

气候变化和人类活动对长江流域极端径流的影响

杨肖丽^{1,2}, 张佳乐^{1,2}, 黄星怡^{1,2}, 曹段冉^{1,3}, 吴凡^{1,2}

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学地理与遥感学院, 江苏 南京 211100)

摘要:采用 PCR-GLOBWB 模型模拟长江流域自然情景和人类活动情景下的月径流过程, 使用 Mann-Kendall 突变检验划分基准期和影响期, 并基于标准化径流指数和广义极值分布计算了不同重现期两种情景下的极端高流和极端低流变化范围, 定量评估了长江流域气候变化和人类活动对极端径流演变的贡献程度。结果表明: 气候变化是长江流域极端高流和极端低流变化的主要贡献因素; 气候变化加剧了长江上游中部及中、下游地区的极端高流和极端低流发生的严重程度; 人类活动对于极端高流和极端低流影响的区域差异性显著, 缓解了丹江口水库和四川盆地极端高流的严重程度, 但加重了中、下游的极端低流的严重程度。

关键词: 极端径流; PCR-GLOBWB 模型; 气候变化; 人类活动; 长江流域

中图分类号: P339 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2025)04-0001-09

Impacts of climate change and human activities on extreme runoff in the Yangtze River Basin// YANG Xiaoli^{1,2}, ZHANG Jiale^{1,2}, HUANG Xingyi^{1,2}, CAO Duanran^{1,3}, WU Fan^{1,2} (1. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Geography and Remote Sensing, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: The PCR-GLOBWB model was employed to simulate monthly runoff processes in the Yangtze River Basin under natural conditions and human-influenced scenarios. The Mann-Kendall mutation test was applied to delineate the baseline period and the impacted period. Based on standardized runoff index and generalized extreme value distribution, the range of extreme high flow and extreme low flow changes under two scenarios with different recurrence periods was calculated, and quantitatively evaluated the contribution of climate change and human activities to the evolution of extreme runoff in the Yangtze River Basin. The results indicate that climate change is the main contributing factor to the extreme high and low flow changes in the Yangtze River Basin. Climate change has intensified the severity of extreme high flow and l extreme low flow in the central part of the upper reaches and middle and lower reaches of the Yangtze River. The regional differences in the impact of human activities on extreme high flow and l extreme low flow are significant, alleviating the severity of extreme high currents in the Danjiangkou Reservoir and Sichuan Basin, but exacerbating the severity of extreme low flow in the middle and lower reaches.

Key words: extreme runoff; PCR-GLOBWB model; climate change; human activities; the Yangtze River Basin

气候变化和人类活动对全球水资源的循环过程的叠合影响, 导致区域甚至全球范围内极端旱涝灾害等极值事件频发, 造成大量经济损失以及大面积基础设施被破坏^[1-3]。由于极端水文事件(极端低流、极端高流等)对流域内经济社会发展的影响大, 破坏能力强, 已成为水文领域关注的焦点问题^[4]。长江流域作为我国最重要的经济区域之一, 也是世界上水资源最丰富的流域之一, 其优越的自然环境为社会经济发展提供了基础保障。但随着气候变暖和人类活动加剧, 长江流域饱受极端径流事件的危

害, 已有学者对此展开了研究。例如: Huang 等^[5]对长江流域极端径流的时空变化进行了研究, 发现极端径流在源区和中上游增加, 而在中游减少; 曹丽娟等^[6]发现未来长江流域干流极端高流在夏季出现的可能性降低而在其他季节升高; 黄丹青等^[7]研究发现极端降雨事件在长江中游、西南部分地区以及下游局部地区呈现显著增加、增强趋势。目前, 大部分研究聚焦于流域内极端事件的时空变化特征, 但针对极端径流变化的归因分析仍较为有限, 尤其是从气候变化和人类活动双重角度进行系统的定量评

估较为缺乏。随着极端径流的变化加剧,如何定量分离气候变化和人类活动在极端径流变化的作用是当前研究的难点^[8]。Zhu 等^[9]基于机器学习模拟径流,分析了人类活动和气候变化对金沙江流域极端低流的影响。吴立钰等^[10]采用 VIC (variable infiltration capacity) 模型模拟了伊逊河流域径流,并将其与观测资料进行对比,从而分析了影响径流变化的因素。虽然这些研究考虑了人类活动的影响,但大多通过概化的方式进行描述,无法全面地评估人类活动对水资源系统的影响。具有模块化结构的 PCR-GLOBWB (PCRaster global water balance) 模型^[11]可以充分考虑人类活动(灌溉、工业用水、生活用水等)对径流的影响,为定量分析人类活动对水文过程的影响提供了有效的工具。Wu 等^[12]基于 PCR-GLOBWB 模型量化了人类活动对长江流域蓝绿水的影响;杨肖丽等^[13]利用 PCR-GLOBWB 模型模拟了人类活动下长江流域水文过程,从而评估了人类活动对水文干旱的影响。

鉴于此,本文以长江流域为研究区,利用 PCR-GLOBWB 模型定量模拟人类活动对流域内水文过程的影响,使用 Mann-Kendall (M-K) 突变检验划定研究基准期和影响期,结合标准化径流指数 (standardized runoff index, SRI) 和广义极值分布 (generalized extreme value, GEV),计算不同重现期下极端高流和极端低流的变化差异,以期为流域极端事件的早期预警提供理论支撑。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

长江是国内第一大河,河流总长超过 6 300 km,先后流经 19 个省、自治区、直辖市,最后注入东海。长江流域位于 24° 30' N ~ 35° 45' N、90° 33' E ~ 122° 25' E,地跨热带、亚热带和暖温带,总面积达 180 万 km²,大部分地区处于亚热带季风气候,多年平均气温为 15℃,多年平均降水量为 1 100 mm。长江流域从上游到下游依次经过高原、山脉、盆地以及平原,复杂的地形导致长江流域降水量时空分布差异较大,在空间上呈现东南多、西北少的分布格局,降雨多集中在夏季^[14-15]。为研究长江流域极端径流的空间变化和特征,本文将长江流域划分为上、中、下游 3 个子流域,如图 1 所示。

1.2 数据来源

本文收集的观测数据包括:长江流域 1961—2020 年日降水量和气温数据(中国气象数据网, <http://data.cma.cn/>),长江流域主要水文站 2006—2015 年的逐日径流量观测数据,包括寸滩、

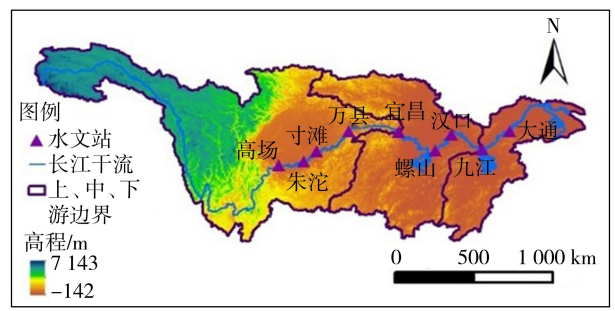


图 1 长江流域概况

Fig. 1 Overview of the Yangtze River Basin

万县、朱沱、宜昌、高场、九江、汉口、螺山、大通共 9 个水文站。

PCR-GLOBWB 模型所需的背景参数、植被参数、土壤参数和地下水参数通过全球共享数据确定。其中,背景参数根据 DEM 确定,植被参数采用 GLCCv2.0 map 数据确定,土壤参数根据联合国粮农组织 10 km 分辨率的土壤类型图及土壤特性表确定,地下水参数基于美国地质调查局 1 km 分辨率的 Hydro1k 数据库确定^[14]。

2 研究方法

2.1 PCR-GLOBWB 模型

基于 10 km 分辨率网格的 PCR-GLOBWB 模型能够充分考虑人类取水,可以更加精确地模拟流域的水文过程^[15],是评估气候变化和人类活动对水资源影响的有效工具^[16]。该模型具有灵活的模块化结构,其人类活动模块中包括生活、工业、灌溉和水库调度等,可以充分考虑人类活动取水以及水库、灌溉用水等方面的水资源过程,也可以基于气象驱动模块来模拟自然气候变化下的流域径流过程。本文通过开启/关闭人类活动模块来设置自然情景(关闭所有人类活动模块)和人类活动情景(开启所有人类活动模块)两种情景,通过两种情景下的径流模拟数据之间的差异,对比分析长江流域极端径流受到气候变化和人类活动的影响程度。

2.2 SRI

SRI 在时间上具有灵活简单的特点,在各种时间尺度上都可以较好地描述流域干旱和洪涝情况。该指数由 Shukla 等^[17]于 2008 年提出,其计算过程是根据已知给定时间尺度的径流累积值的分布函数,将其转化为标准正态分布值^[18]。在提取 SRI 的各种分布函数中,本文采用了 GEV 分布来拟合具有独立参数的月径流序列,计算 SRI 的时间尺度为 1 月。根据得到的 1 月尺度的 SRI 来对极端径流进行分类,选择每年最小的 SRI 构建极端低流序列,选择每年最大的 SRI 构建极端高流序列。其中,SRI

负值越小,极端低流越小;SRI 正值越大,极端高流越大。

2.3 极端径流变化的归因分析方法

采用突变检验方法检验长江流域径流过程的突变时间,基于突变检验方法的结果,将研究时段划分为基准期和影响期。M-K 检验法是研究长时间序列的气象或水文数据突变情况的常用方法,其样本不必遵从某一特定分布,分析结果也不受少数异常值的干扰,因此可用于揭示整体时间序列的突变情况与趋势变化^[19]。在此基础上,结合长江流域经济发展、水利设施建设以及国家政策来进一步确定突变点,提高突变检验结果的准确性和合理性^[20-21]。基于突变检验结果,将研究时段划分为基准期和影响期。

与非极端事件相比,极端事件具有发生频率低、破坏程度大的特点。极值统计理论研究的发展为极端事件的统计分析提供了研究基础,GEV 分布^[22]基于极值统计理论的框架,为极端事件提供了事件发生概率的推论。采用 GEV 分布对 PCR-GLOBWB 模型模拟的长江流域径流的 SRI 极端序列进行拟合。GEV 分布函数表达式为

$$F(x;\sigma,\mu,\xi)=\exp\left\{-\left[1+\xi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right]^{-\frac{1}{\xi}}\right\}.$$

$$\left[1+\xi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right]>0\tag{1}$$

式中: x 为自变量; σ 为尺度参数; μ 为位置参数; ξ 为形状参数。

重现期是在一定年代的记录资料统计期间内,大于或等于某量级的水文要素出现一次的平均间隔时间^[23]。计算 GEV 分布中相应重现期的极值:

$$E_T=qF(P_T;\sigma,\mu,\xi)\tag{2}$$

其中

$$P_T=1-1/T$$

式中: T 为重现期; E_T 为 GEV 分布中的重现期 T 下的极值; q 为 GEV 分布的分位数。

设 $E_{T,o}$ 为重现期 T 下基准期自然情景中的极值, $E_{T,n}$ 为重现期 T 下影响期自然情景中的极值, $E_{T,h}$ 为重现期 T 下影响期人类活动情景中的极值,则重现期 T 下的极值总变化 ΔE_T 计算公式见式(3),气候变化影响的极值变化 $\Delta E_{T,c}$ 计算公式见式(4),人类活动影响的极值变化 $\Delta E_{T,h}$ 的计算公式见式(5)。对于极端低流, $\Delta E_T<0$ 表示极端低流降低, $\Delta E_T>0$ 表示极端低流增加;对于极端高流, $\Delta E_T<0$ 表示极端高流降低, $\Delta E_T>0$ 表示极端高流增加。

$$\Delta E_T=E_{T,h}-E_{T,o}\tag{3}$$

$$\Delta E_{T,c}=E_{T,n}-E_{T,o}\tag{4}$$

$$\Delta E_{T,h}=\Delta E_T-\Delta E_{T,c}\tag{5}$$

3 结果与分析

3.1 PCR-GLOBWB 模型模拟精度及径流突变特征

基于长江流域干流上的主要水文站 2006—2015 年的径流观测数据,采用相关系数(r)和纳什系数(NSE)评价 PCR-GLOBWB 模型模拟的月径流过程精度^[24]。水文站实际观测的径流数据包含了人类活动的影响,因此对于 PCR-GLOBWB 模型模拟精度的验证是在人类活动情景下进行的,结果见表 1。由表 1 可见,PCR-GLOBWB 模型模拟结果的 NSE 值均在 0.6 以上,其中寸滩站、朱沱站、九江站、汉口站、螺山站、大通站的 NSE 均大于 0.8;除宜昌站 r 值为 0.85,其余水文站的 r 值都在 0.9 以上。表明 PCR-GLOBWB 模型能够很好地模拟长江流域的径流过程,其模拟结果可以用来进一步分析气候变化和人类活动对极端径流的影响。

表 1 PCR-GLOBWB 模型模拟精度
Table 1 Simulation accuracy of PCR-GLOBWB model

水文站	NSE	r
寸滩	0.82	0.94
万县	0.79	0.91
朱沱	0.87	0.95
宜昌	0.61	0.85
高场	0.64	0.94
九江	0.86	0.95
汉口	0.84	0.94
螺山	0.84	0.94
大通	0.90	0.97

图 2 为模拟径流过程的 M-K 突变检验 Z 值变化。由图 2 可见,1961—1980 年长江流域的径流过程呈上下波动的变化趋势,1980 年以后基本呈增长趋势。UF 和 UB 两条曲线在 1990—2000 年存在多个交点,去除处于末端的交点,可以确定长江流域径流序列在 20 世纪 90 年代存在突变特征。有学者也得到相同的结论,Zeng 等^[25]在对长江上游径流变化特征的研究中发现长江上游及其支流均于 1990 年后出现突变;Zhu 等^[9]在量化气候变化和人类活动

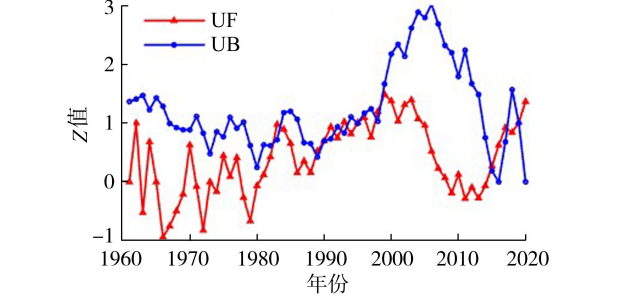


图 2 模拟径流过程的 M-K 突变检验 Z 值变化
Fig.2 Change of Z value of M-K mutation test of simulated runoff process

对极端低流的贡献研究中发现长江支流金沙江流域径流在 1990 年后出现突变。基于此, 本文确定 1991 年为长江流域径流序列突变年份, 划分 1961—1990 年为基准期, 1991—2020 年为影响期。

3.2 长江流域极端径流事件的频率特征

基于 PCR-GLOBWB 模型模拟的长江流域径流序列, 计算基准期和影响期自然情景和人类活动情景下的 1 月尺度的 SRI, 提取每年最大 SRI 值作为极端高流序列, 每年最小 SRI 值作为极端低流序列。极端低流序列进行 GEV 分布拟合时需先乘以 -1 进

行转换, 而极端高流序列直接进行 GEV 分布拟合, 再利用最大似然算法推导出 GEV 的位置、形状和尺度参数, 得到不同时期两种情景下极端径流的 GEV 分布, 如图 3 所示。结果表明, 决定系数 (R^2) 均在 0.94 以上, 均方误差 (MSE) 都在 0.003 以下, 说明 GEV 分布拟合效果较好。

设置第 90、95、98、99 百分位数分别代表重现期为 10、20、50、100 a 对应的极端径流, 通过计算不同重现期下的不同因素影响的极端早涝变化来分析气候变化和人类活动对极端径流的影响。图 4 为不同

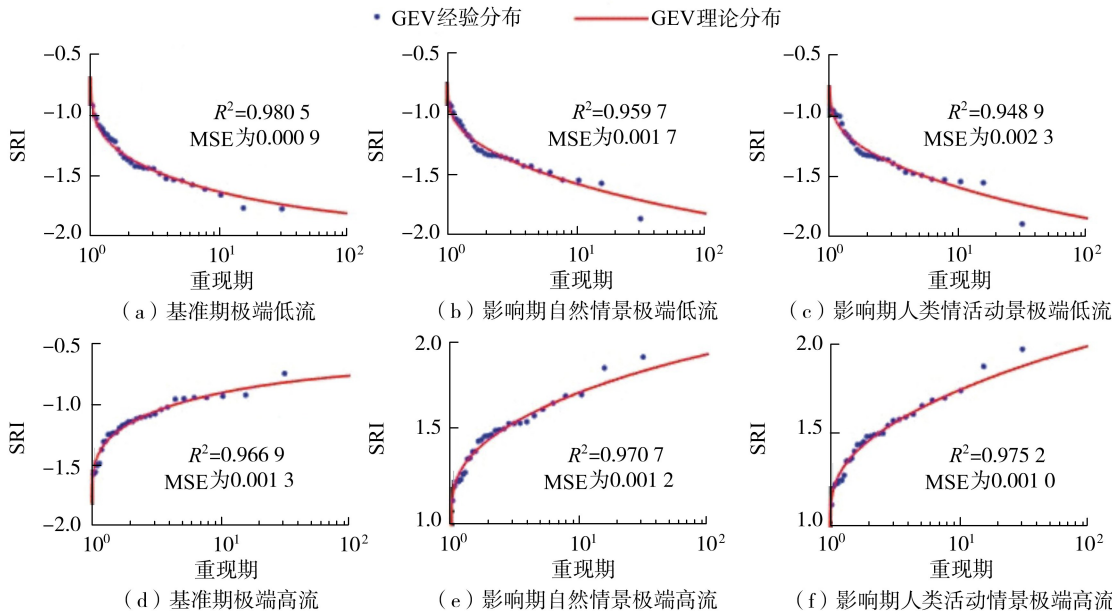


图 3 不同时期两种情景下极端径流的 GEV 分布

Fig. 3 GEV distribution of extreme runoff under two scenarios in different periods

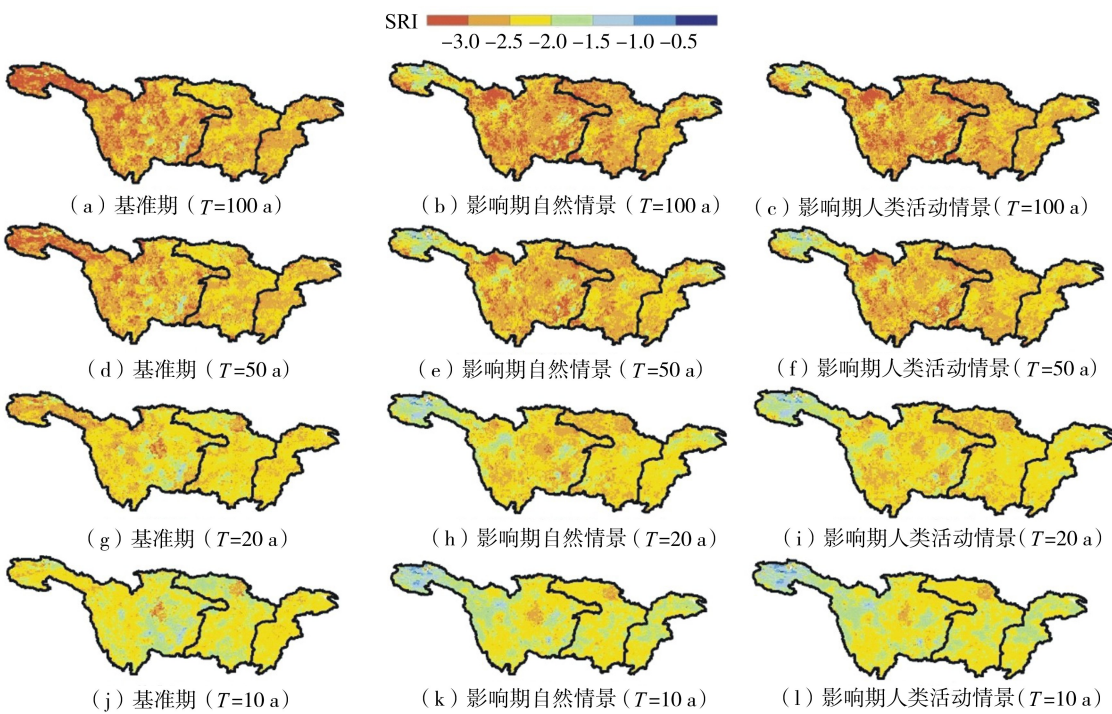


图 4 不同时期及重现期的两种情景下极端低流的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of extreme low current under two scenarios with different periods and recurrence periods

时期及重现期的两种情景下极端低流的空间分布,可见影响期自然情景和人类活动情景在不同重现期下的 SRI 相较于基准期在长江流域的上游源区有所增加,极端低流受气候变化和人类活动的影响有着显著的增加,极端低流事件得到缓解,而在长江流域中、下游地区的极端低流有所降低,极端低流事件加剧。两种情景下极端低流随重现期的增大而逐步降低,而影响期自然情景和人类活动情景下上游源区的极端低流的变化小于中、下游。此外,相较于气候变化,人类活动会增加流域极端低流的出现。这些结果表明长江流域内极端低流的动态复杂性,并说明气候变化的影响下,人类活动起到一定的调节作用。

图 5 为不同时期及重现期的两种情景下极端高流的空间分布,与极端低流的空间分布不同,相较于基准期,影响期自然和人类活动情景下极端高流对应的 SRI 在上游源区有所增加,极端高流事件在气候变化和人类活动的双重影响下有所加剧。与气候变化主导的极端高流事件相比,中、下游人类活动的作用在一定程度上缓解了这种影响,这一现象可能与中下游地区大量水库及水利设施的建设有关。中、下游水利基础设施通过精细化的水资源管理和调度策略,有效地调节了长江流域内的径流过程。在洪水季节,水库能够发挥重要的蓄洪滞洪功能,通过拦蓄多余的洪水,降低了下游极端高流严重程度。而在枯水季节,通过合理的水资源管理调度,为下游

地区提供必要的生态补水和生活、生产用水,缓解了极端低流的问题。这些水利设施对长江流域径流的调节起到了削减洪水和补充枯水的作用,从而在整体上减轻了极端高流事件的严重性。

3.3 长江流域年极端径流变化归因分析

图 6 为不同重现期下各因素影响极端低流的变化范围空间分布。由图 6 可见,长江流域上游源区极端低流在气候变化和人类活动的共同影响下有一定的缓解,其中气候变化的影响显著大于人类活动的影响,气候变化是主导因素。在长江流域的上游中部和中游,气候变化因素在大面积上减少了极端低流,而人类活动主要起到减缓极端低流的影响作用,这是由于国家经过几十年的粗放式发展,认识到环境保护的重要性,在 20 世纪 90 年代实施了退耕还林政策以及进行了大规模的水利设施建设。在长江流域下游,人类活动相较于气候变化在加剧极端低流事件方面起到了更显著的作用,这主要归因于下游的人类活动用水更多,加剧了极端低流的危害。

图 7 为不同重现期下各因素影响极端高流的变化范围空间分布。由图 7 可见,极端高流变化在长江上游源区与极端低流相似,人类活动对极端高流的影响较小,源区极端高流加剧主要是受气候变化影响。在其他区域,极端高流变化范围的空间分布与极端低流不同。在长江流域上游中部以及中、下游,气候变化和人类活动都加剧了极端高流情况,但在上游四川盆地以及中游北部的丹江口水库区域

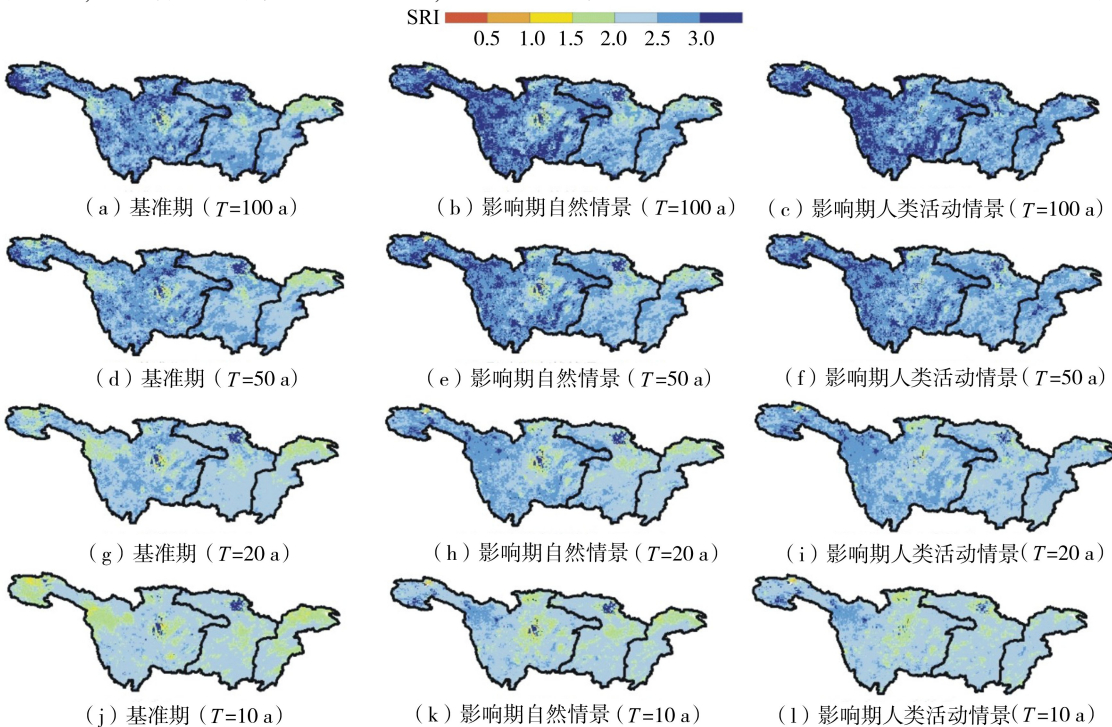


图 5 不同时期及重现期的两种情景下极端高流的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of extreme high current under two scenarios with different periods and recurrence periods

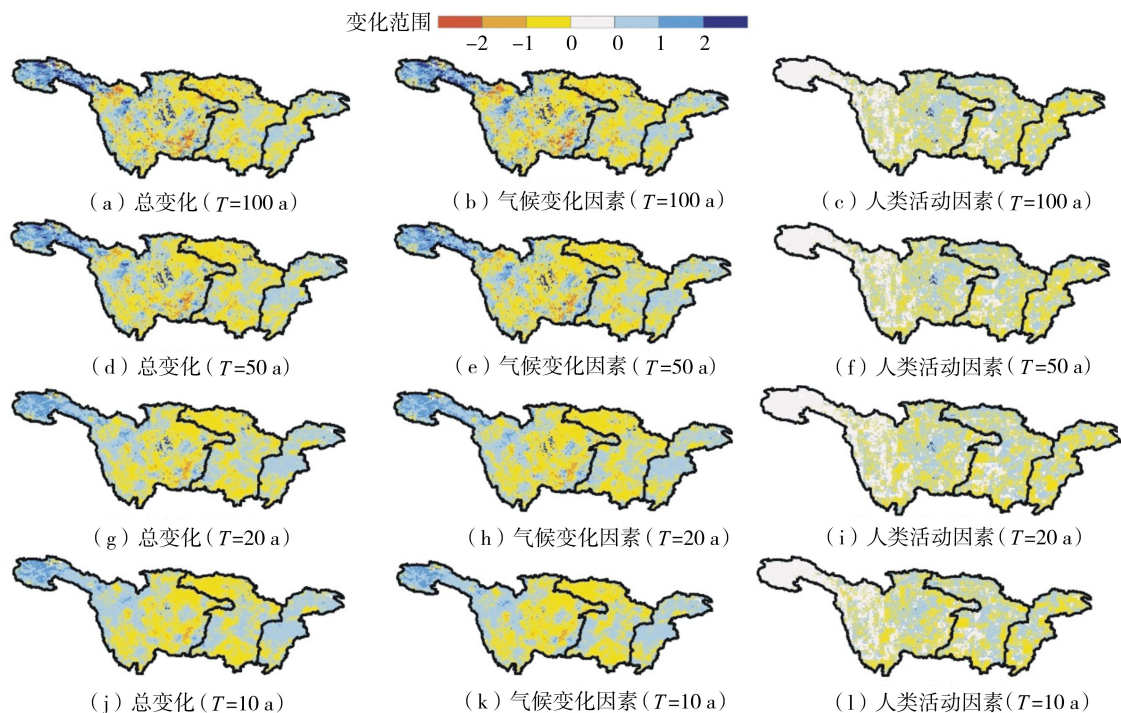


图 6 不同重现期下各因素影响极端低流的变化范围空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of variation range of extreme low current affected by various factors under different recurrence periods

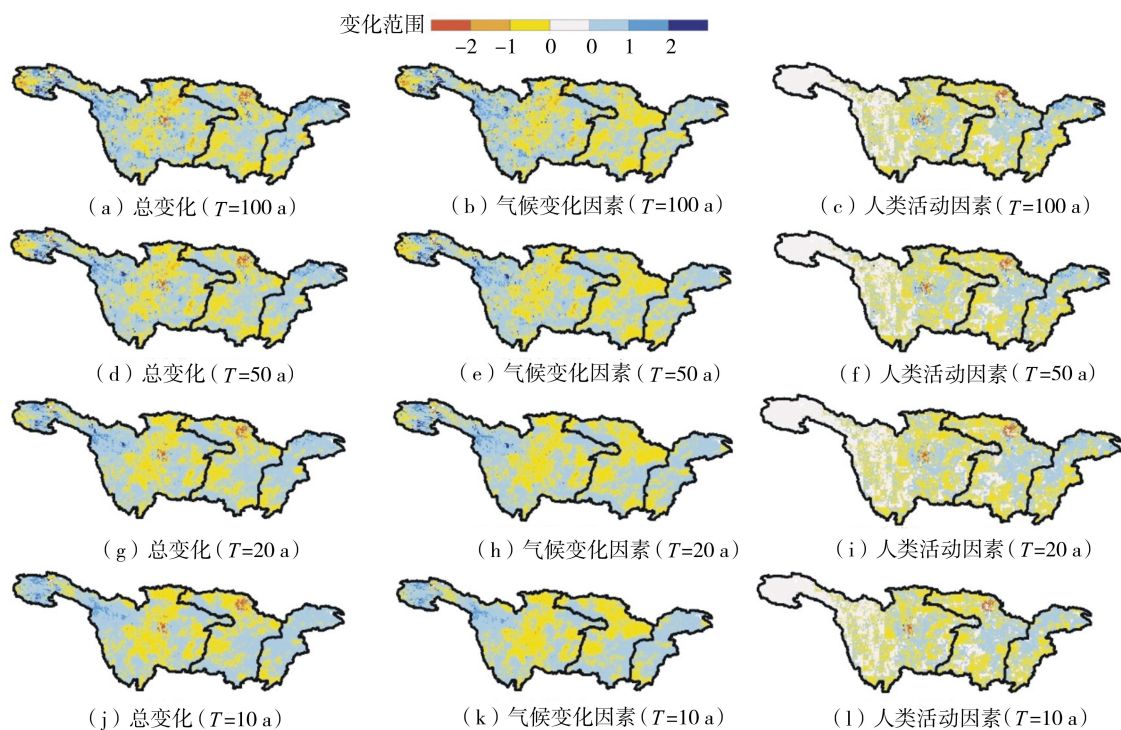


图 7 不同重现期下各因素影响极端高流的变化范围空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of variation range of extreme high current affected by various factors under different recurrence periods

人类活动较大地消减了极端高流,这可能是由于水库等水利设施的建设对流域极端高流起到了泄洪作用,而且随着重现期增大消减作用越明显。在长江流域中、下游极端高流呈现加剧的趋势,由于中、下

游有着大面积的灌区,大量的灌溉用水导致区域的极端高流风险增加。

图 8 为栅格尺度上极端径流受气候变化和人类活动影响的变化范围,可以看出气候变化和人类活

动对极端径流的影响存在显著差异。由图 8(a)(b)可见,大部分箱体位于 0 以上,尤其是在第 99 百分位数,表明人类活动主要加剧了极端高流事件,并在一定程度上缓解了极端低流的情况。人类活动,如灌溉用水、土地利用变化等,通常会改变自然水文过程,增加极端高流事件的强度和频率。同时,水库调度也能减缓干旱早期的极端低流现象。由图 8(c)可见,极端高流事件的变化范围表现出较为平均的分布,显示气候变化对极端高流加剧和减缓的影响相差不大。相比之下,图 8(d)中大部分箱体位于 0 以下,表明气候变化对极端低流的影响主要是加剧的。随着全球气温上升、蒸发量增加及降水模式的变化,一些地区的干旱和水资源匮乏现象变得更加严重,导致极端低流现象的发生频率和强度增加。从箱体的范围来看,人类活动影响的变化范围小于气候变化的影响,极端径流的变化范围中,人类活动影响是气候变化影响的 10%~20%,说明气候变化是极端径流变化的主导因素。

表 2 为不同重现期下人类活动和气候变化加剧极端径流的栅格占比。由表 2 可见,上、中、下游人类活动加剧的重现期为 100a 的极端低流的栅格占比分别为 29%、41%和 56%,加剧极端高流的栅格占比分别为 33%、43%和 55%,表明从上游到下游人类活动加剧极端径流的影响占比逐步扩大。上、中、下游人类活动导致极端高流加剧的占比相对较小,栅

格占比为 29%~56%,而气候变化影响下的栅格占比为 25%~79%。在加剧极端低流方面,人类活动在上、中游的影响栅格占比小于气候变化,但下游人类活动大于气候变化。从上游到下游,人类活动的影响加剧的栅格占比逐步增加。

4 讨论

近年气候变化对径流变化的影响研究表明,气温上升、降水模式变化是导致流域极端水文事件(如极端高流和极端低流)变化的重要因素^[26-28]。Chen 等^[29]的研究指出,长江流域源区金沙江上、中游地区影响极端径流变化的主导因素是气候变化,与本文研究结果一致。人类活动对极端低流起到缓解的作用,可能是因为水库等水利工程能够有效调节水流,减少极端低流事件,吴凡等^[30]的研究发现在 1990 年后水利工程对长江流域削洪补枯的作用明显提升,减缓了干旱的影响。同时,长江流域中、下游四川盆地和丹江口水库地区的水利设施有效缓解了极端高流现象,调控作用明显。此外,在长江中、下游地区,土地利用类型变化、城市化进程等会加剧极端高流的发生,与 Wang 等^[31]的研究结论一致。

本文采用 PCR-GLOBWB 模型对长江流域的径流序列进行模拟,整体效果较好,但也存在部分站点的 NSE 较低,这可能是因为 PCR-GLOBWB 模型的

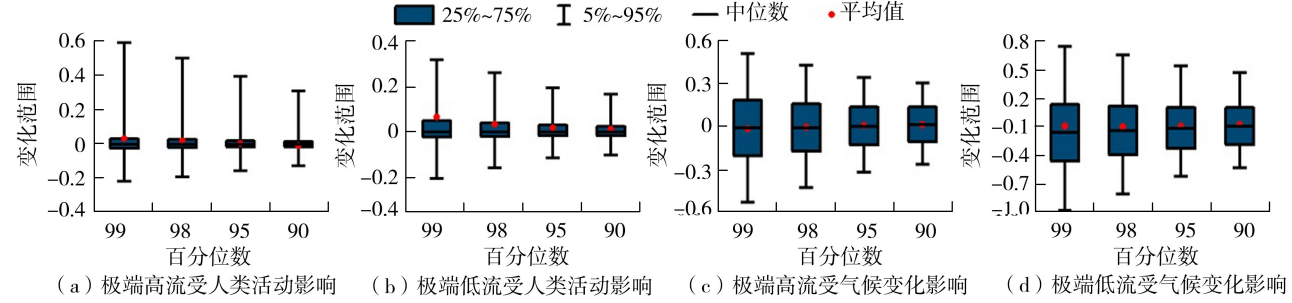


图 8 栅格尺度上极端径流受人类活动和气候变化影响的变化范围

Fig. 8 Range of changes in extreme runoff affected by human activities and climate change on grid scale

表 2 不同重现期下人类活动和气候变化加剧极端径流的栅格占比

事件		上游栅格占比/%			中游栅格占比/%			下游栅格占比/%		
		总变化	人类活动	气候变化	总变化	人类活动	气候变化	总变化	人类活动	气候变化
极端高流	10	59	31	58	57	43	52	81	56	79
	20	61	31	60	56	43	50	77	56	73
	50	62	32	61	54	43	49	73	56	67
	100	62	33	61	53	43	48	70	55	65
极端低流	10	43	31	44	60	41	63	25	53	25
	20	44	30	45	62	41	64	29	52	30
	50	45	29	46	62	41	64	37	55	37
	100	45	29	47	62	41	64	40	56	41

输入数据(如气候、土地利用、水库取用水等)存在误差或不完整性,在部分地区模型未能较好地模拟水循环等一系列水文过程,进而影响径流模拟的准确性。未来可进一步补充输入数据,完善流域的参数率定过程,降低模型的不确定性,提高模拟结果的可靠性。

5 结 论

- a. 利用 PCR-GLOBWB 模型可以较好地模拟长江流域径流过程,全部水文站的 NSE 值在 0.6 以上,大部分水文站的 r 值在 0.9 以上。长江流域径流过程的突变发生在 1991 年,基于此将研究时段划分为基准期(1961—1990 年)和影响期(1991—2020 年)。
- b. 气候变化因素是导致长江流域极端径流变化的主要因素,尤其在上游源区。气候变化加剧了上游中部及中、下游地区的极端径流事件,而人类活动对极端低流有所缓解。在四川盆地及丹江口水库区域,水库等水利设施有效减轻了极端高流,但在中、下游地区却加剧了此类灾害。
- c. 气候变化加剧极端低流的栅格占比大于人类活动,人类活动影响的栅格占比约为气候变化影响的 52%~90%。从上游到下游,人类活动对百年一遇的极端径流的影响逐步提高,栅格占比从 30%左右增加到 50%左右。

参考文献:

[1] PALMER N T, RÄISÄNEN J. Quantifying the risk of extreme seasonal precipitation events in a changing climate [J]. *Nature*, 2002, 415(6871): 512-514.

[2] 荣艳淑,王文,王鹏,等. 淮河流域极端降水特征及不同重现期降水量估计[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(1): 1-8. (RONG Yanshu, WANG Wen, WANG Peng, et al. Analysis of characteristics of extreme rainfall and estimate of rainfall during return periods in Huaihe Basin [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2012, 40(1): 1-8. (in Chinese))

[3] 李文婷,杨肖丽,任立良. 赣江流域气候和土地利用变化对蓝绿水的影响[J]. *水资源保护*, 2022, 38(5): 166-173. (LI Wenting, YANG Xiaoli, REN Liliang. Effects of climate and land use changes on blue and green water in the Ganjiang River Basin [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(5): 166-173. (in Chinese))

[4] 马明卫,韩宇平,严登华,等. 特大干旱事件灾害孕育机理及影响研究进展[J]. *水资源保护*, 2020, 36(5): 11-21. (MA Mingwei, HAN Yuping, YAN Denghua, et al. Research progress on the mechanism and influence of extreme drought-induced disasters [J]. *Water Resources*

Protection, 2020, 36(5): 11-21. (in Chinese))

[5] HUANG Anqi, GAO Guangyao, YAO Liqiang, et al. Spatiotemporal variations of inter-and intra-annual extreme streamflow in the Yangtze River Basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 629: 130634.

[6] 曹丽娟,董文杰,张勇. 未来气候变化对黄河和长江流域极端径流影响的预估研究[J]. *大气科学*, 2013, 37(3): 634-644. (CAO Lijuan, DONG Wenjie, ZHANG Yong. Estimation of the effect of climate change on extreme streamflow over the Yellow River and Yangtze River Basins [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2013, 37(3): 634-644. (in Chinese))

[7] 黄丹青,钱永甫. Community Climate Model 3 模拟夏季极端降水的初步分析[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2007, 43(3): 238-248. (HUANG Danqing, QIAN Yongpu. The elementary analysis of summer extreme precipitation events simulated by Community Climate Model 3 [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 2007, 43(3): 238-248. (in Chinese))

[8] SUN Hemin, KRYSAANOVA V, GONG Yu, et al. The recent trends of runoff in China attributable to climate change[J]. *Climatic Change*, 2024, 177(11): 159.

[9] ZHU Shuang, XU Zhanya, LUO Xiangang, et al. Quantifying the contributions of climate change and human activities to drought extremes, using an improved evaluation framework[J]. *Water Resources Management*, 2019, 33(15): 5051-5065.

[10] 吴立钰,张璇,李冲,等. 气候变化和人类活动对伊逊河流域径流变化的影响[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(7): 1744-1756. (WU Liyu, ZHANG Xuan, LI Chong, et al. Impacts of climate change and human activities on runoff variations in Yixun River Basin [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(7): 1744-1756. (in Chinese))

[11] SUTANUDAJA E H, VAN BEEK R, WANDERS N, et al. PCR-GLOBWB 2: a 5 arcmin global hydrological and water resources model [J]. *Geoscientific Model Development*, 2018, 11(6): 2429-2453.

[12] WU Fan, YANG Xiaoli, CUI Zhouyu, et al. The impact of human activities on blue-green water resources and quantification of water resource scarcity in the Yangtze River Basin [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 909: 168550.

[13] 杨肖丽,崔周宇,任立良,等. 1966—2015 年长江流域水文干旱时空演变归因[J]. *水科学进展*, 2023, 34(3): 349-359. (YANG Xiaoli, CUI Zhouyu, REN Liliang, et al. Patterns and attributions of hydrological drought in the Yangtze River basin from 1966 to 2015 [J]. *Advances in Water Science*, 2023, 34(3): 349-359. (in Chinese))

[14] 沈哲辉,韩静妍,桂敬聪,等. 长江流域再分析与卫星反演降水数据的适用性分析[J]. *河海大学学报(自然科*

- 学版), 2025, 53 (1): 50-61. (SHEN Zhehui, HAN Jingyan, GUI Jingcong, et al. Analysis of the applicability of reanalysis and satellite-derived precipitation data in the Yangtze River Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(1): 50-61. (in Chinese))
- [15] 姜雨彤,郝增超,冯思芳,等. 长江与黄河流域复合高温干旱事件时空演变特征[J]. 水资源保护, 2023, 39 (2): 70-77. (JIANG Yutong, HAO Zengchao, FENG Sifang, et al. Spatiotemporal evolution characteristics in compound hot-dry events in Yangtze River and Yellow River basins [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (2): 70-77. (in Chinese))
- [16] WADA Y, WISSER D, BIERKENS M F P. Global modeling of withdrawal, allocation and consumptive use of surface water and groundwater resources[J]. Earth System Dynamics, 2014, 5(1): 15-40.
- [17] SHUKLA S, WOOD A W. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought [J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(2): L02405.
- [18] 陈伏龙,杨宽,蔡文静,等. 基于 GAMLSS 模型的水文干旱指数研究: 以玛纳斯河流域为例[J]. 地理研究, 2021, 40(9): 2670-2683. (CHEN Fulong, YANG Kuan, CAI Wenjing, et al. Study on hydrological drought index based on GAMLSS: taking Manas River Basin as an example[J]. Geographical Research, 2021, 40(9): 2670-2683. (in Chinese))
- [19] HAMED K H. Trend detection in hydrologic data: the Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis[J]. Journal of Hydrology, 2008, 349(3/4): 350-363.
- [20] 张应华,宋献方. 水文气象序列趋势分析与变异诊断的方法及其对比[J]. 干旱区地理, 2015, 38(4): 652-665. (ZHANG Yinghua, SONG Xianfang. Techniques of abrupt change detection and trends analysis in hydroclimatic time-series: advances and evaluation [J]. Arid Land Geography, 2015, 38(4): 652-665. (in Chinese))
- [21] HE Wenping, FENG Guolin, WU Qiong, et al. A new method for abrupt dynamic change detection of correlated time series[J]. International Journal of Climatology, 2012, 32(10): 1604-1614.
- [22] FISHER R A, TIPPETT L H C. Limiting forms of the frequency distribution of the largest or smallest member of a sample[C]//GREEN B J. Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society. Cambridge: Cambridge University Press, 1928: 180-190.
- [23] 赵玲玲,张鑫辉,刘昌明,等. 华南中小流域设计暴雨洪水同频率检验与重现水平推算[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51 (2): 157-163. (ZHAO Lingling, ZHANG Xinhui, LIU Changming, et al. Same frequency test and recurrence level estimation of design storm flood in a small and medium-sized basin of South China [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51 (2): 157-163. (in Chinese))
- [24] 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.
- [25] ZENG Feng, HE Qiulan, LI Yao, et al. Reduced runoff in the upper Yangtze River due to comparable contribution of anthropogenic and climate changes[J]. Earth' s Future, 2024, 12(7): e2023EF004028.
- [26] 李文鑫,金君良,舒章康,等. 气候变化对嘉陵江流域水资源和极端水文事件的影响[J]. 水利水运工程学报, 2024 (2): 20-33. (LI Wenxin, JIN Junliang, SHU Zhangkang, et al. Assessing the impact of climate change on water resources and extreme hydrological events in the Jialing River Basin [J]. Hydro-Science and Engineering, 2024(2): 20-33. (in Chinese))
- [27] 徐宗学,班春广,张瑞. 我国主要河川径流演变规律与归因及其区域特征[J]. 水利水电科技进步, 2024, 44 (1): 1-8. (XU Zongxue, BAN Chunguang, ZHANG Rui. Evolution law, attribution and regional characteristics of runoff for major rivers in China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44 (1): 1-8. (in Chinese))
- [28] FANG Jian, KONG Feng, FANG Jiayi, et al. Observed changes in hydrological extremes and flood disaster in Yangtze River Basin: spatial-temporal variability and climate change impacts [J]. Natural Hazards, 2018, 93 (1): 89-107.
- [29] CHEN Qihui, CHEN Hua, WANG Jinxing, et al. Impacts of climate change and land-use change on hydrological extremes in the Jinsha River Basin [J]. Water, 2019, 11 (7): 1398.
- [30] 吴凡,杨肖丽,任立良,等. 人类活动影响下的中国各大流域水文干旱状态演变规律[J]. 水利学报, 2024, 55 (12): 1448-1460. (WU Fan, YANG Xiaoli, REN Liliang, et al. Evolutionary law of hydrological and drought states in large basins of China under the influence of human activities [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55 (12): 1448-1460. (in Chinese))
- [31] WANG Qiang, XU Youpeng, WANG Yuefeng, et al. Individual and combined impacts of future land-use and climate conditions on extreme hydrological events in a representative basin of the Yangtze River Delta, China [J]. Atmospheric Research, 2020, 236: 104805.

(收稿日期: 2024 - 10 - 15 编辑: 王芳)