

气候变化和人类活动对白河流域径流 变化影响的定量研究

王晓颖¹, 宋培兵², 廖卫红³, 张永波¹, 蔡思宇³, 雷晓辉³

(1. 太原理工大学 水利科学与工程学院, 山西 太原 030024; 2. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058; 3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: 分析气候变化和人类活动对白河流域径流变化的贡献率, 可为流域水资源规划与管理提供依据。以白河流域作为研究对象, 首先采用线性趋势法、滑动平均法分析水文气象要素的年际变化趋势, 其次采用 Mann-Kendall 检验、有序聚类检验和滑动 t 检验探究年径流量的突变年份, 最后采用基于 Budyko 假设的水量平衡法评估气候变化和人类活动对径流变化的影响。结果表明: 白河流域年径流量呈下降趋势, 2008-2017 年平均径流量仅为 1960-1969 年平均径流量的 36.5%; 年径流量在 1979 年发生突变, 在 1986 年以后呈显著下降趋势; 与基准期相比, 变化期流域的干旱指数在增加, 2001-2017 年流域的干旱更为明显; 人类活动是白河流域径流变化的主要原因, 1980-2000 年、2001-2017 年人类活动对径流变化的平均贡献率分别为 85.6%、73.6%, 说明 2000 年以后气候变化对径流变化的影响呈上升趋势。

关键词: 径流; 气候变化; 人类活动; 突变检验; Budyko 假设; 白河流域

中图分类号: TV121; P333 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2020)04-0050-07

Quantitative analysis of the influences of climate change and human activities on runoff variations of Baihe River Basin

WANG Xiaoying¹, SONG Peibing², LIAO Weihong³, ZHANG Yongbo¹, CAI Siyu³, LEI Xiaohui³

(1. College of Water Resources Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Studies on the contribution rates of climate change and human activities to the runoff variations of Baihe River Basin is valuable for the planning and management of water resources in this area. In this paper the Baihe River Basin was selected as the study area, linear trend method and moving average method were adopted to analyze the interannual trends of hydrometeorological elements. Then, Mann-Kendall test, sequential cluster test and moving t test were adopted to investigate the abrupt change year of the annual runoff. Finally, multiple water balance methods based on Budyko hypothesis were adopted to evaluate the influences of climate change and human activities on the runoff variations. Results show that the annual runoff in Baihe River Basin showed a downward trend, the average runoff from 2008 to 2017 only reached 36.5% of that from 1960 to 1969. The abrupt change of annual runoff happened in 1979 and the annual runoff showed a significant downward trend after 1986. Compared to the base period, the drought index increased in the variation period and the droughts became more severe from 2001 to 2017. Human activities was the major cause of runoff variations, its average contribution rates to the runoff variations were 85.6% and 73.6% for the periods of 1980-2000 and 2001-2017 respectively,

收稿日期: 2019-11-19; 修回日期: 2020-02-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51709273); 中国电力建设股份有限公司项目(DJ-ZDZX-2016-02); 广东省水利创新科技项目(2017-06)

作者简介: 王晓颖(1993-), 女, 山西大同人, 硕士研究生, 主要从事水文水资源研究。

通讯作者: 廖卫红(1986-), 女, 湖北监利人, 博士, 高级工程师, 从事水文模型和洪水预报研究。

which also indicate that the influences of climate change on the runoff variations were on the rise.

Key words: runoff; climate change; human activities; abrupt change test; Budyko hypothesis; Baihe River Basin

1 研究背景

在气候变化和人类活动影响下,流域水循环发生显著变化^[1-2]。径流不仅是流域水循环的关键环节,也是流域水资源的重要组成部分,其变化过程将直接影响到流域水资源的开发和利用,并对区域的社会经济发展和生态文明建设产生重要影响^[3-4]。目前,基于 Budyko 假设的水量平衡法和水文模拟法是研究气候变化和人类活动对流域径流变化的主要方法^[5-6]。郭生练等^[7]基于 Budyko 假设的水量平衡法推导了长江流域年径流量的变化公式,发现降水量是造成各子流域径流变化的主导因素。邓晓宇等^[8]利用水文模拟程序分析抚河流域地表水文变化过程,发现降水量是气候变化的主要影响因子。夏军等^[9]采用弹性系数法和水文模拟法,发现人类活动对汉江上游径流量变化的影响较大,且其对径流量变化的影响呈增长趋势。夏伟等^[10]应用累积量斜率变化率比较法量化降水量和人类活动对泮河流域径流量变化的影响,发现 1997-2016 年人类活动对径流减小的相对贡献率高达 111.92%。杨思雨等^[11]通过双累积曲线法揭示渭河上游径流量变化原因,发现 2010-2015 年人类活动对径流量变化的贡献率高达 98.32%。综合现有的研究可知,与水文模拟法相比,基于 Budyko 假设的水量平衡法具有物理意义明显、计算过程简单、参数较易获取等优点。因此,基于 Budyko 假设的水量平衡法是一种用于径流变化归因分析的理想方法^[12-13]。

作为北京市重要的地表饮用水水源地,密云水库对于保障首都供水安全和城市经济发展具有重要的战略意义。近几十年来,受气候变化和人类活动的综合作用,密云水库年径流量呈下降趋势,1956-2008 年的变化率约为 $-0.3 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ^[14]。此外,随着南水北调工程中线入京输水的稳定运行,密云水库入库径流量的丰枯变化必定会影响北京市的水源供水格局,进而影响流域水资源的合理规划和开发利用。

鉴于此,本文以密云水库上游的白河流域作为研究对象,基于 1960-2017 年白河流域的降水、径流和潜在蒸发数据,运用滑动 t 检验对 Mann-Kendall 检验、有序聚类检验判定的突变年份进行显著性检验,采用基于 Budyko 假设的水量平衡法评估气

候变化和人类活动对白河流域径流变化的影响。研究结果可为白河流域水资源规划、防洪减灾提供科学依据,对于提高城市供水安全保障程度、保护流域生态环境安全具有重要意义。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

密云水库上游的潮白河流域由潮河、白河两大支流在密云县河槽村汇合而成。潮白河流域位于东经 $115^{\circ}25'$ ~ $117^{\circ}33'$,北纬 $40^{\circ}19'$ ~ $41^{\circ}31'$ 之间,流域控制面积为 $15\,788 \text{ km}^2$ 。流域多年平均气温为 10.6°C ,降水主要集中在 6-9 月,其中 7-8 月的降水量约占年降水总量的 56%。白河发源于河北省涞源县,至密云水库的坝址长 248 km,在延庆白河堡入北京境内,白河流域控制流域面积为 $8\,506 \text{ km}^2$,断面以上河长约 217 km,洪水期降水集中,历史实测最大流量为 $2\,600 \text{ m}^3/\text{s}$ 。白河流域水系及水文、气象测站分布如图 1 所示。

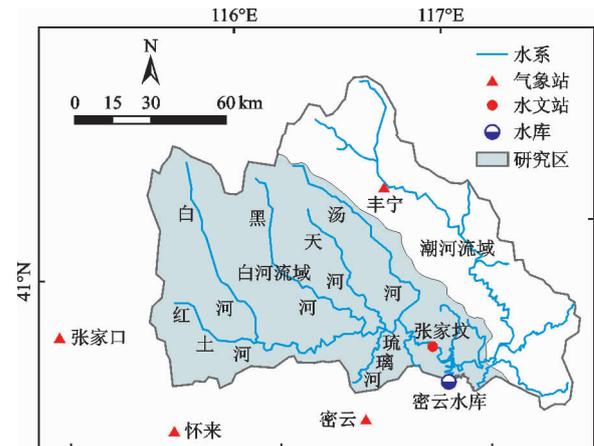


图 1 白河流域水系及水文、气象测站分布图

2.2 数据来源

本文采用的研究时段为 1960-2017 年。径流资料来源于密云水库管理处提供的张家坟站实测径流数据,张家坟站是白河流域的入库控制站,能较好地反映密云水库上游白河流域的径流变化。气象资料来源于中国气象数据网提供的白河流域周边密云、怀来、丰宁和张家口气象站的地面气候资料数据集。潜在蒸发量根据联合国粮食及农业组织 (FAO) 推荐的 Penman-Monteith 公式计算得到^[15],该公式具有严格的物理基础,且在不同流域和环境

下估算的潜在蒸发量精度较高,是目前应用最为广泛的计算方法之一^[16-17]。流域降水量、潜在蒸发量由白河流域周边气象站的降水、蒸发数据通过反距离权重插值得到。

2.3 研究方法

首先采用线性趋势法和滑动平均法分析蒸发、降水和径流的年际变化趋势;随后,运用滑动 t 检验对 Mann-Kendall 检验、有序聚类检验判定的突变年份进行显著性检验,根据径流突变年份划分研究时段的基准期和变化期;最后,采用基于 Budyko 假设的水量平衡法评估气候变化和人类活动对径流变化的影响。

2.3.1 径流序列的突变检验 目前,用于突变检验的方法较多,不同的检验方法各有特点。例如, Mann-Kendall 检验不要求时间系列遵从一定分布,可用于水文气象要素非正态分布数据的突变检验^[18]。有序聚类检验的原理是根据有序分类推求最有可能的干扰点,即通过寻求最优分割点推估突变点^[19]。滑动 t 检验通过比较两组样本序列平均值的差异是否显著来检验突变^[20]。在水文气象要素突变点的识别中,很难只依靠单一方法就可以对径流序列做出准确的突变检验。因此,在确定径流序列的突变点时,可以采用多种突变检验方法进行检验结果对比分析^[21]。

2.3.2 基于 Budyko 假设的水量平衡法 封闭流域的水文气候特征遵循水量平衡原理,其多年水量平

衡方程的表达式为:

$$E = P - Q \quad (1)$$

式中: E 为年蒸发量, mm; P 为年降水量, mm; Q 为年径流量, mm。

此外,实际蒸发量可以用干燥指数 ϕ 、潜在蒸发量 E_0 的函数表示为:

$$\frac{E}{P} = f\left(\frac{E_0}{P}\right) = f(\phi) \quad (2)$$

Budyko 假设给出了一条经验关系曲线描述流域多年平均降水量、潜在蒸发量和实际蒸发量之间的定量关系^[22-23]。常见的 Budyko 假设表达式如下:

$$\begin{aligned} \frac{E}{P} &= f\left(\frac{E_0}{P}\right) \\ &= \left\{ \frac{E_0}{P} \tanh\left(\frac{P}{E_0}\right) [1 - \exp(-\frac{E_0}{P})] \right\}^{0.5} \end{aligned} \quad (3)$$

即 $f(\phi) = [\phi \tanh(1/\phi)(1 - e^{-\phi})]^{0.5}$, 对该式进行求导可得:

$$\begin{aligned} f'(\phi) &= 0.5(\phi \tanh(1/\phi) \cdot (1 - e^{-\phi}))^{-0.5} \cdot \\ &(\tanh(1/\phi) \cdot (1 - e^{-\phi}) + \phi(1 - (\tanh^2(1/\phi)) \cdot \\ &(-1/\phi^2) \cdot (1 - e^{-\phi}) + \tanh(1/\phi)(e^{-\phi})) \end{aligned} \quad (4)$$

此外,其他常见的 Budyko 假设还包括 Scheriber、Turc-Pike^[24]、Zhang^[25]、Fu 等公式。基于周小珍等^[26]的结果,确定 Zhang 公式中的参数 $\omega = 1.17$ 。基于曹文旭等^[27]的结果,确定 Fu 公式中的参数 $\alpha = 2.54$ 。其他 Budyko 假设的公式中 $f(\phi)$ 和 $f'(\phi)$ 的表达式如表 1 所示。

表 1 Budyko 假设的水量平衡法表达式

公式名称	$f(\phi)$	$f'(\phi)$
Scheriber	$1 - e^{-\phi}$	$e^{-\phi}$
Turc-Pike	$(1 + \phi^{-2})^{-0.5}$	$1/[\phi^3(1 + (1/\phi)^2)^{1.5}]$
Hang	$(1 + \omega\phi)/(1 + \omega\phi + 1/\phi)$	$(\omega + 2\omega/\phi - 1 + 1/\phi^2)/(1 + \omega\phi + 1/\phi)^2$
Fu	$1 + \phi - (1 + \phi^\alpha)^{1/\alpha}$	$1 - (1 + \phi^\alpha)^{1/(\alpha-1)} \phi^{\alpha-1}$

气候变化对径流量的影响因素主要是降水量和潜在蒸发量,由降水量和潜在蒸发量引起的径流量变化量、人类活动引起的径流量变化量可通过下式表示:

$$\begin{cases} \Delta Q_C = \Delta Q_P + \Delta Q_{E_0} = \frac{\partial Q}{\partial P} \Delta P + \frac{\partial Q}{\partial E_0} \Delta E_0 \\ = \varepsilon_P \frac{Q}{P} \Delta P + \varepsilon_{E_0} \frac{Q}{E_0} \Delta E_0 \\ \Delta Q_H = \Delta Q - \Delta Q_C \end{cases} \quad (5)$$

其中, $\varepsilon_P = 1 + \frac{\phi f'(\phi)}{1 - f(\phi)}$, $\varepsilon_P + \varepsilon_{E_0} = 1$ 。

式中: ΔQ 、 ΔP 、 ΔE_0 分别为径流量变化量、降水量变化量、潜在蒸发量变化量; ΔQ_C 、 ΔQ_H 、 ΔQ_P 、 ΔQ_{E_0} 分别为气候变化、人类活动、降水量、潜在蒸发量导致的径流量变化量; $\partial Q/\partial P$ 、 $\partial Q/\partial E_0$ 分别为径流对降水、对潜在蒸发量的敏感性系数; ε_P 、 ε_{E_0} 分别为径流对降水、对潜在蒸发量的弹性系数。

相应的气候变化、人类活动对径流量变化量的贡献率 η_C 、 η_H 可通过下式表示:

$$\eta_C = \Delta Q_C / \Delta Q \times 100\% \quad (6)$$

$$\eta_H = \Delta Q_H / \Delta Q \times 100\% \quad (7)$$

3 结果与分析

3.1 水文气象序列的趋势分析

采用线性趋势法、滑动平均法对1960-2017年白河流域年潜在蒸发量、年降水量和年径流量进行年际变化趋势分析,结果如图2所示。

由图2可知,白河流域年潜在蒸发量、年降水量呈上升趋势,对应的变化率分别为 $1.53/0.15 \text{ mm/a}$;年径流量呈下降趋势,其水量变化率为 $-0.09 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 、流量变化率为 $-0.30 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{a})$ 。年径流量在1974年达到最大值,为 $13.18 \times 10^8 \text{ m}^3$;在2002年达到最小值,为 $0.60 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。1960-1969年的10 a平均径流量为 $6.03 \times 10^8 \text{ m}^3$,2008-2017年的10 a平均径流量为 $2.20 \times 10^8 \text{ m}^3$,仅为1960-1969年多年均值的36.5%。本文提出的白河流域年径流量变化趋势,与钟永华等^[28]提出的水量变化率 $-0.10 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ (1960-2012年)、秦丽欢等^[29]提出的流量变化率 $-0.32 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{a})$ (1960-2014年)基本一致。

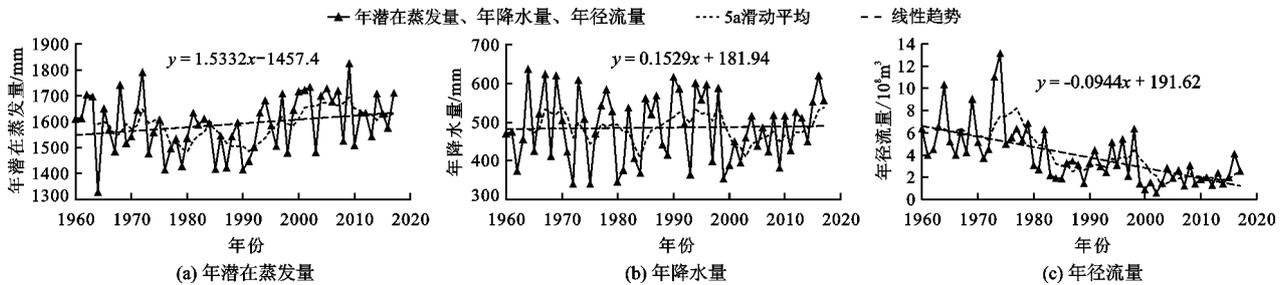


图2 1960-2017年白河流域水文气象序列变化趋势

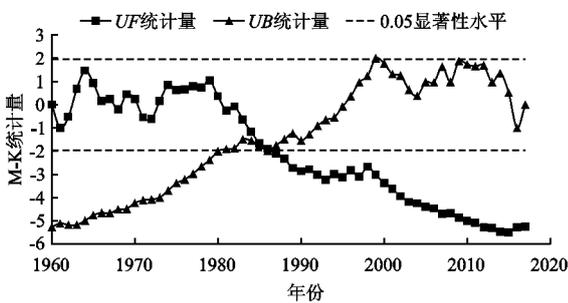


图3 1960-2017年白河流域年径流量Mann-Kendall检验

由图4可知,年径流量离差平方和的最小值出现在1979年,说明年径流量在1979年可能发生突变。根据上述分析结果,Mann-Kendall检验和有序聚类检验这两种方法判定的突变年份不一致。因此,最后采用滑动 t 检验分别计算Mann-Kendall检验、有序聚类检验判定的突变年份的统计量 t ,并根据 t 检验临界值表判断不同年份的显著性。本文选

3.2 年径流量的突变检验

首先,采用Mann-Kendall检验初步分析径流序列的突变点。在同一坐标系下点绘 UF 、 UB 两个统计量曲线以及上、下临界线。若 UF 和 UB 在上、下临界线范围内存在交点,那么交点所在的年份为突变年份。

本文选取显著性水平 $\alpha = 0.05$,对应的临界值 $U_{0.05} = \pm 1.96$,1960-2017年年径流量的Mann-Kendall检验曲线如图3所示。

由图3可知,年径流量 UF 和 UB 两条统计量曲线相交于1985、1986年,但是仅有1985年在置信区间内,说明年径流量在1985年可能发生突变。观察 UF 曲线可知,1986年以后 UF 系列值均超过了下临界值且 $UF < 0$,说明1986年以后年径流量开始显著下降。

其次,采用有序聚类检验分析径流序列的突变点,在该方法中,认为最小离差平方和所在的年份即为突变年份。1960-2017年年径流量的有序聚类检验曲线如图4所示。

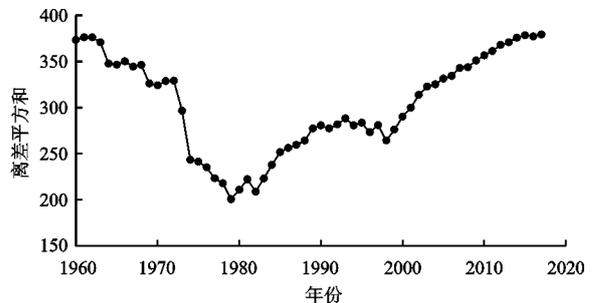


图4 1960-2017年白河流域年径流量有序聚类检验

取显著性水平 $\alpha = 0.01$,对应的 $t_{0.01} = \pm 3.355$,不同突变年份的滑动 t 检验结果如表2所示。

由表2可知,Mann-Kendall检验判定的1985年没有通过统计量 t 的显著性检验,说明1985年不是径流序列的突变年份;有序聚类检验判定的1979年统计量 $t = 3.378 > t_{0.01}$,说明突变年份为1979年时显著性较好。因此,白河流域年径流量的突变

年份为1979年,这与庞树江等^[30]采用累积距平法确定的径流序列突变年份相一致。

3.3 径流量变化的归因分析

根据径流量突变点分析结果,将研究时段划分为基准期(1960-1979年)和变化期(1980-2017年)。考虑到变化期的时间尺度较长,为了突出评估不同时间段气候变化和人类活动对径流量变化的影响,选取2000年作为变化期的中间年份,分别对变化期1980-2000年、2001-2017年的径流变化做归因分析。白河流域水文气象序列突变前后的对比结果如表3所示。

由表3可知,与基准期相比,1980-2000年和2001-2017年的多年平均降水量 \bar{P} 、多年平均径流量 \bar{Q} 均有下降,多年平均干燥指数 ϕ 则有一定的上升。1980-2000年、2001-2017年的多年平均径流量的下降幅度分别约为基准期的49.8%、68.3%,干燥指数较基准期分别增加了0.07、0.23。与基准期相比,2001-2017年的多年平均潜在蒸发量增大了80.07 mm,约为1960-1979年多年平均潜在蒸发量的5.1%。综合来说,变化期流域的干旱程度在增加,2001-2017年流域的干旱更为明显。

采用基于Budyko假设的水量平衡法定量计算不同变化期气候变化和人类活动对径流变化的贡献率,计算结果如表4、5所示。

由表4可知,Budyko、Schreiber、Turc-Pike、Zhang和Fu公式计算得到1980-2000年气候变化对白河流域径流变化的影响较小,贡献率的变化范围为11.3%~18.4%,平均贡献率为14.4%。1980-2000年人类活动对径流变化的贡献率分别为84.0%、81.6%、87.2%、86.6%和88.7%,平均贡献率为85.6%,表明人类活动是1980-2000年径流量减少的主要原因。同理,根据表5可知,2001-2017年气候变化、人类活动对径流变化贡献率的变化幅度分别为18.1%~37.5%、62.5%~81.9%,其对应的平均贡献率分别为26.4%和73.6%。人类活动仍然是2001-2017年径流量变化的主要原因,不过与1980-2000年相比,2001-2017年气候变化对径流变化的贡献率有所上升,说明2000年以后气候变化对径流量减少的影响呈上升趋势。本文提出的人类活动对白河流域径流量变化的贡献率,与秦丽欢等^[29]根据累积径流曲线得到的贡献率变化范围为71.36%~91.39%的结论基本接近。

表2 不同突变年份的滑动 t 检验结果

水文站	突变点年份		统计量 t		突变点显著性	
	Mann-Kendall	有序聚类	Mann-Kendall	有序聚类	Mann-Kendall	有序聚类
张家坟	1985	1979	0.088	3.378	不显著	显著

表3 白河流域水文气象序列突变前后对比结果

划分标准	时间段(年份)	\bar{P}/mm	ET_0/mm	\bar{Q}/mm	ϕ
基准期	1960-1979	493.24	1570.96	74.65	3.18
	1980-2000	480.63	1562.75	37.50	3.25
变化期	变化量	-12.61	-8.21	-37.15	0.07
	2001-2017	483.98	1651.03	23.63	3.41
	变化量	-9.26	80.07	-51.02	0.23

表4 气候变化和人类活动对白河流域径流变化的影响(变化期1980-2000年)

公式名称	ϕ	ε_P	ε_{E_0}	$\Delta Q_C/\text{mm}$	$\Delta Q_H/\text{mm}$	$\eta_C/\%$	$\eta_H/\%$
Budyko	3.25	3.67	-2.67	-5.96	-31.19	16.0	84.0
Schreiber	3.25	4.25	-3.25	-6.84	-30.31	18.4	81.6
Turc-Pike	3.25	2.87	-1.87	-4.75	-32.40	12.8	87.2
Zhang	3.25	3.03	-2.03	-4.99	-32.16	13.4	86.6
Fu	3.25	2.50	-1.50	-4.19	-32.96	11.3	88.7

表5 气候变化和人类活动对白河流域径流变化的影响(变化期2001-2017年)

公式名称	ϕ	ε_P	ε_{E_0}	$\Delta Q_C/\text{mm}$	$\Delta Q_H/\text{mm}$	$\eta_C/\%$	$\eta_H/\%$
Budyko	3.41	3.74	-2.74	-15.67	-35.35	30.7	69.3
Scheriber	3.41	4.41	-3.41	-19.15	-31.87	37.5	62.5
Turc-Pike	3.41	2.88	-1.88	-11.19	-39.83	21.9	78.1
Zhang	3.41	3.07	-2.07	-12.18	-38.84	23.9	76.1
Fu	3.41	2.51	-1.51	-9.26	-41.76	18.1	81.9

但是,受流域内气象站数据较少、时间尺度不够长等因素的影响,本文采用的降水量、潜在蒸发量是由白河流域周边气象站数据根据反距离权重插值法计算得到的,较流域实际监测的降水量、潜在蒸发量有差别,导致在分析水文气象序列的年际变化趋势、评估气候变化和人类活动对径流变化的影响等部分存在一定的不确定性。因此,为了增加研究结果的科学性和准确性,在后续的研究中,当分析径流变化归因时,需综合考虑流域内及流域周边的所有气象站点。

4 结论

以密云水库上游的白河流域作为研究对象,基于1960-2017年张家坟站的径流数据,以及流域周边气象站的地面气候资料数据集,采用线性趋势法、滑动平均法分析蒸发、降水和径流的年际变化趋势,运用滑动 t 检验分别对Mann-Kendall检验、有序聚类检验判定的突变年份进行显著性检验,采用5种基于Budyko假设的水量平衡法评估气候变化和人类活动对径流变化的影响。主要结论如下:

(1)白河流域年潜在蒸发量、年降水量呈上升趋势;年径流量呈下降趋势,其变化率为 $-0.09 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$;2008-2017年的10 a平均径流量为 $2.20 \times 10^8 \text{ m}^3$,仅为1960-1969年10 a平均径流量的36.5%;白河流域年径流量在1979年发生突变,在1986年以后下降趋势显著。

(2)与基准期相比,变化期1980-2000年和2001-2017年的多年平均降水量、径流量均有减少;1980-2000年、2001-2017年的干燥指数较基准期分别增加了0.07、0.23,变化期1980-2017年流域的干旱程度在增加,其中2001-2017年流域的干旱更为明显。

(3)人类活动是白河流域径流量变化的主要原因;1980-2000年气候变化和人类活动对径流量变化的贡献率分别为14.4%、85.6%,2001-2017年气候变化和人类活动对径流变化的贡献率分别为

26.4%、73.6%;与1980-2000年相比,2001-2017年气候变化对径流量变化的贡献率有所增大,说明2000年以后气候变化对径流量变化的影响呈上升趋势。

参考文献:

- [1] 徐宗学,刘晓婉,刘浏. 气候变化影响下的流域水循环:回顾与展望[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2016,52(6):722-730.
- [2] 王浩,贾仰文. 变化中的流域“自然-社会”二元水循环理论与研究方法[J]. 水利学报, 2016,47(10):1219-1226.
- [3] 张强,刘剑宇. 变化环境下不同时空尺度径流演变及其归因研究[M]. 北京:科学出版社, 2019.
- [4] 张艳霞. 锡林河流域径流量对气候变化与人类活动双重作用的定量响应研究[D]. 呼和浩特:内蒙古大学, 2018.
- [5] WANG Xixi. Advances in separating effects of climate variability and human activity on stream discharge: An overview [J]. Advances in Water Resources, 2014,71:209-218.
- [6] 刘剑宇,张强,陈喜,等. 气候变化和人类活动对中国地表水文过程影响定量研究[J]. 地理学报, 2016,71(11):1875-1885.
- [7] 郭生练,郭家力,侯雨坤,等. 基于Budyko假设预测长江流域未来径流量变化[J]. 水科学进展, 2015,26(2):151-160.
- [8] 邓晓宇,张强,陈晓宏. 气候变化和人类活动综合影响下的抚河流域径流模拟研究[J]. 武汉大学学报(理学版), 2015,61(3):262-270.
- [9] 夏军,马协一,邹磊,等. 气候变化和人类活动对汉江上游径流变化影响的定量研究[J]. 南水北调与水利科技, 2017,15(1):1-6.
- [10] 夏伟,周维博,李文溢,等. 气候变化和人类活动对泮河流域径流量影响的定量评估[J]. 水资源与水工程学报, 2018,29(6):47-52.
- [11] 杨思雨,姜仁贵,解建仓,等. 渭河上游径流变化特征及归因研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019,30(2):37-42.
- [12] 周帅,王义民,郭爱军,等. 气候变化和人类活动对黄

- 河源区径流影响的评估[J]. 西安理工大学学报, 2018,34(2):205-210.
- [13] 司源, 尹冬勤, 侯胜林, 等. 气候变化及人类活动对黑河流域径流演变影响分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018,26(6):1177-1188.
- [14] 章燕喃. 密云水库流域近三十年径流变化及归因分析[D]. 北京: 清华大学, 2014.
- [15] 李艳, 刘海军, 罗雨. 北京地区潜在蒸散量计算方法的比较研究[J]. 灌溉排水学报, 2010,29(5):27-32.
- [16] 赵玲玲, 夏军, 王中根, 等. 北京潜在蒸散发量年内-年际的气候变化特征及成因辨识[J]. 自然资源学报, 2013, 28(11): 1911-1921.
- [17] 刘昌明, 张丹. 中国地表潜在蒸散发敏感性的时空变化特征分析[J]. 地理学报, 2011,66(5):579-588.
- [18] 付意成, 赵进勇, 朱国平, 等. 基于M-K检验的黄淮海湖面面积退化成因分析[J]. 中国农村水利水电, 2017(7):79-84.
- [19] 赵文荣, 张健, 杜鹏远. 黄河石嘴山水文站年径流量多时间尺度分析[J]. 人民黄河, 2018,40(11):30-33.
- [20] 郭彦, 侯素珍, 林秀芝. 近51年西柳沟流域水沙变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2014,28(10):176-183.
- [21] 吴晗, 董增川, 蒋飞卿, 等. 黄河源区气候变化特性分析[J]. 水资源与水工程学报, 2018,29(6):1-7.
- [22] 袁喆, 许继军, 王永强, 等. 基于水热平衡的抚河流域地表径流长期预估[J]. 工程科学与技术, 2019,51(1):60-67.
- [23] BUDYKO M, MILLER D. Climate and life[M]. Salt Lake City: Academic Press, 1974.
- [24] PIKE J G. The estimation of annual run-off from meteorological data in a tropical climate[J]. Journal of Hydrology, 1964, 2(2): 116-123.
- [25] ZHANG L, DAWES W R, WALKER G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale[J]. Water Resources Research, 2001, 37(3): 701-708.
- [26] 周小珍, 潘兴瑶, 朱永华, 等. 潮白河流域1980-2013年平均水平衡特征研究[J]. 自然资源学报, 2016,31(4):649-657.
- [27] 曹文旭, 张志强, 查同刚, 等. 基于Budyko假设的潮河流域气候和植被变化对实际蒸散发的影响研究[J]. 生态学报, 2018,38(16):5750-5758.
- [28] 钟永华, 鲁帆, 易忠, 等. 密云水库以上流域年径流变化趋势及周期分析[J]. 水文, 2013,33(6):81-84.
- [29] 秦丽欢, 周敬祥, 李叙勇, 等. 密云水库上游径流变化趋势及影响因素[J]. 生态学报, 2018,38(6):1941-1951.
- [30] 庞树江, 王晓燕. 密云水库流域入库径流量变化特征及归因研究[J]. 干旱区资源与环境, 2016,30(9):144-148.

(上接第49页)

- [32] 张启楠, 张凡凡, 李福夺, 等. 粮食虚拟水流动对水资源和区域经济的影响研究[J]. 中国农业资源与区划, 2018,39(7):21-28.
- [33] 吕添贵, 吴次芳, 游和远. 鄱阳湖生态经济区水土资源与经济发展耦合分析及优化路径[J]. 中国土地科学, 2013,27(9):3-10.
- [34] 戚瑞, 耿涌, 朱庆华. 基于水足迹理论的区域水资源利用评价[J]. 自然资源学报, 2011,26(3):486-495.
- [35] 文倩, 孟天醒, 范慧平, 等. 河南省水土资源与经济发展耦合效应及其时空分异[J]. 水土保持研究, 2017,24(3):234-240.
- [36] 王洁云, 许译文, 吴克宁, 等. 新疆水土资源综合承载力评价与水土耦合[J]. 太原理工大学学报, 2014, 45(4):500-505.
- [37] 张卡, 曲本亮, 盖美. 区域经济发展与水土资源的耦合协调研究——以辽宁省为例[J]. 资源开发与市场, 2015,31(3):316-320+374.
- [38] 刘新平, 孟梅. 土地持续利用与生态环境协调发展的耦合关系分析——以塔里木河流域为例[J]. 干旱区地理, 2011,34(1):173-178.
- [39] 熊建新, 陈端吕, 彭保发, 等. 洞庭湖区生态承载力系统耦合协调度时空分异[J]. 地理科学, 2014, 34(9): 1108-1116.
- [40] 王琦, 汤放华. 洞庭湖区生态-经济-社会系统耦合协调发展的时空分异[J]. 经济地理, 2015,35(12):161-167+202.
- [41] 柯文前, 陆玉麒. 基于县域的福建省经济空间格局演化[J]. 经济地理, 2011, 31(7):1081-1087.
- [42] 李少英, 吴志峰, 李碧莹, 等. 基于互联网房产数据的住宅容积率多尺度时空特征——以广州市为例[J]. 地理研究, 2016,35(4):770-780.
- [43] 邹君, 杨玉蓉, 毛德华. 虚拟水战略优势度及其评价[J]. 冰川冻土, 2009,31(3):565-570.