

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20222456

基于 WA-BP 耦合模型的流域径流变化归因分析

刘 雨¹, 赵 君^{1,2}, 王国庆², 徐进超^{1,2}, 邵月红¹

(1. 南京信息工程大学水文与水资源工程学院, 江苏 南京 210044; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 为了研究气候变化和人类活动双重影响下径流演变趋势,以秦淮河流域为例,基于代表站点的水文气象资料,首先,采用 Mann-Kendall 趋势检验分析流域水文气象要素的变化趋势;其次,利用有序聚类法和双累计曲线法判断径流序列的可疑突变点;而后,从众多水文气象因子中筛选影响径流的关键因子,构建小波分析-BP 神经网络(WA-BP)耦合模型预测突变点后的天然径流;最后,结合归因分析法定量识别气候变化和人类活动对径流变化的贡献率。结果表明,降雨方面,新河闸呈下降趋势,武定门闸和流域整体呈上升趋势,但变化趋势均不显著;径流方面,流域总体呈上升趋势,其中新河闸增加趋势不显著,武定门闸和流域整体增加趋势均通过了置信度为 0.01 的检验;流域蒸发总体呈下降趋势。武定门闸与流域整体在降雨径流变化趋势、突变点发生时间等方面具有较大的一致性。人类活动和气候变化对径流增加的贡献率分别为 73.92%、26.08%,可见人类活动是秦淮河流域径流变化的重要原因。结果对于该流域水旱灾害防治及水资源规划提供了科学依据。

关键词: Mann-Kendall 趋势检验;有序聚类分析;离散小波变换;BP 神经网络;归因分析

中图分类号: TV121⁺.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)10-0027-05

1 引言

近年来全球变暖背景下强烈人类活动极大地改变了区域的自然环境^[1],使流域的产汇流机制变得更为复杂,难以模拟预测,导致各种极端降雨和洪水事件频发。研究表明,秦淮河流域不透水面的扩张致使地表径流增加,流域水文循环过程和时空特征发生深刻变化,导致暴雨洪涝风险增加^[2]。因此,了解水文气象要素变化趋势,定量评估气候变化和人类活动对径流变化的影响,对于保证区域水安全和生态平衡具有重要意义。秦淮河流域位于长江下游,流域面积 2 631 km²。秦淮河有溧水河、句容河两源,两河在江宁区西北村汇合成秦淮河干流,在江宁东山镇分为两支河流,分别从武定门闸和秦淮新河闸流出,汇入长江。秦淮河流域水系及水文站点见图 1。本文采用不同的水文统计方法,对秦淮河流域内 1978~2015

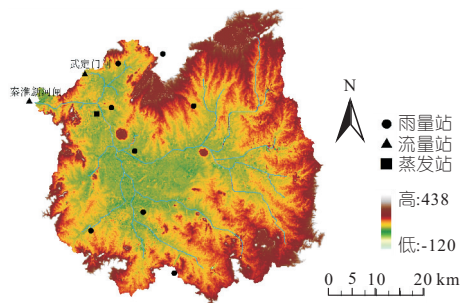


图 1 秦淮河流域水系及水文站点分布

Fig. 1 Locations of drainage system and hydrological stations in Qinhuai River Basin

年降雨径流序列进行趋势分析、突变点检验及归因分析,以期能更准确地预报径流演变趋势,给出影响径流变化的主要因素,为该流域洪涝防控提供科学依据。

2 数据和方法

收稿日期: 2022-11-21, **修回日期:** 2023-01-05

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3202300);中国博士后科学基金项目(2020T130309, 2019M651892);江苏省水利科技项目(2020022, 2021024);江苏省重点研发计划项目(BE2020633);江北新区重点研发计划项目(ZDYF20200129);伊犁科技项目(YZ2022A005);南京信息工程大学教材建设基金项目(20JCLX035)

作者简介: 刘雨(1998-),男,硕士研究生,研究方向为气候变化与水循环,E-mail:2811306430@qq.com

通讯作者: 赵君(1983-),女,博士、副教授、硕导,研究方向为气候变化与水循环,E-mail:zsmzyq@126.com

2.1 数据来源

选用秦淮河流域 1978~2015 年水文气象数据,其中降雨数据来源于流域内 10 个雨量站的逐日观测资料,并通过泰森多边形法求得面降雨量;径流数据来自流域出口武定门闸、秦淮新河闸的日径流资料,并将两者之和作为流域总径流;蒸散发数据取自东山(大骆村)蒸发测站的日蒸发数据,并通过点面折算系数转换为面蒸发量;130 项大气环流指数的逐月数据源自国家气象中心网站(<http://www.ncc-cma.net/cn/>)。

2.2 研究方法

2.2.1 趋势分析与突变检验法

Mann-Kendall 法^[3]是一种非参数检验,其优点是无需样本遵从一定分布,可较为全面地检验趋势性和突变性,给出检验结果的显著性评价。有序聚类分析法^[4]是在径流序列中寻找最佳分割点,使同类之间的离差平方和较小,而异类之间的离差平方和较大,该方法广泛应用于水文、气象序列的突变检验。双累计曲线法^[5]是检验水文、气象要素一致性及趋势性变化的常用方法,但双累计曲线一致性关系较为模糊,需配合其他方法一起诊断。

2.2.2 径流还原法

径流还原法^[6]认为突变点前的径流深序列为基准期(假定无人类活动或人类活动不明显),突变点后的径流深序列为影响期(受人类活动和气候变化共同影响),通过模拟基准期径流深来预测还原影响期天然径流深。

2.2.3 水文气象因子的筛选

采用相关系数法对众多水文气象因子进行初选,初选出因子后,进一步结合主成分分析法(PCA)对数据进行降维。主成分分析是通过正交变换将具有一定相关性的原始变量转变为一组维数较少且不相关的综合变量,可实现利用较少变量尽可能多地反映原始变量的信息,以达到数据简化的目的^[7]。

2.2.4 小波分析与 BP 神经网络(WA-BP)耦合模型

鉴于水文序列多为观测的离散值,故本文使用离散小波变换分析水文时间序列。对于信号 $\varphi(t) \in L^2(R)$,其离散小波变换^[8]定义为:

$$W_f(i, j) = 2^{-i/2} \sum_{t=0}^{N-1} \varphi(t) \overline{\Psi}(2^{-i}t - j) \quad (1)$$

式中, i, j 分别为伸缩因子、平移因子; $W_f(i, j)$ 为对应频率的小波系数; $\overline{\Psi}$ 为小波函数。

小波变换通常将时间序列分解为高频分量和低频分量。高频分量主要由随机性成分组成,而低频分量主要由确定性成分组成。采用选择小波函数及确定分解层数的方法^[9-10],选用 db1 作为离散小波分解的小波函数,分解层数取 2。

BP 神经网络模型是一种基于误差反向传播算法训练的多层前馈神经网络^[11],其具有优异的非线性逼近能力。采用 Levenberg-Marquardt 方法训练神经网络,设置一个隐含层,神经元数量经过训练和测试确定为 15。

WA-BP 耦合模型对径流模拟预测的基本思想见图 2。通过离散小波变换将径流序列分解为高、低频分量,然后由 BP 神经网络预测这些高、低频分量的小波系数,最终通过小波逆变换得到预测的径流序列。

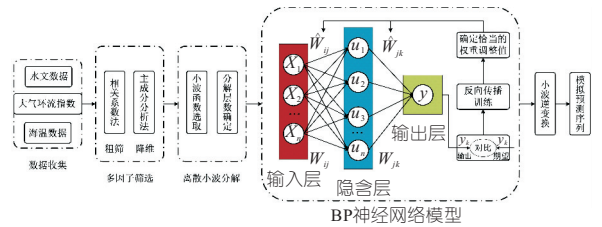


图 2 WA-BP 耦合模型流程图

Fig. 2 Flow chart of WA-BP coupling model

选用纳什效率系数(N_{NSE})、平均绝对误差(M_{MAE})及均方根误差(R_{RMSE})等指标评价模型精度。

2.2.5 归因分析法

基准期天然径流深 R_1 为基准期实测径流深序列的均值,影响期实测径流深 R'_1 为影响期实测径流深序列的均值,影响期天然径流深 R'_2 为模拟天然径流深序列的均值, R_1 与 R'_1 的差值为径流总变化量,记为 ΔR ,即 $\Delta R = R_1 - R'_1$; R'_2 与 R'_1 的差值为人类活动引起的径流变化量,记为 ΔR_1 ,即 $\Delta R_1 = R'_2 - R'_1$; R_1 与 R'_2 的差值为气候变化引起的径流变化量,记为 ΔR_2 ,即 $\Delta R_2 = R_1 - R'_2$ 。则人类活动在流域径流变化中的占比 η_1 为:

$$\eta_1 = (\Delta R_1 / \Delta R) \times 100\% \quad (2)$$

气候变化在流域径流变化中的占比 η_2 为:

$$\eta_2 = (\Delta R_2 / \Delta R) \times 100\% \quad (3)$$

3 结果与分析

3.1 水文气象要素变化趋势及突变检验

(1)采用 Mann-Kendall 法对秦淮河流域代表站和流域整体水文气象要素进行趋势分析,结

果见图 3。由图 3 可知,新河闸年降雨的 UF 曲线均落在 0.05 显著性水平线的范围内,说明新河闸年降雨系列无明显变化趋势,武定门闸年降雨在 1982 年后达到过 0.05 显著性水平,但 1985 年后降到显著性水平线以下,流域整体年降雨只在极个别年份达到显著性水平。三者统计值 Z 分别为 -0.21、1.18、1.79,表明新河闸年降雨呈下降趋势,武定门闸和流域整体均呈增加趋势,但三者变化趋势均未达到 0.05 的显著性水平。新河闸径流深在 1994 年后呈增加趋势,在 2003 年超

过 0.05 显著性水平线,但其统计值为 1.51,增加趋势不显著。武定门闸和流域整体径流深分别在 2007、2006 年后呈递增趋势,在 2009 年后递增趋势均超过显著性水平 0.05 的临界线,统计值分别为 3.77、3.20,均超过了 0.01 的显著性水平。流域蒸发量呈下降趋势,统计值为 2.40,通过了置信水平为 0.05 的显著性检验。

(2) 采用有序聚类分析法分别对新河闸和武定门闸径流深进行突变点分析,结果见图 4(a)、(b)。由图 4(a)、(b)可知,统计曲线分别在 1986、

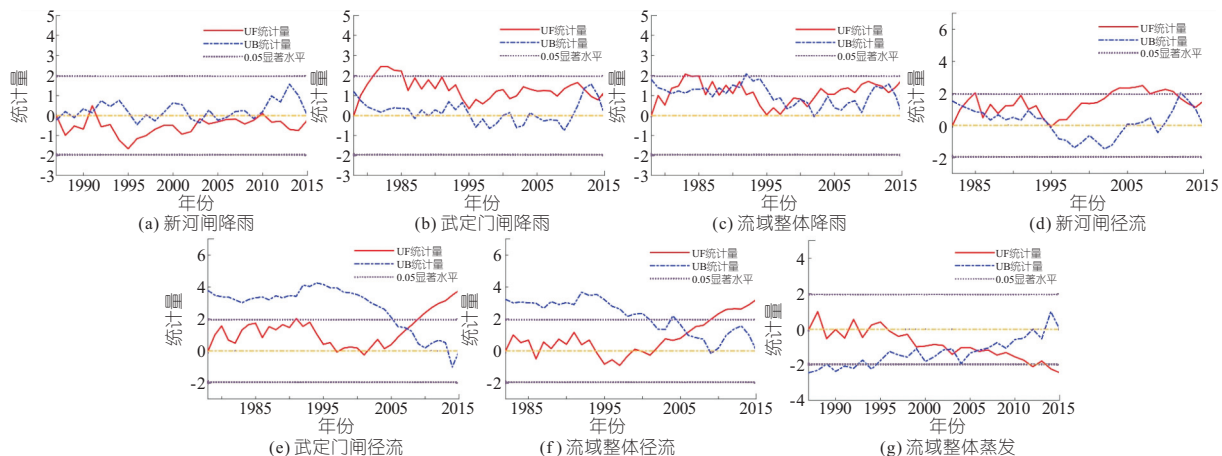


图 3 秦淮河流域水文气象要素 Mann-Kendall 趋势检验

Fig. 3 Mann-Kendall test of hydrometeorological elements in Qinhuai River Basin

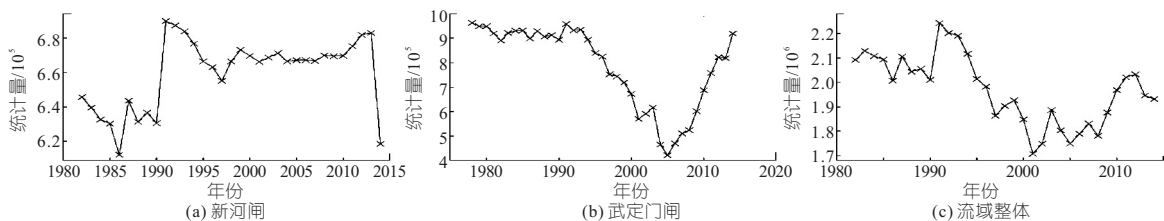


图 4 秦淮河流域径流深有序聚类分析

Fig. 4 Ordered cluster analysis method of runoff in Qinhuai River Basin

2005 年出现最小值,说明两站在 1986、2005 年存在可疑突变点。由图 4(c)可知,统计曲线在 2001 年出现最小值,其次在 2005 年出现次极小值,说明流域整体径流深在 2001、2005 年存在可疑突变点。根据降雨径流双累计曲线结果可知,径流深同样也在 1986、2005、2005 年发生较大突变。综合有序聚类分析法和双累计曲线法两种方法,并在此基础上采用秩和检验法分别对径流序列一致性的显著性改变进行检验(置信水平 $\alpha = 0.05$),最终选取 1986、2005 年作为秦淮新河闸和武定门闸径流深的突变点,选取 2005 年作为流域整体径流深突变点。

3.2 天然径流过程模拟

(1) 采用相关系数法对众多水文气象因子进行初步筛选,见表 1。由表 1 可知,选取的因子相关系数大于 0.4,且通过置信度为 0.05 的显著性

表 1 相关性较高的备选因子

Tab. 1 Alternative factors with high correlation

备选因子	r
降雨量	0.812
印度洋暖池强度指数	0.467
北半球副高强度指数	0.455
北美副高强度指数	0.453
北大西洋副高强度指数	0.452
北非-北大西洋-北美副高强度指数	0.447
北非副高强度指数	0.446
北美-北大西洋副高强度指数	0.441
北半球副高面积指数	0.429
东太平洋副高面积指数	0.428
北美副高面积指数	0.428
印度洋暖池面积指数	0.425
北美大西洋副高面积指数	0.418
北非-大西洋-北美副高面积指数	0.417
东太平洋副高强度指数	0.415
北大西洋副高面积指数	0.410
北非副高面积指数	0.401

检验。利用主成分分析法将表 1 中的备选因子进行数据降维,并根据特征值的累计贡献率达 95% 确定主成分个数为 5。

(2)收集秦淮河流域 1982~2015 年(共 408 个月)月径流数据,其中突变点前的月径流(共 288 个月)数据用于率定,并采用逐步回归法作为对比。各模型模拟评价结果见表 2。由表 2 可看出,WA-BP 耦合模型模拟精度明显优于逐步回归模型。各模型实测与模拟数据对比见图 5。由图 5 可知,对于径流深的模拟尤其是极大值的模拟,WA-BP 耦合模型明显优于逐步回归模型。秦淮新河是经人工开挖,于 1980 年通水用于秦淮河分洪的人工河道^[12],实测流量数据的起始时间为 1982 年,鉴于新河闸的突变点年份为 1986 年,本文未对秦淮新河闸做天然径流过程模拟。

表 2 WA-BP 与逐步回归模型的性能对比

Tab. 2 Performance comparison of WA-BP and Stepwise Regression models

模型	项目	R_{RMSE}	M_{MAE}	N_{NSE}
WA-BP	训练	15.54	9.76	0.94
	验证	25.51	16.02	0.85
	测试	18.87	11.85	0.91
逐步回归		30.66	19.26	0.65

表 3 径流演变各影响因素贡献率

Tab. 3 Contribution rate of each influencing factor to runoff evolution

项目	时段	实测径流深/mm	总变化量/mm	人类活动影响		气候变化影响	
				绝对影响/mm	相对影响/%	绝对影响/mm	相对影响/%
武定门闸	1982~2005 年	197.21	-269.30	-169.65	63.00	-99.65	37.00
	2006~2015 年	466.51					
流域整体	1982~2005 年	354.96	-249.34	-184.31	73.92	-65.03	26.08
	2006~2015 年	604.30					

径流深增加 99.65 mm,贡献率为 37%。同样,人类活动对于流域整体径流变化的贡献为 73.92%,气候变化对于流域整体径流变化的贡献率则为 26.08%。因此,无论是武定门闸还是流域整体,人类活动均是引起秦淮河流域径流变化的重要驱动因素。

4 结论

a. 秦淮河流域降雨无显著的变化趋势;径流总体呈上升趋势,其中新河闸增加趋势不显著,武定门闸和流域整体增加趋势均通过 0.01 的显著性检验;流域蒸发总体呈显著下降趋势。

b. 秦淮新河闸突变点发生在 1986 年,武定门闸和流域整体的突变点均出现在 2005 年,武定门闸和流域整体在降雨径流变化趋势、突变点出现时间等方面具有较大的一致性,因此武定门闸从规律方面能很好地代表秦淮河流域的水文气象变

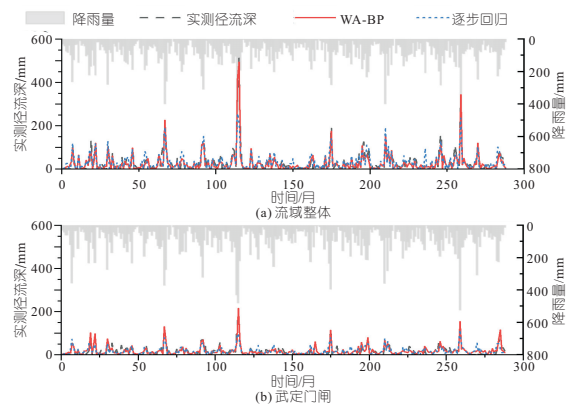


图 5 秦淮河流域基准期实测与模拟月径流过程

Fig. 5 Recorded and naturalized monthly runoff in base period of Qinhuai River Basin

3.3 径流变化归因定量识别

对秦淮河流域径流变化归因定量识别的结果见表 3。由表 3 可看出,武定门闸基准期平均径流深为 197.21 mm,影响期平均径流深为 466.51 mm,影响期平均径流深相较于基准期增加 269.30 mm,该部分是气候变化和人类活动对径流变化的共同影响,其中人类活动对径流变化的影响较于基准期径流深增加 169.65 mm,贡献率为 63%;气候变化对径流变化的影响较于基准期

化趋势。

c. 秦淮河流域 2006~2015 年实测径流深相较于基准期 1982~2005 年增加 249.34 mm,其中,人类活动、气候变化分别占径流增加总量的 73.92%、26.08%,人类活动的影响是秦淮河流域径流变化的重要原因。

d. 本文离散小波变换受水文序列噪声成分的干扰和影响,小波分解结果的精度和结果不可避免地存在一定误差,再者,神经网络虽较传统回归分析模型的模拟预测效果更好,但其类似于黑箱模型,无具体的物理模型作为支撑,模拟预测结果可能会违背现实情况。今后需对相关问题作进一步研究,为未来径流变化归因定量研究提供理论支撑与推广应用。

参考文献:

[1] PÖRTNER H O, ROBERTS D C, ADAMS H, et al. Climate change 2022: Impacts, adaptation and

