

气候变化与人类活动对鄱阳湖流域入湖水沙变化的贡献率分析

赵雅楠^{1,2,3}, 黄国鲜², 童思陈^{1,3}, 王志超⁴, 许新发⁴, 李友辉⁵

(1. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074; 2. 中国环境科学研究院水生态环境研究所, 北京 100012;

3. 重庆交通大学国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074; 4. 江西省水利科学研究院, 江西 南昌 330029;

5. 中铁水利水电规划设计集团有限公司, 江西 南昌 330029)

摘要:为量化气候变化与人类活动对鄱阳湖流域入湖水沙变化的贡献率,基于 1957—2023 年鄱阳湖流域 5 大支流水文站水沙实测资料,采用 Mann-Kendall 检验法和累积距平法分析入湖水沙演变趋势及突变点,利用 SWAT 模型模拟流域突变点前后的水沙过程。结果表明:鄱阳湖流域年均入湖径流量总体呈不显著增加趋势,年均入湖输沙量呈显著减少趋势;1990 年为鄱阳湖流域入湖水沙突变点,以 1957—1989 年为基准期,1990—2023 年年均入湖径流量较基准期增加了 101.2 亿 m³,年均入湖输沙量减少了 629.9 万 t;气候变化是导致鄱阳湖流域入湖径流量增加的主要驱动因素,贡献率为 78.7%;人类活动是鄱阳湖流域入湖输沙量减少的主要驱动因素,贡献率为 85.1%。

关键词:水沙变化;气候变化;人类活动;SWAT 模型;鄱阳湖流域

中图分类号:P333 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)06-0113-10

Analysis of contribution rates of climate change and human activities to changes in runoff and sediment inflow into lake in the Poyang Lake Basin//ZHAO Yanan^{1,2,3}, HUANG Guoxian², TONG Sichen^{1,3}, WANG Zhichao⁴, XU Xinfu⁴, LI Youhui⁵ (1. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Institute of Water Ecology and Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 4. Jiangxi Provincial Institute of Water Sciences, Nanchang 330029, China; 5. China Railway Water Conservancy & Hydropower Planning and Design Group, Co., Ltd., Nanchang 330029, China)

Abstract: To quantitatively assess the contribution rates of climate change and human activities to the changes in runoff and sediment inflow into Poyang Lake, based on the observed runoff and sediment data at hydrological stations of five major tributaries in the Poyang Lake Basin from 1957 to 2023, the trend and abrupt points of runoff and sediment inflow into the lake were analyzed using the Mann-Kendall test and cumulative anomaly method, and the SWAT model was used to simulate water-sediment processes before and after the abrupt points in the basin. The results showed that the annual average runoff inflow into Poyang Lake exhibited an insignificant increasing trend, while the annual average sediment load into the lake demonstrated a statistically significant decreasing trend, with abrupt changes of runoff and sediment occurring in 1990. Compared with the baseline period of 1957-1989, the annual average runoff inflow into the lake from 1990 to 2023 increased by 10.12 billion m³, and the annual average sediment load into the lake decreased by 6.298 million t. Climate change is the primary driving factor leading to the increase in the runoff inflow into Poyang Lake, with a contribution rate of 78.7%, and human activities play a dominant role in reduction of the sediment load into Poyang Lake, with a contribution rate of 85.1%.

Key words: changes in runoff and sediment; climate change; human activities; SWAT model; the Poyang Lake Basin

气候变化与人类活动是影响水文循环和水资源演变的两个主要驱动因素^[1-2],定量解析两者对流域水文水资源变化的相对贡献有助于流域水资源的合

理开发和可持续利用。国内外有关定量区分气候变化与人类活动对流域水文影响贡献的研究主要采用对比分析法、回归分析法及水文模型等^[3-5]。由于水

基金项目:江西省科技厅重大科技项目(20213AAG01012);国家自然科学基金项目(U2240202,52079130)
作者简介:赵雅楠(1998—),女,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:622220960067@mails.cqjtu.edu.cn
通信作者:黄国鲜(1975—),男,研究员,博士,主要从事水生态环境研究。E-mail:huanggx@craes.org.cn

文模型具有较强的物理基础并能够综合考虑流域水文气象要素的空间异质性等优点,已成为各流域评估气候变化与人类活动水文响应的主要方法^[6-9]。在众多水文模型中,SWAT(soil and water assessment tool)模型可对流域水文过程、土地利用、水质污染等多种因素进行定量分析^[10],已在鄱阳湖流域相关研究中得到应用^[11-12],具有较好的适用性。

鄱阳湖是我国最大的淡水湖,是长江流域最重要的自然资源和生态保护区之一,具有调蓄洪水、调节水环境、保护生物多样性等功能,鄱阳湖流域的生态和水资源保护对长江流域可持续发展具有重要意义。鄱阳湖流域入湖水沙 80% 以上来源于赣江、抚河、信江、修水、饶河 5 大支流流域(以下简称为五河流域)^[13],五河流域入湖水沙过程对维持鄱阳湖流域生态环境功能有着极其重要的影响。近年来鄱阳湖流域面临区域水资源分布不均、干旱洪涝灾害频发等诸多挑战^[14-16],变化环境下鄱阳湖流域入湖水沙变化特征及驱动因素受到众学者的广泛关注。曾瑜等^[17]对 1961—2016 年鄱阳湖流域入湖水沙变化趋势及影响因素进行了分析,指出入湖年径流量变化不显著,而入湖输沙量显著下降,径流量变化主要受气候变化影响,输沙量变化主要受人类活动影响。刘同宣等^[18]采用 1956—2018 年实测资料对鄱阳湖流域入湖水沙通量及典型断面形态变化进行了研究,发现水利工程、水土保持、人工采砂等人类活动是入湖水沙通量及河道断面形态变化的主要影响因素。胡江军等^[19]研究表明,鄱阳湖流域大规模水利工程建设是导致入湖输沙量减少的最主要原因。葛士林等^[20]指出鄱阳湖入湖输沙量自 20 世纪 90 年代起呈显著减少趋势且与五河流域各梯级水库建设有关。上述研究仅对鄱阳湖流域入湖水沙变化进行了归因分析,并未对其驱动因素相对贡献进行具体研究。

本文基于鄱阳湖 5 个入湖代表水文站(赣江外洲站、信江梅港站、抚河李家渡站、修水万家埠站、饶河虎山站) 1957—2023 年径流和泥沙实测数据,利用 Mann-Kendall 非参数检验法(以下简称 M-K 检验法)和累积距平法对鄱阳湖流域入湖水沙演变趋势和突变时间进行分析,建立适用于鄱阳湖流域的 SWAT 模型,模拟突变点前后的水沙过程,量化气候变化与人类活动对鄱阳湖流域入湖水沙变化的贡献率,以期为了保护鄱阳湖流域水资源、促进其生态可持续发展和综合治理提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

鄱阳湖流域主要处于长江流域中下游南岸的江

西省境内,地理位置为 24°29'N~30°05'N、113°34'E~118°29'E(图 1),流域总面积 16.22 万 km²,占江西省陆地总面积的 97.2%^[21]。鄱阳湖主要接收赣江、信江、修水、饶河、抚河 5 大支流的水沙输送,五河流域面积占鄱阳湖流域总面积的 84%。鄱阳湖流域三面环山,中部及北部地势较低,由周边向内倾斜,地貌以山地、丘陵为主,山地、丘陵、平原、水体分别占鄱阳湖流域总面积的 36%、42%、12%和 10%。地势起伏较大,地形复杂,周边山脉平均海拔为 1 000 m,少数山峰海拔约为 2 000 m,而五河下游和鄱阳湖湖区地势较低,平均海拔为 20 m。鄱阳湖流域位于亚热带季风气候带,四季分明,偶有台风侵袭,年平均气温、风速、相对湿度和年水面蒸发量分别为 16.2~19.7℃、1.0~3.8 m/s、75%~83%和 800~1 200 mm。流域内雨量充沛,时空分布不均,空间分布上呈南多北少、东多西少,年降水量为 1 343~1 843 mm,降雨主要集中在 4—9 月,4—6 月自南向北先后进入暴雨集中期,7—9 月常出现台风型暴雨。

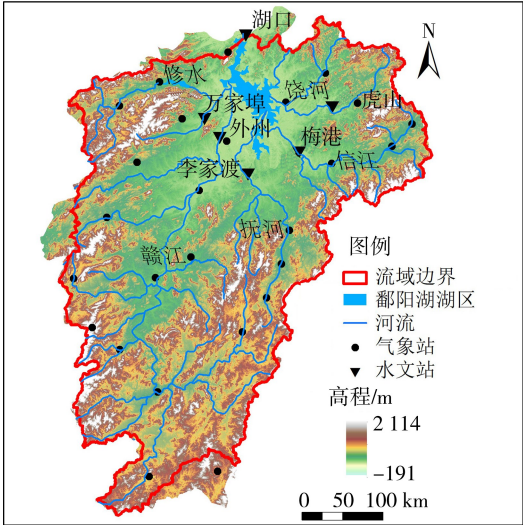


图 1 鄱阳湖流域及其主要气象站和水文站分布

Fig.1 The Poyang Lake Basin and distributions of major meteorological and hydrological stations

1.2 数据来源

收集了鄱阳湖流域数字高程(DEM)、气象、土地利用类型、土壤类型等数据并进行分析,用于建立 SWAT 模型基础数据库。DEM 数据来源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>),分辨率为 90m,为了减少空间插值和分辨率等问题对 DEM 的影响,对 DEM 进行图像裁剪、填洼处理,并将所有空间数据投影坐标系统一为 WGS_1984_UTM_Zone_49N。将坡度分为 5 个等级:0°~3°、>3°~14°、>14°~22°、>22°~72°、>72°。从中国气象数据共享服务系统(<http://data.cma.cn/>)收集了流域内 1955—2023 年 26 个气象站数据,包括日降水量、太

阳辐射、最高(低)温度、相对湿度和平均风速。鄱阳湖流域 5 个人湖代表水文站 1957—2023 年逐月水沙实测数据来源于水文年鉴和江西水文局,5 个水文站的位置分布和主要参数分别见图 1 和表 1。采用由中国科学院资源环境科学数据平台(<http://www.resdc.cn/>)提供的 30m 分辨率土地利用数据,根据 SWAT 模型土地利用分类标准将原始数据重分类得到 6 种土地利用类型:耕地、林地、草地、水域、城镇建设用地、未利用土地,鄱阳湖流域 1980 年土地利用类型分布如图 2(a)所示。土壤类型数据资料来源于联合国粮农组织提供的世界土壤数据库(<http://www.fao.org/data/en/>),分辨率为 1 km,如图 2(b)所示,经过重新分类后流域内的土壤类型共有 15 种。

表 1 鄱阳湖流域各代表水文站基本情况

Table 1 Basic information of representative hydrological stations in the Poyang Lake Basin

水文站	水系	控制面积/km ²	多年平均径流量/亿 m ³	多年平均输沙量/万 t
外洲	赣江	80 948	688. 2	602. 30
梅港	信江	15 811	179. 3	111. 50
李家渡	抚河	15 535	123. 9	86. 80
万家埠	修水	3 584	35. 0	18. 70
虎山	饶河	6 374	70. 3	35. 15

2 研究方法

2.1 趋势检验和突变点识别方法

M-K 检验法和累积距平法广泛用于水文气象等要素的变化趋势分析、显著性检验和突变点识别,具体计算与分析方法详见文献[22-25]。采用上述两种方法对鄱阳湖流域入湖年径流和年输沙量进行趋势性分析和突变检验,将研究时段划分为基准期和影响期,认定基准期无人类活动影响或受人类活动影响较小,影响期入湖水沙受气候变化与人类活动共同影响。

2.2 SWAT 模型

SWAT 模型是基于 GIS 技术且具有物理基础的

分布式水文模型,融合了多个模型的特点,适用于复杂流域长时间序列水文过程模拟,是定量分析各因素对水沙变化影响的重要工具之一^[26-27]。根据收集的研究区资料情况,本文采用 SWAT 模型和水文模拟分割分析法对鄱阳湖流域入湖水沙变化影响因素进行定量分析。通过 DEM 对河网进行提取后,考虑其流域面积、地形、坡度及土地覆盖等条件,设置河道集水面积阈值为 5 万 hm²,将鄱阳湖流域划分成 191 个子流域。考虑到流域内不同土地利用、土壤类型以及坡度对水文循环的影响,在划分子流域的基础上引入了水文响应单元(hydrological response units,HRU),将具有相同水文特性的区域归集为一个单元。将土地利用类型、土壤类型及坡度类型的阈值均设置为 10%,最终共生成 2 178 个 HRU。

参数率定是水文模型优化的重要内容之一,SWAT 模型中参数众多,为提高模型计算效率,需采用适当的方法进行参数敏感性分析,筛选出敏感性较高的参数进行率定。SWAT-CUP (SWAT calibration uncertainty procedures)作为 SWAT 模型辅助软件可以提供 SUFI 2 (sequential uncertainty fitting version 2)、GLUE (generalized likelihood uncertainty estimation)和 ParaSol 等多种算法进行参数敏感性分析和校准,以提升模型的准确性。SUFI 2 算法运行时间较短且校准效果较好,因此本文采用该算法对敏感参数进行率定。采用 *t*-stat 与 *p* 值两项指标对参数敏感性进行评估,*t*-stat 的绝对值越大,且 *p* 值越接近 0,对应参数的敏感性越高;当 *p* < 0. 5 时,认为该参数对模型的影响较小。

2.3 模型评价指标

采用确定系数(*R*²)和纳什效率系数(*E*_{NS})对 SWAT 模型在鄱阳湖流域的适用性进行评价。*R*²和 *E*_{NS} 越接近于 1,则模拟结果越接近实测值,说明模型在该流域的适用性也越好;若 *R*² > 0. 5、*E*_{NS} > 0. 6,则认为模拟结果满足要求^[28]。

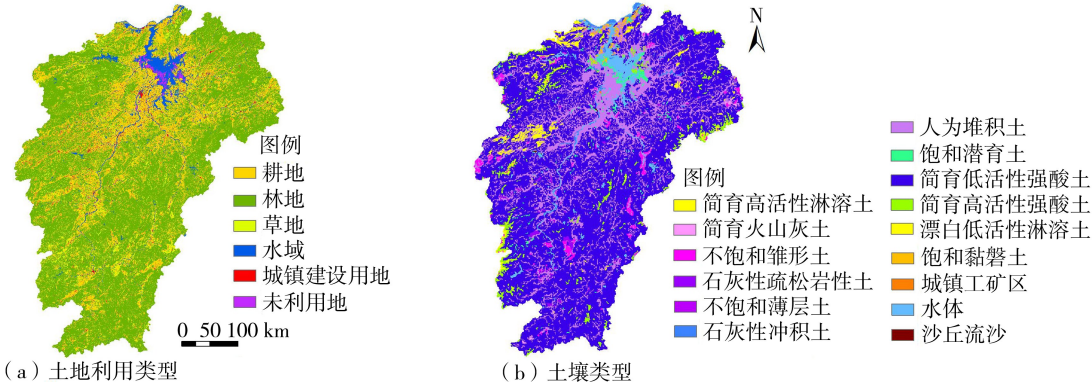


图 2 鄱阳湖流域土地利用类型和土壤类型空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of land use and soil types in the Poyang Lake Basin

2.4 定量分析方法

假设气候变化与人类活动两个因子相互独立,影响期气候变化与人类活动共同作用导致入湖径流量或输沙量的总变化量 ΔQ_T 为

$$\Delta Q_T = \Delta Q_c + \Delta Q_h \tag{1}$$

其中

$$\Delta Q_c = Q_{s1} - Q_{s0}$$

式中: ΔQ_c 、 ΔQ_h 分别为影响期气候变化、人类活动导致入湖径流量或输沙量的变化量; Q_{s0} 为对模型参数进行率定验证后得到的基准期入湖径流量或泥沙量的模拟值; Q_{s1} 为不改变基准期土地利用数据和参数,输入影响期气象数据运行模型,获得的气候变化影响下影响期入湖径流量或输沙量的模拟值。

影响期气候变化与人类活动对鄱阳湖入湖水沙变化的贡献率 η_c 和 η_h 分别为

$$\eta_c = \Delta Q_c / \Delta Q_T \times 100\% \tag{2}$$

$$\eta_h = \Delta Q_h / \Delta Q_T \times 100\% \tag{3}$$

3 结果与分析

3.1 水沙变化趋势及突变分析

利用 M-K 检验法对 5 个入湖代表水文站 1957—2023 年年径流量和年输沙量进行趋势性检验,结果如表 2 所示。由表 2 可得出:①除李家渡站年径流量呈不显著($P>0.05$)减少趋势外,外洲站、梅港站、万家埠站、虎山站年径流均呈不显著增加趋势;②万家埠站年输沙量呈不显著减少趋势,李家渡站年输沙量呈显著($P<0.05$)减少趋势,外洲站、梅港站的年输沙量减少趋势更为显著,达到了 0.01 显著性水平,而虎山站年输沙量呈显著($P<0.01$)增加趋势;③全流域年径流量呈不显著增加趋势,年输沙

量呈显著($P<0.01$)减少趋势。

表 2 鄱阳湖流域入湖水沙变化 M-K 趋势检验结果
Table 2 Results of M-K trend tests for changes in runoff and sediment inflow into lake in the Poyang Lake Basin

水文站	年径流量检验结果		年输沙量检验结果	
	Z	β	Z	β
外洲	0.79	11.16	-7.70 **	-19.01
梅港	1.40	5.72	-4.31 **	-2.20
李家渡	-0.45	-1.66	-2.33 *	-1.02
万家埠	1.75	1.40	-1.19	-0.12
虎山	1.11	1.84	3.17 **	0.91
全流域	0.81	16.42	-6.09 **	-22.30

注:Z 为 M-K 检验统计量, β 为序列斜率;*、** 分别表示达到 0.05 和 0.01 显著性水平,无标注表示未达到 0.05 显著性水平。

为划分基准期和影响期,采用 M-K 检验法对鄱阳湖流域入湖年径流量和年输沙量进行突变点检验,结果如图 3 和图 4 所示。考虑到仅使用 M-K 检验法不能完全直观地判断出突变点,利用累积距平法(图 5)进一步对 M-K 突变检验曲线进行综合分析。

由图 3 可知,各入湖代表水文站及全流域入湖年径流量 UF、UB 曲线在置信区间内均出现了多次交叉,无法直接判断径流突变点。外洲站除 1965—1975 年 UF 统计值小于 0 外,其余时期均大于 0,1990 年后外洲站 UF 曲线出现更为明显的增长,结合累积距平曲线得出 1990 年为赣江流域入湖径流量突变点。同外洲站一样,梅港站 UF 统计值整个时期几乎均大于 0,1990 年后梅港站 UF 曲线增加趋势更为明显,结合累积距平曲线得出 1991 年为信江流域入湖径流量突变点。李家渡站 UF 统计值在 1990 年前几乎都大于 0,而 1990 年后大部分小于 0,说明李家渡站径流量在 1990 年后主要呈下降趋势,

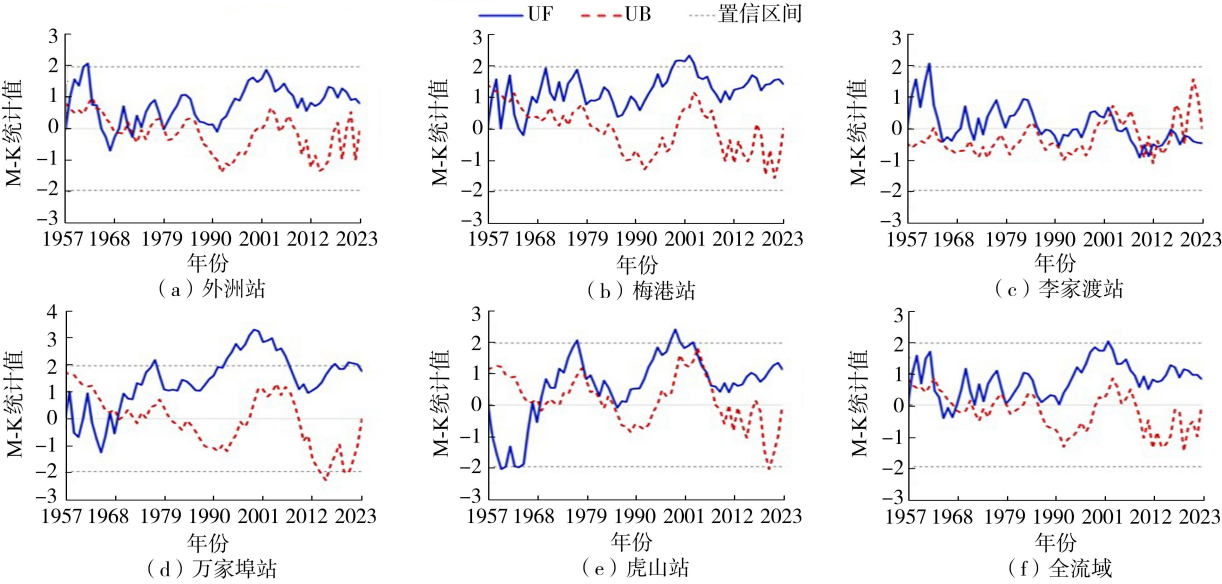


图 3 鄱阳湖流域各代表水文站径流量 M-K 突变检验曲线

Fig. 3 M-K abrupt change test curves of runoff at representative hydrological stations in the Poyang Lake Basin

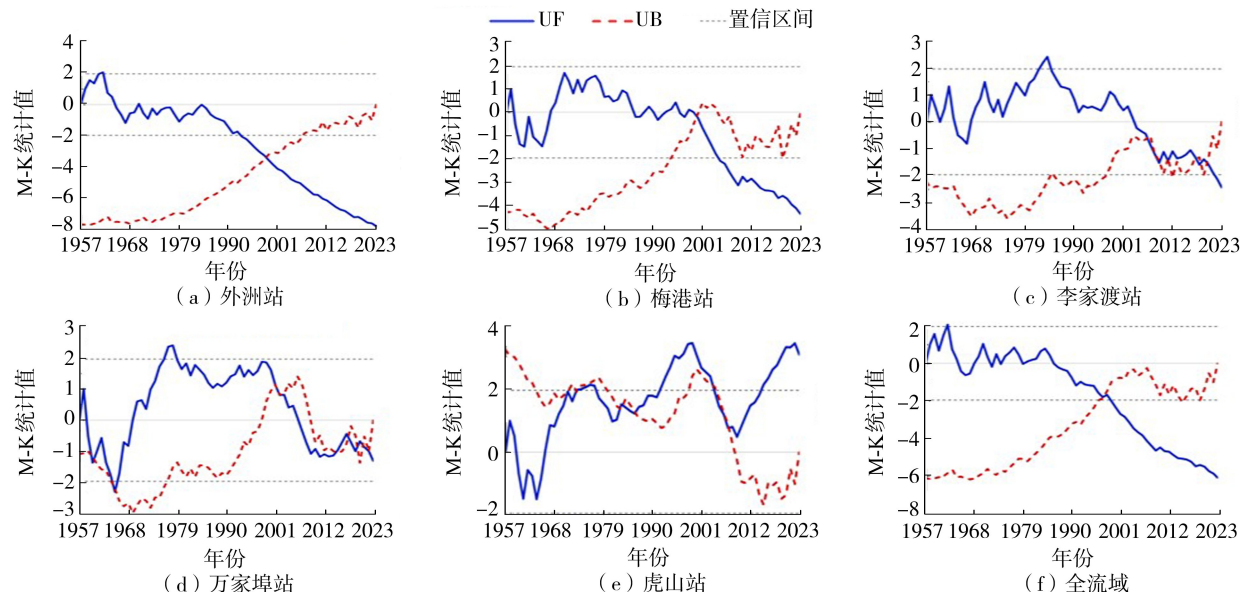


图4 鄱阳湖流域各代表水文站输沙量 M-K 突变检验曲线

Fig. 4 M-K abrupt change test curves of sediment load at representative hydrological stations in the Poyang Lake Basin

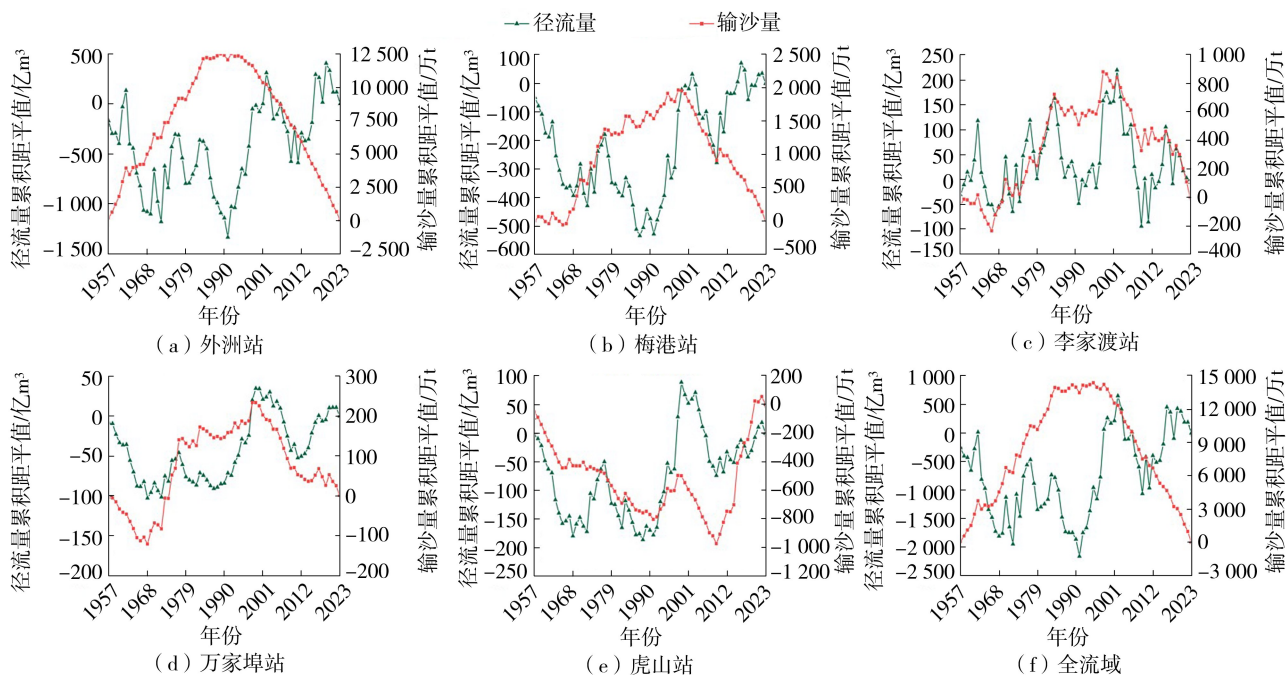


图5 鄱阳湖流域各代表水文站年径流量和输沙量累积距平曲线

Fig. 5 Cumulative anomaly curves of annual runoff and sediment load at representative hydrological station in the Poyang Lake Basin

结合累积距平曲线,1990 年可视为抚河流域入湖径流量突变点。万家埠站 UF、UB 曲线在置信区间内仅交于 1970 年,则 1970 年为修水流域入湖径流量突变点。虎山站 UF 统计值在 1957—1970 年小于 0,1970 年后均大于 0,径流量呈先减少后增加趋势,再从累积距平曲线来看,饶河流域入湖径流量突变点为 1970 年和 1991 年。全流域 UF 曲线与外洲站相似,均在 1990 年后增长趋势更为明显,再根据累积距平曲线,可将 1990 年视为全流域入湖径流量突变点。

由图 4 可知,外洲站输沙量 UF、UB 曲线在置信

区间内没有交点,自 1965 年后 UF 统计值都小于 0,1990 年后 UF 统计值小于 -1.96 ,超过了 0.05 显著性水平的置信区间,表明外洲站输沙量在 1965 年后呈下降趋势,并在 1990 年后显著下降,1990 年可视为赣江流域入湖输沙量突变点。梅港站 UF、UB 曲线在 1998 年出现一个交点,该交点位于置信区间内,则信江流域入湖输沙量突变点为 1998 年。自 2002 年后李家渡站 UF 统计值均小于 0 且持续下降,结合累积距平曲线得出,抚河流域入湖输沙量在 2002 年发生了突变。万家埠站 UF、UB 曲线在

1957—1965 年和 2000—2023 年两个时期内多次相交,结合累积距平曲线可知 1968 年和 1998 年为修水流域入湖输沙量突变点。虎山站 UF 统计值除了 1960—1965 年小于 0,其余时期都大于 0,特别是在 1992—2005 年和 2015 年—2023 年,UF 统计值大于 1.96,说明在这两个时期内虎山站输沙量显著增长,结合累积距平曲线得出,饶河流域入湖输沙量有两个突变点,分别为 1990 年和 2009 年。全流域 UF、UB 曲线在置信区间内交于 1995 年,该年为全流域入湖输沙量突变点。

3.2 模型情景设置及适用性分析

根据对实测数据的变化趋势及突变分析,划分基准期和影响期。虽然 5 个水文站水沙突变年份不尽相同,但主要集中于 20 世纪 90 年代,且从 80 年代末江西省大力开展水土流失治理工作,鄱阳湖流域森林覆盖率不断升高。由上述突变分析可知赣江流域水沙突变点均为 1990 年,且赣江作为鄱阳湖流域第一大支流,外洲站平均径流量和输沙量分别占鄱阳湖流域入湖水沙总量的 62.8%和 69.2%。综合上述原因并考虑到便于模型模拟,本文采用同一时间点分割径流和泥沙序列,以 1990 年为时间序列分割点,将 1957—1989 年视为基准期,1990—2023 年视为影响期。

依据基准期(1957—1989 年)实测数据校准模型参数,将 1955—1956 年设为预热期,1957—1967 年设为率定期,1968—1989 年设为验证期。选取各水文站基准期月径流量和月输沙量进行模拟,对 SWAT 模型中常用的 25 个参数进行敏感性分析,在 SWAT-CUP 中进行了 5 次迭代,每次迭代设置 500 次模拟,确定了 p 值小于 0.5 的 12 个参数,结果见表 3。对鄱阳湖流域入湖水沙模拟影响较为显著的参数包括:泥沙输移线性系数、泥沙输移指数系

数、主河道曼宁系数、基流 α 系数。

从图 6 和图 7 可以看出,经参数调整后,模型的径流量模拟效果优于输沙量模拟效果,除个别模拟的峰值小于实测值外,模拟值与实测值的变化趋势大体一致,拟合效果良好。5 个水文站率定期月径流量 R^2 范围为 0.84 ~ 0.94, E_{NS} 范围为 0.76 ~ 0.91;验证期 R^2 范围为 0.87 ~ 0.90, E_{NS} 值范围为 0.72 ~ 0.87。对于月输沙量模拟,梅港站、李家渡站和万家埠站的模拟结果较好,在率定期和验证期, R^2 和 E_{NS} 均大于 0.7,5 个水文站评价指标均满足模拟精度要求。总体来说,SWAT 模型能够比较准确地模拟流域的月径流和月输沙量,在鄱阳湖流域有较好的适用性,可用于后续的情景模拟研究。

3.3 气候变化与人类活动对入湖径流量的影响

气候因素中通常以降水量对水沙影响最大,受全球变暖影响,鄱阳湖流域年降水量自 1990 年后呈显著增长趋势^[29]。如表 4 所示,各支流流域及全流域影响期的降水量较基准期均有增加,全流域基准期年均降水量为 1611.3 mm,影响期年均降水量为 1783.3 mm,增幅达 172.0 mm。其中赣江、抚河流域降水量变化相对较小,这与鄱阳湖流域降水量呈自北部向西南递减的空间分布规律^[30]有一定关系。由表 5 可知,气候变化使各支流流域入湖径流量有所增加,除赣江、抚河流域外,气候变化为信江、修水、饶河流域入湖径流量增加的主要因素,贡献率均超过 90%。受气温升高和水库蓄水水域面积增加的影响,各支流流域及全流域影响期潜在蒸发量较基准期略微增加。在下垫面条件不变的情况下,降水量增加远大于潜在蒸发量的增加,因此影响期气候变化最终导致鄱阳湖流域入湖径流量增加。水利工程具有防洪、发电、灌溉等功能,在汛期削减洪峰流量,在枯水期能及时补充下游径流,保证下游供水

表 3 主要参数的敏感性分析结果

Table 3 Results of sensitivity analysis for key parameters

敏感性排序	参数名称	含义	t -stat	p	参数范围	最佳参数值
1	v_SPCON. bsn	泥沙输移线性系数	-32.44	0	0.000 1~0.01	0.005
2	v_SPEXP. bsn	泥沙输移指数系数	10.29	0	1~1.5	1.472
3	v_CH_N2. rte	主河道曼宁系数	7.59	0	-0.01~0.3	0.298
4	v_ALPHA_BF. gw	基流 α 系数	2.19	0.03	0~1	0.833
5	v_CANMX. hru	最大冠层蓄水量	-1.95	0.05	0.01~100	0.078
6	r_USLE_P. mgt	水土保持措施因子	-1.54	0.12	-0.5~0.5	0.095
7	v_SFTMP. bsn	降雪气温阈值	1.22	0.22	-5~5	-2.779
8	r_CN2. mgt	SCS 径流曲线系数	1.16	0.25	-0.2~0.2	0.200
9	v_OV_N. hru	坡面漫流曼宁系数	1.13	0.26	0.01~30	23.765
10	r_SLSUBBSN. hru	平均坡长	-1.09	0.28	0~0.2	0.097
11	v_CH_COV1. rte	河道侵蚀因子	1.08	0.28	-0.05~0.6	-0.046
12	v_SURLAG. bsn	地表径流滞后时间	0.97	0.33	0.05~24	13.979

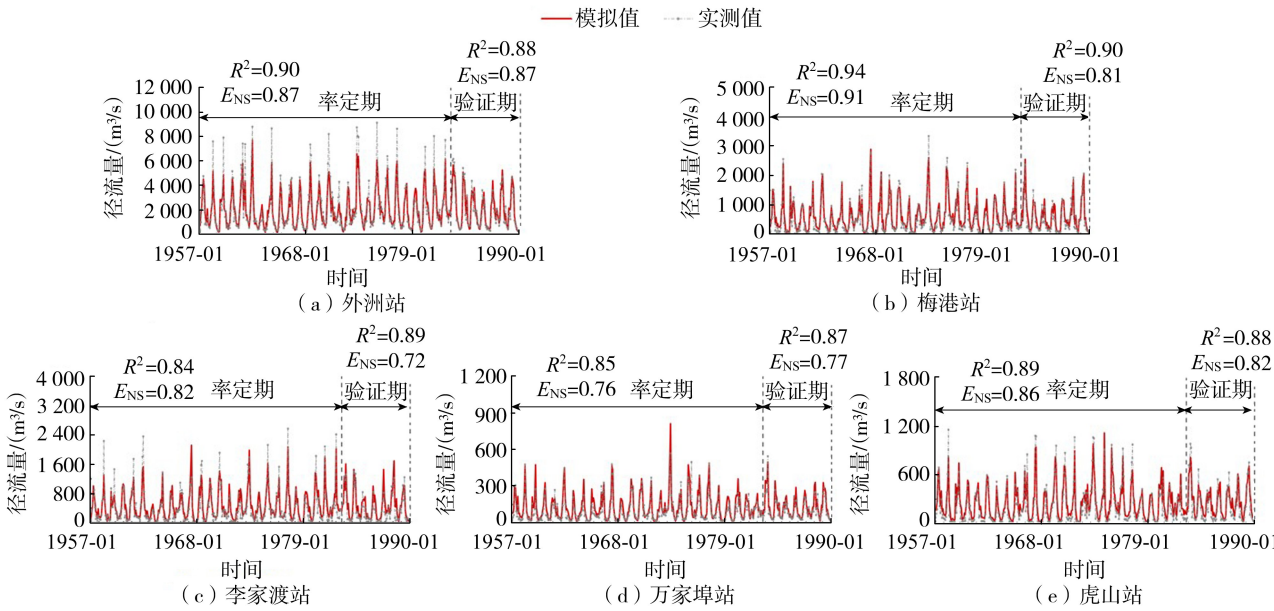


图 6 基准期月径流量模拟值与实测值对比

Fig. 6 Comparison of simulated and observed monthly runoff during baseline period

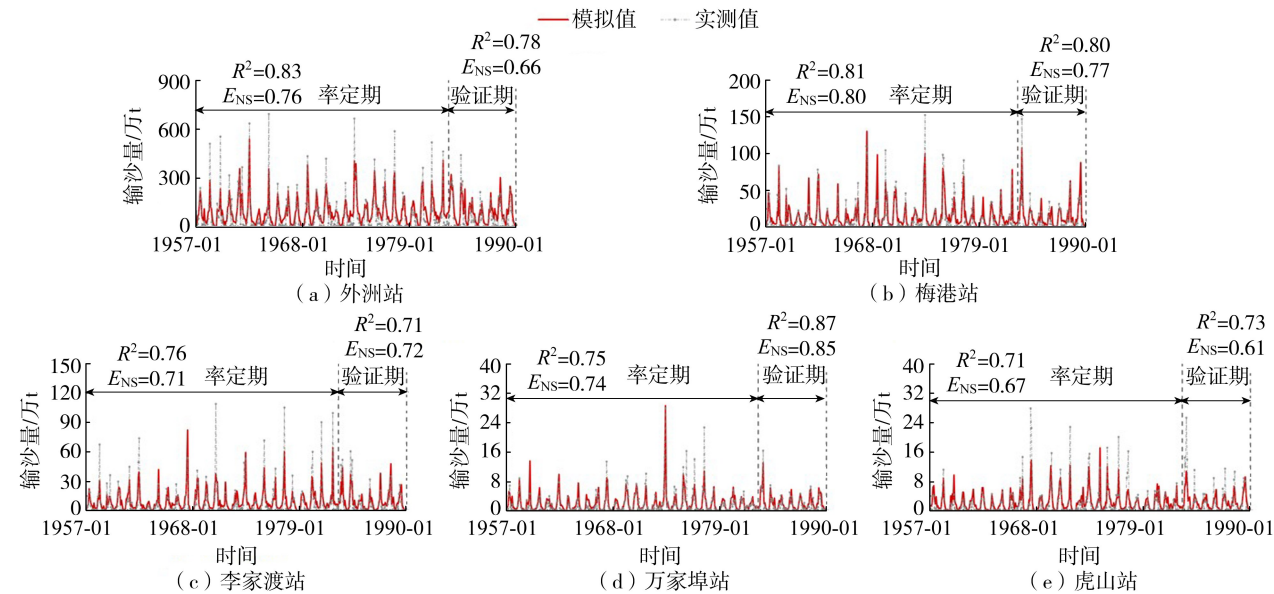


图 7 基准期月输沙量模拟值与实测值对比

Fig. 7 Comparison of simulated and observed monthly sediment load during baseline period

需求。饶河流域水利工程规模与其他流域相比较小,入湖径流量受水库调蓄影响较小,因此,饶河流域入湖径流量增加受人类活动影响最小。赣抚平原灌区需大量引水,位于抚河上游的柴埠口和焦石两个进水闸设计总引水流量为 167 m³/s,占抚河多年平均流量的 42%^[31],导致抚河流域入湖径流量减少,而气候变化导致抚河流域入湖径流量增加,因此在气候变化与人类活动共同影响下,抚河流域影响期年均入湖径流量较基准期略微减少。全流域影响期年均入湖径流量较基准期增加 101.2 亿 m³,气候变化对入湖径流量的贡献率为 78.7%,人类活动贡献率仅为 21.3%,表明鄱阳湖流域入湖径流量增加

主要受气候变化的影响。

表 4 基准期和影响期鄱阳湖流域年均降水量和潜在蒸发量模拟值

Table 4 Simulation results of annual average rainfall and potential evaporation of the Poyang Lake Basin in baseline and impact periods						
流域	年均降水量/mm			年均潜在蒸发量/mm		
	基准期	影响期	变化量	基准期	影响期	变化量
赣江	1 209.8	1 256.6	46.8	711.0	729.5	18.5
信江	1 787.1	1 950.4	163.3	713.7	732.9	19.2
抚河	1 330.6	1 469.7	139.1	692.2	713.5	21.3
修水	1 516.2	1 690.9	174.8	682.0	706.6	24.6
饶河	1 706.4	1 875.6	169.2	735.9	775.4	39.5
全流域	1 611.3	1 783.3	172.0	707.0	731.6	24.6

表 5 气候变化与人类活动对年均入湖径流量的影响

Table 5 Impact of climate change and human activities on annual average runoff inflow into lake

流域	年均入湖径流量/亿 m ³		年均入湖径流量变化/亿 m ³	气候变化影响		人类活动影响	
	基准期	影响期		入湖径流量变化/亿 m ³	贡献率/%	入湖径流量变化/亿 m ³	贡献率/%
赣江	655.2	721.1	65.9	26.4	40.1	39.5	59.9
信江	167.8	190.7	22.9	21.5	94.0	1.4	6.0
抚河	124.2	123.6	-0.6	18.8	49.2	-19.4	50.8
修水	32.6	37.3	4.7	4.5	96.4	0.2	3.6
饶河	66.1	74.4	8.3	8.4	98.8	-0.1	1.2
全流域	1 045.9	1 147.1	101.2	79.6	78.7	21.6	21.3

3.4 气候变化与人类活动对入湖输沙量的影响

如表 6 所示,仅受气候变化影响时,各支流流域入湖输沙量均增加,流域内土壤侵蚀产沙受降雨的影响,降水量和降雨强度的增加会加剧水土流失风险,20 世纪 70 年代以来鄱阳湖流域的降雨侵蚀力呈不显著上升趋势^[32],其空间分布同降水量分布规律一致^[30]。人类活动均为导致各支流流域入湖输沙量发生变化的主要驱动因素。人类活动使饶河流域年均入湖输沙量增加 17.9 万 t,贡献率达 79.2%。这与虎山站上游剧烈的采砂活动有关,采砂活动导致虎山站断面洲滩范围明显缩小,河道内携带泥沙增多,输沙量显著增加。在其余 4 个支流流域,人类活动均导致年均入湖输沙量减少,赣江流域年均入湖输沙量受人类活动的影响最为显著,人类活动导致赣江流域年均入湖输沙量减少 631.7 万 t,贡献率高达 90.0%。人类活动分别导致信江、抚河、修水流域年均入湖输沙量减少 95.5 万、45.6 万、8.5 万 t。全流域影响期年均入湖输沙量较基准期减少 629.9 万 t,减少了 54.1%。气候变化导致全流域年均入湖输沙量增加 133.5 万 t,贡献率为 14.9%,人类活动导致年均入湖输沙量减少 763.4 万 t,贡献率为 85.1%,人类活动为鄱阳湖流域入湖输沙量减少的主要原因。

人类活动对水沙变化的影响主要体现在水利工程建设、工农业及生活用水、水土保持措施实施、土地利用类型转变等方面。相关研究表明,水库拦沙是鄱阳湖流域入湖输沙量减少的重要原因^[33-35]。鄱阳湖流域水能开发利用资源丰富,从 20 世纪

50 年代开始大规模修建水库,50—70 年代修建的水库是以农业灌溉为主的中小型水库,80 年代以后修建的是以水电开发为主的大中型水库。根据《中国水利统计年鉴 2024》,截至 2023 年,流域内已建成水库 10 623 座,总库容达到 357 亿 m³。其中,大型水库 38 座,总库容为 225 亿 m³;中型水库 266 座,总库容为 66 亿 m³。赣江流域是五河流域中拥有大中型水库最多的流域,共有 132 座大中型水库,总库容达到 94.6 亿 m³。1990 年 8 月建成并下闸蓄水的万安水库总库容 22.16 亿 m³,是赣江流域库容最大的水库,多年平均入库沙量 742 万 t,多年平均拦沙量达 400 万 t,其建成时间与赣江流域入湖输沙量突变时间一致,说明万安水库对赣江流域入湖输沙量的减少起到至关重要的作用。万家埠站位于修水支流潦河,该水文站上游无大型水库,泥沙输移过程受水利工程影响相对较小。

鄱阳湖流域山区丘陵众多,土壤抗蚀能力差,属于长江流域水土流失严重的区域之一,水土流失面积占流域总面积的 20%。随着经济发展和人口迅速增加,鄱阳湖流域森林植被受到一定规模的破坏,20 世纪 80 年代初鄱阳湖流域森林覆盖率为 31.5%。1985 年之前鄱阳湖流域已修建大中型水库 148 座,总库容 84.23 亿 m³,由于水土流失严重和干流未修建大型水库等原因,使得入湖输沙量并未出现明显减少。80 年代末江西省开始开展以植树造林为主的生态恢复工作,至 2023 年森林覆盖率达 61.2%,水土治理面积达到 6.6 万 km²,流域内水土保持功能增强使得水土流失情况好转,加之省内

表 6 气候变化与人类活动对年均入湖输沙量的影响

Table 6 Impact of climate change and human activities on annual average sediment load into lake

流域	年均入湖输沙量/万 t		年均入湖输沙量变化/万 t	气候变化影响		人类活动影响	
	基准期	影响期		入湖输沙量变化/万 t	贡献率/%	入湖输沙量变化/万 t	贡献率/%
赣江	878.0	316.7	-561.3	70.4	10.0	-631.7	90.0
信江	141.6	81.3	-60.3	35.2	26.9	-95.5	73.1
抚河	99.9	73.8	-26.1	19.5	30.0	-45.6	70.0
修水	21.1	16.3	-4.8	3.7	30.2	-8.5	69.8
饶河	23.9	46.5	22.6	4.7	20.8	17.9	79.2
全流域	1 164.5	534.6	-629.9	133.5	14.9	-763.4	85.1

加大了对前期水库的加固、扩建并修建了一系列大型水库的修建,从而使影响期入湖输沙量显著减少。

4 结 论

a. 1957—2023 年赣江外洲站、信江梅港站、饶河虎山站、修水万家埠站的年径流量均呈不显著增加趋势,抚河李家渡站年径流量呈不显著减少趋势;除虎山站年输沙量显著增加外,其他 4 个水文站年输沙量均减少,其中万家埠站年输沙量减少趋势不显著,外洲站、梅港站年输沙量呈显著减少趋势。全流域入湖年径流量增加趋势不显著,年输沙量减少趋势达到 0.01 显著性水平。

b. 以 1957—1989 年为基准期,1990—2023 年为影响期,采用 5 个入湖代表水文站基准期月尺度多年长序列水沙实测数据对 SWAT 模型进行率定与验证,表明所建立的 SWAT 模型参数取值合理,SWAT 模型可用于定量解析气候变化与人类活动对鄱阳湖流域入湖水沙变化的影响。

c. 影响期鄱阳湖流域入湖年均径流量较基准期增加了 101.2 亿 m³,入湖年均输沙量较基准期减少了 629.9 万 t。气候变化使各支流流域入湖径流量均有所增加,是造成影响期鄱阳湖流域入湖径流量增加的主要驱动因素,其对入湖径流量的贡献率为 78.7%,人类活动的贡献率仅为 21.3%。气候变化使各支流流域入湖输沙量均有所增加,而人类活动是鄱阳湖流域入湖输沙量减少的主要原因,贡献率为 85.1%。

参考文献:

[1] 王宣宣,刘欢,胡鹏,等. 基于水量平衡原理和 Budyko 假设的强人类活动干扰下西辽河流域径流衰减归因分析[J]. 水资源保护, 2024, 40(6): 165-172. (WANG Xuanxuan,LIU Huan,HU Peng,et al. Attribution analysis of runoff attenuation in the Xiliao River Basin under significant human interference based on water balance principle and Budyko hypothesis [J]. Water Resources Protection,2024,40(6): 165-172. (in Chinese))

[2] 王延贵,吴钰川,刘焕永,等. 南方主要河流水沙变化及人类活动的影响[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(5): 16-22. (WANG Yangui, WU Yuchuan, LIU Huanong,et al. Variations of water and sediment and impact of human activities in major rivers in southern China[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(5): 16-22. (in Chinese))

[3] 郭心仪,贾雨凡,范丽丽,等. 气候变化和人类活动对流域径流及其年内分配的影响[J]. 水利水运工程学报, 2024(2): 10-19. (GUO Xinyi, JIA Yufan, FAN Lili, et al. The effects of climate change and human actions on runoff

and its seasonal variation [J]. Hydro-Science and Engineering,2024(2): 10-19. (in Chinese))

[4] WU Jingwen, MIAO Chiyuan, ZHANG Xiaoming, et al. Detecting the quantitative hydrological response to changes in climate and human activities[J]. Science of the Total Environment,2017,586:328-337.

[5] DEY P, MISHRA A. Separating the impacts of climate change and human activities on streamflow: a review of methodologies and critical assumptions [J]. Journal of Hydrology,2017,548:278-290.

[6] HUANG Tingting, LIU Yu, WU Zhiyong, et al. Quantitative analysis of runoff alteration based on the Budyko model with time-varying underlying surface parameters for the Wuding River Basin, Loess Plateau [J]. Ecological Indicators,2024,158:111377.

[7] WANG Jinfeng, LI Yawen, WANG Sheng, et al. Determining relative contributions of climate change and multiple human activities to runoff and sediment reduction in the eastern Loess Plateau, China[J]. CATENA,2023, 232:107376.

[8] REN Liliang, YUAN Shanshui, YANG Xiaoli, et al. Initiatives to clarify mechanisms of hydrological evolution in human-influenced Yellow River Basin [J]. Water Science and Engineering,2023,16(2): 117-121.

[9] ZHANG Yuhang, YE Aizhong, YOU Jinjun, et al. Quantification of human and climate contributions to multi-dimensional hydrological alterations: a case study in the Upper Minjiang River, China [J]. Journal of Geographical Sciences,2021,31(8): 1102-1122.

[10] 肖渝,孙若辰,王倩,等. 不同降水驱动的 SWAT 模型参数不确定性研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(2): 43-52. (XIAO Yu, SUN Ruochen, WANG Qian, et al. Study on parameter uncertainty in SWAT model driven by different precipitation [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(2): 43-52. (in Chinese))

[11] LIU Mengyuan, ZHANG Pingping, CAI Yanpeng, et al. Spatial-temporal heterogeneity analysis of blue and green water resources for Poyang Lake Basin, China[J]. Journal of Hydrology,2023,617:128983.

[12] ZOU Rui, WANG Xiaojun, YIN Yixing, et al. Comparing spatio-temporal propagation patterns of hydrological and meteorological droughts: insights from SWAT modelling in the Poyang Lake Basin[J]. CATENA,2024,243:108183.

[13] 孙鹏,张强,陈晓宏,等. 鄱阳湖流域水沙时空演变特征及其机理[J]. 地理学报,2010,65(7): 828-840. (SUN Peng, ZHANG Qiang, CHEN Xiaohong, et al. Spatio-temporal patterns of sediment and runoff changes in the Poyang Lake Basin and underlying causes [J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 65 (7): 828-840. (in Chinese))

- [14] LI Bing, YANG Guishan, WAN Rongrong, et al. Impacts of hydrological alteration on ecosystem services changes of a large river-connected lake (Poyang Lake), China [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 310: 114750.
- [15] LI Yunliang, ZHANG Qi, CAI Yongjiu, et al. Hydrodynamic investigation of surface hydrological connectivity and its effects on the water quality of seasonal lakes: insights from a complex floodplain setting (Poyang Lake, China) [J]. Science of the Total Environment, 2019, 660: 245-259.
- [16] XUE Chenyang, ZHANG Qi, JIA Yuxue, et al. Intensifying drought of Poyang Lake and potential recovery approaches in the dammed middle Yangtze River catchment [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2023, 50: 101548.
- [17] 曾瑜, 刘进宝, 厉莎, 等. 鄱阳湖流域气候变化和人类活动对入湖水沙的影响 [J]. 人民长江, 2020, 51(1): 28-35. (ZENG Yu, LIU Jinbao, LI Sha, et al. Effects of climate variation and human activities on runoff and sediment into Poyang Lake [J]. Yangtze River, 2020, 51(1): 28-35. (in Chinese))
- [18] 刘同宦, 安智伟, 柴朝晖, 等. 鄱阳湖五河入湖水沙通量及典型断面形态变化特性分析 [J]. 长江科学院院报, 2020, 37(11): 8-13. (LIU Tonghuan, AN Zhiwei, CHAI Zhaohui, et al. Changes of water and sediment flux and typical sectional shape of five rivers flowing into the Poyang Lake [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(11): 8-13. (in Chinese))
- [19] 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 [J]. 人民长江, 2022, 53(增刊 2): 47-51. (HU Jiangjun, SUN Yu, GU Chaojun. Analysis on water and sediment variation and its influencing factors of five rivers entering Poyang Lake during recent 60 years [J]. Yangtze River, 2022, 53(Sup2): 47-51. (in Chinese))
- [20] 葛士林, 黄国鲜, 任倩慧, 等. 鄱阳湖水沙与氮磷输移过程及滞留效应研究 [J]. 环境科学研究, 2024, 37(2): 346-358. (GE Shilin, HUANG Guoxian, REN Qianhui, et al. Study on transport processes and retention effects of water, suspended sediment, nitrogen and phosphorus in Poyang Lake [J]. Research of Environmental Sciences, 2024, 37(2): 346-358. (in Chinese))
- [21] TIAN Biqing, GAO Peng, MU Xinmin, et al. Water area variation and river-lake interactions in the Poyang Lake from 1977-2021 [J]. Remote Sensing, 2023, 15(3): 600.
- [22] YE Xuchun, ZHANG Qi, LIU Jian, et al. Distinguishing the relative impacts of climate change and human activities on variation of streamflow in the Poyang Lake catchment, China [J]. Journal of Hydrology, 2013, 494: 83-95.
- [23] 黄建雄, 冶运涛, 曹引, 等. 黄河北干流水沙时空变化特征及协调性分析 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(3): 25-33. (HUANG Jianxiong, YE Yuntao, CAO Yin, et al. Analysis of spatial and temporal variation characteristics and coordination of water-sediment in the north main reach of Yellow River [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(3): 25-33. (in Chinese))
- [24] 姜瑶, 徐宗学, 王静. 基于年径流序列的五种趋势检测方法性能对比 [J]. 水利学报, 2020, 51(7): 845-857. (JIANG Yao, XU Zongxue, WANG Jing. Comparison among five methods of trend detection for annual runoff series [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(7): 845-857. (in Chinese))
- [25] 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))
- [26] SUN Pengcheng, WU Yiping, WEI Xiaohua, et al. Quantifying the contributions of climate variation, land use change, and engineering measures for dramatic reduction in streamflow and sediment in a typical loess watershed, China [J]. Ecological Engineering, 2020, 142: 105611.
- [27] 李发文, 陶仁杰. 变化环境下子牙河流域水文过程影响要素分析 [J]. 水资源保护, 2023, 39(5): 9-17. (LI Fawen, TAO Renjie. Analysis of factors influencing hydrological processes in the Ziya River Basin under changing environment [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(5): 9-17. (in Chinese))
- [28] HU Jingyi, WU Yiping, WANG Lijing, et al. Impacts of land-use conversions on the water cycle in a typical watershed in the southern Chinese Loess Plateau [J]. Journal of Hydrology, 2021, 593: 125741.
- [29] GUO Ruifang, ZHU Yaqiao, LIU Yuanbo. A comparison study of precipitation in the Poyang and the Dongting Lake basins from 1960-2015 [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 3381.
- [30] 姬志军, 张连明. 鄱阳湖流域降雨量及降雨侵蚀力时空分布特征 [J]. 人民黄河, 2019, 41(6): 81-84. (JI Zhijun, ZHANG Lianming. Spatial-temporal variation of distribution of rainfall erosivity in the Poyang Lake Basin [J]. Yellow River, 2019, 41(6): 81-84. (in Chinese))
- [31] 刘剑宇, 张强, 顾西辉. 水文变异条件下鄱阳湖流域的生态流量 [J]. 生态学报, 2015, 35(16): 5477-5485. (LIU Jianyu, ZHANG Qiang, GU Xihui. Evaluation of ecological flow with considerations of hydrological alterations in the Poyang Lake Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(16): 5477-5485. (in Chinese))

(下转第 148 页)

(ZHOU Zhaoqiang, ZOU Huazhi, SHI Haiyun. Spatial-temporal characteristics and driving forces of drought in the Pearl River Basin [J]. China Flood & Drought Management, 2023, 33(6): 1-11. (in Chinese))

[19] WU Zhiyong, LU Guihua, LIU Zhiyu, et al. Trends of extreme flood events in the Pearl River Basin during 1951-2010[J]. Advances in Climate Change Research, 2013, 4(2): 110-116.

[20] 刘金贵,李谊纯,仇天宇. 珠江河口咸潮入侵研究进展[J]. 广东海洋大学学报, 2023, 43(1): 134-140. (LIU Jingui, LI Yichun, ZHANG Tianyu. Review of salinity intrusion in the Pearl River Estuary [J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2023, 43(1): 134-140. (in Chinese))

[21] LIU Zhanwei, HE Xiaogang. Balancing-oriented hydropower operation makes the clean energy transition more affordable and simultaneously boosts water security [J]. Nature Water, 2023, 1(9): 778-789.

[22] 王浩,王旭,雷晓辉,等. 梯级水库群联合调度关键技术的发展历程与展望[J]. 水利学报, 2019, 50(1): 25-37. (WANG Hao, WANG Xu, LEI Xiaohui, et al. The development and prospect of key techniques in the cascade reservoir operation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(1): 25-37. (in Chinese))

[23] GIULIANI M, CASTELLETTI A, PIANOSI F, et al. Curses, tradeoffs, and scalable management: advancing evolutionary multiobjective direct policy search to improve water reservoir operations[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2016, 142(2): 04015050.

[24] REED P M, HADKA D, HERMAN J D, et al. Evolutionary multiobjective optimization in water resources: the past, present, and future [J]. Advances in Water Resources, 2013, 51: 438-456.

[25] 周建中,杨佩瑶,覃晖,等. 水库(群)随机优化调度研究进展与展望[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(8): 19-26. (ZHOU Jianzhong, YANG Peiyao, QIN Hui, et al. Research progress and prospect of multi-reservoir system stochastic optimal operation [J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(8): 19-26. (in Chinese))

[26] DEB K, JAIN H. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, part I: solving problems with box constraints [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2014, 18(4): 577-601.

[27] DANG T D, CHOWDHURY A F M K, GALELLI S. On the representation of water reservoir storage and operations in large-scale hydrological models: implications on model parameterization and climate change impact assessments [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2020, 24(1): 397-416.

[28] BRUNNER M I, GILLELAND E. Stochastic simulation of streamflow and spatial extremes: a continuous, wavelet-based approach [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2020, 24(8): 3967-3982.

[29] KIRSCH B R, CHARACKLIS G W, ZEPP H B. Evaluating the impact of alternative hydro-climate scenarios on transfer agreements: practical improvement for generating synthetic streamflows [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2013, 139(4): 396-406.

[30] PIANOSI F, BEVEN K, FREER J, et al. Sensitivity analysis of environmental models: a systematic review with practical workflow [J]. Environmental Modelling & Software, 2016, 79: 214-232.

(收稿日期:2024-11-21 编辑:施业)

(上接第 122 页)

[32] 顾朝军,朱永清,李仁华,等. 鄱阳湖流域降雨侵蚀力变化及其对入湖悬移质输沙量的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(6): 45-54. (GU Chaojun, ZHU Yongqing, LI Renhua, et al. Change of the rainfall erosivity in Poyang Lake Basin and its influence on suspended sediment load into the lake[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(6): 45-54 (in Chinese))

[33] 李微,李昌彦,吴敦银,等. 1956~2011 年鄱阳湖水沙特征及其变化规律分析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(5): 832-838. (LI Wei, LI Changyan, WU Dunyin, et al. Characteristics of runoff-sediment into and out of the Poyang Lake from 1956 to 2011 [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(5): 832-838 (in Chinese))

[34] 谢彪,关兴中,卢静媛,等. 鄱阳湖入出湖水沙通量演变及输沙量归因分析[J]. 水文, 2023, 43(6): 80-85. (XIE Biao, GUAN Xingzhong, LU Jingyuan, et al. Analysis on the evolution of water and sediment fluxes into and out of Poyang Lake and the attribution of sediment transport [J]. Journal of China Hydrology, 2023, 43(6): 80-85. (in Chinese))

[35] 齐述华,熊梦雅,廖富强,等. 人类活动对鄱阳湖泥沙收支平衡的影响[J]. 地理科学, 2016, 36(6): 888-894. (QI Shuhua, XIONG Mengya, LIAO Fuqiang, et al. Impacts of human activities on sediments budget in Poyang Lake [J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(6): 888-894. (in Chinese))

(收稿日期:2024-12-27 编辑:施业)