

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.01.035; CSTR:32311.14.rswc.2025.01.035.

姬广兴, 刘智培, 高红凯, 等. 1961—2020 年赣江流域月尺度实际蒸发模拟及归因分析[J]. 水土保持研究, 2025, 32(1): 195-202.

Ji Guangxing, Liu Zhipei, Gao Hongkai, et al. Monthly scale actual evaporation simulation and attribution analysis in Gan River Basin from 1961 to 2020 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(1): 195-202.

# 1961—2020 年赣江流域月尺度实际蒸发模拟及归因分析

姬广兴<sup>1</sup>, 刘智培<sup>1</sup>, 高红凯<sup>2</sup>, 陈伟强<sup>1</sup>, 黄琚嫦<sup>1</sup>, 张亚丽<sup>1</sup>, 郭宇龙<sup>1</sup>, 陈轶楠<sup>1</sup>

(1.河南农业大学 资源与环境学院, 郑州 450046; 2.华东师范大学 地理科学学院, 上海 200241)

**摘要:** [目的]探究赣江流域月时间尺度实际蒸发的变化规律和分配特征以及不同因素对实际蒸发量的贡献量,为生态环境保护和水资源高效利用提供理论依据。[方法]基于赣江流域外洲水文站 1961—2020 年径流量数据,结合 Mann-Kendall 突变检验法和 Pettitt 突变点检验法确定径流突变年份。其次利用 ABCD 水文模拟赣江流域基准期和突变期径流变化过程,计算得出月尺度实际蒸发量。然后利用去趋势预置白趋势检验法(TFPW-MK)分析实际蒸发的变化趋势和年内分布特征。最后采用月尺度 Budyko 模型对实际蒸发量变化进行归因分析。[结果](1) 径流突变年份为 1991 年。(2) 赣江流域 2 月、3 月、4 月、6 月、9 月的实际蒸发量呈现上升趋势,其余月份实际蒸发为下降趋势。其中 2 月、3 月的实际蒸发量显著上升( $p < 0.05$ )。(3) 赣江流域月尺度实际蒸发量呈现“单峰型”分布,在 7 月附近达到最大值。(4) 气候变化会导致各月实际蒸发量的增加,人类活动会导致各月实际蒸发量减少。[结论]赣江流域实际蒸发量呈现先增大后减少的趋势,气候变化对实际蒸发量的贡献表现为正作用。人类活动对实际蒸发量变化表现为负作用。

**关键词:** 实际蒸发量变化; 气候变化; 人类活动; ABCD 模型; 月尺度 Budyko 模型

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)01-0195-08

## Monthly scale actual evaporation simulation and attribution analysis in Gan River Basin from 1961 to 2020

Ji Guangxing<sup>1</sup>, Liu Zhipei<sup>1</sup>, Gao Hongkai<sup>2</sup>, Chen Weiqiang<sup>1</sup>,  
Huang Junchang<sup>1</sup>, Zhang Yali<sup>1</sup>, Guo Yulong<sup>1</sup>, Chen Yinan<sup>1</sup>

(1.College of Resources and Environmental Sciences, Henan Agricultural University, Zhengzhou, Henan 450046, China; 2.School of Geographic Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to investigate the change rule and distribution characteristics of actual evaporation in Ganjiang River Basin on monthly time scale and the contribution of different factors to actual evaporation, and to provide theoretical basis for ecological environmental protection and efficient utilization of water resources. [Methods] Based on the runoff data of Waizhou hydrological station in Gan River Basin from 1961 to 2020, the abrupt year of runoff was determined by Mann-Kendall and Pettitt mutation point test methods. Secondly, for calculating monthly scale actual evaporation data, the ABCD hydrological model was employed to simulate the runoff change process during the base period and the mutation period. Next, the Mann-Kendall test with trend-free pre-whitening (TFPW-MK) was applied to examine the variation trend and intra-annual distribution characteristics of monthly scale actual evaporation.

收稿日期: 2023-12-07

修回日期: 2024-03-04

资助项目: 国家重点研发计划(2021YFD1700900); 国家自然科学基金(42122002, 42071081); 河南省科技攻关项目(222102320041); 河南省高校人文社会科学研究一般项目(2023-ZZJH-189); 河南农业大学拔尖人才项目(30501031)

第一作者: 姬广兴(1990—), 男, 河南商丘人, 博士, 讲师, 研究方向为变化环境下生态水文响应。E-mail: guangxingji@henau.edu.cn

通信作者: 陈伟强(1975—), 男, 河南安阳人, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为土地资源信息管理。E-mail: chwqgis@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

Finally, the monthly scale Budyko model was used to analyze the attribution of monthly scale actual evaporation changes. [Results] (1) The mutation year of runoff was 1991. (2) The actual evaporation in February, March, April, June and September showed an upward trend, and the actual evaporation in the remaining months showed a downward trend. Among them, actual evaporation in February and March increased significantly ( $p < 0.05$ ). (3) The actual evaporation in the Gan River Basin showed a single peak distribution, and the actual evaporation reached to the maximum near July. (4) Climate change had led to an increase in monthly scale actual evaporation. Human activities had led to a decrease in monthly scale actual evaporation. [Conclusion] The actual evapotranspiration in the Ganjiang River Basin showed a trend of increasing and then decreasing, and the contribution of climate change to the actual evapotranspiration showed a positive effect. The contribution of climate change to actual evapotranspiration was positive, while the contribution of human activities to actual evapotranspiration was negative.

**Keywords:** actual evaporation changes; climate change; human activities; ABCD hydrological model; monthly Budyko model

在全球气候变化的趋势下,水循环会受到一定的影响,因此水资源存有安全问题<sup>[1-2]</sup>。近年来气温的逐渐升高,导致水循环加速,进而对实际蒸发造成影响<sup>[3]</sup>。人类活动的日益加剧,会对流域下垫面变化造成影响<sup>[4]</sup>。实际蒸发是水循环的关键环节,也是关系人类社会进步和自然环境变化的重要资源<sup>[5]</sup>。因此开展实际蒸发量的相关研究对生态环境保护和水资源高效利用有重要意义。实际蒸发变化会受多方面因素影响。学者们围绕实际蒸发变化特征和归因分析展开研究。赵勇等<sup>[6]</sup>采用 Choudhury-Yang 公式对 2000—2014 年泾河流域蒸发变化进行研究分析,并量化了气候和下垫面对实际蒸发的贡献。结果表明实际蒸发呈现下降趋势,且降水是影响实际蒸发变化的主要因素,贡献率为 76.8%。翁升恒等<sup>[7]</sup>对 1981—2019 年淮河流域实际蒸发时空分布特征进行了估算,发现整体上实际蒸发为极显著上升趋势,空间上实际蒸发在中东部和南部较高,并利用敏感度系数和贡献率法对其归因分析,叶面积指数是导致春夏秋实际蒸发变化的主要因素,而气温是导致冬季实际蒸发变化的主要因素。余欣等<sup>[8]</sup>探究塔里木河流域(1970—2017)主要绿洲实际蒸发的变化规律,发现年均实际蒸发表现为东多西少,且呈现出显著增加的趋势,并对实际蒸发变化的原因进行了探究,地表净辐射对策勒等绿洲实际蒸发变化的影响最大,气温对阿克苏等绿洲实际蒸发的影响最大。叶林媛等<sup>[9]</sup>探索了长江流域 1960—2019 年不同时段蒸发皿蒸发量变化的成因,并分析了实际蒸发的变化特征,发现蒸发皿蒸发和实际蒸发在 1990 年前后均有先减后增的趋势,但较少研究分析不同因素对月尺度实际蒸发量的影响程度。

赣江是长江主要的支流之一,该流域的水文要素

会受到全球气候变化的影响<sup>[10]</sup>。气候因素和人为因素以不同的方式影响流域的水循环<sup>[11]</sup>。譬如城镇化建设等人为因素,导致下垫面发生变化,进而影响水循环进程<sup>[12]</sup>。因此对赣江流域水文要素的演变规律及驱动因素开展研究有一定的必要性。许多学者在该方面进行了相关的研究。郭强等<sup>[1]</sup>分析了土地利用变化对水文过程时空分布特点的影响。刘卫林等<sup>[5]</sup>采用 Mann-kendall 检验和滑动 t 检验等方法分析了赣江流域(1953—2017)水文气象要素变化特征,发现赣江流域径流呈现不显著的增加趋势。金晶等<sup>[13]</sup>对赣江流域(1950—2018)下游的径流变化特征进行研究,结果发现径流年内分配不均且年际变化相对稳定,年径流出现不显著的增加趋势。韩会明等<sup>[10]</sup>采用累积距平等方法,对赣江流域(1960—2018)降水的趋势、突变等进行分析研究,结果表明赣江流域降水的突变年份为 1991 年和 2002 年。但较少研究分析赣江流域不同因素对月尺度实际蒸发量的影响程度。

因此,本文致力于分析赣江流域实际蒸发量的月尺度变化特征,定量计算不同因子对月尺度实际蒸发量的贡献量。(1)结合 Mann-Kendall(M-K)突变法和 Pettitt 突变法确定径流量的突变年份。(2)通过 ABCD 水文模型模拟月时间尺度径流变化,并计算出实际蒸发量。(3)采用去趋势预置白趋势检验法(TFPW-MK)分析赣江流域月实际蒸发量的变化趋势特征。(4)分析赣江流域实际蒸发量的年内分布特征。(5)应用月尺度 Budyko 假设法对外洲水文站实际蒸发量进行归因分析。

## 1 资料与研究方法

### 1.1 研究区概况

赣江位于长江中下游南岸,地理坐标为东经

113°45′—114°45′, 北纬 25°55′—26°35′, 以山地丘陵为主体, 占流域面积的 64.7%。该流域是亚热带湿润季风气候, 气候温和, 雨量充足<sup>[14-15]</sup>。流域地跨多省, 干流天然落差为 937 m。由于南北地势不同, 南北年平均气温相差 3℃左右。该流域降水主要集中在 4—6 月, 年均降水量为 1 400~1 800 mm<sup>[16]</sup>。

## 1.2 数据来源

外洲水文站是赣江主要控制站, 实测时间长并且资料代表性强, 因此, 本研究选择外洲站作为赣江流域的代表站。外洲水文站 1961—2020 年的月尺度径流量数据来源于《中国水文统计年鉴》、长江水利委员会以及国家地球系统科学数据中心。从中国气象数据网获取 1961—2020 年气象数据, 选取赣江流域内及周边空间上分布均匀的 34 个气象站点。应用泰森多边形法计算得到降水量, 并通过彭曼公式得出参考蒸发量。

## 1.3 研究方法

1.3.1 突变检验方法 M-K 突变检验, 样本不需要遵循一定的分布, 不受少数异常值的影响, 易于计算<sup>[17]</sup>。本研究中利用该方法确定径流发生突变的时间。若 UF 和 UB 曲线在置信区间内相交, 则交点对应的时间即为突变时间<sup>[12]</sup>。

Pettitt 突变检验是一种非参数检验法, 是基于极值统计量的方法, 原理是基于时间序列中极值出现的位置变化来检测突变点。其优点是灵活性高, 不需要对数据进行任何假设或者模型假定。首先对序列中所有可能的割点进行检测, 将序列分为两组, 并将这些割点按照时间的顺序进行排列。计算每个割点前后的乘积秩之和, 得到突变点的指数。再对所有的可能突变点指数进行秩次排序, 得到一个秩序序列。求出给定突变点分割时产生的秩次和与最大可能秩次和之间的差, 得到一个绝对秩次差值。对绝对秩次差值进行显著性检验, 以确定突变点是否具有统计显著性<sup>[18]</sup>。

1.3.2 ABCD 水文模型 土壤含水层中的水量平衡方程可表示为<sup>[19]</sup>:

$$P_t - ET_t - DR_t - GR_t = S_t - S_{t-1} \quad (1)$$

式中:  $P_t$  为月降雨量;  $ET_t$  为实际月蒸发量(mm);  $DR_t$  为地表直接径流量(mm);  $GR_t$  代表地下水补给量(mm);  $S_t$  和  $S_{t-1}$  代表当前月和上月土壤含水量(mm)。

可能蒸发量  $Y_t$  是指能够以蒸发的形式离开流域的最大水量, 而有效水量  $W_t$  是可能蒸发量与土壤含水层出流量之和, 可表示为<sup>[20]</sup>:

$$W_t = S_{t+1} + P_t = S_t + ET_t + GR_t + DR_t \quad (2)$$

$$Y_t = \frac{W_t + b}{2a} - \sqrt{\left(\frac{W_t + b}{2a}\right)^2 - \frac{bW_t}{a}} \quad (3)$$

式中:  $a$  为土壤完全饱和前形成径流的概率;  $b$  为不

饱和含水层储水量的上限。

ABCD 模型假定由于蒸散发导致土壤含水量  $S$  减少的速度与潜在蒸发量之间的比例  $S_t/b$  为<sup>[21]</sup>:

$$\frac{dS_t}{dt} = -PET_t \frac{ST}{b} \quad (4)$$

$$S_t = Y_t \exp\left(\frac{-PET_t}{b}\right) \quad (5)$$

$$PET_t = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + r \frac{900}{T + 273} U_2 (e_a - e_b)}{\Delta + r(1 + 0.34U_2)} \quad (6)$$

式中:  $PET_t$  代表潜在蒸发量;  $\Delta$  为饱和蒸气压随温度变化曲线的斜率(kPa/℃);  $U_2$  表示 2 m 处的风速(m/s);  $e_a$  和  $e_b$  分别表示空气温度下的饱和蒸气压(kPa)和实际空气的蒸气压(kPa)。对于地下水层分量, 水量平衡的方程为:

$$G_t + GD_t = G_{t-1} + GR_t \quad (7)$$

式中:  $GD_t$  为地下径流;  $GR_t$  为地下水补给量;  $G_t$  和  $G_{t-1}$  分别为当前月和上月的地下水储量。地下水补给量  $GR_t$  和地下径流  $GD_t$  可分别表示为:

$$GR_t = c(W_t - Y_t) \quad (8)$$

$$GD_t = dG_t \quad (9)$$

式中:  $c$  为土壤含水层补给地下水量的比例;  $d$  为地下水形成出流的速度;  $DR_t + GD_t$  为地表径流与地下径流的总和。

实测径流与模拟径流的均方误差或 Nash 系数可作为模型参数优选的目标函数<sup>[22]</sup>。本文选择 Nash 系数作为模型参数优选的目标函数。NSE 表示为:

$$NSE = 1 - \frac{MSE}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_i^{obs} - \mu_o)^2} \quad (10)$$

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i^{pred} - Q_i^{obs})^2}{N} \quad (11)$$

式中:  $N$  为样本系列长度;  $Q_i^{pred}$  为模拟径流深(mm);  $Q_i^{obs}$  为实测径流深(mm);  $\mu_o$  为实测径流的平均值(mm)。

1.3.3 TFPW-MK 趋势检验法 TFPW-MK 趋势检验法的优势是在趋势检验前对实际蒸发时间序列进行预置白处理, 从而降低序列的高度自相关性。因此采用 TFPW-MK 检验方法分析实际蒸发时间序列数据的变化趋势。该方法在不削弱时间序列趋势性的前提下, 提高了时间序列趋势检验的准确性, 这是一种更加合理的检验方法。

1.3.4 月尺度 Budyko 模型 月尺度 Budyko 模型采用 Turc-Pike 形式的表达式为<sup>[23]</sup>。

$$\frac{E}{P - \Delta S} = \left[ 1 + \left( \frac{E_p}{P - \Delta S} - \varphi \right)^{-\omega} \right]^{\frac{1}{\omega}} \quad (12)$$

式中： $\frac{E_p}{P-\Delta S}$  为干旱指数； $\frac{E}{P-\Delta S}$  为蒸发率； $\varphi$  为干旱指数的下界； $\Delta S$  表示土壤水蓄变量； $\omega$  表示下垫面的特征参数。

基准期和变化期的实际蒸发分别为  $E_1, E_2$ 。假设变化期只受到气候因素的影响，其实际蒸发量为  $E_2'^{[23-24]}$ ， $E_h$  是人类活动对实际蒸发变化的贡献量。 $E_c$  是气候变化对实际蒸发变化的贡献量。

$$\Delta E = E_2 - E_1 \tag{13}$$

$$E_h = E_2 - E_2' \tag{14}$$

$$E_c = \Delta E - E_h \tag{15}$$

2 结果与分析

2.1 突变分析

采用 M-K 突变检验方法识别 1961—2020 年赣江流域径流序列的突变情况，如图 1 所示，图中 UK 和 UF 两条曲线的交点较多（如 1970 年、1990 年、1991 年等），且交点都在 0.05 显著水平线范围内，这说明这些交点所对应的年份均可能是赣江流域 1961—2020 年径流突变年。所以将结合 Pettitt 突变检验方法进一步确定出径流突变年份。

图 2 是采用 Pettitt 突变检验法分析赣江流域径流序列的结果。Pettitt 可以检测序列中最显著的突变点，其检测结果只有一个，相对于 M-K 突变检验更加准确。如图 2 所示，1991 年的统计值大于最大阈值，所以 1991 年被视为最显著突变点。结合上述的 M-K 突变检验结果可确定，赣江流域径流突变年份为 1991 年。刘卫林等<sup>[5]</sup> 结合累积距平法和滑动 T 检验法确定外洲水文站径流在 1991 年前后发生突变；游海林等<sup>[25]</sup> 结合 M-K 检验和滑动 T 检验方法，确定在 1991 年为赣江径流的突变年；段红鑫等<sup>[26]</sup> 采用 Pettitt 分析法确定外洲站年径流在 1991 年前后发生突变，上述研究结果与本文是一致的。这可能由

于 1990 年建成的万安水库对径流的调控作用，致使外洲站径流在 1991 年发生突变。

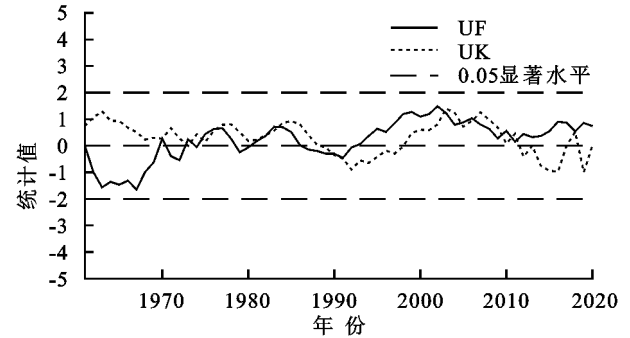


图 1 赣江流域径流 M-K 突变检验

Fig. 1 M-K mutation test of runoff in Gan River Basin

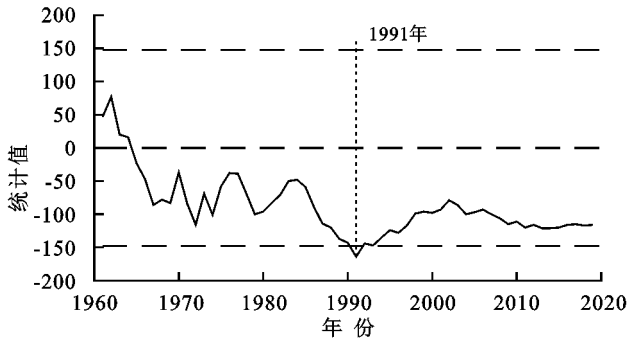


图 2 赣江流域径流 Pettitt 突变检验

Fig. 2 Pettitt mutation test of runoff in Gan River Basin

2.2 ABCD 水文模型

ABCD 模型用于模拟基准期(1961—1991 年)和突变期(1992—2020 年)径流变化过程，并得出实际蒸发量。表 1 是 ABCD 模型模拟径流的参数和 Nash 系数。基准期及突变期的率定、验证期的 Nash 系数均在 0.79 及以上，表明模拟结果具有较高的精度。图 3 和图 4 是基准期和突变期的径流和模拟径流的比较结果。图中率定期和验证期的径流和模拟径流拟合度较高。因此，由 ABCD 水文模型模拟得出的月尺度实际蒸发数值较为准确，可用于进行后续分析。

表 1 ABCD 模型模拟径流参数和 Nash 系数

Table 1 Simulation of runoff parameters by ABCD model and Nash coefficient

时期	a	b	c	d	时期	NSE
基准期	0.90	398.23	0.25	0.30	率定期(1961—1980 年)	0.84
					验证期(1981—1991 年)	0.88
突变期	0.84	359.54	0.34	0.25	率定期(1992—2005 年)	0.79
					验证期(2006—2020 年)	0.80

2.3 变化趋势分析

本文采用 TFPW-MK 趋势检验法对整个时间序列(1961—2020 年)各月实际蒸发量的变化趋势进行分析(表 2)。从  $\beta$  系数来看，2 月、3 月、4 月、6 月、9 月的实际蒸发趋势变化斜率均大于零，表明这些月份实际蒸发呈现上升趋势。其余月份  $\beta$  系数均小于零，

则表明实际蒸发呈现下降趋势。其中 2 月、3 月达到 0.05 显著水平( $|Z| > 1.96$ )，说明 2 月、3 月实际蒸发量有显著的上升趋势，其余月份的变化趋势均为不显著。可能赣江流域 2—3 月逐渐步入汛期，降水较多，且气温回暖，因此蒸发量有上升的趋势。6 月正值主汛期，9 月易产生台风型暴雨，降水量大，地表径流量



大,因此蒸发量会有所上升。赣江流域气候温和,人类活动较为频繁,生活生产用水比较多,且地表的水库建设等会影响下渗和蒸发,所以可能会存在人类因素导致蒸发量减少。

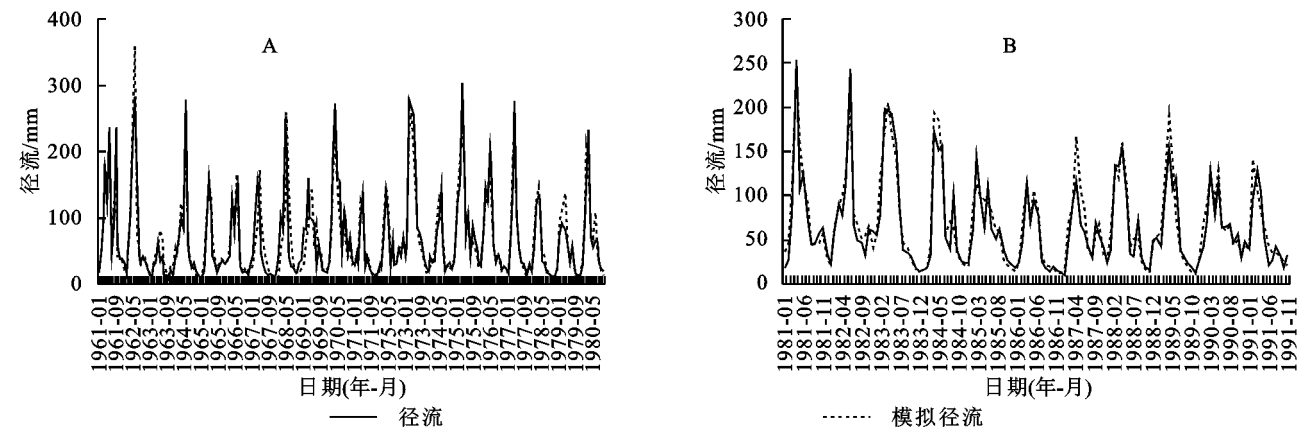


图 3 率定期(A)和验证期(B)观测径流和模拟径流的比较(基准期)

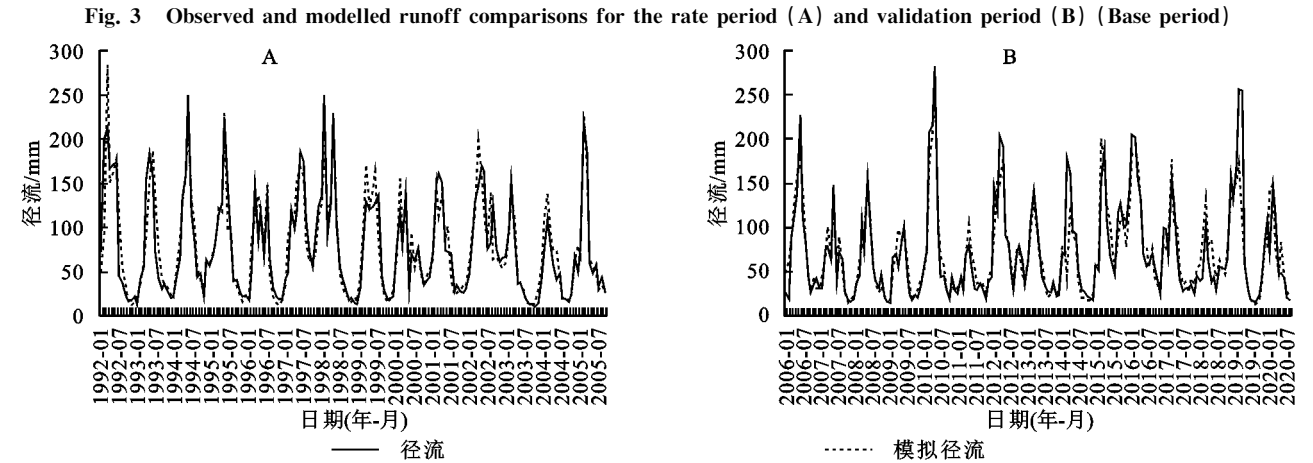


图 4 率定期(A)和验证期(B)观测径流和模拟径流的比较(突变期)

Fig. 4 Observed and modelled runoff comparisons for the rate period (A) and validation period (B) (Mutation period)

表 2 实际蒸发变化趋势检验结果				
Table 2 Actual evaporation trend test results				
月份	变化速率 $\beta/$ ( $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$ )	$Z$	显著 水平	检验 结果
1 月	-0.009	-0.379	—	无显著趋势
2 月	0.054	2.223	0.05	上升趋势
3 月	0.088	2.550	0.05	上升趋势
4 月	0.016	0.863	—	无显著趋势
5 月	-0.060	-1.164	—	无显著趋势
6 月	0.006	0.497	—	无显著趋势
7 月	-0.055	-1.125	—	无显著趋势
8 月	-0.026	-0.327	—	无显著趋势
9 月	0.050	1.687	—	无显著趋势
10 月	-0.045	-0.798	—	无显著趋势
11 月	-0.010	-0.052	—	无显著趋势
12 月	-0.004	0.092	—	无显著趋势

注:“—”代表未发现。

2.4 年内变化特征

由图 5 可知,实际蒸发量皆呈现为先增加再减少的“单峰型”分布。1—2 月实际蒸发量处于低值。3

月开始,实际蒸发量逐渐增加。在 7 月左右达到实际蒸发量最大值。然后 8—9 月下降明显,直至 12 月再次达到低值。这与赣江流域汛期在 3—8 月,主汛期在 4—6 月基本相符合,且各年代实际蒸发量相差较小,变化幅度较小。

2.5 月尺度实际蒸发变化归因分析

结合 ABCD 模型模拟得到的基准期(1961—1991 年)赣江流域各月实际蒸发量,拟合基准期月尺度 Budyko 曲线,并量化气候变化和人类活动对变化期(1992—2020 年)实际蒸发变化的影响。表 3 是基准期拟合 Budyko 曲线的参数值及结果,从表中可以看出月尺度的确定性系数均达到 0.9 以上,且相对误差均较小,因此拟合 Budyko 曲线精度达到要求,结果较好。

基于 ABCD 模型的模拟结果和基准期拟合的 Budyko 曲线参数值,计算出气候变化和人类活动对月实际蒸发量变化的贡献量(表 4)。相较于基准期(1961—1991 年),运用月尺度 Budyko 方法做突变期(1992—2020 年)实际蒸发的归因分析。从表中可以看出,气候变化对各月实际蒸发量变化的影响程度一

致,均导致各月实际蒸发量有所增长。人类活动对各月实际蒸发量变化的影响程度一致,均导致各月实际蒸发量有所下降。随着全球气候变暖,赣江流域气温逐渐升高并且雨水充沛,促进植被的生长,导致植被覆盖度增加,进而影响实际蒸发增加。由于人类更加重视生态修复,并出台赣江流域生态环境保护措施,使得土地退化、水土流失等问题有效改善,同样导致植被覆盖率增加。从归因结果来看,在赣江流域气候因素对实际蒸发量增加的贡献要大于人类因素,因此导致植被增加的主要因素是气候变化,而人类活动是次要因素。刘明霞<sup>[27]</sup>、黄端<sup>[28]</sup>等研究证明影响赣江流域植被生长的主要因素是气候。因此,气候的变化会影响植被的增加,进而使得实际蒸发增加。随着城市化的加快和人口的增加,赣江流域的人类活动较为

表 3 基准期 Budyko 模型拟合参数及结果

Table 3 Fitting parameters and results of Budyko model in base period				
时间	参数		评价指标	
尺度	$\omega$	$\phi$	$R^2$	相对误差
1 月	0.978	0.049	0.994	-0.0010
2 月	1.087	0.068	0.985	-0.0017
3 月	1.277	0.050	0.997	-0.0002
4 月	1.377	0.048	0.999	-0.0008
5 月	1.374	0.040	0.999	0.0005
6 月	1.552	0.065	0.998	-0.0006
7 月	1.772	0.166	0.988	0.0010
8 月	1.649	0.135	0.961	0.0014
9 月	1.368	0.099	0.997	-0.0022
10 月	1.228	0.088	0.991	0.0005
11 月	1.010	0.002	0.995	0.0009
12 月	0.997	0.054	0.993	0.0018

### 3 结 论

本文基于赣江流域外洲水文站 1961—2020 年的逐月实测径流数据,首先应用 M-K 突变检验和 Pettitt 突变检验确定径流突变年份。然后利用 ABCD 水文模型计算出赣江流域的实际蒸发量。随后采用 TFPW-MK 趋势检验法分析了月尺度实际蒸发的变化趋势,并分析了实际蒸发量的年内分布特征。其次最后利用月尺度 Budyko 模型定量计算出不同因子对月尺度实际蒸发变化的贡献量。得出以下结论。

(1) M-K 突变检验和 Pettitt 检验方法均表明径流在 1991 年存在显著的突变特征。

(2) ABCD 水文模型能够精确模拟基准期和突变期的径流变化过程。基准期的率定期和验证期的 Nash 系数分别为 0.84,0.88,突变期的率定期和验证

频繁,人类主要影响为居民日常生活用水、工厂企业生产用水等,较少部分用于农业灌溉,这些人类行为均会导致径流减少,从而影响到实际蒸发量的减少。

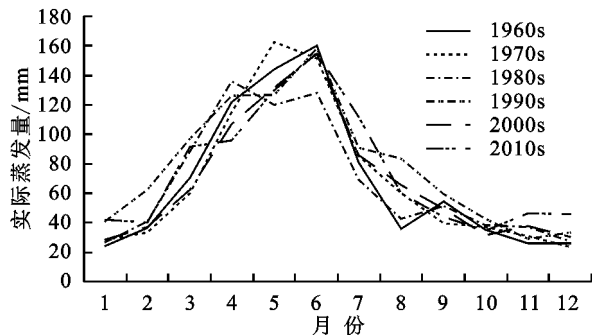


图 5 赣江流域年实际蒸发量分布特征

Fig. 5 Distribution characteristics of annual actual evaporation in Gan River Basin

表 4 月尺度实际蒸发量归因分析

Table 4 Attribution analysis of actual evaporation on monthly scale				
时间	实际蒸发量/mm		实际蒸发归因/mm	
尺度	基准期	突变期	气候变化	人类活动
1 月	18.85	18.92	1.53	-1.46
2 月	22.56	24.69	3.60	-1.48
3 月	39.22	41.61	4.98	-2.58
4 月	58.47	58.85	3.84	-3.47
5 月	76.28	72.97	0.02	-3.33
6 月	82.76	81.66	1.59	-2.69
7 月	94.13	93.14	1.02	-2.01
8 月	81.59	80.74	2.34	-3.19
9 月	56.46	57.13	3.85	-3.18
10 月	41.19	39.12	1.35	-3.42
11 月	26.60	25.99	2.28	-2.89
12 月	19.91	19.46	2.05	-2.50

期的 Nash 系数分别为 0.79,0.81。

(3) 赣江流域 2 月、3 月、4 月、6 月、9 月的实际蒸发量呈现为上升趋势,其余月份实际蒸发为下降趋势。其中 2 月、3 月在 0.05 水平上显著上升。

(4) 赣江流域年实际蒸发量呈现先增加后减少的“单峰型”分布,实际蒸发在 7 月附近达到最大值。

(5) 气候变化对实际蒸发量的贡献表现为正作用。人类活动对实际蒸发量变化表现为负作用。

本文仍然存在一些不足。首先是本文只使用了外洲水文站的数据,并不能代表整个赣江流域径流的实际状况。其次是 ABCD 模型模拟中,基准期和突变期径流的拟合度较高,计算出的实际蒸发精度较高,但是仍然会存在一些误差。最后是本文将降水、潜在蒸发和土壤水储量归为气候因素,其余因素皆为人类活动。这其中会忽略其他气候因子对实际蒸发

的影响。并且没有考虑到气候因素和人类活动之间的联系,及二者共同对实际蒸发的作用,所以我们会在后续工作中综合考虑气候因素和人类活动之间的相互作用,更加精确地计算对实际蒸发量的贡献量。

#### 参考文献(References):

- [1] 郭强,叶许春,刘佳,等.土地利用变化对流域水文过程时空分异的影响:以赣江流域为例[J].长江流域资源与环境,2020,29(12):2747-2759.
- Guo Q, Ye X C, Liu J, et al. Impact of land use change on spatio-temporal differentiation of watershed hydrological processes: A case study of Ganjiang River Basin [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020,29(12):2747-2759.
- [2] 王敏霞,张学珍,荆文龙.基于 BCC-CSM1-1 模拟的过去千年黄河中上游径流百年尺度变化的归因分析[J].地理科学进展,2022,41(7):1226-1238.
- Wang M X, Zhang X Z, Jing W L. Attribution analysis of centennial scale changes of runoff in the Yellow River Basin over the past millennium based on BCC-CSM1-1 simulation[J]. Progress in Geography, 2022,41(7):1226-1238.
- [3] 马柱国,符淙斌,周天军,等.黄河流域气候与水文变化的现状及思考[J].中国科学院院刊,2020,35(1):52-60.
- Ma Z G, Fu C B, Zhou T J, et al. Status and ponder of climate and hydrology changes in the Yellow River Basin [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020,35(1):52-60.
- [4] 杨林,赵广举,穆兴民,等.基于 Budyko 假设的洮河与大夏河径流变化归因识别[J].生态学报,2021,41(21):8421-8429.
- Yang L, Zhao G J, Mu X M, et al. Attribution of runoff variations in Tao River and Daxia River based on Budyko Hypothesis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(21):8421-8429.
- [5] 刘卫林,华惠玲,张景嵘,等.基于 Budyko 假设的赣江流域径流变化归因识别[J].人民珠江,2022,43(9):90-97.
- Liu W L, Hua H L, Zhang J R, et al. Attribution identification of runoff variation in Ganjiang River Basin based on budyko hypothesis[J]. Pearl River, 2022,43(9):90-97.
- [6] 赵勇,何国华,李海红,等.基于 Choudhury-Yang 公式的泾河流域蒸发归因分析[J].南水北调与水利科技,2019,17(1):8-14.
- Zhao Y, He G H, Li H H, et al. Attribution analysis on evapotranspiration changes in the Jinghe River Basin based on Choudhury-Yang equation[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019,17(1):8-14.
- [7] 翁升恒,张方敏,卢燕宇,等.淮河流域蒸散发时空变化与归因分析[J].生态学报,2022,42(16):6718-6730.
- Weng S H, Zhang F M, Lu Y Y, et al. Spatiotemporal changes and attribution analysis of evapotranspiration in the Huai River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(16):6718-6730.
- [8] 余欣,杨汉波,吕华芳,等.基于广义蒸发互补理论的塔里木河流域绿洲实际蒸散发变化及其归因分析[J].水利水电技术,2020,51(6):1-9.
- Yu X, Yang H B, Lyu H F, et al. Generalized evapotranspiration-complementarity theory-based analysis on variation of actual evapotranspiration in oases of Tarim River Basin and its attribution[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020,51(6):1-9.
- [9] 叶林媛,鲁汉,秦淑静,等.长江流域 1960—2019 年蒸发皿蒸发和实际蒸散发演变规律[J].水科学进展,2022,33(5):718-729.
- Ye L Y, Lu H, Qin S J, et al. Changes in pan evaporation and actual evapotranspiration of the Yangtze River Basin during 1960—2019 [J]. Advances in Water Science, 2022,33(5):718-729.
- [10] 韩会明,孙军红,简鸿福,等.变化环境下气候因素对赣江径流的影响[J].长江科学院院报,2023,40(4):44-50.
- Han H M, Sun J H, Jian H F, et al. Influence of climate factors on runoff in Ganjiang River under changing environment [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2023,40(4):44-50.
- [11] 李敏敏,邹磊,夏军,等.Budyko 框架下白河流域径流演变及其归因分析[J].长江流域资源与环境,2023,32(4):774-782.
- Li M X, Zou L, Xia J, et al. Analysis of runoff change and its attribution in the Baihe River Basin under the budyko framework[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023,32(4):774-782.
- [12] 严伟卿,刘冀,赵心睿,等.基于 Budyko 假设的金溪流域径流变化归因分析[J].水土保持研究,2023,30(3):121-126.
- Yan W Q, Liu J, Zhao X R, et al. Attribution of runoff variation in Jinxi Basin based on budyko hypothesis[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(3):121-126.
- [13] 金晶,汪红洲.赣江下游径流变化特征分析[J].中国水运,2021(12):133-135.
- Jin J, Wang H Z. Analysis of runoff variation characteristics in the lower reaches of Ganjiang River [J]. China Water Transport, 2021(12):133-135.
- [14] 温天福,熊立华,江聪,等.基于时变矩 BMA 方法的赣江流域年输沙量变化归因分析[J].农业工程学报,2021,37(7):140-149.

- Wen T F, Xiong L H, Jiang C, et al. Attribution analysis of annual sediment load of Ganjiang River Basin using BMA based on time-varying moment models[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(7): 140-149.
- [15] 鲁向晖, 张海娜, 白桦, 等. 赣江流域 1986—2015 年降雨侵蚀力时空变化特征[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(10): 51-58.
- Lu X H, Zhang H N, Bai H, et al. Spatial and temporal variations in rainfall erosivity during 1986-2015 in the Ganjiang River Basin[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(10): 51-58.
- [16] 胡强, 王姣, 刘颖, 等. 水库建设对赣江流域水沙情势的影响[J]. 人民长江, 2021, 52(4): 1-5.
- Hu Q, Wang J, Liu Y, et al. Effect of reservoir construction on runoff and sediment characteristics in Ganjiang River[J]. Yangtze River, 2021, 52(4): 1-5.
- [17] 易浪, 孙颖, 尹少华, 等. 2000—2019 年长江流域植被覆盖时空演化及其驱动因素[J]. 生态学报, 2023, 43(2): 798-811.
- Yi L, Sun Y, Yin S H, et al. Spatial-temporal variations of vegetation coverage and its driving factors in the Yangtze River Basin from 2000 to 2019[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(2): 798-811.
- [18] 王永文, 卢怡诗, 刘裕辉. 1961—2015 年赣江流域极端降水时空变化特征分析[J]. 南昌工程学院学报, 2019, 36(6): 50-56.
- Wang Y W, Lu Y S, Liu Y H. Temporal and spatial characteristics of extreme precipitation in Ganjiang River drainage basin from 1961 to 2015[J]. Journal of Nanchang Institute of Technology, 2019, 36(6): 50-56.
- [19] 吴贞晖, 梅亚东, 朱迪, 等. 基于拓展敏感性方法和 ABCD 模型的流域枯季径流归因分析[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(6): 1366-1373.
- Wu Z H, Mei Y D, Zhu D, et al. Dry season runoff attribution in basin based on extended hydrological sensitivity method and ABCD model[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(6): 1366-1373.
- [20] Ji G X, Wu L Y, Wang L D, et al. Attribution analysis of seasonal runoff in the source region of the Yellow River using seasonal budyko hypothesis[J]. Land, 2021, 10(5): 542.
- [21] Guo W X, Hong F T, Yang H, et al. Quantitative evaluation of runoff variation and its driving forces based on multi-scale separation framework[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2022, 43: 101183.
- [22] 庄稼成, 星寅聪, 李艳忠, 等. 基于改进 abcd 模型的黄河源区径流变化与归因[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(5): 953-965.
- Zhuang J C, Xing Y C, Li Y Z, et al. Attribution analysis of runoff change based on the *abcd* model coupled with the snowmelt module in the source region of the Yellow River[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(5): 953-965.
- [23] 王喆, 李昱, 丁伟, 等. 基于扩展 Budyko 假设的季节径流变化归因分析[J]. 水力发电学报, 2017, 36(8): 22-33.
- Wang Z, Li Y, Ding W, et al. Attribution analysis on seasonal river runoff based on extended Budyko hypothesis[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(8): 22-33.
- [24] 季芳, 范林峰, 匡星星, 等. 青藏高原多年冻土退化对蒸散发的影响[J]. 水科学进展, 2022, 33(3): 390-400.
- Ji F, Fan L F, Kuang X X, et al. Role of permafrost degradation on evapotranspiration on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(3): 390-400.
- [25] 游海林, 吴永明, 杜冰雪, 等. 1950—2016 年赣江径流量变化特征及其影响因素分析[J]. 水利水电技术, 2019, 50(7): 48-54.
- You H L, Wu Y M, Du B X, et al. Analysis on annual runoff variation characteristics of Ganjiang River and its influence factors from 1950—2016[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(7): 48-54.
- [26] 段红鑫, 孔志岗, 叶许春, 等. 1960 年以来赣江流域生态径流变异机制及生态效应研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(12): 178-188.
- Duan H X, Kong Z G, Ye X Q, et al. Study on variation mechanism and ecological effect of eco-flows in the Ganjiang River Basin since 1960[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(12): 178-188.
- [27] 刘明霞, 刘友存, 陈明, 等. 2000—2018 年赣江上游植被覆盖度时空演化及其对气候变化的响应[J]. 水土保持通报, 2020, 40(5): 284-290.
- Liu M X, Liu Y C, Chen M, et al. Spatiotemporal evolution of vegetation coverage and its response to climate change in upper reaches of Ganjiang River Basin during 2000—2018[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(5): 284-290.
- [28] 黄端, 甘家亮, 胡辉, 等. 赣江流域植被 NPP 时空演变及其驱动因子研究[J]. 测绘科学, 2023, 48(6): 119-130.
- Huang D, Gan J L, Hu H, et al. Temporal and spatial evolution of NPP and the impact of driving factors in the Ganjiang River Basin[J]. Science of Surveying and Mapping, 2023, 48(6): 119-130.