

气候变化和人类活动对鄱阳湖流域赣江径流影响的定量分析*

刘贵花^{1,2}, 齐述华^{1,2**}, 朱婧瑄², 熊梦雅², 王 点²

(1: 江西师范大学鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 南昌 330022)

(2: 江西师范大学地理与环境学院, 南昌 330022)

摘要: 气候变化和人类活动对流域径流影响的定量研究是当前研究的热点, 赣江作为鄱阳湖流域最大的子流域, 径流变化对鄱阳湖湿地水生态系统具有重要的影响. 利用 Mann-Kendall 突变检验分析了赣江流域径流 1955—2010 年间演变趋势, 再分别应用统计方法和 IHACRES 集总式模型分析气候要素和人类活动对径流的影响. 研究表明 IHACRES 能够较好地模拟赣江流域径流, 适用于中亚热带湿润季风气候区. Mann-Kendall 突变检验表明赣江流域径流在 1979 年发生突变, 可划分为 1955—1979 年和 1980—2010 年两个时段. 降水是影响赣江流域径流年际变化的主要因素, 而土地利用等人类活动的影响并不明显. 水库建设显著影响赣江径流的季节分配, 1980—2010 年间人类活动影响更加显著, 其中 45% 的年份秋季径流增加 50% 以上, 26% 的年份秋季径流增加超过 100%, 其中 1989 年的秋季径流增加幅度达到 320%.

关键词: 径流; Mann-Kendall 检验; IHACRES; 赣江; 鄱阳湖流域; 气候变化; 人类活动

Quantitative estimation of runoff changes in Ganjiang River, Lake Poyang Basin under climate change and anthropogenic impacts

LIU Guihua^{1,2}, QI Shuhua^{1,2**}, ZHU Jingxuan², XIONG Mengya² & WANG Dian²

(1: Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Ministry of Education, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, P.R.China)

(2: School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, P.R.China)

Abstract: How to identify the quantitative effect of climate change and human activities on runoff is a hot topic. As the largest river of Poyang Basin, the hydrological regime changes of Ganjiang River had an effect on water ecosystem health of Lake Poyang Basin. In this paper, the non-parametric Mann-Kendall test was used to analyze the tendency of runoff changes for Ganjiang River in 1955—2010. The impact of climate factors and human activities on runoff was analyzed by statistical methods and IHACRES model. The IHACRES model simulated the streamflow well in Ganjiang River and suitable for subtropical humid monsoon climate zone. The abrupt change of runoff occurred in 1979 and the watershed runoff was divided into two stages, i.e. 1955—1979 and 1980—2010. Precipitation is the main factor influencing runoff of the Ganjiang River Basin, while the effect of land cover change on runoff due to human activities is not obvious. The influence of reservoir construction on the seasonal distribution of runoff was significant, with decreases in summer and increases in autumn, especially in 1980—2010. The autumn runoff of about 45% of years in 1980—2010 increased more than 50% compared with that in 1955—1979. In addition, 26% of years showed autumn runoff increase exceeding 100%, with a maximum 320% of autumn runoff increase occurred in 1989.

Keywords: Runoff; Mann-Kendall test; IHACRES; Ganjiang River; Lake Poyang Basin; climate change; human activity

径流是流域水循环的重要环节, 径流量的变化影响整个水文系统的演化, 影响生态环境及区域经济的发展. 气候变化和人类活动^[1-3]以不同方式影响着流域水文系统和生态功能, 特别是近年来水利工程及土地

* 鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室(江西师范大学)开放基金资助项目(ZK2014003)、江西省重大生态安全问题监控协同创新中心资助项目(JXS-EW-00)和江西省博士后科研项目(2014KY13)联合资助. 2015-06-15 收稿; 2015-08-23 收修改稿. 刘贵花(1984~), 女, 博士; E-mail: yafeng9918@163.com.

** 通信作者; E-mail: qishuhua11@163.com.

利用等人类活动日益加剧^[4],极大地改变了流域的下垫面条件,影响流域水资源的开发及利用,破坏流域生态系统平衡,使水文过程的恢复和保护日益迫切和必要^[5-6].

水文模型是对自然界中复杂水循环过程的近似描述,是水文科学研究的一种手段和方法. 分布式水文模型具有很强的物理机制,但所需的数据量大、结构复杂、参数多;集总式水文模型结构简单、所需数据少、参数少,在气候变化的水文效应评估及无资料地区水文研究中广泛应用.

本文以鄱阳湖流域最大河流——赣江为研究对象,利用 1955—2010 年赣江外洲水文控制站流量观测资料,探讨 IHACRES 模型在中亚热带湿润季风气候区的应用效果,以 IHACRES 模型定量分析气候变化和人类活动的影响量.

1 研究区概况

赣江是鄱阳湖流域最大的河流,贯穿江西南北,是长江八大支流之一. 发源于石城县洋地乡石寨寮,入湖口为永修县吴城镇望江亭,主河道长 823 km,沿途流经赣州、吉安、萍乡、宜春等地,下游外洲水文站控制断面以上流域面积为 78021 km²,约占鄱阳湖流域总面积的 50%,多年平均流量为 2125 m³/s,约占鄱阳湖流域径流总量的 50% (图 1). 流域内地貌格局多样,以山地丘陵为主,低丘岗地为辅,其中山地约占 50%,丘陵约占 30%,平原约占 20%,由南向北海拔高度逐渐降低,呈阶梯状分布. 流域内以林地、耕地等覆被类型为主,土壤类型以典型强淋溶土、旱耕人为土为主. 流域属中亚热带湿润季风气候区,气候温和,雨量丰沛,四季分明,霜冻期较短. 流域多年平均降水量为 1580.8 mm,每年 4—6 月为主雨季,暴雨集中形成洪水.

1980s 以来,以水库建设、新垦坡耕等为主的人类活动在赣江流域显著加强. 赣江流域水资源丰富,可开发的水能资源为 333×10^4 kW,目前已建立的大型水库库容达到 23.43×10^9 m³,这些水库用于防汛、灌溉、发电等.

2 数据与方法

2.1 数据收集

本文主要收集 1955—2010 年赣江水文控制站外洲站的日径流数据;46 个气象站的逐日降水、气温等气象数据,多数站点降水时间序列为 1955—2010 年,部分站点数据为 1961—2010 年,考虑数据的统一性,采用 1961—2010 年 46 个气象站平均值分析赣江流域降水量的变化.

2.2 Mann-Kendall 检验

Mann-Kendall 检验是一种非参数统计检验方法,变量可以不具有正态分布特征,检测范围宽、人为影响小、定量化程度高,适用于水文变量的趋势分析. 应用 Mann-Kendall 方法分析水文气象数据的研究逐渐增多,包括降水、气候及径流的变化趋势研究^[7-8]和突变性检验^[9-10]. 本文采用 Mann-Kendall 方法对赣江下游外洲站径流和赣江流域降水等要素进行突变性检验,求出径流及降水等发生突变的年份,分析不同时期径流变化与气候变化及人类活动的关系,为应用 IHACRES 模型进行径流模拟提供基础.

2.3 IHACRES 模型

IHACRES 模型由 Jakeman 等提出,以单位线原理为基础,是一个集总式概念性降水-径流模型^[11-12],该

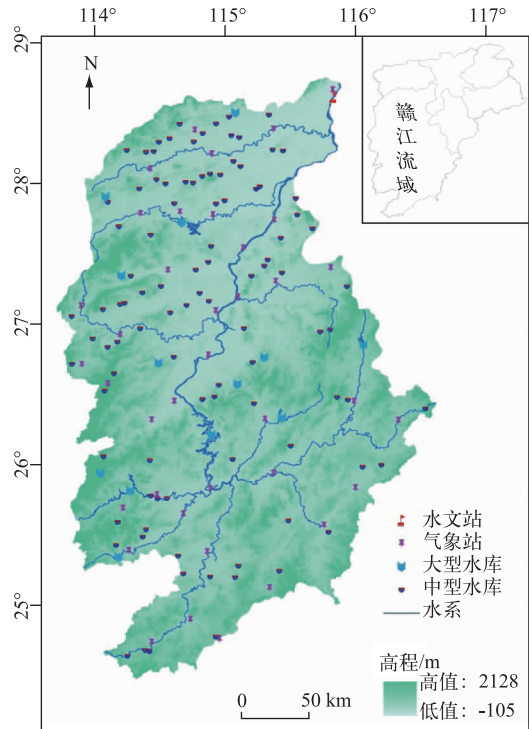


图 1 赣江流域水文气象站点及水库分布

Fig.1 Location of hydrological and rainfall stations and water reservoirs in Ganjiang watershed

模型在国外广泛用于径流模拟,并在一些资料缺乏地区推广^[13-14]. 模型参数较少,需输入数据包括降水、径流量、气温、流域面积等,减少了因模型复杂、参数和输入数据多而造成的模拟结果的不确定性.模型由非线性模块和线性模块串联而成.

非线性模块又称降水量损失模块,负责将降水转化为有效降水,有效降水指最终以径流形式流出流域的降水,水量损失发生在非线性模块,相同的降水量在不同的研究区产生的径流存在差异.有效降水(U_k) (产生径流的降水量部分)由降水量(r_k)和湿润指数(S_k)确定.

$$U_k = r_k \cdot S_k \quad (1)$$

其中, S_k 的计算方法为:

$$S_k = C \cdot r_k + \left[1 - \frac{1}{\tau_w(t_k)} \right] \cdot S_{k-1}, \quad S_0 = 0 \quad (2)$$

$$\tau_w(t_k) = \tau_w \cdot e^{0.062/(t_i - t_i)}, \quad \tau_w(t_k) > 1 \quad (3)$$

式中,参数 τ_w (流域干时常数)是在参考气温 t_i 下 $\tau_w(t_k)$ 的值. $\tau_w(t_k)$ 决定着无降水时段内 S_k 的衰减速率.参数 f (温度调节因子)决定 $\tau_w(t_k)$ 对温度 t_k 的敏感程度.有降水量的时段, S_k 会发生递减,但是也会随着 r_k 的比例(C)增加. C 值在模型调试过程中自动生成.

线性模块确定有效降水量向径流的转化,有平行或并列两种线性存储结构.模型将径流分为以基流为主的慢速径流和降水期间的快速径流,二者之和构成总径流.线性模块仅有3个参数,即 α_q 、 β_q 、 α_s 和 β_s 中的任意3个,快速径流(q_i^f)、慢速径流(q_i^s)和总径流(Q_i)分别表示为:

$$q_i^f = -\alpha_q \cdot q_{i-1} + \beta_q \cdot U_k \quad (4)$$

$$q_i^s = -\alpha_s \cdot q_{i-1} + \beta_s \cdot U_k \quad (5)$$

$$Q_i = q_i^f + q_i^s \quad (6)$$

在模型中,除了参数 C 值由降水、径流等资料自动生成以外,其他需要手动配置.这些参数包括: τ_w 、 f 、 t_r 、产流的时间延迟系数(为数据时间步长的整数倍数)、单位过程曲线结构.单位过程曲线结构有3个选项:*single*、*two in series*、*two in parallel*,大多数流域选用*two in parallel*,即快速径流和慢速径流并列的形式.

2.4 模型评价指标

Nash-Sutcliffe 效率系数(NS)、相关系数(R^2)和相对误差(P_{BIAS})被用来评价模型校准期和验证期的模拟效果^[15-16].

R^2 表示模拟值与实测值的拟合效果,范围为0~1,值越大表示拟合效果越好,并且值大于0.5时,模型模拟效果可以接受.

NS 计算公式如下:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \text{mean}(Q_{obs}))^2} \quad (7)$$

式中, Q_{obs} 、 Q_{sim} 和 $\text{mean}(Q_{obs})$ 分别为实测值、模拟值和实测值均值; n 代表数据个数. NS 最优值是1.0, NS 值越接近于1.0,表示模拟效果越好,当 NS 为负值时,模型模拟值没有实测值的均值效果好.

P_{BIAS} 计算公式如下:

$$P_{BIAS} = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim}) \times 100}{\sum_{i=1}^n Q_{obs}} \quad (8)$$

式中, Q_{obs} 和 Q_{sim} 分别为实测值和模拟值. P_{BIAS} 最优值为0,负值表示实测值小于模拟值,而正值表示实测值大于模拟值.当 $|P_{BIAS}|$ 介于15~25之间时,模型模拟效果令人满意;当 $|P_{BIAS}|$ 介于10~15之间时,模拟效果较好;当 $|P_{BIAS}|$ 小于10时,模拟效果非常好.

2.5 人类活动影响指数

采用影响指数(L)定量分析人类活动对赣江流域径流的影响:

$$L = (Q_o - Q_s) / Q_s \quad (9)$$

式中, Q_o 为实测径流流量 (m^3/s), Q_s 为模拟径流流量 (m^3/s).

3 结果与分析

3.1 降水与径流变化趋势

影响流域径流的气候要素主要包括降水、蒸发、气温等,在大中尺度流域,降水对径流过程的影响显著.根据 Mann-Kendall 检验年降水的变化趋势(图 2)表明:(1)赣江流域降水量总体呈波动上升趋势(图 2a).1961—1970 年年总降水量先下降后上升,1963 年为该时期降水最低值;1971—1979 年降水量变化趋势不显著,1979 年以后逐渐上升,1998—2002 年超过 $\alpha=0.05$ 的显著性水平,2002 年以来降水量呈下降趋势;(2)根据 UF 和 UB 曲线的交点位置,采用 T 检验法,确定流域降水在 1979 年发生突变.

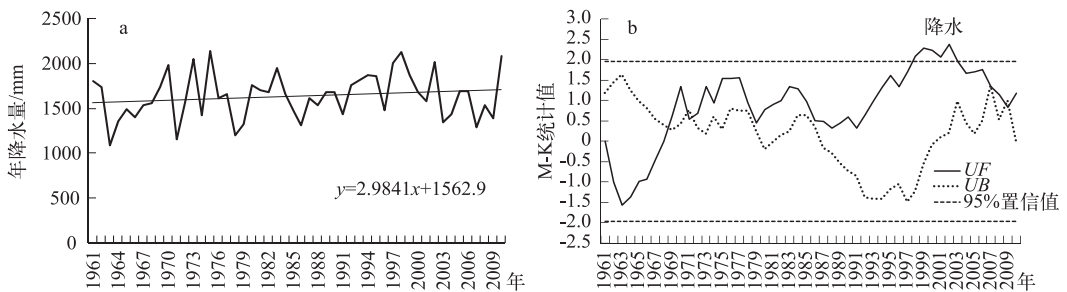


图 2 1961—2010 年赣江流域降水年际变化 (a) 及其 Mann-Kendall 突变检验结果 (b)

Fig.2 Inter-annual variation of depth of rain (a) and its Mann-Kendall results (b) in Ganjiang watershed during 1961—2010

根据 Mann-Kendall 检验 1955—2010 年赣江外洲站年总径流量的变化趋势(图 3)表明:(1)外洲站年总径流量呈波动上升趋势.1955—1962 年径流量显著上升,并超过 $\alpha=0.05$ 显著性水平,之后逐渐降低,1967 年 UF 值为 0,1967—1979 年径流量变化趋势不显著,1979 年以后又出现显著上升趋势,2002 年超过 $\alpha=0.05$ 的显著性水平,2002 年以来径流量呈下降趋势;(2) UF 和 UB 曲线有多个交点,为了去除无效突变点,采用 T 检验法,确定年径流在 1979 年发生突变.与流域年降水的突变发生时间一致,说明流域径流的增加与降水直接相关.根据降水和径流的突变检验结果,将研究时段划分为 1955—1979 年和 1980—2010 年两个阶段.

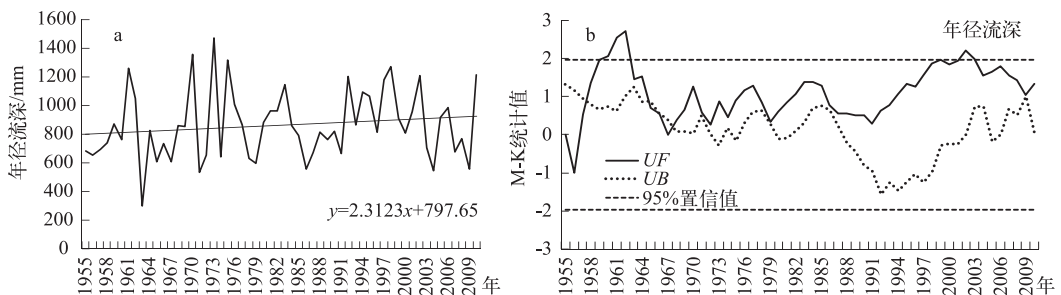


图 3 1955—2010 年外洲站径流深年际变化 (a) 及其 Mann-Kendall 突变检验结果 (b)

Fig. 3 Inter-annual variation of depth of runoff (a) and its Mann-Kendall results (b) in Waizhou Station during 1955—2010

为定量表示降水与径流变化量的关系,研究采用流域年降水变异系数与外洲站年径流变异系数相比较.根据上述分析结果,将流域径流数据分为两个阶段:第 1 阶段为 1955—1979 年;第 2 阶段为 1980—2010 年.1955—2010 年年径流和年降水的变异系数分别为 27.8% 和 15.5%,其中,第 1 阶段分别为 33.4% 和 18.1%;

第2阶段分别为22.6%和13.3%,表明在两个阶段径流受降水的影响均较大。

3.2 IHACRES 模型的径流模拟评价

IHACRES 模型可以有效评估气候变化对流域水文要素的影响,分析表明流域径流与降水的变化趋势基本一致,表明在不考虑下垫面的条件下,降水等气候因子是影响流域年径流的重要因素。将人类活动影响相对较少的1955—1979年作为基准时段,用该时段降水、径流及气温数据率定模型参数;然后输入变化时段(1980—2010年)实际降水、径流及气温数据运行模型,检验模型模拟效果,并分析除降水和气温以外其他因子对径流的影响,概括为人类活动的影响。

输入数据为1955—2010年赣江下游外洲站日降水量、日径流量、日气温和流域面积数据,采用月尺度进行模拟,选取基准时段(1955—1979年)降水、气温和径流数据率定参数。参数取值分别为: $w=2, f=4.9, c=0.001, t_r=30, \delta=0$ (其中 w 为流域干时常数, f 为温度调节因子, c 为保证在整个率定期模拟的有效降水总量等于观测总径流量的一个非自由参数, t_r 为参考温度, δ 为产流的延迟时间系数)。模型月径流量模拟效果较好(图4),其中 NS 为0.83,相对误差为0.02, R^2 达0.8649,表明IHACRES模型可以用于赣江流域的径流变化研究。

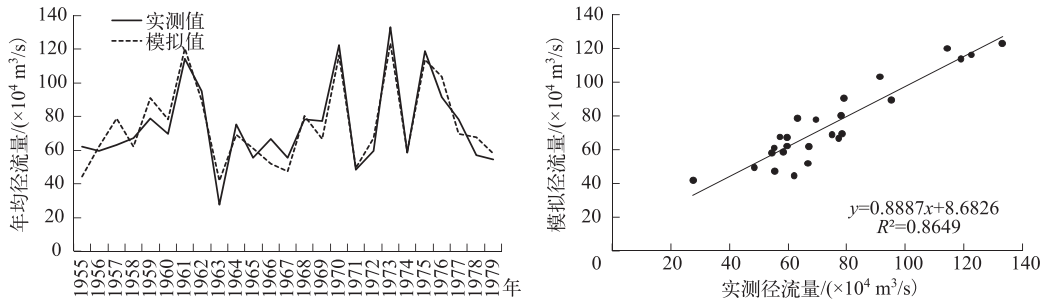


图4 外洲站1955—1979年基准期径流模拟值与实测值比较及拟合状况

Fig.4 Comparison between simulated runoff and observed runoff and curve chart in Waizhou Station during 1955-1979

3.3 人类活动对赣江径流变化的影响

应用模型率定的参数,求出变化时段(1980—2010)径流量模拟值,与实测值相比较(图5),模型 NS 为0.50, P_{BIAS} 值为2.69, R^2 为0.6607。利用1955—1979年基准期模拟径流率定的参数模拟1980—2010年径流量变化时的误差显著增加,表明1980—2010年间人类活动对赣江径流的影响显著增强。

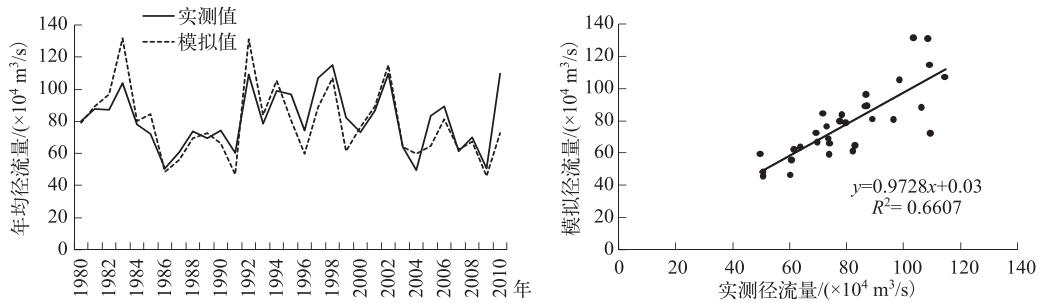


图5 外洲站1980—2010年变化期径流模拟值与实测值比较及拟合状况

Fig.5 Comparison between simulated runoff and observed runoff and curve chart in Waizhou Station during 1980-2010

由外洲站基准期(1955—1979年)和变化期(1980—2010年)径流模拟值与实测值的年内变化特征(图6、7)和模型效率系数、相对误差、相关系数值(表1)等可以看出:基准期各季节径流模拟效果都很好, NS 均在0.65以上, P_{BIAS} 小于6;而变化期夏季模拟效果最好, NS 为0.66, P_{BIAS} 为1.93, R^2 为0.68;冬季次之, NS 、

P_{BIAS} 和 R^2 分别为 0.65、9.63 和 0.73;春季和秋季较差,特别是秋季,NS 为 -0.06, P_{BIAS} 为 28.69,径流量实测值显著大于模拟值,表明人类活动使秋季径流量显著增加,春季径流量显著减少。

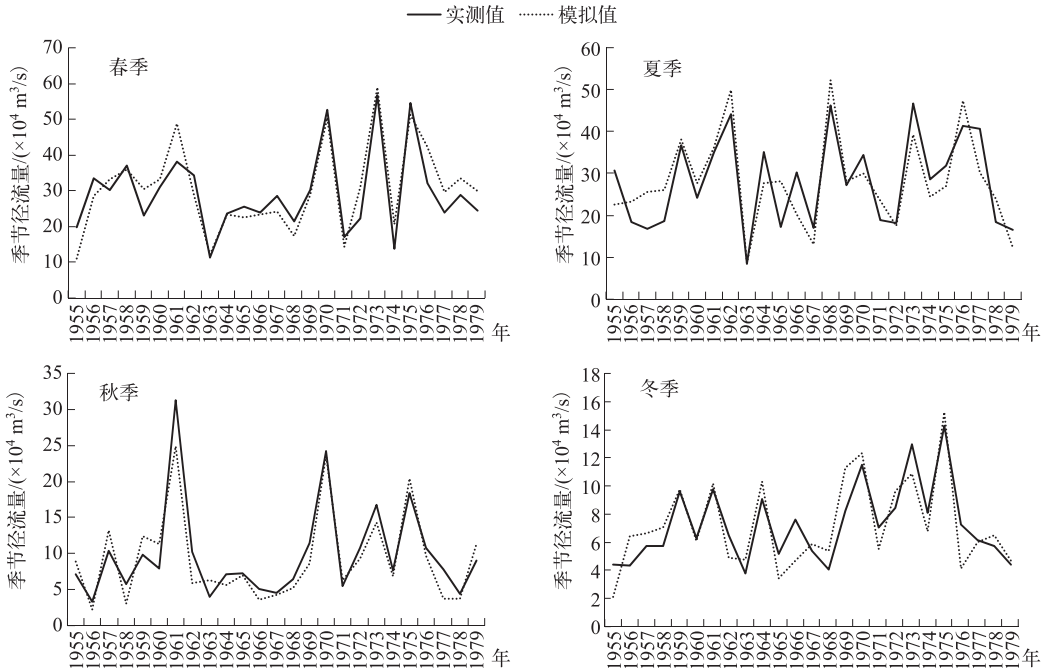


图 6 外洲站 1955—1979 年径流模拟值与实测值季节变化的比较

Fig.6 Comparison between seasonal simulated runoff and observed runoff in Waizhou Station during 1955 - 1979

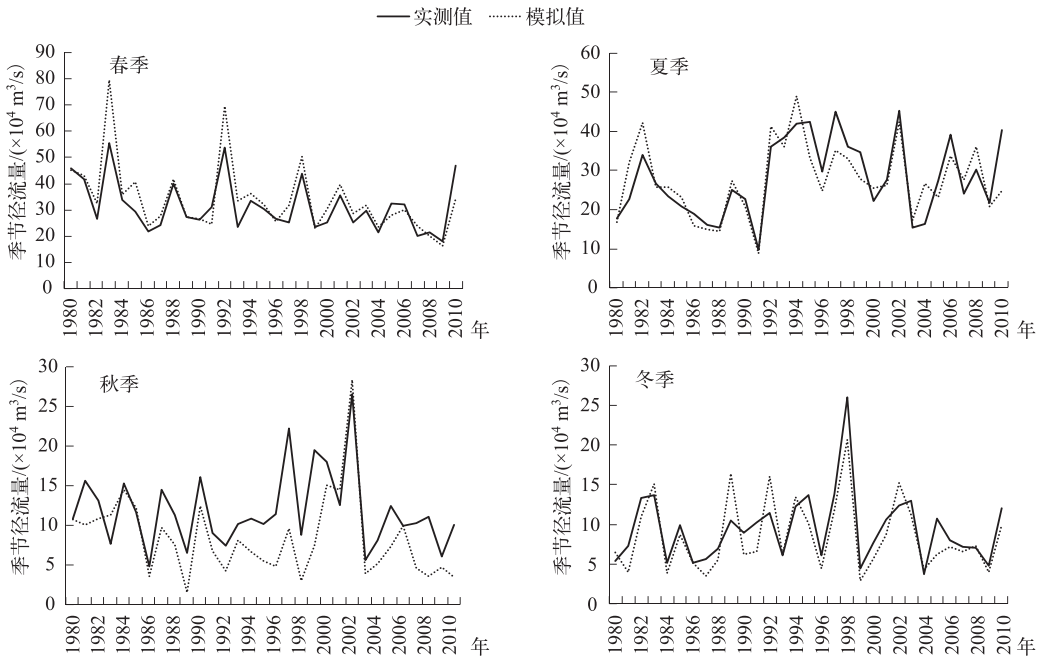


图 7 外洲站 1980—2010 年径流模拟值与实测值季节变化的比较

Fig.7 Comparison between seasonal simulated runoff and observed runoff in Waizhou Station during 1980 - 2010

表1 外洲站 1955—2010 年月径流数据
率定参数及有效性系数

Tab.1 Parameter and validity coefficient calibrated by
monthly runoff data in Waizhou Station during 1955—2010

时期	季节	NS	P_{BIAS}	R^2
1955—1979 年	春季	0.78	-3.89	0.81
	夏季	0.68	-0.25	0.70
	秋季	0.85	5.84	0.86
	冬季	0.74	0.26	0.66
1980—2010 年	春季	0.48	-8.58	0.78
	夏季	0.66	1.93	0.68
	秋季	-0.06	28.69	0.56
	冬季	0.65	9.63	0.73

通过计算变化期不同年份人类活动影响指数(L)值,分析人类活动对径流的影响评价,表明人类活动对赣江秋、冬径流有增加作用(图8)。45%年份的秋季径流增加50%以上,其中径流增加超过100%的年份达26%;径流增加超过150%的年份占16%;1989年的径流增加幅度最大,为320%。

尽管建国初期由于不合理的经济建设政策,加上后来人口增加,森林砍伐严重,森林覆盖率从1950s的40.1%下降到1980s初期的31.5%,但根据IHACRES模型模拟1955—1979年径流的结果表明:赣江流域径流变化主要受气候要素影响,土地利用覆盖的变化对地表径流的影响并不显著,且受水库影响也不明显;根据江西省水库建设情况^①,1950s—1970s修建的水库是以农业灌溉为主的中小型水库,1980s以后修建的是以水电为主的大中型水库(表2)。目前,赣江流域大型水库13座,中型水库120座,小型水库3678座。IHACRES模型模拟1980—2010年径流的结果表明:水库在丰水季节的夏季具有蓄水削洪作用,对地表径流的季节分配产生显著的影响,使夏季赣江流量下降,秋季流量增加。万安水库是流域最大的水库,1990年开始运行,兴利库容 $10.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。据统计,丰水期,当下游遭遇30~50a一遇洪水时,经水库调蓄,吉安最高洪水位可降低0.4~1.3m,丰城一带可降低0.5~0.7m,南昌地区可降低0.2~0.3m;枯水期,经水库调节后,下游增加航深0.2m^[17-18]。赣江流域1955—2010年秋、冬季节径流显著增加及春季径流减少与该区域水库的蓄水和泄水有直接关系,应用IHACRES模型计算的人类活动导致流域径流的增加量符合该流域实际情况。

表2 1980s前后赣江流域建设的大型水库的特性
Tab.2 Features of large reservoirs built in Ganjiang River around 1980s

水库	集水面积/ km^2	正常蓄水/ m	总库容/ ($\times 10^4 \text{ m}^3$)	兴利库容/ ($\times 10^4 \text{ m}^3$)	死库容/ ($\times 10^4 \text{ m}^3$)	最大坝高/ m	建成日期	河流水系	级别
上犹江水库	2750	198.4	82200	47100	25000	67.5	1957年10月	上犹江	大二
江口水库	3900	72	89000	70600	18400	33.4	1959年9月	赣江袁河	大二
上游水库	140	83	18300	11600	1900	28.1	1960年4月	锦河苏溪水	大二
长岗水库	848.5	190	36500	15800	9320	50.5	1970年12月	平江支流激水	大二
社上水库	427	172	17070	14300	380	40.2	1973年10月	禾水泸水河	大二
团结水库	412	242	14600	5920	4280	34.0	1979年12月	贡江支流东江河	大二
白云山水库	464	180	11400	7727	1280	48.0	1980年12月	富田水	大二
油罗口水库	557	220	11300	5400	3186	36.3	1981年11月	章水章江	大二
老营盘	172	158	10160	5540	2110	51.2	1983年5月	云亭河	大二

4 结论

本文利用赣江外洲水文观测站流量资料,以IHACRES模型模拟赣江1955—2010年径流,分析气候变化和人类活动对径流的影响,得到以下结论。

1) 1955—2010年赣江流域年总径流量呈波动增加趋势,Mann-Kendall突变检验表明赣江径流在1979年发生突变,据此将研究时段分为1955—1979年和1980—2010年两个阶段。根据变异系数等统计方法进行

① 江西省水利厅,内部资料,2009年印刷。

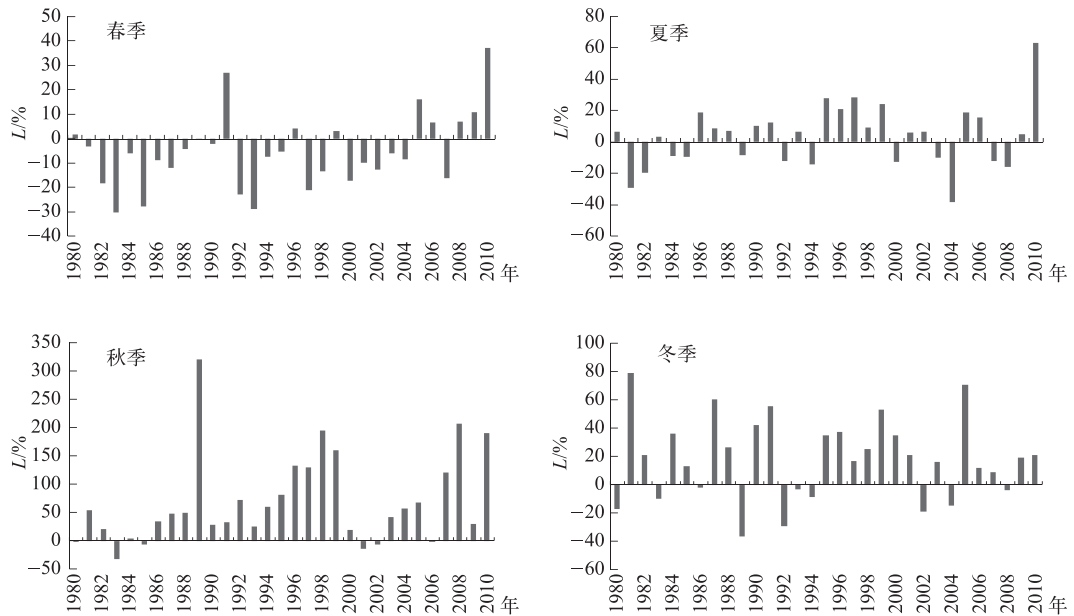


图8 利用 IHACRES 模型计算的外洲站 1955—2010 年人类活动影响指数 (L) 值
Fig.8 Index (L) calculated by IHACRES model in Waizhou Station during 1955 - 2010

分析,表明降水是引起径流变化的主要原因。

2) IHACRES 模型能够较好地模拟赣江流域的径流,表明 IHACRES 模型适用于中亚热带季风性湿润气候区的径流模拟。

3) IHACRES 模拟结果表明赣江流域土地覆盖的变化对年径流的影响不显著,但是流域内水库建设对径流的季节分配产生显著影响,具体表现为:丰水期的夏季径流量减少,秋季径流量显著增加;45%的年份秋季径流量增加 50% 以上,26%的年份秋季径流量增加超过 100%。

5 参考文献

- [1] Ye XC, Zhang Q, Liu J *et al.* Distinguishing the relative impacts of climate change and human activities on variation of streamflow in the Poyang Lake catchment, China. *Journal of Hydrology*, 2013, **494**: 83-95.
- [2] Zhang L, Podlasly C, Feger K *et al.* Different land management measures and climate change impacts on the runoff—A simple empirical method derived in a mesoscale catchment on the Loess Plateau. *Journal of Arid Environments*, 2015, **120**: 42-50.
- [3] Jiang C, Xiong LH, Wang DB *et al.* Separating the impacts of climate change and human activities on runoff using the Budyko-type equations with time-varying parameters. *Journal of Hydrology*, 2015, **522**: 326-338.
- [4] 赖格英, 王 鹏, 黄小兰等. 鄱阳湖水利枢纽工程对鄱阳湖水文水力影响的模拟. *湖泊科学*, 2015, **27**(1): 128-140. DOI 10.18307/2015.0116.
- [5] Milly PCD, Betancourt J, Falkenmark M *et al.* Stationarity is dead; whither water management? *Science*, 2008, **319**: 573-574.
- [6] Zheng H, Zhang L, Zhu R *et al.* Responses of streamflow to climate and land surface change in the headwaters of the Yellow River Basin. *Water Resources Research*, 2009, **45**: W00A19.
- [7] Jones JR, Schwartz JS, Ellis KN *et al.* Temporal variability of precipitation in the Upper Tennessee Valley. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2015, **3**: 125-138.
- [8] 康淑媛, 张 勃, 柳景峰等. 基于 Mann-Kendall 法的张掖市降水量时空分布规律分析. *资源科学*, 2009, **31**(3): 501-508.

- [9] 李子君, 李秀彬. 近 45 年来降水变化和人类活动对潮河流域年径流量的影响. 地理科学, 2008, **28**(6): 809-813.
- [10] 王金花, 康玲玲, 赵广福. 基于 Mann-Kendall 法的水沙系列突变点研究. 人民黄河, 2010, **32**(1): 43-45.
- [11] Jakeman AJ, Glittlewood L, Whitehead PG. Computation of the instantaneous unit hydrograph and identifiable component flows with application to two small upland catchments. *Journal of Hydrology*, 1990, **117**: 275-300.
- [12] Dye PJ, Croke BFW. Evaluation of streamflow predictions by the IHACRES rainfall-runoff model in two South African catchments. *Environmental Modelling & Software*, 2003, **18**: 705-712.
- [13] Alredaisy SMA. Recommending the IHACRES model for water resources assessment and resolving water conflicts in Africa. *Journal of Arid Land*, 2011, **3**(1): 40-48.
- [14] 柴晓玲, 郭生练, 彭定志等. IHACRES 模型在无资料地区径流模拟中的应用研究. 水文, 2006, **26**(2): 30-33.
- [15] Popov EG. *Gidrologicheskie prognozy*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979.
- [16] Deo RC, Şahin M. Application of the Artificial Neural Network model for prediction of monthly Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index using hydrometeorological parameters and climate indices in eastern Australia. *Atmospheric Research*, 2015, **161/162**: 65-81.
- [17] 邹淑珍. 赣江中游大型水利工程对鱼类及其生态环境的影响研究[学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2011.
- [18] 詹寿根, 汤志贤. 赣江峡江水库防洪库容研究. 人民长江, 2011, **42**(5): 11-14.