2.2 气候变化特征

1861~2018 年, 乌江流域年平均气温为 14.9℃, 年平均气温上升趋势显著, 倾向率为 0.03℃/10a(图 4a); 多年平均降水量为 1119.3mm, 年降水量呈显著下降趋势, 倾向率为-10.9mm/10a(图 4b)。年平均气温与年降水量趋势均通过了 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验。

“自然”强迫下, 1861~2018 年, 乌江流域年平均气温为 14.8℃, 无明显变化趋势(图 4a); 年降水量为 1173.7mm, 呈微弱上升趋势, 倾向率为 1.9mm/10a(图 4b)。人类活动引起的气候变化与“自然”强迫条件相比, 年平均气温之间差异从 21 世纪初开始明显增大, 年降水之间的差异明显增大出现在 1980s 中后期。

2.3 气候变化对年径流的影响

人类活动引起的气候变化背景下, 1861~2018 年乌江流域气温上升, 降水量下降。根据 SWAT 模拟, 武隆站多年平均流量为 1297.7m³/s, 年平均流量呈显著下降趋势, 倾向率为-20.8m³/s/10a, 通过 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验。“自然”强迫下, 武隆站年平均流量为 1387.9m³/s, 1861~2018 年呈弱上升趋势, 倾向率为 0.12m³/s/10a(图 5)。

为了定量分析人类活动引起的气候变化对径流的影响, 本文将 1861~2018 年分为 1861~1890、1891~1920、1921~1950、1951~1980、1981~2018 五个时段, 分别计算“自然”强迫和“人为+自然”强迫下径流模拟结果的差。

相比“自然”强迫, 人类活动引起的气候变化导致 1861~1890 年乌江年平均流量有微弱上升, 但 1891 年以来呈下降趋势。1891~1920 年、1921~1950 年、1951~1980 年 3 个时期的年平均流量下降幅度不大且较接近; 1981~2018 年下降幅度最大, 达到 18.0%(图 6)。

2.4 气候变化对径流年内分布的影响

乌江流域武隆站径流年内分布呈现 6~11 月大, 12 月至次年 5 月小的特征。人类活动引起的气候变化背景下, 1861~2018 年各月平均流量均呈下降趋势, 其中 2~10 月平均流量下降趋势显著, 倾向率分别为-5.1、-6.7、-8.7、-17.8、-46.9、-51.3、-40.1、-26.4、-19.3m³/s/10a, 均通过 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验, 其余月份均不显著。流域夏秋两季平均流量大, 春冬两季平均流

量小，四季平均流量倾向率分别为-10.8、-46.1、-20.1和-5.9 $m^3/s/10a$ ，均呈显著下降趋势，通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性检验。

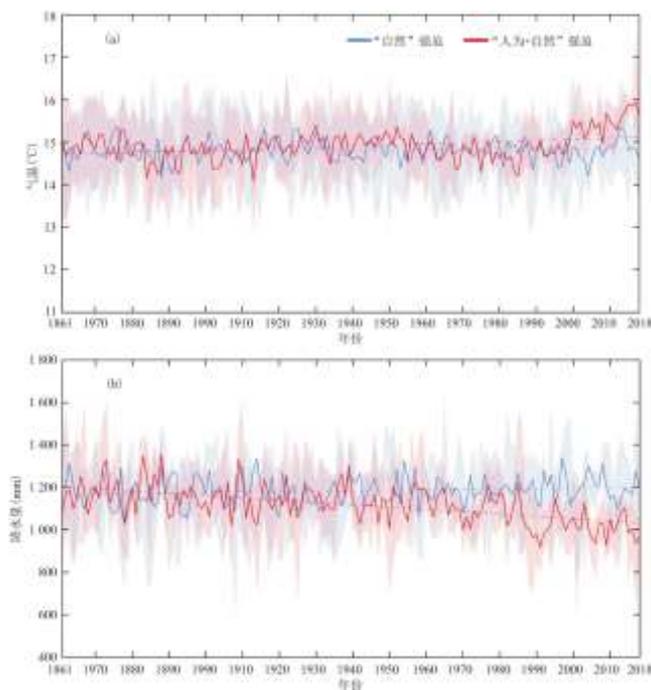


图 4 乌江流域 1861~2018 年的年平均气温 (a) 和年降水 (b)

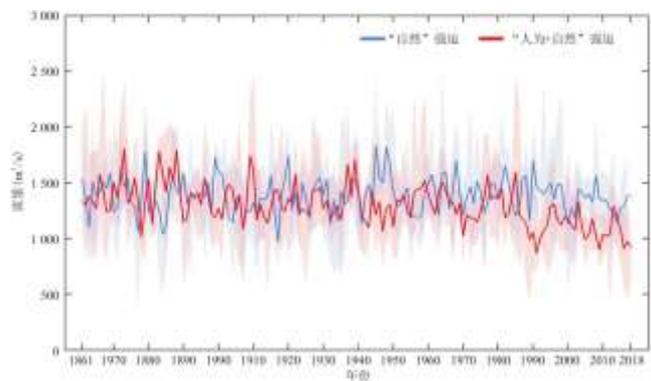


图 5 1861~2018 年“自然”强迫与“人为+自然”强迫下乌江流域年平均流量

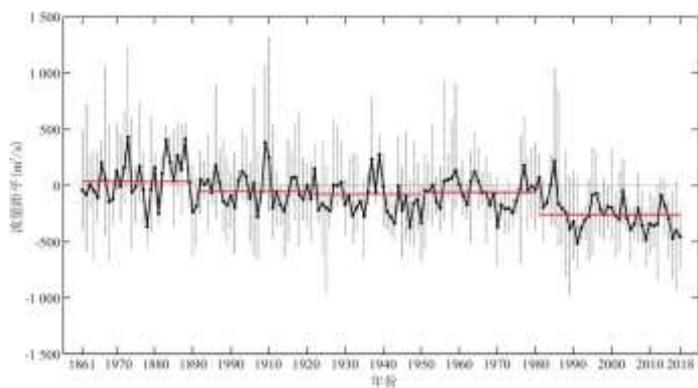


图 6 乌江流域 1861~2018 年人类活动引起的气候变化对年径流的影响

注：曲线为多模式平均；红线为多年均值；上下限表示模式间差异。

相比“自然”强迫，1861~2018 年人类活动引起的气候变化导致乌江流域逐月平均流量均有所下降。分期来看，1861~1890 年，除 5~7 月，其余月份平均流量均有所增加，变幅最大的月份是 10 月，达 12.7%，变幅最小的是 8 月，为 1.7%；1891~1920 年，4~7 月以外的月份平均流量均有所下降，12 月变幅最大，达 7.7%，7 月变幅最小，为 0.2%；1921~1950 年，4、5 月平均流量增加，其他月份平均流量减少，最大和最小变幅分别出现在 10 月和 4 月，为 13.9%和 0.4%；1951~1980 年，除 9 月、10 月、12 月平均流量有小幅增加(1.2%、1.2%、0.5%)外，其他月份均下降，最大变幅出现在 4 月，为 15.9%，12 月变幅最小；1981~2018 年，各月平均流量均下降，3 月降幅最大，5 月降幅最小，分别为 26.0%和 11.5%。1981~2018 年，人类活动引起的气候变化对径流产生的影响是 1861 年以来最大的，各月平均流量都出现较大幅度下降(图 7-8)，四季平均流量分别减少了 19.1%、16.0%、17.8%、23.1%。

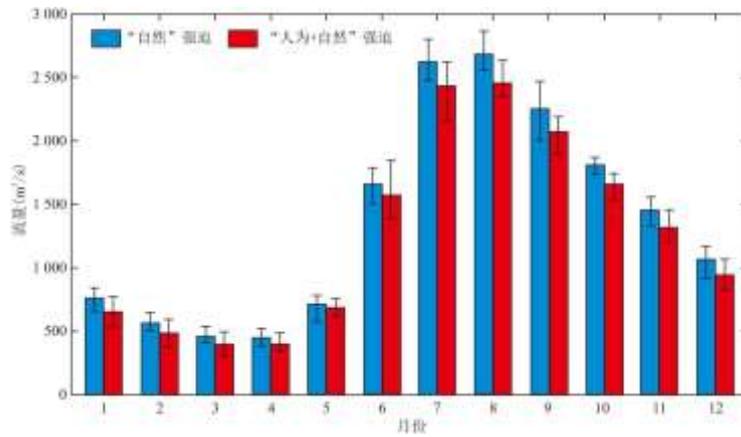


图 7 1861~2018 年“自然”强迫与“人为+自然”强迫下乌江流域逐月流量

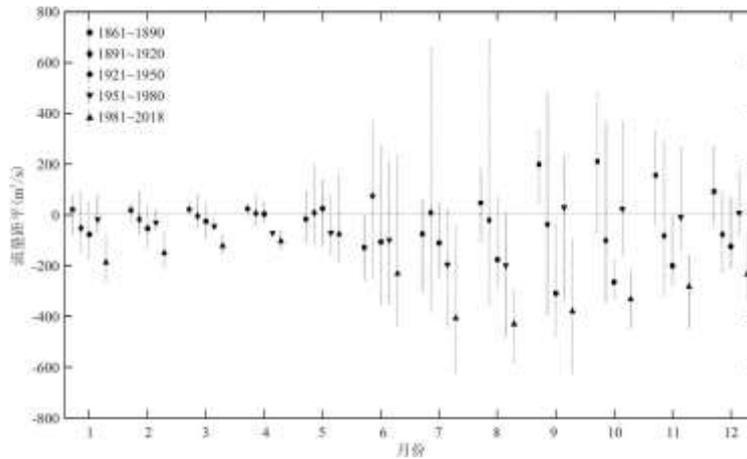


图 8 1861~2018 年人类活动引起的气候变化对乌江流域月径流的影响

2.5 气候变化对径流极值的影响

Q10 与 Q90 是用于研究极值流量的方法, 分别表示只有 10% 的流量大于该值(丰水极值流量)和有 90% 的流量大于该值(枯水极值流量)^[27]。人类活动引起的气候变化背景下, 1861~2018 年乌江流域多年平均丰水和枯水极值流量分别为 369.5 和 2727.3 m³/s, 均呈显著下降趋势, 通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性检验, 倾向率为 -7.6 和 -43.5 m³/s/10a。

“自然”强迫下, 枯水极值流量多年平均为 407.2 m³/s, 1861~2018 年呈不显著上升趋势, 倾向率为 2.5 m³/s/10a; 丰水极值流量平均为 2869.9 m³/s, 呈不显著下降趋势, 倾向率为 -9.5 m³/s/10a (图 9)。相对于“自然”强迫条件, 1861~2018 年人类活动引起的气候变化使枯水与丰水极值流量分别下降 9.3% 和 5.0%; 枯水极值流量在 1891 年后减少幅度逐渐增大, 1981~2018 年达到 24.6%; 丰水极值流量在 1921~1950、1981~2018 年减少幅度较大, 1981~2018 年达到 14.7% (图 10)。

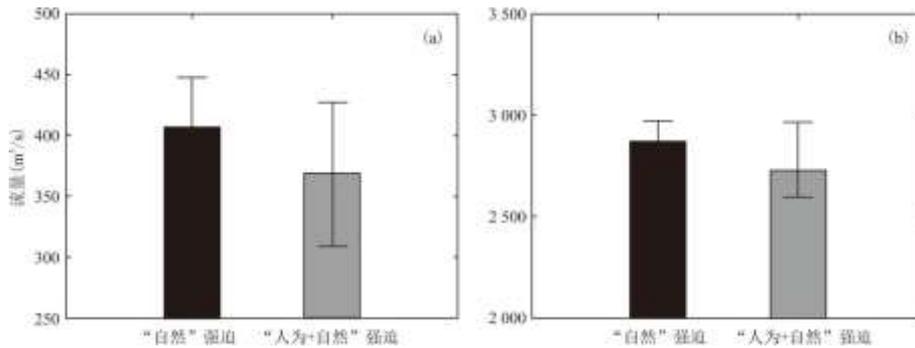


图 9 1861~2018 年“自然”强迫与“人为+自然”强迫下乌江流域枯水极值(a)和丰水极值(b)流量

3 结论与讨论

本文采用地面气象与水文观测数据, 校验了 SWAT 水文模型; 基于降尺度和订正处理的气候模式数据 (GFDL-ESM2M、HadGEM2-ES、IPSL-CM5A-LR、MIROC-ESM-CHEM), 分析了 1961 年以来乌江流域人类活动引起的气候变化及其对径流的影响, 主要结论如下:

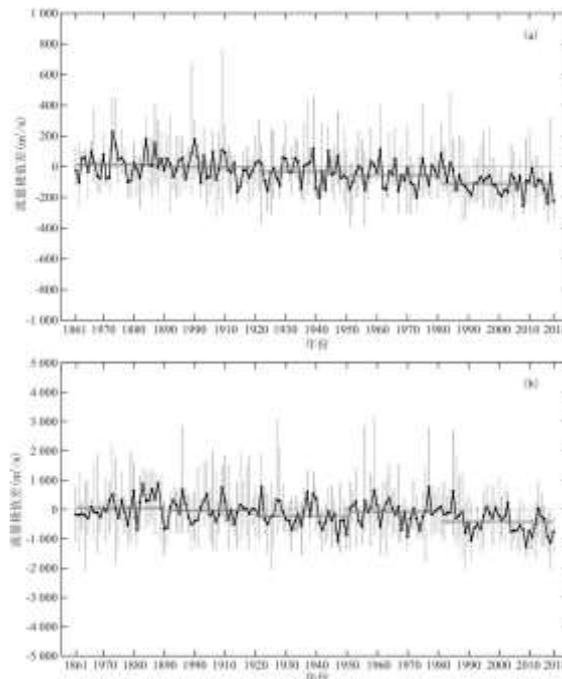


图 10 人类活动引起的气候变化对 1862~2018 年乌江流域枯水极值(a)和丰水极值(b)流量的影响

(1) 1861~2018 年, 乌江流域的气候变化趋势特征为: 气温不显著上升, 降水显著下降。流域年平均气温与降水的倾向率分别为 0.03 和 -10.9mm/10a。人类活动引起的气候变化与“自然”强迫条件相比, 年平均气温和年降水分别 21 世纪初和 1980s 中后期开始产生了明显差异。

(2) 气候变化背景下, 1861~2018 年乌江流域年平均流量和月平均流量均呈下降趋势, 年平均流量变化倾向率为 $-20.8\text{m}^3/\text{s}/10\text{a}$, 下降趋势显著; 从 1980s 中后期开始与“自然”强迫条件下的径流产生明显差异; 1981~2018 年, 人类活动引起的气候变化对乌江流域年和月平均流量减少的影响程度是 1861 年以来最大的, 相对于“自然”强迫条件下, 年平均流量减少 18%, 月平均流量减少 11.5%~26.0%, 四季平均流量分别减少了 19.1%、16.0%、17.8%、17.6%。

(3) 1861~2018 年, 乌江流域丰水极值流量和枯水极值流量总体呈显著下降趋势, 相对于“自然”强迫条件, 人类活动引起的气候变化影响下, 枯水极值流量和丰水极值流量的变化率分别为 9.3%和 5.0%。1981~2018 年, 极值流量下降幅度为 1861 年以来最大, 枯水极值流量达 24.6%, 丰水极值流量达 14.7%。

气候模式和水文模型相结合是开展径流对气候变化响应研究的重要方法。本文利用的全球气候模式虽然适用于乌江流域, 但不同模式之间在结构等方面的差异客观存在, 即使采用了集合平均, 结果仍存在不确定性; 同时, 水文模型对复杂的水文现象进行了简化, 无法完全模拟出流域的水文过程, 其参数化方案对径流模拟结果也会产生影响, 存在不确定性^[10, 28, 29]。在今后的研究中, 可以结合更多的气候模式和水文模型开展径流对气候变化的响应研究, 进一步增加研究结果的可靠性。另一方面, 除了人类活动引起的气候变化会对径流产生影响, 水库调节、水土保持措施等下垫面人类活动也会对径流产生较大影响, 也是亟需深入研究的方向。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis. IPCC working group I contribution to AR5[M]. Cambridge, UK, New York, USA: Cambridge University Press, 2013.
- [2] HUNTINGTON T G, WEISKEL P K, WOLOCK D M, et al. A new indicator framework for quantifying the intensity of the terrestrial water cycle[J]. Journal of Hydrology, 2018, 559: 361-372.
- [3] GERTEN D, ROST S, VON BLOH W, et al. Causes of change in 20th century global river discharge[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(20).
- [4] MILLIMAN J D, FARNSWORTH K L, JONES P D, et al. Climatic and anthropogenic factors affecting river discharge to the global ocean, 1951-2000[J]. Global and Planetary Change, 2008, 62(3-4): 187-194.
- [5] DAI A, QIAN T, TRENBERTH K E, et al. Changes in continental freshwater discharge from 1948 to 2004[J]. Journal of Climate, 2009, 22(10): 2773-2792.
- [6] 张建云, 章四龙, 王金星, 等. 近 50 年来中国六大流域年际径流变化趋势研究[J]. 水科学进展, 2007, 18(2): 230-234.
- [7] 黄金龙, 王艳君, 苏布达, 等. RCP4.5 情景下长江上游流域未来气候变化及其对径流的影响[J]. 气象, 2016, 42(5): 614-620.

-
- [8]LIU L L, DU J J, Documented changes in annual runoff and attribution since the 1950s within selected rivers in China[J], *Advances in Climate Change Research*, 2017, 8(1):37-47.
- [9]VETTER T, HUANG S, AICH V, et al. Multi-model climate impact assessment and intercomparison for three large-scale river basins on three continents[J]. *Earth System Dynamics*, 2015, 6(1):17-43.
- [10]SU B D, HUANG J L, ZENG X F, et al. Impacts of climate change on streamflow in the upper Yangtze River basin[J]. *Climatic Change*, 2017, 141(3):533-546.
- [11]LIU L L, JIANG T, XU H M, et al. Potential threats from variations of hydrological parameters to the Yellow River and Pearl River basins in China over the next 30 years[J]. *Water*, 2018, 10(7):883.
- [12]YUAN Z, YAN D, YANG Z, et al. Attribution assessment and projection of natural runoff change in the Yellow River Basin of China[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2018, 23(1):27-49.
- [13]GUSEV Y M, NASONOVA O N, KOVALEV E E, et al. Impact of possible climate changes on river runoff under different natural conditions[J]. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 2018, 379:293-300.
- [14]GAO C, SU B D, KRYSANOVA V, et al. A 439-year simulated daily discharge dataset (1861-2299) for the upper Yangtze River, China[J]. *Earth System Science Data*, 2020, 12(1):387-402.
- [15]秦年秀, 陈喜, 薛显武, 等. 气候变化对乌江流域水文水资源的影响[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(6):623-628.
- [16]邵骏, 范可旭, 邴建平, 等. 乌江干流年径流变化趋势及成因分析[J]. *水文*, 2012, 32(6):86-91, 20.
- [17]王艳君, 姜彤, 施雅风. 长江上游流域 1961-2000 年气候及径流变化趋势[J]. *冰川冻土*, 2005, (5):709-714.
- [18]夏军, 王渺林. 长江上游流域径流变化与分布式水文模拟[J]. *资源科学*, 2008, (7):962-967.
- [19]秦鹏程, 刘敏, 杜良敏, 等. 气候变化对长江上游径流影响预估[J]. *气候变化研究进展*, 2019, 15(4):405-415.
- [20]刘波, 陈刘强, 周森, 等. 长江上游重庆段径流变化归因分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(6):1333-1341.
- [21]中国水利百科全书第二版编辑委员会. *中国水利百科全书*[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [22]张蕾, 黄大鹏, 杨冰韵. RCP4.5 情景下中国人口对高温暴露度预估研究[J]. *地理研究*, 2016, 35(12):2238-2248.
- [23]KNUTTI R, FURRER R, TEBALDI C, et al. Challenges in combining projections from multiple climate models[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(10):2739-2758.
- [24]ARNOLD J G, WILLIAMS J R, SRINIVASAN R, et al. *SWAT-Soil & Water Assessment Tool*. USDA[J]. Agricultural Research Service, Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Temple, Texas, 1994.

-
- [25]张利平, 陈小凤, 张晓琳, 等. VIC 模型与 SWAT 模型在中小流域径流模拟中的对比研究[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(8):745-752.
- [26]夏智宏, 周月华, 许红梅. 基于 SWAT 模型的汉江流域水资源对气候变化的响应[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(2):158-163.
- [27]REMESAN R, HOLMAN I P. Effect of baseline meteorological data selection on hydrological modelling of climate change scenarios[J], Journal of Hydrology, 2015, 528:631-642.
- [28]CARVAJAL P E, ANANDARAJAH G, MULUGETTA Y, et al. Assessing uncertainty of climate change impacts on long-term hydropower generation using the CMIP5 ensemble:the case of Ecuador[J]. Climatic Change, 2017, 144(4):611-624.
- [29]IIZUMI T, TAKIKAWA H, HIRABAYASHI Y, et al. Contributions of different bias-correction methods and reference meteorological forcing data sets to uncertainty in projected temperature and precipitation extremes[J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres, 2017, 122(15):7800-7819.