

## 人类活动对鄱阳湖流域 1959-2022 年水文干旱演变的影响\*

姚仕明<sup>1, 2\*\*</sup>, 姚立强<sup>1, 2</sup>

(1. 长江水利委员会长江科学院, 武汉 430010)

(2. 流域水资源与生态环境科学湖北省重点实验室, 武汉 430010)

**摘要:** 为定量评估人类活动对鄱阳湖流域水文干旱特征的影响, 基于 1959-2022 年流域内气象水文站点的实测数据, 分析降水、气温、蒸发及径流序列的年际变化趋势。采用双累积曲线法, 绘制鄱阳湖五大流域分区的累积年降水量~径流深关系曲线, 根据曲线斜率变化情况, 结合突变点检验, 确定人类活动影响的基准期和变化期。采用两参数月水量平衡模型, 依据各阶段月降水、蒸发和径流实测数据, 分阶段率定模型参数, 并利用纳什效率系数、相关系数及水量平衡误差检验模拟效果。通过对基准期、变化期模拟月径流深的还原、还原计算及其相对差值分析, 量化气候变化、人类活动对径流的影响。以单月标准化径流指数 (SRI) 为干旱指标, 运用游程理论识别变化期的干旱事件, 对比分析参数还原前后的年平均累积干旱烈度、单次干旱最大烈度及干旱次数等特征。结果显示, 总体上人类活动减少了流域的径流深, 且对枯水期影响更为显著。空间上, 以抚河和饶河流域受影响最为明显, 年平均径流深较基准期分别减少 8.5%、9.2%, 枯水期径流深减少 12.0%、12.3%。变化期鄱阳湖流域水文干旱频次和烈度较基准期整体增加, 年均干旱次数、年均干旱烈度、单次干旱最大烈度分别增加约 21.3%、55.4%和 24.3%。该研究可为鄱阳湖流域干旱趋势的长期预测提供参考。

**关键词:** 水文干旱; 鄱阳湖流域; 人类活动影响; 月水量平衡模型; 双累积曲线

## Influence of human activities on hydrologic drought characteristics in Lake Poyang Basin, 1959-2022

YAO Shiming<sup>1, 2\*\*</sup>, YAO Liqiang<sup>1, 2</sup>

(1: Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, P.R. China)

(2: Hubei Provincial Key Laboratory of Basin Water Resources and Ecological Environmental Sciences, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, P.R.China)

**Abstract:** The present article employs an analytical approach to quantitatively evaluate the impact of human activities on the changes of hydrologic drought characteristics in the Lake Poyang Basin. To this end, the article undertakes an inter-annual variation trend analysis of precipitation, temperature, evaporation and runoff from 1959 to 2022, according to the data of meteorological and hydrologic stations in the basin. The relationship curve between cumulative annual precipitation and runoff in the five watershed divisions of Lake Poyang is derived using the double cumulative curve method. The reference period and change period affected by human activities are then divided based on this curve, in combination with the mutation point test. The calibration of the parameters of the two-parameter monthly water balance model is achieved through the utilization of measured data on precipitation, evaporation and runoff for each period. The subsequent testing of the simulation results employs the Nash efficiency coefficient, correlation coefficient and water balance error as performance indicators. The simulation of the reduction and reconstruction of monthly runoff during the reference and change periods was undertaken in

\* 2025-01-13 收稿; 2025-04-24 收修改稿。

国家自然科学基金委-中华人民共和国水利部-中国长江三峡集团有限公司长江水科学研究联合基金 (U2240224)、江西省技术创新引导类计划项目 (2023KSG01005) 联合资助。

\*\* 通信作者。E-mail: yzshymq@163.com。

order to obtain an understanding of the impact of climate change and human activities on runoff. The SRI (Severe Drought Index) was used as the hydrological drought index, and drought events during the change period were identified through run length theory. The characteristics of annual average cumulative drought intensity, the maximum severity of a single drought, and drought frequency before and after parameter reduction were compared. The results show that human activities have generally reduced the runoff depth in the basin, with more significant impacts on the dry season. Spatially, the impacts on the Fuhe River and Raohe River basins are the most obvious, with the annual average runoff depth and the runoff depth during the dry season decreasing by 8.5%, 9.2%, 12.0%, and 12.3% respectively. The frequency and severity of hydrological droughts in the Lake Poyang Basin during the change period have generally increased. The average annual number of droughts, the average annual drought severity, and the maximum severity of a single drought have increased by approximately 21.3%, 55.4%, and 24.3% respectively compared with the reference period. The research can provide a reference for the long-term prediction of the drought trend in the Lake Poyang Basin.

**Key words:** hydrologic drought; Lake Poyang basin; impact of human activities; monthly water balance model; double cumulative curve

近几十年来, 气候变化和高强度人类活动对水文条件及干旱变化特征影响愈加显著<sup>[1-4]</sup>, 致使水文序列一致性及干旱频次发生改变。气候变化直接作用于降水与蒸发, 而人类活动则通过水资源开发利用、水利工程建设、河道整治工程等方式, 直接改变下垫面及水文条件, 进而间接影响蒸发量、降水量以及它们与径流深的响应关系。同时, 人类活动还通过改变水资源的供需平衡关系, 对径流变化过程及水文干旱阈值产生影响。干旱对社会经济的影响, 主要表现在降水短缺引起的农作物缺水、河道径流减少和水位下降、水库蓄水不足等方面, 进而带来社会经济系统的供需失衡问题<sup>[5]</sup>。研究人类活动对于干旱演变特征的影响, 定量区分气候变化、人类活动对于干旱特征因子的影响程度, 有助于从宏观和长期视角评估水文干旱, 支撑水文干旱预警和风险管控。

鄱阳湖流域作为我国第一大淡水湖, 是长江中下游重要的调蓄性湖泊, 经湖口与长江相通, 根据相关文献研究结论, 鄱阳湖主要入湖河流的水位及径流不仅受流域内气候及人类活动影响, 还受到上游三峡水库蓄水后江湖蓄泄关系变化带来的影响<sup>[6-9]</sup>。由于人类活动影响径流涉及的因素较多, 包括人口分布、产业布局、水利工程建设、河道整治等, 因此人类活动对水文干旱的作用机理较为复杂, 目前针对鄱阳湖流域控制站的径流演变进行了一定的研究, 然而更多关注径流深、水位等特征的变化<sup>[6-8,12,25]</sup>, 对于人类活动影响下的干旱特征变化研究较少。

目前, 在人类活动对水文干旱影响的研究方法方面, 主要从人类活动改变气候因素、改变河流水文情势两个方面, 从宏观尺度和流域尺度, 通过相似流域对比、观测数据对比、时间序列分析以及水文模型情景模拟等方法<sup>[10]</sup>, 研究人类活动影响下的干旱特征变化。薛联青等<sup>[11]</sup>研究了人类活动对干旱传播时间的影响, 得出水利工程建设通过调节径流, 能够延长气象干旱向水文干旱演变的时间, 进而减轻水文干旱程度。曹宇贤等<sup>[12]</sup>利用神经网络模型和情景分析方法, 定量计算了人类活动对鄱阳湖流域生态径流变化的影响。在干旱的水文序列选取方面, 主要针对河道月平均径流深、湖泊的月平均水位进行分析<sup>[13-15]</sup>。在水文序列诊断方面, 主要采用降水-径流双累积曲线法、M-K 检验、Pettitt 检验等, 划定人类活动影响的基准期和变化期<sup>[16]</sup>。本文将气候变化和人类活动单独考虑, 即降水、蒸发变化作为气候变化要素, 降水-径流响应关系变化作为人类活动要素, 采用两参数月水量平衡模型作为径流模拟的分析方法, 该模型具有模拟效果好、参数少及实用性强等优势, 与双累积曲线法、游程理论识别干旱法相结合, 通过不同情景下的径流模拟, 可定量区分气候变化与人类活动对径流和干旱特征的影响程度。

## 1 研究区概况

鄱阳湖承纳赣江、抚河、信江、饶河、修水等来水, 经调蓄后由湖口注入长江, 是一个过水型、吞吐型、季节性的湖泊。2003 年以来, 受鄱阳湖水系入湖径流量减少、湖区入江水道采砂以及三峡水库蓄水等多种因素影响, 鄱阳湖枯水出现了时间提前、水位偏低、持续时间延长等现象, 流域主要水系的径流过

程及干旱特征也发生变化，期间典型干旱年份包括：2003、2007、2009、2011、2013、2018、2021、2022年等<sup>[17-18]</sup>，其中2003年流域内遭遇了五十年不遇的大旱，旱灾发生早、范围广、持续时间长，给农业生产造成极大困难，经济损失严重。2007年赣江南昌站出现历史性低水位，出现水厂取水困难和区域性停水现象。2021年9月受异常热干气候影响，流域内降水减少、蒸发增加，赣江、饶河、修水等部分水系支流出现历史性低水位。2022年鄱阳湖流域发生历史极端高温干旱，鄱阳湖湖区水位及入湖径流经历了汛期反枯、枯期极枯的严峻考验。

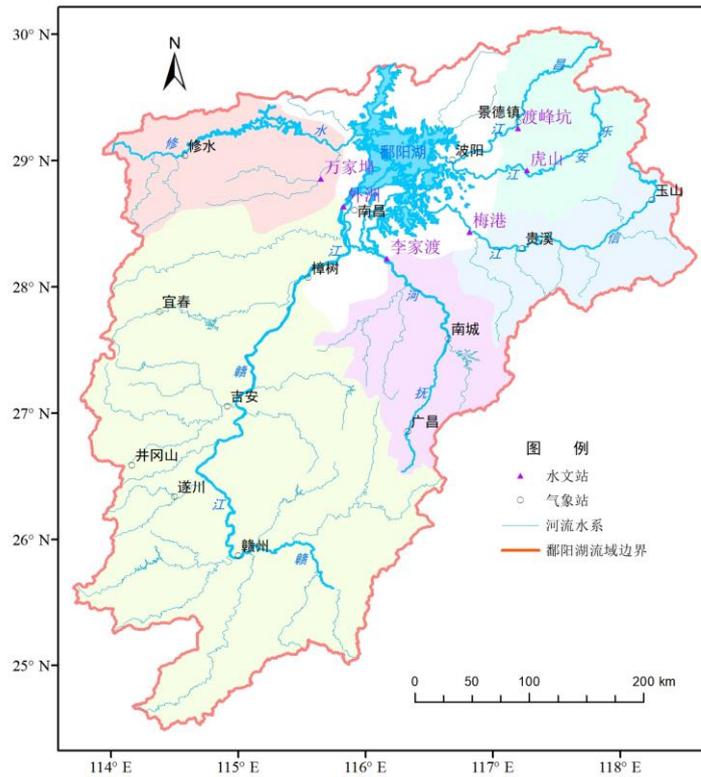


图1 研究区水系及气象水文站点分布图

Fig.1 Distribution map of river systems and meteorological - hydrological stations in the study area

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源

本文研究所需的数据资料，主要包括气象、水文和统计调查三大类，其中气象资料为鄱阳湖流域内14个国家气象站点1959-2022年逐日降水、气温、太阳辐射、风速等数据(通过彭曼公式计算潜在蒸散发)，水文资料为鄱阳湖流域控制性水文站1959-2022年逐日平均径流、水位数据，统计调查资料为历史水旱灾害公报及普查成果、水资源及气候公报、社会经济资料等，详见表1。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 基于两参数月水量平衡模型的径流模拟

##### (1) 年径流序列的突变点检验

采用双累积曲线法，根据年降水序列、年径流序列的累积变化特征及其相关性、曲线斜率，判断径流序列的突变年份点，突变点以前作为人类活动影响较小的基准期，突变点以后作为人类活动影响较大的变化期。双累积曲线法在气象水文要素一致性分析或突变检验中，具有简单、直观的特点<sup>[16]</sup>，同时有助于定量区分气候变化和人类活动的影响程度<sup>[19,20]</sup>。基于降水-径流序列的双累积曲线法，将年降水量、年径流

深的连续累积值，分别绘制在直角坐标系的 x 轴和 y 轴，由累积点得到连续曲线，当曲线的斜率发生明显趋势性改变时，变化对应的年份即认为突变年份，前后序列可分别作为基准期和变化期。当转折点变化不明显时，可结合常见的 Pettitt 检验等方法对突变点进行识别。

表 1 主要基础资料名称及数据来源  
Tab.1 The main basic data and their sources

类型	资料名称	数据来源
气象资料	鄱阳湖流域内 14 个国家气象站点 1959-2022 年逐日降水、气温数据、太阳辐射、风速等数据（赣州、遂川、井冈山、广昌、吉安、南城、宜春、樟树、贵溪、南昌、玉山、波阳、修水、景德镇）	中国气象科学数据共享服务网（网址： <a href="http://data.cma.cn">http://data.cma.cn</a> ）
水文资料	鄱阳湖流域控制性水文站 1959-2022 年逐日平均径流、水位数据（赣江外洲、抚河李家渡、信江梅港、饶河虎山、渡峰坑、修水万家埠）	江西省水利厅
统计调查资料	历史水旱灾害公报及普查成果、水资源及气候公报、社会经济资料等	江西省水利厅、江西省气象局（中国水旱灾害公报、江西省气候公报、江西省水资源公报、江西省统计年鉴、江西省水旱灾害风险普查成果）

设  $P_i$  为鄱阳湖流域各分区的年降水量， $R_i$  为流域控制性水文站的年径流深， $i$  为年份序号，则可以得到  $P_i$  和  $R_i$  序列的累积值  $\Sigma P_i$ 、 $\Sigma R_i$ ，点绘后根据突变点可得到基准期和变化期的线性回归函数：

$$\sum R_{1i} = a_1 \sum P_{1i} + b_1$$

$$\sum R_{2i} = a_2 \sum P_{2i} + b_2$$

式中， $\Sigma R_{1i}$ 、 $\Sigma P_{1i}$ 、 $a_1$ 、 $b_1$  分别为基准期的累积年径流深、累积年降水量和线性回归参数； $\Sigma R_{2i}$ 、 $\Sigma P_{2i}$ 、 $a_2$ 、 $b_2$  分别为变化期的累积年径流深、累积年降水量和线性回归参数。

### (2) 两参数月水量平衡模型

两参数月水量平衡模型以水量平衡原理、经验公式为基础，广泛应用于变化环境对于流域水文条件的影响研究中<sup>[21,22]</sup>，其模型基本原理(图 2)和主要公式如下：

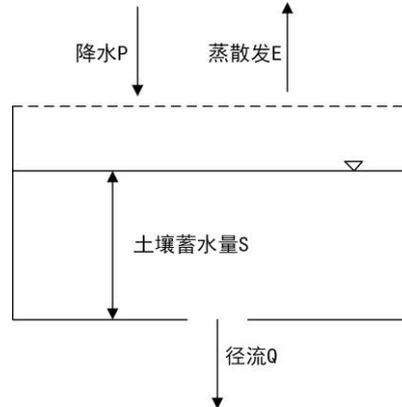


图 2 两参数月水量平衡模型基本原理示意图

Fig.2 The basic principle diagram of the two-parameter monthly water balance model

流域的月实际蒸散发采用以下经验公式进行计算，其中  $E_t$  为流域月实际蒸散发，mm； $C$  为无量纲参数，综合反映降水和蒸发变化情况，取值范围一般为 0.4~2； $\tanh()$  为双曲正切函数； $EP_t$  为月潜在蒸散发； $P_t$  为月降水量。

$$E_t = C \times EP_t \times \tanh(P_t / EP_t)$$

假定月径流量为土壤蓄水量的双曲正切函数，则月径流量可由下式计算得到：

$$Q_t = S_t \times \tanh(S_t / SC)$$

式中，SC 为流域最大蓄水能力，St 为土壤净蓄水量(mm)。

根据水量平衡原理，得到土壤蓄水量的时间变化方程： $S_t = S_{t-1} + P_t - E_t - Q_t$

将此式代入即可得到：

$$Q_t = (S_{t-1} + P_t - E_t - Q_t) \times \tanh((S_{t-1} + P_t - E_t - Q_t) / SC)$$

### (3) 模型参数率定、检验及径流模拟方法

针对所划分的基准期、变化期，利用不同阶段的实测月降水、月潜在蒸散发、月径流数据作为输入序列，基于给定的参数区间范围，以最小化相对误差为目标函数，进行参数率定。针对率定的参数，通过纳什效率系数、相关系数、水量平衡误差等指标对率定结果进行检验，当检验指标未达理想水平时，可改变参数率定区间范围，使得模拟的最终各项指标达到最优状态。

### (4) 气候变化、人类活动及其叠加作用对径流影响的分析方法

从基准期到变化期，鄱阳湖流域各分区的径流均值可能发生变化，其原因包括：人类活动引起的下垫面条件变化以及水利工程调蓄、区间耗水变化等；气候变化引起的降水、蒸散发、太阳辐射、气温等变化；其他因素（如：参数误差、叠加效应等）。本文分别对同一气候序列下的模型参数改变、同一模型参数下的气候序列改变进行计算，用于表征人类活动、气候变化对径流的影响作用，另外分析气候变化与人类活动叠加影响下的综合效应。

表 2 气候变化、人类活动对径流影响的分析方法

Tab.2 The analytical methods for the impact of climate change and human activities on runoff

序号	输入序列	模型参数	备注
1	基准期降水、蒸散发、径流	基准期参数	
2	基准期降水、蒸散发、径流	变化期参数	模拟结果④-①或③-②表示气候变化影响作用；模拟结果③-④或②-①表示人类活动影响作用；模拟结果③-①表示气候变化、人类活动的叠加影响作用
3	变化期降水、蒸散发、径流	变化期参数	
4	变化期降水、蒸散发、径流	基准期参数	

## 2.2.2 水文干旱评价及特征识别

为定量比较基准期、变化期不同模拟情景下水文干旱特征的变化，首先选取适宜的干旱指数，反映月尺度径流变化引起的干旱程度；在此基础上，通过干旱特征识别方法，深入探究干旱发生起止时间、干旱次数、干旱累积及最大烈度等变化特征。

### (1) 干旱指数选取

对于河道型水源而言，水文干旱主要体现在河道径流、河道水位两个方面。由于本文选取的两参数月水量平衡模型，主要建立降水、蒸发与河道径流之间的关系，因此针对径流要素，选择目前常用的标准化径流指数（SRI）作为水文干旱指数。

### (2) 基于游程理论的干旱特征识别

游程理论作为时间序列分析的方法，目前广泛应用于干旱特征识别中<sup>[23]</sup>。根据该方法，通过给定干旱阈值，可分析得到干旱事件发生的起止时间、烈度、频率等，另外可实现小干旱过程的合并、不同时间尺度的干旱累积特征分析。本文采用干旱多阈值法识别标准<sup>[23]</sup>，即：当干旱指标 SRI 连续处于特定状态时认定为干旱事件，采用的阈值  $R_0$ 、 $R_1$ 、 $R_2$  分别为 0、-0.5、-1。当  $SRI \leq R_1$  时待定为干旱，若 SRI 历时仅 1 个月且大于  $R_2$ ，则判定为非干旱事件。小干旱事件合并原则为：当两次干旱事件间隔为 1 个月，若间隔期所对应的 SRI 小于  $R_0$ ，则将两次干旱事件合并为一次，反之为两次独立的干旱事件。

## 3 结果分析

### 3.1 气象水文要素变化特征

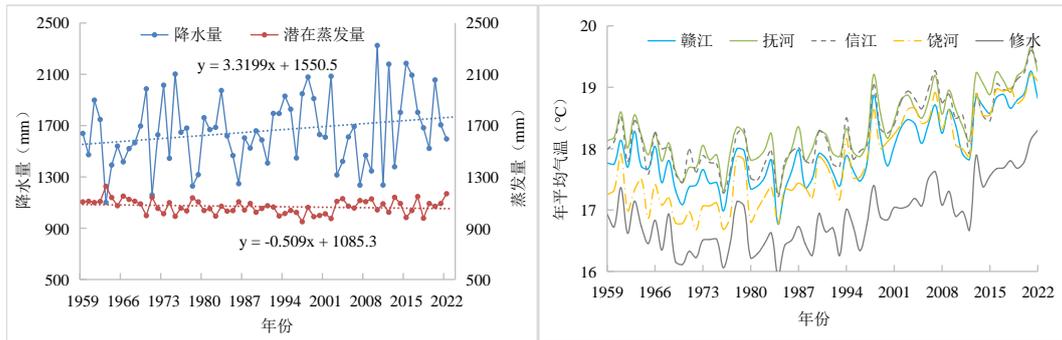
根据鄱阳湖流域内 14 个国家气象站点 1959-2022 年逐日降水、气温、风速、太阳辐射等气象数据，

利用泰森多边形法、Penman 公式，统计各站点、鄱阳湖流域及各分区的年尺度降水量、潜在蒸发量、平均气温，其中赣江、抚河、信江、修水流域分区的径流深分别采用外洲站、李家渡站、梅港站、万家埠站的实测值，饶河流域分区径流序列采用乐安江虎山站、昌江渡峰坑站实测数据的叠加值。各流域分区对应的气象站点分别为：赣江（赣州、遂川、井冈山、吉安、宜春、樟树）、抚河（广昌、南城）、饶河（景德镇）、信江（贵溪、玉山）、修水（修水）。

由图 3 可以看出，年降水量、年潜在蒸发量分别呈现一定的增加、减少趋势，但 Mann-Kendall 检验的统计量  $p$  分别为 0.114、0.190，说明变化趋势不显著。对于年平均气温序列而言，鄱阳湖各流域分区均通过  $p < 0.01$  的显著性检验，说明气温增加趋势十分显著。根据相关文献分析结论<sup>[24]</sup>，鄱阳湖流域蒸发量下降趋势是多种因素的共同结果，在气温呈上升趋势的背景下，太阳净辐射和风速的下降起主要作用。

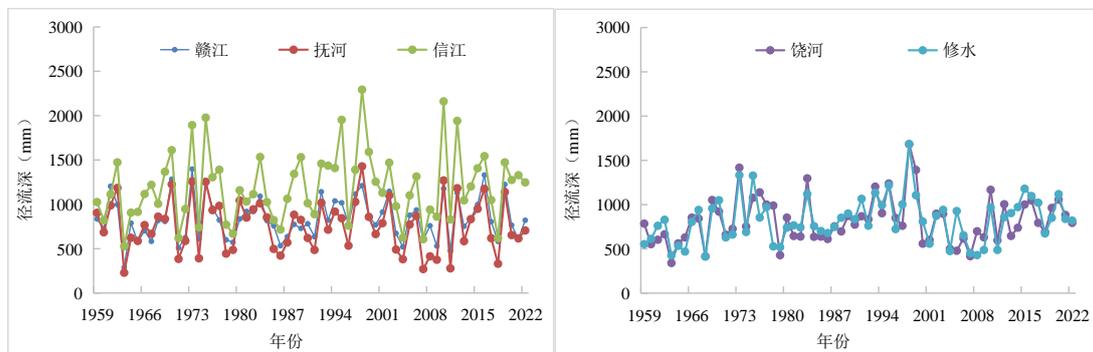
对于径流深而言，1959-2022 年鄱阳湖五河控制性水文站的年际径流存在丰枯波动变化(图 4)，与降水存在较强的相关关系，然而整体上无显著增加或减少趋势（均未通过  $p < 0.05$  的显著性检验），信江流域年平均径流深最高，赣江、抚河、饶河和修水年平均径流深较为接近。采用双累积曲线，检验降水-径流关系发生转变的时刻，划分基准期和变化期。分赣江、抚河、信江、饶河、修水五大流域分区，分别绘制累积年降水量、累积年径流深的关系曲线（图 5），其中降水采用各流域分区站点的面平均降水量，径流深采用控制性水文站点的实测径流数据。

由图 5 和表 3 可以看出，各流域分区双累积曲线均在 2003 年前后，发生相对明显的趋势转折，因此将本次分析采用的序列划分为两个阶段，即：基准期：1959~2002 年，作为天然径流时段；变化期：2003~2022 年，作为受人类活动影响的径流阶段（表 3）。



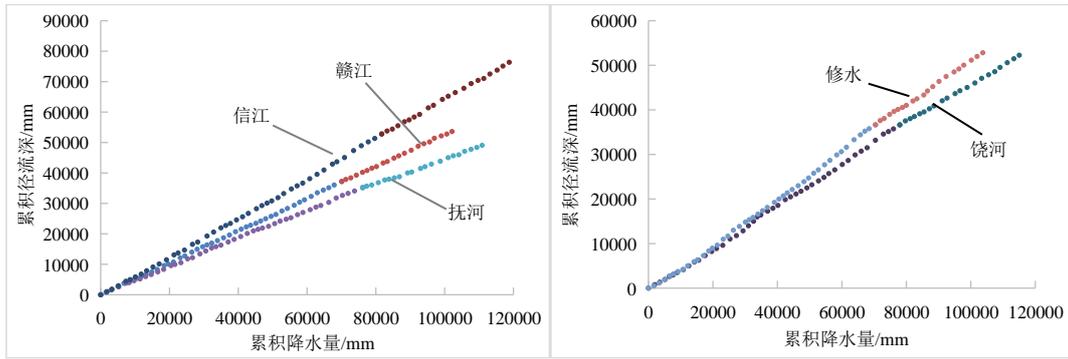
(a) 面降水量、蒸发量变化趋势 (b) 主要流域分区年平均气温变化趋势  
图 3 鄱阳湖流域 1959-2022 年降水、蒸发和气温变化趋势

Fig.3 The trends of precipitation, evaporation and temperature in the Lake Poyang basin from 1959 to 2022



(a) 赣江、抚河、信江流域 (b) 饶河、修水流域  
图 4 鄱阳湖主要流域分区年径流深变化趋势

Fig.4 The trends of annual runoff depth changes in major divisions of Lake Poyang basin



(a) 赣江、抚河、信江流域

(b) 饶河、修水流域

图 5 鄱阳湖主要流域分区年降水-径流双累积曲线

Fig.5 The double accumulation curve of annual precipitation and runoff for Lake Poyang basin

表 3 基准期、变化期的平均径流深及累积曲线斜率

Tab.3 The average runoff depth and cumulative curve slope in base period and change period

流域分区	1959 年-2002 年 (基准期)		2003 年-2022 年 (变化期)	
	径流均值 (mm)	累积曲线斜率	径流均值 (mm)	累积曲线斜率
赣江	845.5	0.529	820.4	0.519
抚河	799.7	0.460	695.3	0.404
信江	1200.2	0.645	1177.5	0.637
饶河	832.6	0.477	781.6	0.416
修水	833.0	0.531	808.1	0.486

为检验上述转折点的显著性,采用 Pettitt 检验法对年降水量与年径流深比值序列进行突变点检验,结果如图 6 所示,各流域分区在 2002~2004 年期间存在 Ut 曲线的趋势性转折,其中抚河流域通过了  $p<0.05$  的检验,饶河、修水流域接近 0.05 的检验阈值,赣江和信江流域虽未达到 0.05 的显著性检验阈值,但也存在趋势性转折变化。鉴于三峡水库于 2003 年启动蓄水,江湖关系随之发生变化,鄱阳湖入江水道河床出现下切现象<sup>[25-27]</sup>,这些变化可能改变赣江等支流的径流条件,因此将 2003 年界定为人类活动影响在基准期与变化期之间的转折年份。

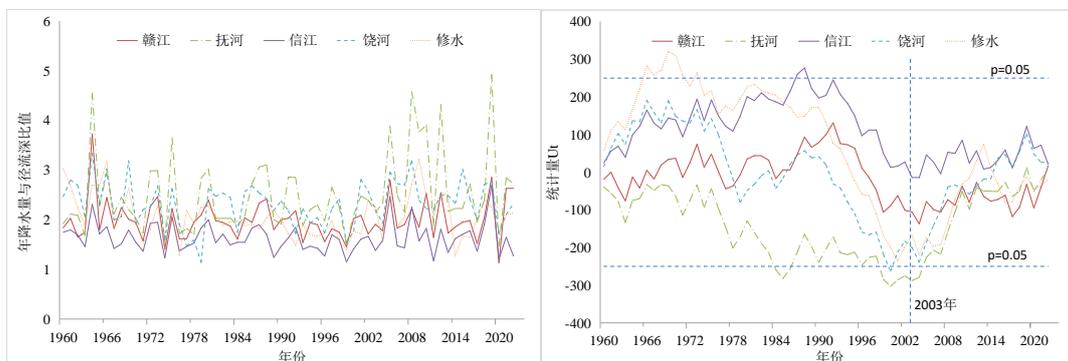


图 6 年降水量与径流深比值及其 Pettitt 检验统计值变化情况

Fig.6 Ratios of annual precipitation and runoff depth, and relevant Pettitt calibration statistics.

### 3.2 基准期、变化期模型参数率定

将基准期作为受人类活动影响较小的阶段，以最小化相对误差为优化目标，分别对基准期、变化期开展参数率定，通过参数变化反映人类活动引起的下垫面条件变化。针对鄱阳湖五大流域分区，率定得到的模型参数见表 4 所示，模型参数分别为：蒸散发参数 C（无量纲）和流域最大蓄水能力 SC（单位为 mm）。采用纳什效率系数、相关系数、水量平衡误差作为衡量模型模拟效果的指标，可以看出，模拟值和实测值的相关系数基本在 0.8 以上，纳什效率系数基本在 0.7 以上，水量平衡误差绝对值小于 1%，说明模拟径流序列可较好的反映实测径流序列的变化特征。各流域分区基准期、变化期的实测月径流、模拟月径流对比情况见图 7 所示。可以看出，整体上径流序列模拟值与实测值较为接近，对于枯水期月份有较好的模拟效果，误差主要发生在径流深较高的部分丰水月份。

表 4 鄱阳湖各流域分区两参数月水量平衡模型率定检验  
Tab.4 The model calibration of monthly water balance model for the main watershed of Lake Poyang

流域分区	率定阶段	模型参数		模型率定检验		
		C	SC	纳什效率系数	相关系数	水量平衡误差
赣江	基准期	0.94	1310	0.80	0.90	-0.03%
	变化期	0.97	970	0.87	0.94	-0.06%
抚河	基准期	1.22	940	0.82	0.91	0.25%
	变化期	1.31	800	0.70	0.86	-0.53%
信江	基准期	0.83	970	0.90	0.95	-0.03%
	变化期	0.84	800	0.82	0.91	-0.51%
饶河	基准期	1.22	920	0.72	0.86	0.25%
	变化期	1.32	800	0.67	0.84	-0.41%
修水	基准期	1.06	940	0.70	0.86	-0.18%
	变化期	1.12	865	0.64	0.85	-0.40%

### 3.3 气候变化、人类活动对径流均值的影响

针对划分的基准期、变化期及对应阶段的模型参数 C、SC，依据 2.2 节分析方法，通过对同一气候序列下的模型参数改变、同一模型参数下的气候序列改变，对径流序列进行还原及还原计算，其序列均值的差值可表征人类活动、气候变化对径流的影响作用。

可以看出，将基准期序列还原至变化期模型参数后，径流深模拟结果总体有所降低；对于变化期模型输入序列而言，将参数还原至基准期后，径流深模拟结果总体有所增加(表 5)。由此说明，相对基准期（1959-2002 年序列）而言，在人类活动影响下，鄱阳湖流域变化期（2003-2022 年序列）年径流深有减少趋势。

表 5 鄱阳湖流域各分区基准期、变化期模拟结果的还原及还原结果  
Tab.5 The restoration of simulation results for variation periods in different watersheds of Lake Poyang

平均年径流深 (mm)		赣江	抚河	信江	饶河	修水
基准期	模拟值	845.5	801.7	1200.2	834.7	831.5
	还原至变化期	822.8	733.5	1192.9	758.2	788.2
变化期	模拟值	816.5	675.5	1171.6	766.2	804.8
	还原至基准期	841.7	748.3	1180.1	848.9	851.1

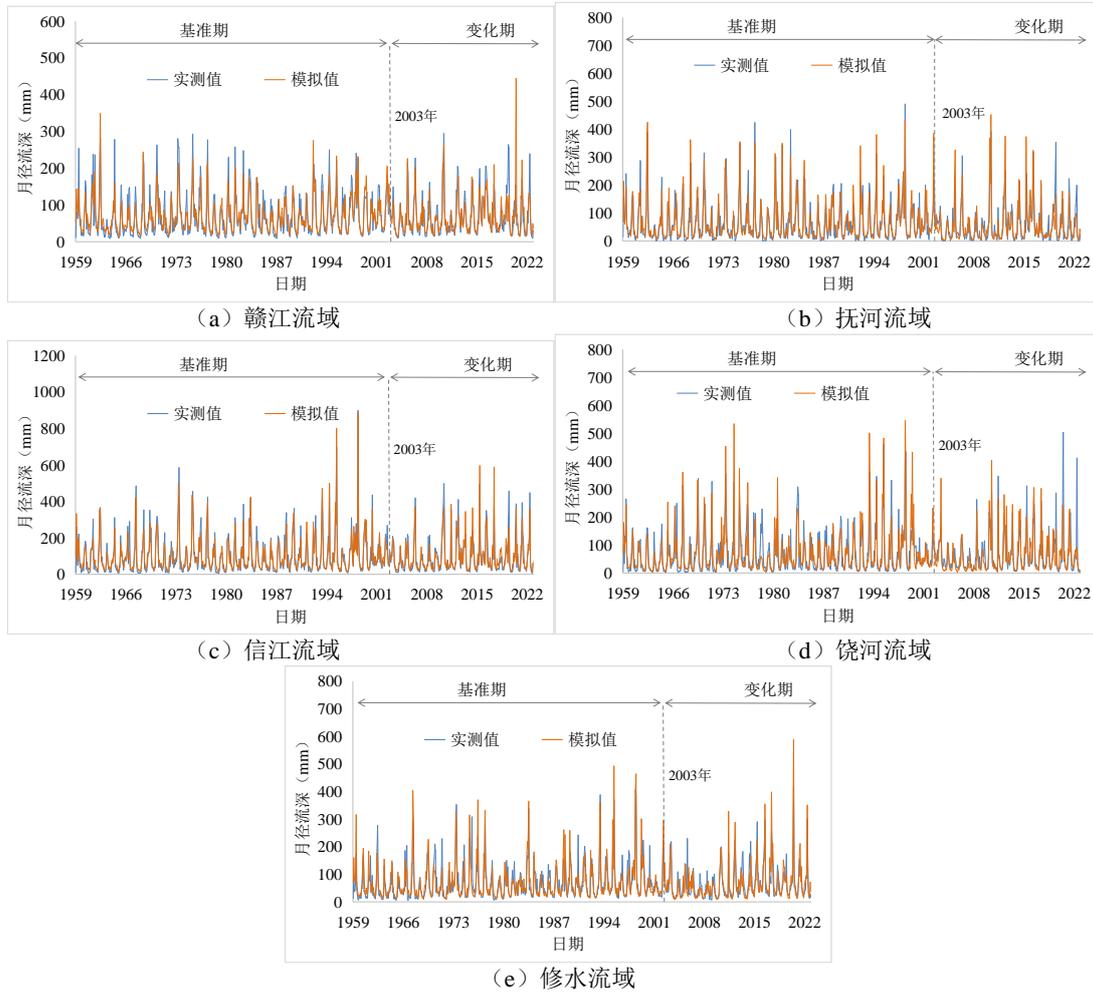


图7 鄱阳湖各流域分区月径流深的实测值和模拟值对比  
Fig.7 The comparison of measured and simulated monthly runoff in different watersheds of Lake Poyang

表6 人类活动、气候变化对年均径流深的影响作用, 单位: mm  
Tab.6 The impact of human activities and climate change on annual runoff, Unit: mm

流域分区	变化期			人类活动影响径流深比例	
	人类活动影响	气候变化影响	叠加影响	全年	枯水期 (11月~次年2月)
赣江	-22.8	-3.9	-29.0	-2.7%	-5.6%
抚河	-68.2	-53.3	-126.2	-8.5%	-12.0%
信江	-7.3	-20.1	-28.7	-0.6%	-0.5%
饶河	-76.5	14.2	-68.5	-9.2%	-12.3%
修水	-43.3	19.6	-26.7	-5.2%	-6.5%

表6给出了鄱阳湖流域各分区年平均径流深的实际变化情况,并定量区分出气候变化(降水、蒸发改变)、人类活动影响的程度。可以看出,人类活动对于年平均径流深的影响均为负值,其中抚河、饶河流域的影响最为明显,相比基准期年平均径流深分别减少68.2mm和76.5mm,叠加气候变化影响后,实际分别减少126.2mm和68.5mm。从鄱阳湖全流域范围而言,人类活动一定程度上降低了年尺度径流深,对于枯水期该影响作用更为显著。

### 3.4 人类活动对水文干旱特征的影响

以标准化径流指数（SRI）作为水文干旱指标，利用游程理论识别变化期的模拟径流序列，以及还原至基准期参数下径流序列的水文干旱指数，以月为时间尺度，对比分析变化期人类活动对水文干旱指数的影响，结果见图 8 所示。可以看出，还原后序列的干旱指数值总体高于还原前序列，尤其是枯水月份，干旱总历时、累积干旱烈度也显著低于还原前序列。

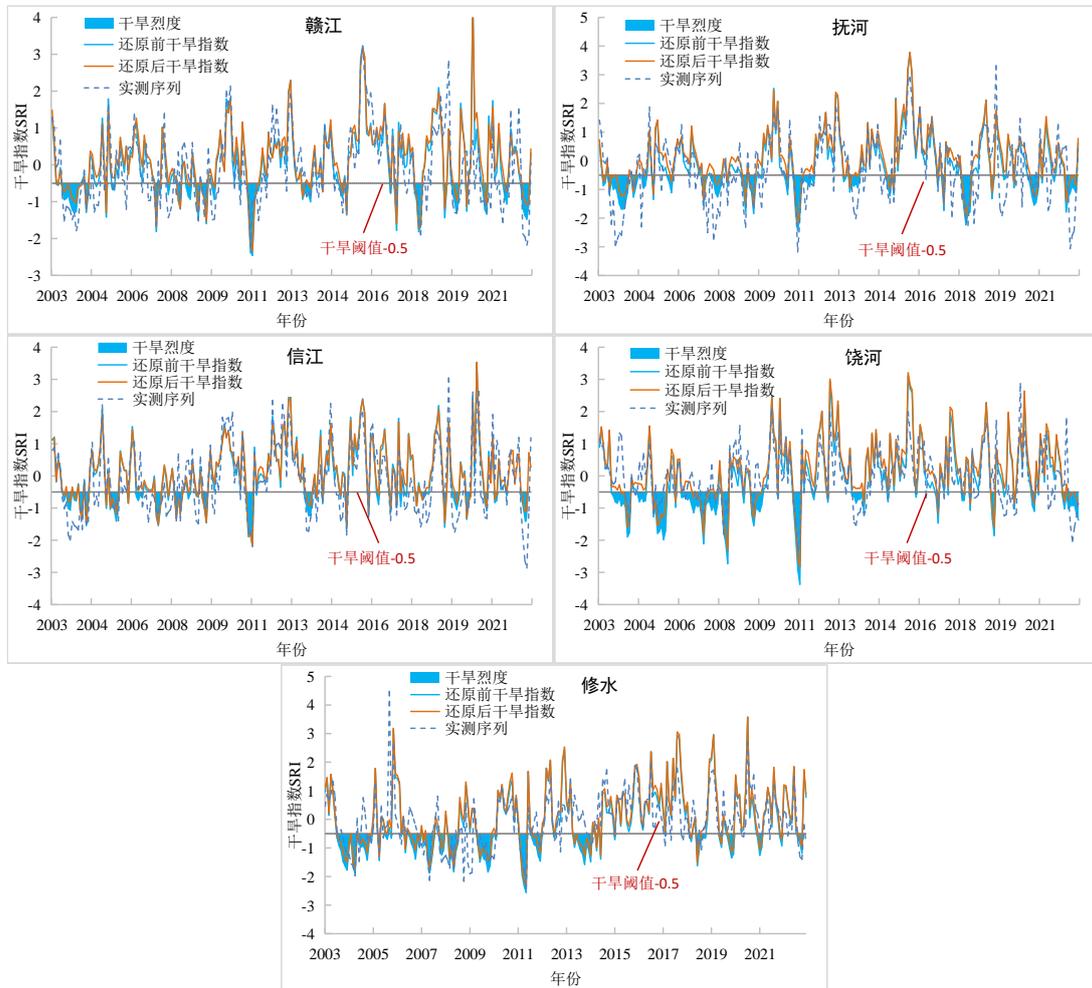


图 8 变化期序列还原至基准期参数后、还原前的干旱指数对比  
Fig.8 The comparison drought indices before and after restoring in the second changing period

当干旱阈值  $R_1$  取-0.5 时（即 SRI 低于-0.5 时发生轻度水文干旱），计算得到变化期的总干旱次数、年平均累积干旱烈度、单次干旱最大烈度，以及典型干旱年份，结果见表 7 所示。当采用基准期模型参数还原变化期的输入序列后，干旱次数、年平均累积干旱烈度均明显下降，即：相比基准期人类活动影响较小的天然径流状态，2003 年以来人类活动对河道径流深产生较大的影响，在同等降水、蒸发条件下，径流深总体呈降低趋势。2003 年三峡水库运行以来，鄱阳湖流域的年平均水文干旱次数、干旱烈度较 2002 年之前序列均略有增加，尤其是干旱烈度，增加趋势更加明显。

由表 7 还可以看出，将变化期实测径流序列还原至基准期参数后，由于整体上径流深相对增加，总干旱次数、烈度相对减少。相对基准期参数而言，变化期人类活动增强，对年均径流深、枯水期月径流深产生降低作用，2003 年以来枯水期实测径流有较大幅度的降低，出现枯水期延长的现象，因此在以标准化径流指数为干旱识别指标的情况下，人类活动使得鄱阳湖流域水文干旱频次和烈度整体上相对增加。

从流域分区空间分布上看，各流域分区变化期序列的年均累积干旱烈度、单次干旱最大烈度以及总

干旱次数均高于基准期参数条件下的干旱烈度。表 7 中模拟的变化期典型干旱年份有 2003 年、2004 年、2007 年、2011 年、2013 年和 2022 年，与中国水旱灾害公报、江西省水旱灾害风险普查成果中统计的干旱发生年份基本一致。

表 7 人类活动对于鄱阳湖各分区干旱特征的影响  
Tab.7 The effects of human activities on the drought characteristics of Lake Poyang

流域分区	序列	总干旱次数 (次)	年平均累积干旱烈度	单次干旱最大烈度	典型干旱年份
赣江	模拟径流序列	24	1.91	5.42	2003、2007、2009、2011、2018、2021、2022
	还原至基准期参数下的径流序列	20	1.27	4.87	2003、2007、2011、2018、2022
抚河	模拟径流序列	22	2.54	7.3	2003、2007、2011、2013、2018、2021、2022
	还原至基准期参数下的径流序列	18	1.39	4.66	2003、2011、2018、2021、2022
信江	模拟径流序列	26	1.79	4.67	2003、2004、2005、2007、2011、2013、2018、2022
	还原至基准期参数下的径流序列	21	1.34	4.49	2003、2004、2005、2007、2008、2011、2022
饶河	模拟径流序列	22	2.62	8.59	2004、2005、2007、2008、2009、2011、2013、2019、2022
	还原至基准期参数下的径流序列	18	1.38	5.87	2004、2005、2007、2008、2011、2019、2022
修水	模拟径流序列	21	2.83	11.07	2003、2004、2007、2008、2009、2011、2014
	还原至基准期参数下的径流序列	17	1.96	7.61	2003、2004、2007、2009、2011、2014

#### 4 讨论分析

##### 4.1 两参数月水量平衡模型参数敏感性分析

在两参数月水量平衡模型的参数率定中，需要设置初始土壤蓄水量，以及SC、C两个参数的取值范围、计算步长，以模拟径流深与实测径流深相对误差最小为优化目标函数，通过编制程序进行参数率定。为使得模拟结果更加真实反映实测径流变化，尤其是干旱月份下的径流深，需要引入纳什效率系数、相关系数、水量平衡误差等指标对率定结果进行模拟效果的验证，当检验指标不理想时，可改变参数率定区间范围，使得模拟的最终各项指标达到最优。因此，需要对各个模型参数的敏感性进行分析，研究各参数变化对于模拟径流的影响特征，便于优化得到更加合理的参数。

本文中初始土壤蓄水量、最大蓄水能力SC、参数C均通过模型的试错法率定得到，其中初始土壤蓄水量主要结合所在流域的多年平均降水和径流深大小，设置率定区间为250~300mm，而参数SC、C分别反映流域的下垫面条件（如：植被覆盖、地质条件）及水利工程调蓄、水资源开发利用程度、降水与蒸发变化等一系列因素，主要参考同类区域水平进行率定区间设定（SC介于800~1500mm之间，C介于0.4~2.0之间）<sup>[28]</sup>，当率定结果处于区间边界时，需增加区间范围。

本文模拟得到的鄱阳湖流域各分区参数C介于0.83~1.32之间，SC介于800~1310之间，对应的水量平衡误差在1%以内，纳什效率系数、相关系数分别在0.64和0.84以上。参数C反映降水与蒸发的变化关系，参数C增大可导致计算的蒸发量增加，在降水量一定的情况下，会使得形成的径流水量减少；参数SC反映流域的蓄水调节能力，SC增大可使得洪水更加平缓，同时枯水径流也相对更高，当径流模拟更加关注干旱时，可适当降低参数SC，使得模拟结果更加接近干旱期间的实测径流序列。

为分析参数变化对于模拟效果的影响，以赣江流域分区为例，设置不同的参数C、SC情景，对比分析参数调整前后的模拟深序列，结果见图9所示。结果表明：通过模型率定得到的参数，对应的径流序列与实测径流序列拟合效果最好。在参数C增加50%情景下，由于计算蒸发量随之增加，使得整个模拟径流序列均有降低，年平均径流深减少约47.8%。而参数SC的敏感性相对较低，当参数SC增加或降低50%时，

年平均径流深无显著变化，但在由汛转枯的8-10月平均径流深变化较大，分别增加8.5%或降低16.2%，主要原因在于不同年份汛期月径流深差异较大，流域最大蓄水能力的差异使得在由汛转枯时模型计算得到的月径流深差异增加。

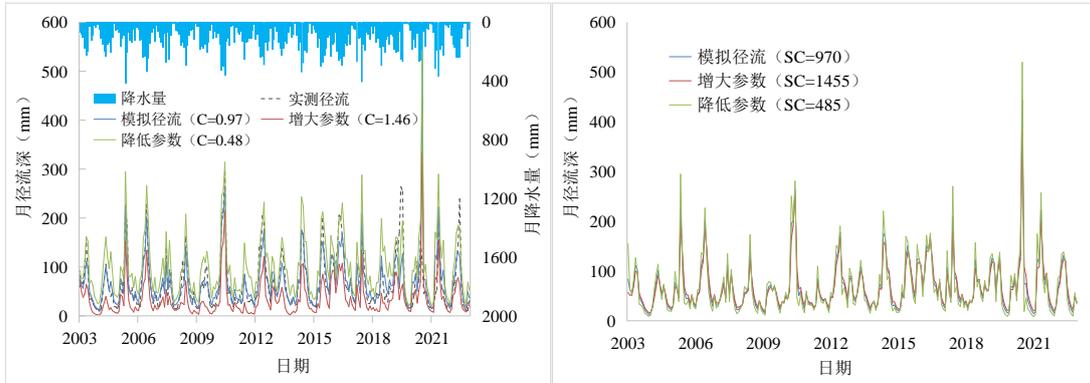


图9 参数C和SC变化对于赣江流域月径流深模拟结果的影响

Fig.9 Impacts of changes of C and SC on the simulated monthly runoff depth, Ganjiang River

针对两参数月水量平衡模型对于枯水月份、干旱月份模拟效果及适用性方面，以赣江流域为例，绘制了1959~2022年实测月径流深与模拟月径流深的散点分布图（图10），以及变化期干旱月份实测径流与模拟径流的对比图。可以看出，整个模拟序列与实测序列集中在参考线附近，存在较强的相关性，相关系数在0.8以上，说明两参数月水量平衡模型在该研究区具有较好的适用性。

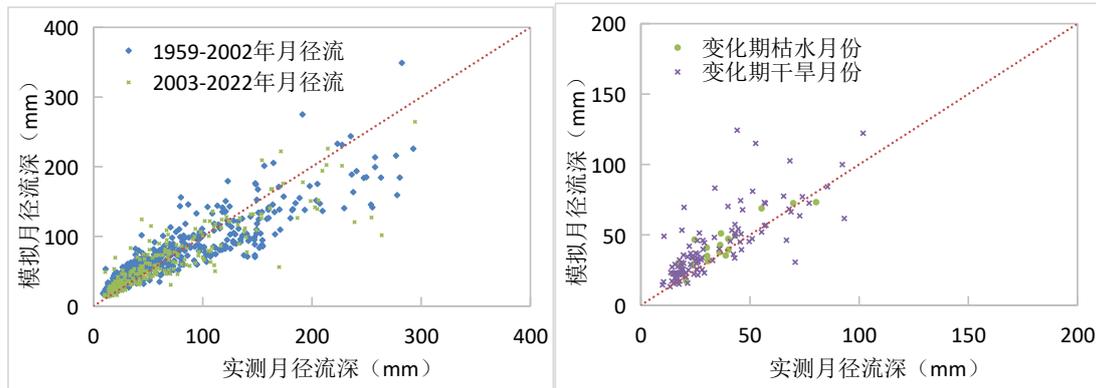


图10 1959~2022年赣江流域实测月径流深与模拟月径流深的散点分布图

Fig.10 Scatter plot of observed and simulated monthly runoff depth in the Ganjiang River Basin,1959-2022

对比基准期和变化期不同丰枯条件下的模拟效果，可以看出，基准期（1959~2002年）径流受人类活动影响较小，其散点分布相对集中，且枯水月份（11月~次年2月径流均值）模拟效果相对优于丰水月份；变化期（2003~2022年）干旱月份下模拟值整体略高于实测值，尤其是在以2022年为典型的由涝转旱期间，说明人类活动对月尺度径流序列有较大干扰。2022年6月赣江流域发生了较严重的洪水，但7-11月急转为历史性极端干旱，由于外洲出口断面以上流域人口产业密集，在异常高温干旱期间用水需求显著增加，加上上游水利工程调蓄作用，使得出口断面实测月径流深低于模型模拟结果，赣江外洲站在9-11月份多次出现历史性低水位和流量。

#### 4.2 人类活动影响水文干旱演变的驱动机制分析

基于变化期内月尺度的实测降水与径流数据对比分析可知，月尺度下降水与径流变化在时间上具有较强的一致性，径流相较于降水、蒸发过程，并无明显的时间滞后现象。一次降水一般能在一个月内在流

域出口处转化为径流或被蒸发、下渗等消耗，而水利工程调蓄等人类活动行为会改变月尺度降水-径流的响应关系<sup>[26]</sup>。相较于其他流域分区，抚河、饶河流域的降水-径流关系变化受人类活动影响更为显著。相关文献<sup>[25-27]</sup>研究表明，鄱阳湖流域径流变化受三峡工程、入江水道采砂的影响较强，其中三峡工程主要通过调节长江干流水量来影响鄱阳湖水位及五河径流深，在汛末蓄水期，鄱阳湖水位下降，枯水期提前且低水位持续时间延长，导致五河入口处月尺度径流深相对减少；在枯水期，三峡工程加大下泄量，为长江中下游补水，会使得五河与长江干流水位差减小，从而减少五河的月尺度径流深；而河道采砂使得五河河床下切，降低了五河与鄱阳湖的水位差，进而降低了月尺度径流深。此外，人类活动使得变化期流域内耗水量增加，使得年尺度径流深整体降低。由于径流减小会使得干旱指数同步降低，上述结论与本次模型计算得到的变化期人类活动对鄱阳湖流域各分区月尺度径流深及干旱特征的影响趋势一致。

干旱阈值大小直接影响干旱烈度、次数和历时，本文在干旱识别中采用的阈值 $R_0$ 为-0.5、 $R_1$ 为-1.0，与《气象干旱等级标准》中SPEI轻旱、中旱的阈值标准相同。在进行基准期还原计算、变化期还原计算以及不同阶段干旱特征指标的对比分析中，由于进行了序列的标准化处理，为了使得结果具有可比性，需要将还原、还原前后序列进行合并计算，避免指数标准化后对结果比较产生影响。

## 5 结论与展望

### 5.1 结论

(1) 1959年以来，鄱阳湖流域年降水量、年潜在蒸发量分别呈现一定程度的增加和减少趋势，但经Mann-Kendall检验，变化趋势均不显著；年平均气温在各流域分区的增加趋势十分显著，均通过 $p < 0.01$ 的显著性检验；五河控制性水文站年际径流深存在明显的丰枯波动，与降水相关性较强，整体上无显著增加或减少趋势。

(2) 鄱阳湖各流域分区双累积曲线在2003年前后趋势转折明显，其原因可视为人类活动的影响，据此将序列划分为1959-2002年的基准期（天然径流时段）和2003-2022年的变化期（受人类活动影响的径流阶段），结合Pettitt检验验证了基准期与变化期划分的合理性。

(3) 通过构建基准期、变化期的两参数月水量平衡模型，分别计算得到还原至基准期参数下的变化期月径流序列，以及还原至变化期参数下的基准期月径流序列。通过还原、还原前后不同阶段模拟径流深比较，定量得到气候变化及人类活动对于径流深的影响，其中人类活动对于径流深整体为减少影响，枯水期影响更为显著，抚河、饶河流域的影响作用最明显。相较于人类活动影响较小的基准期，鄱阳湖流域变化期水文干旱频次和烈度整体相对增加，年均干旱次数、干旱烈度较基准期分别增加约21.3%、55.4%，单次干旱最大烈度也较基准期增加24.3%，说明极端水文干旱强度增强，其发生的频率也有增加的可能性。

(4) 两参数月水量平衡模型在鄱阳湖流域月尺度径流模拟的适用性较好，模型参数C对于径流结果影响的敏感性高于参数SC，其中参数C增加可使径流序列值整体降低，而参数SC增加使得径流序列更加坦化，尤其对汛末至枯水期径流的坦化作用明显。相较于基准期，变化期水库调蓄等人类活动干扰径流的作用得到增强，影响了干旱及枯水月份的径流过程，增加了水文干旱模拟的难度，但在长序列月时间尺度上，基于水量平衡原理模拟的径流深序列依然能较好地刻画鄱阳湖流域实际水文过程。

### 5.2 展望

近年来鄱阳湖流域极端干旱事件频发，湖区水位的降低及入湖径流的减少，给流域生产生活带来显著影响。本文仅关注五大流域分区的基于标准化径流指数的干旱变化特征，分析气候变化和人类活动对关键控制性水文站点干旱指数的影响规律，研究结果更多体现了各流域分区水文干旱的宏观变化趋势。下一步研究可考虑针对不同水源类型，选取差异化的水文干旱指标，如水库集水区水文干旱主要取决于水利工程调蓄作用下的蓄水位变化，湖区水文干旱主要取决于湖泊水位变化，河道型水源水文干旱主要取决于径流深的变化。由于旱情发展具有缓慢性、空间异质性的特点，可通过细化流域分区、改变计算时间尺度的方式，研究人类活动对不同下垫面区域径流深、干旱指标的累积影响作用。

## 6 参考文献

- [1] Chen YN, Li YP, Li Z, et al. Analysis of the impact of global climate change on dryland areas. *Advances in Earth Science*, 2022, 37(2): 111-119. DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2022.006. [ 陈亚宁, 李玉朋, 李稚等. 全球气候变化对干旱区影响分析. *地球科学进展*, 2022, 37(02):111-119. ]
- [2] LI Yu, XI Jia, ZHANG Chi, et al. Impact of climate change on the spatio-temporal characteristics of meteorological and hydrological drought over the Lancang-Mekong River basin. *Advances in Water Science*, 2021, 32(4): 508-519. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2021.04.003 [ 李昱, 席佳, 张弛等. 气候变化对澜湄流域气象水文干旱时空特性的影响. *水科学进展*, 2021, 32(04):508-519. ]
- [3] Wang Yujie, Qin Dahe. Influence of Climate Change and Human Activity on Water Resources in Arid Region of Northwest China: An Overview. *Climate Change Research*, 2017, 13(5): 483-493. [ 王玉洁, 秦大河. 气候变化及人类活动对西北干旱区水资源影响研究综述. *气候变化研究进展*, 2017, 13(05):483-493. ]
- [4] Hui C, Wen W, Pieter R, et al. Impacts of different human activities on hydrological drought in the Huaihe River Basin based on scenario comparison *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Volume 37, 2021, 100909.
- [5] Sun KK, Yao LQ, Xu JJ, et al. Evaluating Urban Drought Loss Based on Water Use Benefit Function. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2021, 38(11): 11-17. [ 孙可可, 姚立强, 许继军, 袁喆, 屈艳萍. 基于用水效益函数的城市干旱损失评估方法. *长江科学院院报*, 2021, 38(11):11-17. ]
- [6] Fan HX, He HD, Xu LG, et al. Simulation and attribution analysis based on the long-short-term-memory network for detecting the dominant cause of runoff variation in the Lake Poyang basin. *Journal of Lake Sciences*. 2021, 33(3):866-878. DOI:10.18307/2021.0319. [ 范宏翔, 何菡丹, 徐力刚等. 基于长短记忆模型的鄱阳湖流域径流模拟及其演变的归因分析. *湖泊科学*, 2021, 33(03):866-878. ]
- [7] Deng P, Sun SL, Huang PN. Influence of climate change on runoff in Poyang Lake Basin. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2020, 48(1):39-45. [ 邓鹏, 孙善磊, 黄鹏年. 气候变化对鄱阳湖流域径流的影响. *河海大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(1):39-45. ]
- [8] Huang ZW, Xu XF, Wang ZC, et al. Analysis on the influence of the evolution of water channel into Yangtze River on the water level of poyang lake. *Journal of Hydroelectric Power*, 2021, 47(8):37-40, 82. [ 黄志文, 许新发, 王志超等. 鄱阳湖入江水道演变对湖区水位影响分析. *水力发电*, 2021, 47(08):37-40. ]
- [9] Hu JJ, Sun Y, GU CJ. Analysis of changes in inflow water and sediment from the five rivers into Poyang Lake in the past 60 years and their influencing factors. *Yangtze River*, 2022, 53(S2): 47-51. [ 胡江军, 孙宇, 顾朝军. 近 60 年鄱阳湖五河入湖水沙变化及影响因素分析. *人民长江*, 2022, 53(S2): 47-51. ]
- [10] Wang W, Wang JS, Tao YY, et al. Review of human impacts on formation and development of hydrologic drought. *Journal of China Hydrology*, 2020, 40(3):1-8. [ 王文, 王靖淑, 陶奕源等. 人类活动对水文干旱形成与发展的影响研究进展. *水文*, 2020, 40(3):1-8. ]
- [11] Xue LQ, Bai QY, Liu YH. Propagation law from meteorological drought to hydrological drought in the Tarim River Basin under the impact of human activities. *Water Resources Protection*, 2023, 39(1):57-62. [ 薛联青, 白青月, 刘远洪. 人类活动影响下塔里木河流域气象干旱向水文干旱传播的规律. *水资源保护*, 2023, 39(1):57-62. ]
- [12] Cao YX, Xu LG, Fan HX, et al. Impact of climate change and human activities on the changes of ecological flow indicators in the Lake Poyang Basin since 1960s. *Journal of Lake Science*. 2022, 34(1):232-246. DOI:10.18307/2022.0119. [ 曹宇贤, 徐力刚, 范宏翔等. 1960 年以来气候变化与人类活动对鄱阳湖流域生态径流改变的影响. *湖泊科学*, 2022, 34(01):232-246. ]
- [13] Wu JF, Chen XH, Yuan X. The interactions between hydrological drought evolution and precipitation- streamflow relationship. *Journal of Hydrology*, 2021, 597, 126210.
- [14] Wu JF, Yuan X, Yao HX. Reservoirs regulate the relationship between hydrological drought recovery water and drought characteristics. *Journal of Hydrology*, 2021, 603, 127127.
- [15] Zhang T, Su XL, Zhang GX. Evaluation of the impacts of human activities on propagation from meteorological drought to hydrological drought in the Weihe River Basin, China. *Science of The Total Environment*, 2022, 819, 153030.
- [16] Mu XM, Zhang XQ, Gao P, et al. Theory of Double Mass Curves and Its Applications in Hydrology and Meteorology. 2010, 30(04):47-51. [ 穆兴民, 张秀勤, 高鹏等. 双累积曲线方法理论及在水文气象领域应用中应注意的问题. *水文*, 2010,

30(04):47-51. ]

- [17] Jia JW, Wang D, Xu WF, et al. Comprehensive evaluation and cause analysis of drought in Poyang Lake Basin in 2022. *Yangtze River*, 2023, 54(2): 36-42. [ 贾建伟, 王栋, 徐伟峰等. 2022 年鄱阳湖流域干旱综合评估及成因分析. *人民长江*, 2023, 54(2): 36-42. ]
- [18] Yu MX, Dong WX, Zhang JY, et al. Agricultural drought of the Poyang Lake basin based on large-scale ground monitoring of soil water content. *Advances in Water Science*, 2022, 33(2): 185-195. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2022.02.003. [ 虞美秀, 董吴欣, 张建云等. 基于大范围地面墒情监测的鄱阳湖流域农业干旱. *水科学进展*, 2022, 33(02):185-195. ]
- [19] Wang MH, Jiang SH, Ren LL. An approach for identification and quantification of hydrological drought termination characteristics of natural and human-influenced series. *Journal of Hydrology*, 2020, 590, 125384.
- [20] Wang MH, Jiang SH, Ren LL. Separating the effects of climate change and human activities on drought propagation via a natural and human-impacted catchment comparison method. *Journal of Hydrology*, 2021, 603, 126913.
- [21] Deng C, Liu P, Wang WG. Modelling time-variant parameters of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology*, 2019, 573:918- 936.
- [22] Andrew R, William H, Lauren E. Quantifying uncertainty in simulated streamflow and runoff from a continental-scale monthly water balance model. *Advances in Water Resources*, 2018, 122:166-175.
- [23] Lu GH, Yan GX, Wu ZY, et al. Regional drought analysis approach based on copula function. *Advances in Water Science*, 2010, 21(2): 188-193. [ 陆桂华, 闫桂霞, 吴志勇等. 基于 copula 函数的区域干旱分析方法. *水科学进展*, 2010, 21(2):188-193. ]
- [24] Liu J, Zhang Q, Xu CY, et al. Change of actual evapotranspiration of Poyang Lake watershed and associated influencing factors in the past 50 years. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, 19(2): 139-145. [ 刘健, 张奇, 许崇育等. 近 50 年鄱阳湖流域实际蒸发量的变化及影响因素. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(2):139-145. ]
- [25] Ye XC, Zhang Q, Liu J, Li LJ, Guo H. Impacts of Climate Change and Human Activities on Runoff of Poyang Lake Catchment. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(05):835-842. [ 叶许春, 张奇, 刘健, 李丽娇, 郭华. 气候变化和人类活动对鄱阳湖流域径流变化的影响研究. *冰川冻土*, 2009, 31(05):835-842. ]
- [26] 杨桂山, 陈剑池, 张奇, 姜霞. 长江中游通江湖泊江湖关系演变及其效应与调控. 科学出版社, 2021.
- [27] Zhang JW, Guo JL, Liu J, et al. Prediction for temporal and spatial variability of Poyang Lake inflow. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2016, 14(5): 41-48, 70. [ 张静文, 郭家力, 刘佳等. 鄱阳湖流域入湖径流时空变化预测. *南水北调与水利科技*, 2016, 14(5):41-48, 70. ]
- [28] Xiong LH, Guo SL, Fu XP, et al. Two-parameter monthly water balance model and its application. *Advances in Water Sciences*, 1996, (S1):80-86. [ 熊立华, 郭生练, 付小平等. 两参数月水量平衡模型的研制和应用. *水科学进展*, 1996, (S1):80-86. ]