

基于弹性系数法的径流对气候变化 与人类活动响应研究

莫崇勋^{1,2,3}, 阮俞理^{1,2,3}, 莫桂燕^{1,2,3}, 朱新荣^{1,2,3}, 孙桂凯^{1,2,3}

(1.广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004;
2.工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 广西 南宁 530004;
3.广西防灾减灾与工程安全重点实验室, 广西 南宁 530004)

摘 要:基于永定河流域内 1957~2010 年降雨、蒸发和径流数据,采用 Mann-Kendall 趋势检验法结合距平序列变化情况分析蒸发能力、降雨和径流的变化趋势;运用 Mann-Kendall 突变检验法、Hurst 系数法分析流域径流序列的突变年及对应的突变程度;在此基础上以径流突变年为界划分基准期和变化期,采用弹性系数法定量分析气候变化和人类活动对径流的影响,并简要分析其原因。结果表明:流域蒸发能力呈现上升趋势,降雨和径流呈现递减趋势;径流序列突变点发生在 1984 年,突变程度属中度变异;永定河流域由气候变化引起的径流变化率为 28%,而由于人类活动引起的径流变化率为 72%,可见人类活动是影响永定河流域径流变化的主要驱动因素。

关键词: Mann-Kendall; 弹性系数法; 气候变化; 人类活动

中图分类号: P343.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2018)02-0041-05

气候变化和人类活动对水文过程影响的定量分析是近年水文研究领域的热点和前沿问题。以气温升高为主要特征的气候变化对水资源的影响主要表现为:加速土壤中的水分蒸发速率、加速地表水渗入速率、增大风暴潮的风险及加快融雪的速度。人类活动则通过各种水利水土保持工程措施来调节径流的过程,导致下渗量增大、汇流时间延长及洪峰减小,最终使得流量过程线变得平缓。由此可见,气候变化和人类活动对径流的变化起着至关重要的作用,特别是对河川径流的影响日益加剧。在国外,Christensen^[1]采用美国能源中心的大气研究并行气候模式(PCM)数据,驱动 VIC 大尺度流域水文模型,研究 Colorado 流域 2010~2039 年、2040~2069 年及 2070~2098 年三阶段气候变化状况;Thanapakpawin 等人^[2]采用 DHSVM,通过构建退耕还林和林地变为耕地两

种方案研究了泰国 Mae Cheam 流域人类活动对水循环的影响;2016 年,Guimberteau 等在新的土地覆被变化情景下,采用多种模型分析未来森林砍伐和气候变化对亚马孙河流域水文的影响^[3]。在国内,李志等采用 Mann-Kendall 以及双累积曲线的方法,研究黑河流域气候变化和人类活动对径流的影响,结果表明人类活动是导致径流减少的主要影响因素^[4];2016 年张连鹏等运用 BUDYKO 假设结合 TOPMODEL 水文模型分析了气候变化以及人类活动对径流变化的贡献率^[5];莫淑红等在分析流域径流序列趋势和突变的基础上,研究气候变化和人类活动对径流情势的影响^[6]。

中国水论坛、中国水科学发展论坛以及中国水利信息技术论坛等会议均指出气候变化和人类活动对中国北方半干旱地区影响较为严重,依托与国内相关

收稿日期:2017-04-05

基金项目:国家自然科学基金(51569003);广西自然科学基金(2015GXNSFAA139248);广西自然科学基金(2017GXNSFAA198361);广西高等学校优秀中青年骨干教师培养工程(桂教人[2014]39号);广西研究生教育创新计划资助项目(YCSW2017052)

作者简介:莫崇勋(1974-),男,壮族,教授,博导,研究方向为水文水资源。E-mail:YuliRuan777@163.com

专家的合作平台,论文以永定河流域为研究对象,采用流域内 1957~2010 年共 54 年的水文气象数据,对永定河流域的蒸发能力、降雨、径流三个主要水文要素进行了趋势分析,通过径流序列突变点划分基准期和影响期,并采用气候弹性系数法定量分析永定河流域气候变化和人类活动对其径流的影响,期冀为流域水资源管理和利用提供科学依据。

1 数据来源与方法

1.1 数据来源

论文原始资料包括永定河流域 1957~2010 年降雨、径流及蒸发能力数据,首先对原始数据进行统计分析计算出永定河流域 1957~2010 年降雨深、径流深及蒸发能力,然后对数据进行自相关的检验与剔除。永定河是海河流域七大水系之一,位于东经 112°~117°45'、北纬 39°~41°20'。永定河上游有桑干河和洋河两大支流,从怀来县朱官屯汇合后称永定河,在延庆县纳妫水河,由官厅水库流入官厅山峡(官厅水库至三家店区间)。永定河流域多年平均降水量为 418 mm 左右,并且年际降雨量变化较大。年内降雨量分布也非常不均匀,70% 以上的雨量集中在汛期(6 月~9 月)。

1.2 研究方法

1.2.1 Mann-Kendall 趋势检验方法

对序列 x_1, x_2, \dots, x_n , 设 $x_i, x_j (j > i)$ 中 $x_i < x_j$ 出现的次数为 P_i , 则^[7]:

$$\begin{cases} \tau = 4 \sum \frac{P_i}{n(n-1)} - 1 \\ \text{var}(\tau) = \frac{2(2n+5)}{9n(n-1)} \\ U = \frac{\tau}{[\text{var}(\tau)]^{0.5}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: U 为秩次相关系数, 取 $\alpha=0.05$, 则 $U_{\frac{\alpha}{2}} = \pm 1.96$ 。当

$|U| > U_{\frac{\alpha}{2}}$, 序列趋势显著, 反之趋势不显著, $U > 0$ 表示序列出现上升趋势; 否则表明出现下降趋势。

1.2.2 Mann-Kendall 突变检验法

本文采用 Mann-Kendall^[8]突变检验法进行流域径流序列突变点的初步检验, 并采用 Hurst 系数法进行突变程度强弱的分析。本章仅简要介绍 Mann-Kendall 突变检验法的原理和步骤, Hurst 系数法的原理和步骤

参考文献[9]。

首先设原始时间序列 $y_1, y_2, \dots, y_n, m_i$ 表示第 i 个样本 y_i 大于 $y_j (1 \leq j \leq i)$ 的累积数, 定义统计量:

$$d_k = \sum_{i=1}^k m_i \quad (2 \leq k \leq n) \quad (2)$$

在原序列随机独立等假设下, d_k 的均值和方差分别为:

$$E(d_k) = \frac{k(k-1)}{4}; \text{var}(d_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \quad (3)$$

将上面公式的 d_k 标准化, 得:

$$UF_k = \frac{d_k - E(d_k)}{\sqrt{\text{var}(d_k)}} \quad (4)$$

UF_k 组成一条 UF 曲线, 通过信度检验可得出其是否有明显的变化趋势。把前述步骤引用到反序列中, 计算得到另一条曲线 UB , 则两条曲线在置信区间内十字相交的交点确定为突变点。给定显著性 $\alpha=0.05$, 则统计量 UF 和 UB 的临界值为 ± 1.96 。

1.2.3 弹性系数法

流域径流量 Q 可以用气候变量 C 和人类活动 H 的函数关系来表示^[10]:

$$Q = f(C, H) \quad (5)$$

式中: C 为气候变量; H 为地形、土壤、土地利用的人类活动综合作用结果。所以流域径流的变化可以表示为:

$$\Delta Q = \Delta Q_c + \Delta Q_H \quad (6)$$

式中: ΔQ 为流域在研究时段内径流总变化; ΔQ_H 为由于人类活动所引起的径流变化; ΔQ_c 为由于气候变化所引起的径流变化。

其次, 总的径流量的变化 ΔQ 也可以表示为:

$$\Delta Q = \Delta Q_{abs,1} - \Delta Q_{abs,2} \quad (7)$$

式中: $\Delta Q_{abs,1}$ 为基准期实测径流量均值; $\Delta Q_{abs,2}$ 为影响期径流量均值。

气候变化对流域径流的影响可以表示为:

$$\Delta Q_c = \left(\frac{d_p \times \varepsilon_p}{p} + \frac{d_{E_s} \times \varepsilon_{E_s}}{E_o} \right) Q \quad (8)$$

式中: d_p 和 d_{E_s} 分别为降水的变化和潜在蒸散发的变化; ε_p 和 ε_{E_s} 分别为径流对该流域降雨和蒸散发的弹性系数, 表示为:

$$\varepsilon = (\sigma_Q / Q) / (\sigma_X / X) \quad (9)$$

按照长时段的水量平衡公式 $Q=P-E_0$ 和 BUDYKO 假设,实际蒸散发 E_0 可以用干燥指数来表示: $f=\overline{E}/\overline{P}$ 。其中 P 和 E 分别是年平均降水及蒸散发。因此降雨和蒸散发对径流的弹性系数可以表示为:

$$\varepsilon_p=1+\theta F'(\theta)/(1-F(\theta))$$

(10)

对于 $F(\theta)$ 的具体函数形式本文采用 Burc-Pike 的公式。

$$f(x)=(1+x^{-2})^{-0.5}$$

(11)

2 结果分析

2.1 趋势检验结果及分析

蒸发能力、降雨和径流距平序列分别见图 1、图 2 和图 3。从图 1 可知,永定河流域蒸发能力距平序列总体呈现出上升趋势,上升速率为 5.52 mm/10a。20 世纪 90 年代后以正距平为主,进一步说明 1990 年之后受全球气候变暖的影响,蒸散发量普遍较大。经 Mann-Kendall 趋势检验,结果显示 $U=2.19$,也说明蒸发能力序列呈现上升趋势,且趋势显著。由图 2 可知,永定河流域的降雨量距平总体呈现下降趋势,下降速率达 13.9 mm/10a。1980 年后则主要为负距平,说明 20 世纪 80 年代后降雨量普遍小于序列平均降雨量,降雨减少趋势明显。Mann-Kendall 趋势检验结果显示 $U=-1.66$,说明降雨序列呈现减少趋势,但减少趋势不显著。由图 3 知,永定河流域径流距平总体呈现下降趋势,下降速率达 7.5 mm/10a。与降雨距平序列一致,径流距平序列 1980 年主要为负距平,说明 20 世纪 80 年代后径流量普遍小于序列平均值,这表明降雨径流变化密切相关。Mann-Kendall 趋势检验结果显示 $U=-2.69$,说明径流序列呈现减少趋势,且减少趋势显著。

2.2 突变检验结果及分析

对永定河流域径流序列进行突变检验,检验结果见图 4。由图 4 可知,曲线 UF 和曲线 UB 完全十字相交于 1984 年,表明永定河流域径流序列在 1984 发生突变,突变后径流序列一致性遭到破坏。此外,采用 Hurst 系数法分析径流序列突变程度的强弱,计算得到 Hurst 系数为 0.68,根据 Hurst 系数法中变异程度划分等级原理(见表 1)可知,永定河流域径流序列突变程度属于中度偏弱变异。以 1984 年作为基准点,将序列划分为基准期(1957~1983 年)

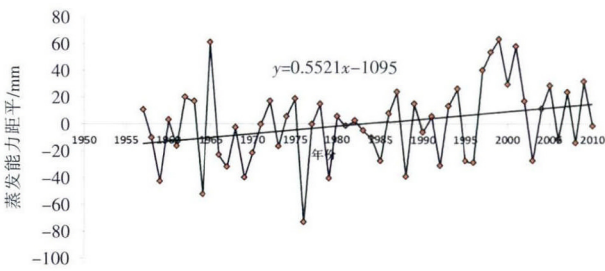


图 1 蒸发能力距平序列

Fig.1 The anomaly series of the evaporation capacity

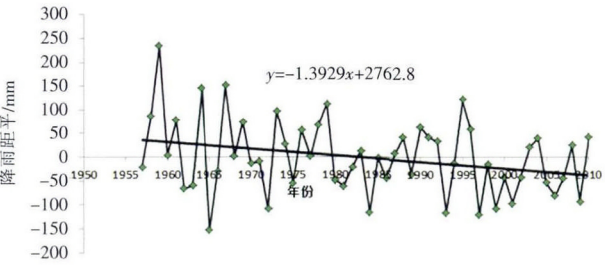


图 2 降雨距平序列

Fig.2 The anomaly series of the precipitation

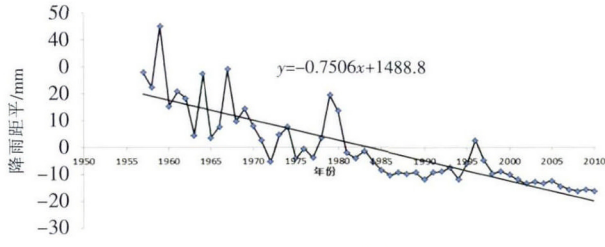


图 3 径流距平序列

Fig.3 The anomaly series of the runoff

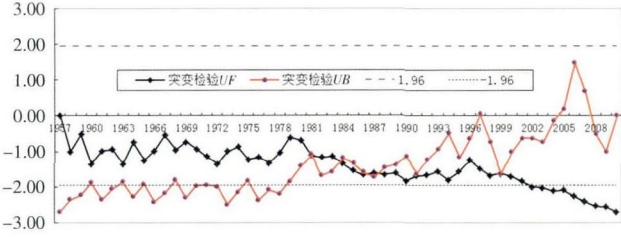


图 4 径流突变检验结果

Fig.4 The results of the runoff mutation test

表1 变异度分级

Table1 The variation classification

相关函数 $C(t)$	Hurst 系数(h)	变异度
$0 \leq C(t) < \gamma_\alpha$	$0.5 \leq h < h_\alpha$	无变异
$\gamma_\alpha \leq C(t) < \gamma_\beta$	$h_\alpha \leq h < h_\beta$	弱变异
$\gamma_\beta \leq C(t) < 0.6$	$h_\beta \leq h < 0.839$	中变异
$0.6 \leq C(t) < 0.8$	$0.839 \leq h < 0.924$	强变异
$0.8 \leq C(t) < 1.0$	$0.924 \leq h \leq 1.0$	巨变异

注: α, β 为显著性水平, 且 $\alpha > \beta$; $\gamma_\alpha, \gamma_\beta$ 为 α, β 下相关函数 $C(t)$ 的最低值; $h_\alpha = \frac{1}{2} [1 + \ln(1 + \gamma_\alpha) / \ln 2]$ 。

表2 突变前后径流计算参数情况对比

特征参数	<i>U</i> 值	Hurst 系数	均值	相对变率
突变前	-2.85	0.64	7.88/mm	27.8%
突变后	-2.08	0.78	1.43/mm	15.7%
变化值	0.77	0.14	-6.45/mm	12.1%

和变化期(1984~2010 年),定量分析气候变化和人类活动对径流的影响。突变前后永定河流径流相关特征参数变化情况详见表2。由表 2 可知,突变前后径流均呈显著减少趋势,由相对变率对比可知突变后径流较突变前稳定,具体表现为突变后相对变率减少。

2.3 弹性系数法定量研究结果及分析

根据突变检验结果,最终确定径流的突变年为1984 年,以突变年为分界点,确定基准期为1957 年~1983 年,变化期为1984 年~2010 年。对永定河流域降水、蒸发能力、径流数据的计算得到基准期平均降雨量 507.63 mm,变化期平均降雨量为 469.41 mm,平均降雨量呈减少趋势,减少 38.22 mm;基准期平均蒸发能力值为 859.77 mm,变化期平均蒸发能力值为 875.54 mm,蒸发能力呈现升高趋势,升高 15.77 mm;基准期径流平均值为 7.88 mm,变化期为 1.43 mm,径流系列呈现递减的趋势,减少值为 6.45 mm。

由于干燥指数的定义计算得永定河流域的干燥指数为 1.78,采用 Burc-pike 公式即本文公式(11)计算实际蒸发量,结果得到 0.87。然后根据公式(10)算的径流对降雨的弹性系数为 2.64,径流对蒸发的弹性系数为-1.64。这表明若降雨量减少一个单位将导致径流量减少 2.64 个单位。若蒸发能力增加一个单位,将导致径流量减少 1.64 个单位。最后根据公式(8)计算出由于气候变化导致径流减少的量为 1.81 mm,而由于人类活动导致的径流减少量为 4.64 mm。综合以上分析和计算,永定河流域由气候变化引起的径流变化率为 28%,而由于人类活动引起的径流变化率为 72%。可见人类活动是影响永定河流域径流变化的主要因素。重要的中间参数计算结果见表 3。

综上,永定河流域内气候变化和人类活动主要从以下几个方面影响流域的径流量:

(1)气温的升高。永定河流域位于我国北方地区,

表3 重要的中间参数计算结果表

参数名称	计算方法	计算结果
干燥指数 ϕ	$\phi=P/E$	$\phi=1.78$
实际蒸发函数 $F=(\phi)$	$F(\phi)=1/\sqrt{1+\phi^2}$	$F(\phi)=0.87$
径流对降雨的弹性系数	参考公式(10)	$\varepsilon_p=2.64$
径流对蒸发的弹性系数	1 减去 ε_p	$\varepsilon_{E_0}=-1.64$
由气候变化导致的径流变化/mm	参考公式(8)	$\Delta Q_c=-1.81$

是我国气温变化的敏感地带。温度变化对降水形成的水汽条件和动力条件都有影响,一般在正常的情况下我们认为气温与蒸发成正比关系,气温通过影响蒸散发来影响径流。气温的升高,通常使得流域蒸散发量增加,从而使得径流减少。

(2)降水的减少。对于永定河流域来说,降水是产生径流的最重要因素,是径流的来源,径流变化与降水变化呈正相关,前面已经分析出 1 个单位的降雨量减少,就会导致 2.64 个单位径流的减少。永定河流域降雨量呈现总体减少的趋势,可见永定河流域内径流也会呈现递减的趋势。

(3)人类活动。人类活动流域径流量的影响,可分为水资源开发利用活动造成的直接影响以及通过对流域下垫面改变而引起的间接影响两类。就永定河而言人类活动的影响主要包括水库兴建、人口激增、大型牲畜的饲养数量激增、地下水的长期开采等。

3 结论与探讨

(1)永定河流域内,1957~2010 年的蒸发量以速率 5.52 mm/10a 上升;降雨量以速率 13.9 mm/10a 递减;径流量以速率 7.5mm/10a 递减。经 Mann-Kendall 趋势检验,除了降雨序列的变化趋势不显著外,其他序列皆呈现显著趋势。

(2)经 Mann-Kendall 突变检验,永定河流域径流序列在 1984 年前后发生突变,突变程度为中度偏弱。

(3)以 1984 年为分界点,将序列划分为基准期和变化期,结果显示变化期(1984 年~2010 年)比基准期(1957 年~1983 年)年平均径流减少 6.45 mm。气候因素对径流减少贡献率约为 28%(1.81 mm),人类活动约为 72%(4.64 mm)。影响永定河流域径流量的因素

包括气候变化和人类活动,其中最主要的影响因素是人类活动。

(4)因为人类对气候系统复杂性、随机性和灰色性认识的局限性,研究气候变化对流域水文循环过程的影响就成为一个相对复杂和困难的过程,其研究存在着一定的不确定性与人为主观性,这有待下一步深入探讨和研究。

参考文献:

- [1] Christensen N S, Wood A W, Voisin N, et al. The effects of climate change on the hydrology and water resources of the Colorado River basin[J]. *Climatic Change*, 2004,62(1-3):337-363.
- [2] Thanapakpawin P, Richey J, Thomas D, et al. Effects of land use change on the hydrologic regime of the Mae Chaem river basin, NW Thailand[J]. *Journal of Hydrology*, 2006,334:215-230.
- [3] Mathieu Guimberteau, Philippe Ciais, Agnès Ducharme, et al. Impacts of future deforestation and climate change on the hydrology of the Amazon basin: a multi-model analysis with a new set of land-cover change scenarios [J]. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 2016,430.
- [4] 李志,刘文兆,郑粉莉,等.黄土塬区气候变化和人类活动对径流的影响[J]. *生态学报*, 2010,30(9):2379-2386. (LI Zhi, LIU Wenzhao, ZHENG Fenli, et al. The impact of climate change and human activities on runoff in Loess Plateau of China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010,30(9):2379-2386. (in Chinese))
- [5] 张连鹏,刘登峰,张鸿雪,等.气候变化和人类活动对北洛河径流的影响[J]. *水力发电学报*, 2016,35(7):55-66. (ZHANG Lianpeng, LIU Dengfeng, ZHANG Hongxue, et al. Impact of climate change and human activities on runoff variation in Beiluo River basin [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2016,35(7):55-66. (in Chinese))
- [6] 莫淑红,王学风,勾奎,等.气候变化和人类活动对灞河流域径流形势的影响分析[J]. *水力发电学报*, 2016,35(9):7-17. (MO Shuhong, WANG Xuefeng, GOU Kui, et al. Impacts of climate changes and human activities on annual runoff of Bahe River basin [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2016,35(9):7-17. (in Chinese))
- [7] 石教智,陈晓宏,吴甜. 东江流域降雨径流变化趋势及其原因分析[J]. *水电能源科学*, 2005,23(5):8-10. (SHI Jiaozhi, CHEN Xiaohong, WU Tian. Study on rainfall and runoff change tendency and its causes in East River valley [J]. *International Journal Hydroelectric Energy*, 2005,23(5):8-10. (in Chinese))
- [8] 雷红富,谢平,陈广才,等.水文序列变异点检验方法的性能比较分析[J]. *水电能源科学*, 2007,25(4):36-40. (LEI Hongfu, XIE Ping, CHEN Guangcai, et al. Comparison and analysis on the performance of hydrological time series change-point testing methods [J]. *International Journal Hydroelectric Energy*, 2007,25(4):36-40. (in Chinese))
- [9] 谢平,陈广才,雷红富. 基于 Hurst 系数的水文变异分析方法 [J]. *应用基础与工程科学学报*, 2009,17(1):32-39. (XIE Ping, CHEN Guangcai, LEI Hongfu. Hydrological alteration analysis method based on Hurst coefficient [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2009,17(1):32-39. (in Chinese))
- [10] 胡珊珊,郑红星,刘昌明,等.气候变化和人类活动对白洋淀上游水源区径流的影响[J]. *地理学报*, 2012(67):17-36. (HU Shanshan, ZHENG Hongxing, LIU Changming, et al. Assessing the impacts of climate variability and human activities on streamflow in the water source area of Baiyangdian Lake [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012(67):17-36. (in Chinese))

Studying Response of Runoff to Climate Change and Human Activities Based on Elastic Coefficient

MO Chongxun^{1,2,3}, RUAN Yuli^{1,2,3}, MO Guiyan^{1,2,3}, ZHU Xinrong^{1,2,3}, SUN Guikai^{1,2,3}

(1. College of Civil Architectural Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education, Nanning 530004, China;

3. Guangxi Key Laboratory of Disaster Prevention and Engineering Safety, Nanning 530004, China)

Abstract: Accurate assessment of the impacts of climate change and human activities on watershed runoff is conducive to better management of water resources. Taking the Yongding River Basin as an example, this paper analyzed the trend of evaporation, rainfall and runoff. Mann-Kendall was used to analyze the mutation year and Hurst method was applied to analyze the degree of mutation. On the basis of this, this paper analyzed the influence of climate change and human activities on runoff by using the method of elastic coefficient, and analyzed the reason of the change of runoff. The results indicate that the evaporation show a rising trend, while rainfall and runoff show a decreasing trend. The mutation occurred in 1984, and mutation degree is moderate. And the main influencing factor is the impact of human activities, and its contribution rate is 72%, while the contribution rate of climate change is 28%.

Key words: Mann-Kendall; elastic coefficient method; climate change; human activity