

【水文泥沙】

# 气候变化和人类活动对永定河流域径流的影响

张伟丽

(山西水利职业技术学院,山西 运城 044004)

**摘要:**利用线性回归法和 Mann-Kendall 趋势检验法对永定河 1957—2000 年的降水量、潜在蒸发能力和径流量进行了趋势分析,利用降雨—径流双累积曲线以及 Pettitt 变点检验找出了径流突变年份。在此基础上,运用水文敏感性分析方法计算了人类活动和气候变化对永定河径流变化的贡献程度。结果表明:1957 年以来,永定河流域径流深呈显著下降趋势,其变化倾向率为  $-0.8 \text{ mm/a}$ ,径流突变点发生在 1982 年;与基准期相比,1982 年之后的年平均径流深减少了 20.0 mm,其中人类活动使径流深减少了 14.0 mm,占总减少量的 70.0%。

**关键词:**气候变化;人类活动;径流;永定河流域

中图分类号:P333

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1000-1379.2015.05.007

在全球变暖的大背景下,近年来我国气温呈显著上升趋势,导致区域水文循环发生了变化<sup>[1]</sup>。与此同时,人类活动对径流的干预强度越来越大<sup>[2]</sup>。关于人类活动和气候变化对径流的影响,国内外学者进行了大量研究<sup>[3-5]</sup>,如 Yang Yonghui 等<sup>[3]</sup>分析了海河流域径流变化及其影响因素,发现径流突变时间为 1978—1985 年,之后径流量呈显著下降趋势,其中人类活动的影响较大;Ma Zhenmei 等<sup>[4]</sup>分析了过去 50 a 石羊河流域径流变化及其影响因素,结果表明径流量呈显著下降趋势,突变时间点在 1961 年左右,气候变化尤其是降水量减少是径流减少的主要因素,气候因素导致的径流减少量占总减少量的 64%。传统的研究主要集中在应用线性回归方法来研究径流变化及其影响因素,而利用水文敏感性分析法定量划分气候变化和人类活动对径流影响的研究较少,对于永定河流域的类似研究则更为少见。

永定河承担着北京市主要的水源供给和防洪任务,流域人文资源丰富,但近年来流域年平均径流量呈显著下降趋势<sup>[6]</sup>。径流量的下降直接影响到人类引水、牲畜用水和灌溉用水,从而使水资源紧缺问题变得日益突出。因此,笔者在总结前人成果的基础上,运用水文敏感性分析法定量划分了气候变化和人类活动对该流域径流变化的贡献度。

## 1 数据和方法

### 1.1 研究区概况及数据来源

永定河是海河流域七大水系之一,全长 747 km,流域面积为 4.7 万 km<sup>2</sup>。流域西北部多为山区,海拔较高,自西北向东南海拔递减。流域地处干旱和湿润

气候的过渡带,属半干旱大陆性季风气候区,四季分明,夏季多暴雨、洪水,冬季寒冷干燥。流域多年平均降水量为 450 mm,大部分降水集中在 7—9 月,多年平均蒸发量为 1 009 mm,年平均气温为 6 ℃,年日照时数为 2 689 h,年平均风速为 2.85 m/s。

选择永定河流域右玉、大同、蔚县、霸州、保定、黄骅 6 个气象站 1957—2000 年日最低和最高气温、日平均气温、日照时数、风速、相对湿度和降水量等实测数据(数据来源于中国气象信息中心气象资料室),流域潜在蒸发能力用 Penman 方法计算;1957—2000 年径流数据来源于河北省张家口市下花园区响水铺村的响水堡水文站。

### 1.2 Mann-Kendall 趋势检验和 Pettitt 变点检验

Mann-Kendall 趋势检验法(简称 M-K 法)是由 Mann 和 Kendall 提出并改进的统计方法。在应用该方法时,被检验的数据样本不需要服从某种特定分布,受数据异常值的干扰较小,计算也较为方便,是现阶段水文气象领域应用较多的一种趋势检验方法。M-K 法得到的统计量若为正值,则表明被检验数据样本总体呈增加趋势,反之则表明呈下降趋势。以  $\pm 1.96$  作为 95% 置信水平值,若统计量 Z 值的绝对值超过了 1.96,则说明序列变化趋势显著<sup>[7]</sup>。

Pettie 变点检验方法也是一种非参数检验方法,主要通过检验时间序列要素均值变化的时间来确定序

收稿日期:2015-01-15

作者简介:张伟丽(1974—),女,山西运城人,讲师,主要从事水利水电工程方面的教研工作。

E-mail: sxsyzwl@126.com

列突变时间。该检验使用 M-K 统计量  $U_{t,N}$ , 计算公式为

$$U_{t,N} = U_{t-1,N} + \sum_{i=1}^N \operatorname{sgn}(x_t - x_i) \quad (t = 2, 3, \dots, N) \quad (1)$$

式中:  $x_t, x_i$  为系列样本数值;  $N$  为系列样本数。

### 1.3 双累积曲线

双累积曲线主要用来分析不同变量之间的一致性及其变化, 被广泛用于检验水文气象要素的趋势性变化及其强度。本文绘制的降水—径流双累积曲线, 若为一条直线, 则认为无人类活动影响; 若直线斜率发生突变, 则意味着存在人类活动的影响, 且斜率突变点即为区分径流有无人类活动影响的时间。

### 1.4 水文敏感性分析

流域径流的变化可用式(2)和式(3)表示:

$$\Delta Q = Q_h - Q_b \quad (2)$$

$$\Delta Q = \Delta Q_c + \Delta Q_h \quad (3)$$

式中:  $\Delta Q$  为径流总变化量;  $Q_h$  为突变年份之后年平均径流量;  $Q_b$  为基准期年平均径流量;  $\Delta Q_c$  和  $\Delta Q_h$  分别为气候因素和人类活动因素导致的径流变化量。

降水量与潜在蒸发量的变化会直接导致径流发生变化, 式(4)给出了常用的水量平衡方程:

$$P - Q - E = \Delta S \quad (4)$$

式中:  $P$  为降水量;  $Q$  为径流深;  $E$  为流域实际蒸发量;  $\Delta S$  为流域蓄水变化量, 在长时间系列尺度上,  $\Delta S$  可以忽略不计。

流域实际蒸发量可通过干旱指数计算求得, Zhang Lu 等<sup>[8]</sup>给出了求实际蒸发量的公式:

$$\frac{E}{P} = \frac{1 + w(PET/P)}{1 + w(PET/P) + (PET/P)^{-1}} \quad (5)$$

式中:  $PET$  为流域潜在蒸发能力;  $w$  为待定参数, 与植被类型有关。

根据敏感性分析, 气候变化对径流的影响量可通过式(6)计算:

$$\Delta Q_c = \alpha \Delta P + \beta \Delta PET \quad (6)$$

式中:  $\Delta P$  为降水量变化量;  $\Delta PET$  为潜在蒸发能力变化量;  $\alpha$  和  $\beta$  为敏感性系数, 可由式(7)、式(8)计算。

$$\alpha = \frac{1 + 2x + 3wx}{(1 + x + wx^2)^2} \quad (7)$$

$$\beta = -\frac{1 + 2wx}{(1 + x + wx^2)^2} \quad (8)$$

式中  $x$  为干旱指数 ( $x = PET/P$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 径流和降水的趋势分析及突变检验

用简单的线性回归法分析了永定河流域 1957—2000 年径流深、降水量与潜在蒸发能力的年均值变化情况, 并用 M-K 法检验了变化趋势的显著性。从图 1 和表 1 可知, 年径流深呈显著下降趋势, M-K 检验  $Z$  值为  $-5.45$ , 下降坡度为  $0.8 \text{ mm/a}$ 。从图 2 可知, 平均月径流深均呈显著下降趋势 (M-K 检验  $Z$  值为  $-2.08 \sim -6.65$ )。同年平均径流深的显著下降趋势相比, 年平均降水量和潜在蒸发能力的变化相对比较平缓。从图 1 和表 1 可知, 1957—2000 年潜在蒸发量呈下降趋势, M-K 检验  $Z$  值为  $-1.45$ , 下降坡度为  $0.6 \text{ mm/a}$ ; 年平均降水量也呈下降趋势, M-K 检验  $Z$  值为  $-0.94$ , 下降坡度为  $1.4 \text{ mm/a}$ 。可以看出, 虽然年平均降水量和潜在蒸发量均呈下降趋势, 但都没有达到显著下降程度。

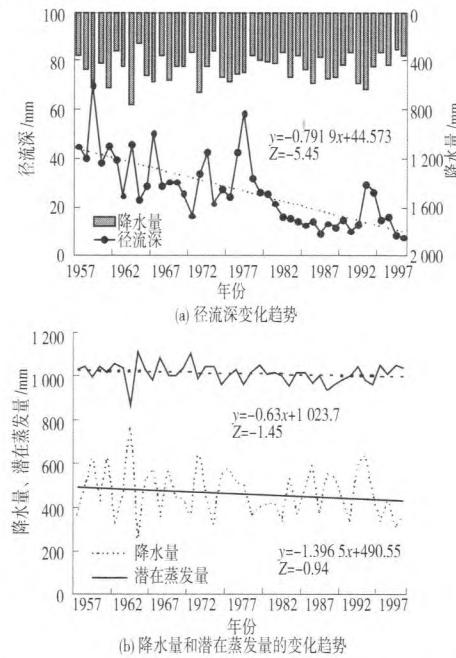


图 1 1957—2000 年径流深、降水量和潜在蒸发能力的变化趋势

表 1 水文要素变化情况

要素	多年平均值/mm	基准期/mm	人类活动影响期/mm	变化幅度/%	变化率/(mm·a <sup>-1</sup> )	M-K 趋势检验 Z 值
径流深	26.8	35.4	15.4	56.5	-0.8	-5.45
降水量	459.7	472.4	443.1	6.2	-1.4	-0.94
潜在蒸发能力	1 009.5	1 018.7	997.5	2.1	-0.6	-1.45

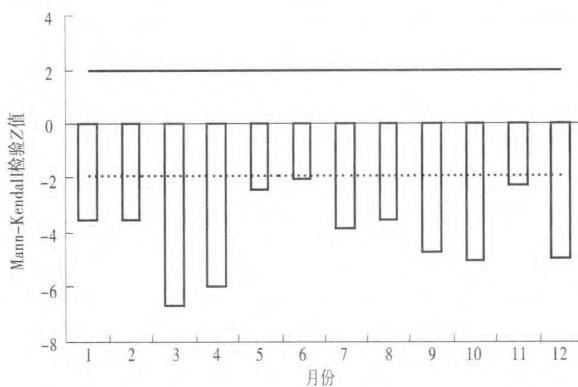


图2 月平均径流量的Mann-Kendall检验Z值

从图3可以看出,年降水量和年径流深双累积曲线(直线)斜率在1982年发生了突变。从图4可以看出,研究区径流量的突变点依然发生在1982年。因此,将1982年视为永定河流域径流变化的突变点,1982年之前作为不受人类活动影响的基准期,1982年之后作为受人类活动影响的时期。从表1可以看出,基准期年平均径流深为35.4 mm,人类活动影响期的年平均径流深为15.4 mm,突变点后比之前径流深减少了20.0 mm,减少了56.5%。降水量的减少引起径流量的减少,而潜在蒸发量减小导致径流量增加,从图1可以看出,降水量下降坡度在过去44 a中较潜在蒸发量下降坡度略大,因此导致径流量呈下降趋势,但由于降水量减少并不显著,因此影响径流量减少的主要因素是人类活动。有关研究也表明<sup>[6]</sup>,20世纪80年代以后,受国家政策的影响,永定河流域耕地面积减小,林地面积增加,使得产流量减少。另外,随着人口的不断增加,农业、工业和畜牧业用水量也随之增加。除此之外,水利工程的不断建设以及地下水利用量的增加也会导致径流量减少。综上所述,20世纪80年代以后,人类活动直接或间接使径流量呈显著下降趋势。

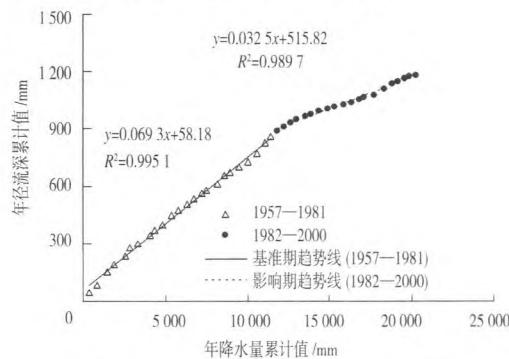


图3 降水量和径流量的双累积曲线

## 2.2 径流变化的影响因素

图5为用水量平衡方程计算的蒸发量和式(5)计算出的蒸发量的相关关系,可以看出二者计算的实际蒸发量相关系数为0.98,表明两种方法得到的蒸发量

差距不大,式(5)的计算结果可信。计算可得径流量对降水量和蒸发量的敏感性系数 $\alpha$ 和 $\beta$ 分别为0.28和-0.11,待定参数 $w$ 为1.13,这同Wang Weiguang等<sup>[9]</sup>对海河流域的研究取值基本相符,且径流对降水的敏感性系数比对蒸发的大,这意味着研究区径流对降水更加敏感。通过敏感性系数 $\alpha$ 和 $\beta$ ,利用式(7)和式(8)定量计算了气候变化和人类活动对径流的影响,由计算结果可以看出,人类活动影响期的年平均径流深为15.4 mm,较基准期减少了20.0 mm,其中人类活动的影响使径流量减少了14.0 mm,占总减少量的70.0%;气候因素的影响使径流深减少了6.0 mm,占总减少能力的30.0%。经上述分析可以看出,20世纪80年代以后人口增加和人类活动的加剧使得径流量显著减少,进入21世纪以后人类活动的影响将更加剧烈,水资源缺乏的问题将更为突出。

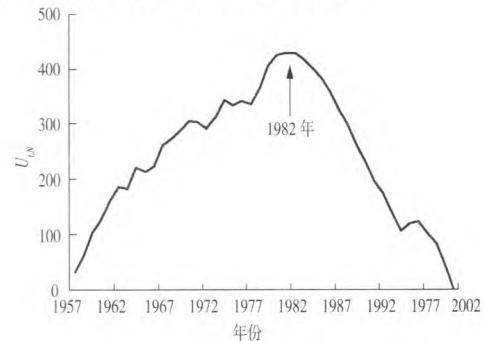


图4 Pettitt径流突变点检验

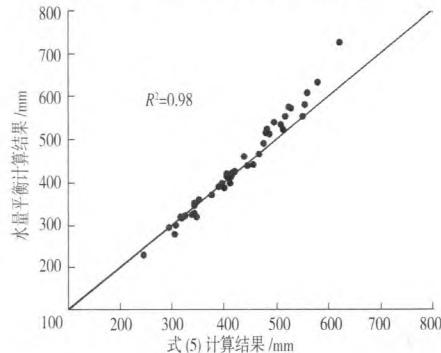


图5 两种方法计算的蒸发量相关性分析

## 3 结论

基于研究区6个气象站的降水数据和响水堡水文站的径流数据,运用Mann-Kendall趋势检验和线性回归法对永定河流域过去44 a的年平均径流量进行了趋势分析,并结合双累积曲线和Pettitt检验找出了径流突变点,利用水文敏感性分析法定量分析了气候因素和人类活动因素对永定河径流的影响。结果表明:①年降水量和潜在蒸发能力在1957—2000年均呈略微下降趋势,但趋势不显著,年平均径流量则呈显著下降趋势,径

流突变点为1982年,可将1982—2000年视为受人类活动影响的时期;②径流深在人类活动影响时期减少了20.0 mm,其中气候因素导致的径流深减少量为6.0 mm,占总减少量的30.0%,人类活动影响导致的径流深减少量为14.0 mm,占总减少量的70.0%。

#### 参考文献:

- [1] HUNTINGTON T G. Evidence for Intensification of the Global Water Cycle: Review and Synthesis [J]. Journal of Hydrology, 2006(319): 83–95.
- [2] 许炯心. 人类活动对黄河河川径流的影响[J]. 水科学进展, 2007, 18(5): 648–655.
- [3] YANG Yonghui, TIAN Fei. Abrupt Change of Runoff and Its Major Driving Factors in Haihe River Catchment, China [J]. Journal of Hydrology, 2009(374): 373–383.
- [4] MA Zhenmei, KANG Shaozhong, ZHANG Lu, et al. Analysis of Impacts of Climate Variability and Human Activity on Streamflow for a River Basin in Arid Region of Northwest China [J]. Journal of Hydrology, 2008(352): 239–249.
- [5] 许炯心, 孙季. 近50年来降水变化和人类活动对黄河入海径流通量的影响[J]. 水科学进展, 2003, 14(6): 690–695.
- [6] 丁爱中, 赵银军, 郝弟, 等. 永定河流域径流变化特征及影响因素分析[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(1): 17–22.
- [7] Mann H B. Nonparametric Tests Against Trend [J]. Econometrica, 1945(13): 245–259.
- [8] ZHANG Lu, DAWES W R, WALKER G R. Response of Mean Annual Evapotranspiration to Vegetation Changes at Catchment Scale [J]. Water Resources Research, 2001(37): 701–708.
- [9] WANG Weiguang, SHAO Quanxi, YANG Tao, et al. Quantitative Assessment of the Impact of Climate Variability and Human Activities on Runoff Changes: a Case Study in Four Catchments of the Haihe River basin, China [J]. Hydrological Processes, 2012, DOI: 10.1002/hyp.9299.

## Effects of Climate Change and Human Activities on Runoff in the Yongding River Basin

ZHANG Weili

(Shanxi Conservancy Technical College, Yuncheng 044004, China)

**Abstract:** Based on Yongding River basin as the research object, the temporal trends of annual precipitation, potential evapotranspiration and runoff were analyzed by using Mann – Kendall test and linear regression method during 1957—2000. Change point was detected by precipitation – runoff double cumulative curves method and Pettitt’s test. On this basis, quantitative analysis of the climate change and human activities on the influence of the Yongding River basin was analyzed by using the hydrological sensitivity analysis method. The results show that since 1957, the runoff of Yongding River presents a significant declining trend, the change tendency at a rate of 0.79 mm/a. Change point of runoff occurs in 1982, the average runoff decreases by 20.0 mm compared with the baseline period after 1982. The runoff decreases 14.0 mm which is affected by human activity, accounting for 70.0% of the total reduction.

**Key words:** climate change; human activities; runoff; Yongding River basin

【责任编辑 翟成亮】

(上接第26页)

## Application of Canal Embankment Combined Sedimentation Reduction Technology on Kizil Reservoir

HU Hao<sup>1</sup>, SHI Kebin<sup>1</sup>, XIA Xinli<sup>2</sup>

(1. College of Civil and Hydraulic Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;

2. Administrative Bureau of Xinjiang Kezil Reservoir, Akesu 842313, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that block sand bottom formed around has achieved V – shape area of the Heizihe branch blocked the Muzat branch, the paper put forward that dam canal joint desilting experimental method and made sure the design of the reservoir area. The sedimentation data before and after flood season proves that the design has achieved the aim of the separation of water sand running path of branches. If the water level in the flood season keeps below 1 135 meter and water flow is less than 750 m<sup>3</sup>/s can expel 85 percent of the sand in the Heizihe branch, resolves the problem of block Heizihe branch blocks the Muzat branch effectively and almost keeps the balance of silting of Heizihe branch, slow down the sediment deposition rate of the reservoir and expand the life span of the reservoir.

**Key words:** dam canal joint; sedimentation reduction; sediment; Kizil Reservoir

【责任编辑 翟成亮】