



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.06.007

颜时延, 平建华, 吴泽宁, 等. 汾河水库控制流域径流突变及其驱动因素[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(6): 45-50. YAN S Y, PING J H, WU Z N, et al. Analysis on abrupt change of runoff in the watershed controlled by Fenhe Reservoir and its driving forces[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(6): 45-50. (in Chinese)

# 汾河水库控制流域径流突变及其驱动因素

颜时延, 平建华, 吴泽宁, 胡彩虹

(郑州大学 水利与环境学院, 郑州 450001)

**摘要:** 针对目前汾河入黄径流锐减的问题, 基于汾河水库控制流域 1960-2013 年 54 年的径流资料, 采用 Mann-Kendall 法和滑动 T 法相结合对径流时间序列进行突变检验, 探究了流域径流阶段性变化规律, 并建立双累积曲线模型定量计算了驱动因素降水和人类活动对径流减少的影响量。结果表明: (1) 汾河水库控制流域内静乐站和上静游站径流均呈现减少趋势; (2) 流域内静乐站径流序列突变年份为 1979 年, 上静游站为 1982 年; (3) 人类活动是该流域径流减少的主要因素, 占径流减少总影响量的 84.48%, 静乐站和上静游站的降水对径流影响率分别为 15.62% 和 14.95%, 人类活动的影响率分别为 84.38% 和 85.05%。

**关键词:** 汾河; 径流; 趋势分析; 突变检验; 双累积曲线

**中图分类号:** P333 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)06-0045-06

## Analysis on abrupt change of runoff in the watershed controlled by Fenhe Reservoir and its driving forces

YAN Shiyan, PING Jianhua, WU Zening, HU Caihong

(School of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Focusing on the sharp decline of the runoff of Fenhe River into the Yellow River, based on the runoff data from 1960 to 2013 of the watershed controlled by the Fenhe reservoir, we analyzed the variation trend of the runoff by using the Mann-Kendall method and sliding T-test to look for the abrupt change points. We also used the double mass curve to calculate the influence of rainfall and human activities on the runoff decline. The results showed that the annual runoffs at Jingle station and Shangjingyou station both showed a trend of decline. The runoff series at Jingle station altered abruptly in 1979, and at Shangjingyou station, it altered abruptly in 1982. The runoff decline in the watershed controlled by Fenhe reservoir was mainly affected by human activities, whose contribution rate was 84.48%. The contribution rates of rainfall and human activities to the runoff at Jingle station were 15.62% and 84.38%, respectively, and those at Shangjingyou station were 14.95% and 85.05%, respectively.

**Key words:** Fenhe River; runoff; trend analysis; abrupt change test; double mass curve

气候变化和人类活动的双重作用使径流规律发生变化<sup>[1]</sup>。一方面通过改变下垫面条件, 使产汇流过程发生变化, 另一方面气候因素尤其是降水因素的作用, 导致径流在时间和数量上发生变异<sup>[2]</sup>, 破坏

径流序列的一致性。近年来, 作为黄河第二大支流的汾河, 入黄径流量减少趋势明显<sup>[3]</sup>, 摸清汾河流域径流变化及其成因规律对于山西经济发展十分必要。国内学者对此已开展了大量的研究工作, 如高

收稿日期: 2016-10-18 修回日期: 2016-12-31 网络出版时间: 2017-11-21  
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20171121.1333.005.html>  
基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAB02B04-07)

**Fund:** National Science & Technology key program during the 12th Five-year Plan Period(2012BAB02B04-07)

**作者简介:** 颜时延(1992), 女, 河南汝州人, 主要从事水资源优化配置与规划管理方面研究。E-mail: shiyan9203@163.com

**通讯作者:** 平建华(1976), 男, 河南新郑人, 副教授, 博士, 主要从事水文学水资源教学与研究。E-mail: pingjianhua@zzu.edu.cn

建峰等<sup>[4]</sup>基于汾河水库流域多年实测水文资料,采用统计学方法对流域径流的年际变化特征进行分析,结果表明流域在 20 世纪 70 和 80 年代发生丰水和平水年份比较多,在 20 世纪 90 年代后枯水年份比较多。胡彩虹等<sup>[5]</sup>基于多年实测旬及月径流资料对汾河水库上游径流年内分配不均匀性进行探究,表明流域径流年内变化幅度大,洪水主要集中在 7 月、8 月份。任世芳等<sup>[6]</sup>利用数理检验方法探究汾河上游年径流序列变化特征及趋势。赵云等<sup>[3]</sup>基于多种相关秩次检验对汾河入黄径流锐减特征进行分析。兰跃东等<sup>[7]</sup>通过建立径流量计算公式,分析了气温和降水等气候因素对汾河径流量的影响。李勇<sup>[8]</sup>、顾盼<sup>[9]</sup>等分别利用 SWAT、MIKE SHE 模型数值模拟方法探究了汾河流域土地利用和采煤等人类活动对河川径流的影响。已有的研究多采用统计方法分析汾河径流的水文特性,或对径流减少的单一影响因素进行分析,其成果在汾河径流变化特征与驱动因素分析方面不够系统和全面。因此,本文以汾河水库控制流域近 50 年来水文资料为基础,研究流域径流时间序列阶段性变化规律,采用 Mann-Kendall 法与滑动 T 法相结合确定流域产汇流机制出现显著变化的时间点,并基于突变检验结果建立径流减少成因分析的双累积曲线模型,定量分析各驱动因素对径流减少的影响量,以期对今后掌握汾河水库控制流域径流演变规律、合理开发利用水资源提供指导。

## 1 数据来源

### 1.1 研究区概况

汾河水库位于汾河流域上游,其主要控制范围为汾河水库坝址以上流域,流域面积约 5 268 km<sup>2</sup>,流域分属宁武县、静乐县、岚县及娄烦县 4 县,水库控制流域面积占 4 县总面积的 78.6%。气候类型属亚热带大陆性季风气候,流域四季分明,春季多风、干燥,夏季短而炎热,秋季少晴、早凉,冬季长而寒冷。据汾河水库流域内岚县及静乐等气象站 1961—2010 年的逐日气象资料显示,汾河水库流域多年平均气温、风速、相对湿度、降水量分别为 7.19℃、1.85 m/s、60.13% 和 465 mm,降水年际变化较大,无霜期达 130 d。

作为汾河流域境内最大的水库,汾河水库于 1961 年 6 月正式投产使用,担负太原和晋中地区的防洪、发电、供水、灌溉等任务,随着引黄入晋工程的实施和运行,汾河水库还兼负起引黄供水调蓄的任务,对山西省国民经济发展起着举足轻重的作用<sup>[10]</sup>。

### 1.2 数据来源

汾河水库入库水文站分别为汾河干流的静乐及典型支流岚河的上静游水文站,出库水文站为流域出口的汾河水库站。本次研究采用汾河水库控制流域内 3 个主要水文站的 1960—2013 年共 54 年的实测年水文数据。其中静乐站和上静游站,建站时间早,资料充足,作为本次分析的主要依据,具体流域位置及水文站点分布见图 1。



图 1 汾河水库控制流域位置及水文站点分布

Fig. 1 The location of the watershed controlled by Fenhe reservoir and distribution of hydrological stations

## 2 研究方法

### 2.1 趋势分析

线性回归法通过建立径流序列  $x_i$  与对应的时间序列  $i$  之间的线性回归方程  $x_i = a \cdot i + b$  来检验径流时间序列的趋势性。该方程斜率的正负可表征径流时间序列是否具有递增或递减的趋势,并且线性方程的斜率  $a$  在一定程度上表征了径流时间序列平均趋势的变化速率<sup>[11-12]</sup>。

### 2.2 突变点检验方法

国内目前径流时间序列突变点检验常采用的方法有 Mann-Kendall 法、小波理论分析法、R/S 法、滑动 T 法等,其中小波分析的结果易受小波函数的影响<sup>[13]</sup>,R/S 方法误差较大,易影响变异点识别精度<sup>[14]</sup>。本文拟采用 Mann-Kendall 法结合滑动 T 法对汾河水库控制流域径流时间序列进行检验,以准确把握径流突变点,增强突变结果分析的可信度。Mann-Kendall 法可得出趋势方程,揭示序列的趋势特征,并找出径流序列突变点的位置<sup>[15-16]</sup>。通过径流序列计算得到的一条曲线  $UF$ ,将序列反转后计算得到另一条曲线  $UB$ ,如果两条曲线的交点在临界线内,则认为该点即是突变点。滑动 T 检验是考察两组样本平均值的差异是否显著来检验突变,其基本思想是对于统计量  $T$ ,在信度水平  $\alpha$  的情况下,对于满足的所有可能的点  $\tau$ ,选择使  $T$  统计量达到

最大值的点,作为所求的最可能变异点  $\tau_0$  [17-18]。两种方法具体计算步骤可参考文献[15-18]。

### 2.3 径流变化驱动力分析模型

径流变化是气候和人类活动双重驱动的结果,本文将降水作为气候变化的主导因素。天然状态下,人类活动不明显,在计算区内累积降水和累积径流的双累积曲线无明显拐点<sup>[19]</sup>。如果双累积曲线出现拐点并发生偏移,说明累积降水和累积径流的关系不再呈现单一关系,表明径流变化除了受降水因素影响以外,还受到人类活动等其他因素的影响。基于上述分析,参考文献[20-21],总结径流突变驱动因素分析的双累积曲线模型建模步骤如下。

(1)以突变年份为界,将突变年份前阶段作为基准期,突变年份后作为变化期。

(2)建立基准期累积降水与累积径流的拟合方程  $\Sigma R = k\Sigma P + b$ ,即为天然条件下的降水与径流相关关系。

(3)将变化期的降水过程进行还原,带入上述拟合方程,得到天然径流过程  $R_0$ 。

(4)将变化期的实测降水过程带入拟合方程,得到径流过程  $R_1$ 。

(5)  $R_0 - R_1 = \Delta R_p$ ,  $\Delta R_p$  即为由于降水因素变

化引起的径流减少量。

(6)  $\Delta R_{实} - \Delta R_p = \Delta R_{人}$ ,  $\Delta R_{人}$  即为由于人类活动影响引起的径流减少量。

## 3 结果分析

### 3.1 径流序列时序特性分析

从图2静乐站、上静游站近50年来径流变化趋势图可以看出,两站的年径流时间序列年际变化振荡起伏明显,但曲线变化具有一定的一致性,径流变化趋势线倾向值都为负值,表明各站点径流序列呈现减小趋势。其中,静乐站年径流量递减速率为  $0.019 \text{ m}^3/\text{s}$ ;上静游站递减趋势明显,年径流量平均递减速率为  $0.035 \text{ m}^3/\text{s}$ 。静乐站和上静游水文站年均径流减少量分别为  $0.0272 \text{ 亿 m}^3/\text{a}$  和  $0.014 \text{ 亿 m}^3/\text{a}$ 。1960-2013年静乐站、上静游站年径流均值分别为  $7.2 \text{ m}^3/\text{s}$  和  $1.78 \text{ m}^3/\text{s}$ ,静乐站年径流均值约是上静游站的4倍。其中,静乐站和上静游站径流趋势线在1966年呈现不规则性偶然增大的现象,经查证是由于“66·8平定深泉特大暴雨”引起。从图中也可以看出,两个水文站的径流序列均值线在20世纪80年代前后呈现出差异性,20世纪80年代后平均径流量明显小于80年代前径流量。

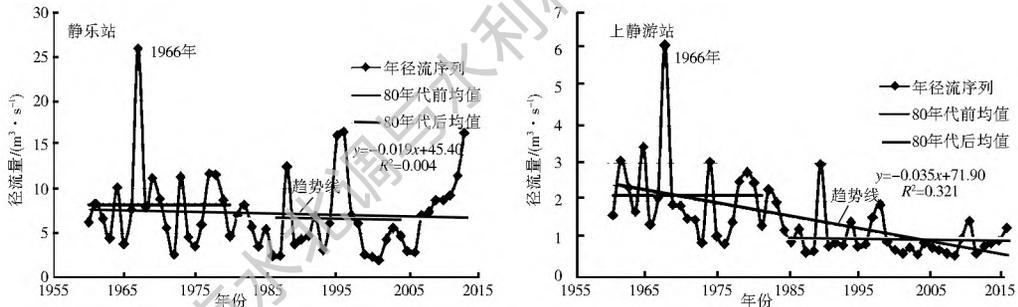


图2 汾河水库控制流域水文站径流变化趋势

Fig. 2 The variation trend of annual runoff in the watershed controlled by Fenhe reservoir

### 3.2 汾河水库控制流域年径流突变分析

本文通过采用 Mann-Kendall 检验法、滑动 T 检验法检验汾河水库控制流域静乐、上静游水文站 1960-2013 年径流时间序列演变过程中的阶段性变化特征,确定出现显著变化的时间点。

(1) Mann-Kendall 检验结果。

图3为静乐、上静游水文站 1960-2013 年实测径流序列 Mann-Kendall 检验结果,可以看出,汾河水库控制流域静乐站径流突变点较多,在显著水平 0.05 情况下,静乐水文站 UF、UB 相交的年份点,即可能发生突变的年份分别为 1972、1975 和 1979 年。上静游站径流突变年份只有一个,为 1982 年。

(2) 滑动 T 检验结果。

由图3结果可以看出,径流的 Mann-Kendall 突变检验结果并不唯一,存在多个突变点现象,因此本文结合滑动 T 法,剔除多余突变点,确定研究区的突变年份。图4为静乐、上静游水文站 1960-2013 年径流序列的滑动 T 检验结果。从图中可以看出,静乐站实测径流序列滑动 T 检验的最大 T 值对应年份为 1970 年和 1979 年,而且大于显著水平  $\alpha = 0.01$  时的 T 检验值,由此可知,静乐站 1960-2013 年实测径流序列滑动 T 检验的突变年份发生在 1970 年和 1979 年,该结果与 Mann-Kendall 突变检验的结果有所差别,但相差甚微。上静游站实测径流序列滑动 T 检验的突变年份为 1982 年,该结果与 Mann-Kendall 突变检验的结果相一致,表明上静游站径流变化比较规律。

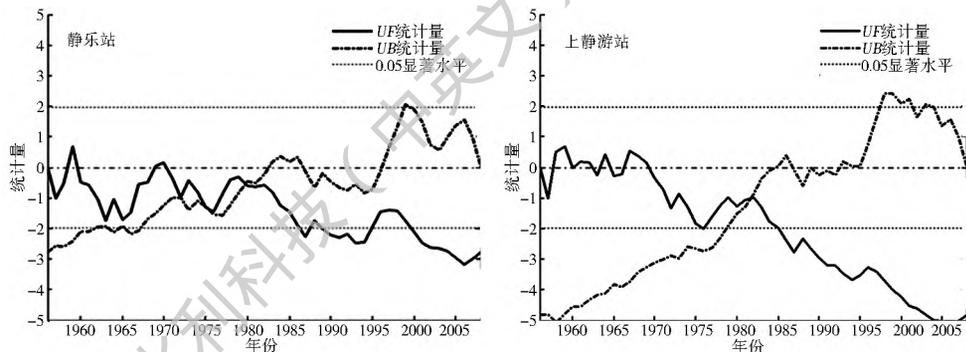


图 3 年径流突变点 Manr Kendall 检验结果

Fig. 3 Manr Kendall test results of abrupt change points of annual runoff

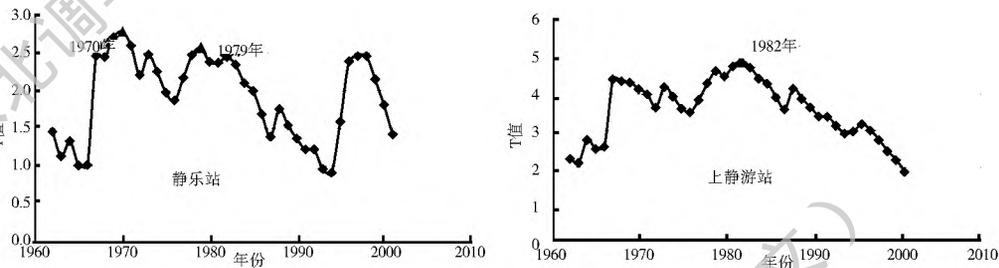


图 4 年径流突变点滑动 T 检验结果

Fig. 4 Sliding T-test results of abrupt change points of annual runoff

表 1 总结了两种方法的突变检验结果, 静乐站突变年份为 1979 年, 上静游站突变年份为 1982 年。

曲线模型建模步骤, 首先将研究区 1960 年- 2013 年降水径流资料进行划分, 并建立基准期和变化期的降水和径流的双累积曲线。

如图 5 所示, 双累积曲线在突变年份出现拐点, 表明 1981- 2013 年期间径流过程不仅受到降水因素影响, 还受到人类活动因素的干扰发生偏离。基准期内静乐站和上静游水文站的累积降水和累积径流呈线性相关关系, 拟合方程分别为  $\sum R = 0.017 \times \sum P + 0.516$ ,  $\sum R = 0.004 \times \sum P + 0.072$ , 拟合度  $R^2$  分别为 0.995 和 0.996, 表明基准期内两个水文站的降水过程和径流过程有极高的相关性, 径流过程受其他因素影响程度非常之小, 因此, 将基准期的降水径流关系视为天然状态下的降水径流过程。

表 1 流域 1960 年- 2013 径流序列突变检验结果

Tab. 1 The results of abrupt change tests of runoff series in 1960-2013

检验方法	Manr Kendall 检验	滑动 T 检验	突变年份
检验内容	均值、方差和其他方面	均值、方差	
静乐	1972 年、1975 年、1979 年	1970 年、1979 年	1979 年
上静游	1982 年	1982 年	1982 年
显著性	显著	显著	

### 3.3 驱动因素分析

通过趋势检验和突变分析表明, 汾水水库控制流域径流序列呈递减趋势, 突变年份分别为 1979 年和 1982 年。根据径流减少驱动因素分析的双累积

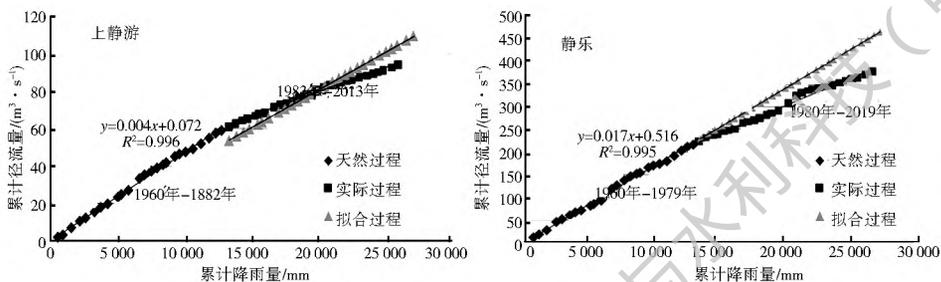


图 5 静乐站、上静游站降水- 径流双累积曲线

Fig. 5 Rainfall runoff double mass curve at Jingleshan station and Shangjingyou station

在基准期径流变化只与降水变化有关, 双累积曲线为一直线; 变化期径流受人类活动的影响加剧, 双累积曲线出现拐点并发生偏移。根据双累积曲线建模原理, 将变化期静乐站和上静游站实测降水数

据和还原的降水数据分别带入基准期拟合方程, 得到径流过程  $R_0$  和  $R_1$ , 其差值即为降水因素引起的径流减少量。变化期实际径流减少是降水变化和人类活动双重作用的结果, 因此实际径流减少量与降

水因素引起的径流减少量相减,即得到人类活动引起的径流减少量。计算结果如表2所示,可以看出,静乐站和上静游站降水因素对径流的影响量分别为1 135.30万m<sup>3</sup>和504.58万m<sup>3</sup>,对径流的影响率分别为15.62%和14.95%,通过模型原理可知人类活动影响量分别为6 131.13万m<sup>3</sup>和2 869.78万m<sup>3</sup>,影响率分别为84.38%和85.05%。对于整个汾河水库控制流域来讲,降水因素对径流的年平均影响量为952.76万m<sup>3</sup>,人类活动影响量为5 187.25万m<sup>3</sup>,占总减少量的84.48%。对比分析各驱动因素的影响结果,可以得出:(1)静乐站的人类活动对

径流总影响量远大于上静游站,但影响程度略小于上静游水文站,主要原因在于静乐站位于汾河干流上游,控制流域面积范围更广;(2)从各个水文站和整个流域降水因素和人类活动对径流影响比例来看,结果虽有微小差别,但总体保持统一,表明气候大环境和人类活动在流域径流影响上的一致性;(3)人类活动是汾河水库控制流域径流减少的主要原因,汾河流域土地利用变化、水利工程建设及水资源开采等人类活动严重改变了流域下垫面条件,对汾河径流减少产生了深远的影响,是导致研究区径流发生锐减的主导因素。

表2 降水、人类活动对径流影响结果统计

Tab. 2 Statistical results of impact of rainfall and human activities on runoff

站名	径流/万m <sup>3</sup>			降水/万m <sup>3</sup>			降水影响率(%)	人类活动	
	基准期	变化期	$\Delta R_{实}$	天然径流	实际径流	$\Delta R_p$		$\Delta R_{人}$ /万m <sup>3</sup>	影响率(%)
静乐	18 348.13	25 614.56	7 266.43	28 193.18	27 057.89	1 135.30	15.62	6 131.13	84.38
上静游	7 410.96	4 036.61	3 374.35	6 464.88	5 960.30	504.58	14.95	2 869.78	85.05
流域	15 182.76	19 369.61	6 140.01	21 904.72	20 951.96	952.76	15.52	5 187.25	84.48

#### 4 结论

本文基于突变分析检验结果建立了径流减少驱动因素分析的双累积曲线模型,系统的分析了汾河水库控制流域径流序列变化特征及内部成因规律,研究表明:汾河水库控制流域内径流年际震荡起伏明显,总体呈现递减趋势,20世纪80年代后径流均值明显小于20世纪80年代前,流域径流在1980年左右发生突变,20世纪80年代后汾河径流锐减主要原因在于人类活动的影响,降水变化是流域径流锐减的次要原因。该研究不仅有助于降水变化和人类活动影响下径流演变规律的认识,也为流域下一步水资源治理工作提供依据。本研究气候因素仅考虑了降水因素,并未考虑温度、湿度、蒸发等其他影响因子,下一步全面评估各影响因子对径流减少的影响量,对于今后制定水资源保护措施更具针对性作用,也是今后的重点研究问题。

#### 参考文献(References):

[1] 董磊华,熊立华,于坤霞,等.气候变化与人类活动对水文影响的研究进展[J].水科学进展,2012,23(2):278-285.(DONG L H, XIONG L H, YU K X, et al. Research advances in effects of climate change and human activities on hydrology [J]. Advances in Water Science, 2012, 23(2): 278-285. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2012.02.022.

[2] 李艳玲,畅建霞.基于Morlet小波的径流突变检测[J].西安理工大学学报,2012,28(3):322-325.(LI Y L, CHANG J X. Detection of the abrupt changes in runoff based on the Morlet

wavelet [J]. Journal Xi'an University of Technology, 2012, 28(3): 322-325. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1006-4710.2012.03.014.

[3] 赵云,胡彩虹,胡珊.汾河和沁河流域入黄径流锐减事实分析[J].水电能源科学,2012,30(3):3F-34.(ZHAO Y, HU C H, HU S. Facts analysis of significant reduction in runoff of Fenhe and Qinhe Basin [J]. Water Resources and Power, 2012, 30(3): 3F-34. (in Chinese))

[4] 高建峰,任健美,胡彩虹.汾河水库以上流域径流变化与洪水频率分析[J].中国沙漠,2009,29(3):577-582.(GAO J F, REN J M, HU C H. Analysis on variation characteristics of runoff and flood frequency in the watershed controlled by the Fenhe Reservoir [J]. Journal of Desert Research, 2009, 29(3): 577-582. (in Chinese))

[5] 胡彩虹,王纪军.汾河水库上游流域径流年内分配时程变化规律研究[J].干旱区资源与环境,2009(6):85-90.(HU C H, WANG J J. Study on the annual runoff distribution in upstream watershed of the Fenhe Reservoir [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009(6): 85-90. (in Chinese) DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2009.06.014.

[6] 任世芳,赵淑贞.汾河水库上游年径流演变趋势分析[J].人民黄河,2012(3):17-18,21.(REN S F, ZHAO S Z. Annual runoff change in the upper reaches of Fenhe River Reservoir [J]. Yellow River, 2012(3): 17-18, 21. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2012.03.007.

[7] 兰跃东,康玲玲,董飞飞,等.汾河流域气候变化及其对径流影响探讨[J].水资源与水工程学报,2012(2):70-72,7.(LAN Y D, KANG L L, DONG F F, et al. Effect of climatic change on runoff in Fenhe Watershed [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2012(2): 70-72, 7. (in Chinese))

[8] 李勇.汾河水库流域土地利用变化对径流影响研究[D].郑州:

- 郑州大学, 2014. (LI Y. Impact on runoff studies at the Fenhe River Reservoir watershed landuse change [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2014. (in Chinese))
- [9] 顾盼. 山西古交煤矿开采对河川径流影响机理及量化模型研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2015. (GU P. Impact studies on the mechanism and quantitative model of coal mining on river runoff in Gujiao City of Shanxi Province [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2015. (in Chinese))
- [10] 李文红. 利用水文法分析汾河水库上游的减沙效益 [J]. 太原理工大学学报, 2008(2): 178-180. (LI W H. Analysis on the benefit of sediment reduction of water and soil conservation in the upstream area of Fenhe Reservoir using hydrology method [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2008(2): 178-180. (in Chinese)) DOI: 10.16355/j.cnki.issn1007-9432yut.2008.02.018.
- [11] 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(6): 81-84. (ZHONG Y H, LU F, YI Z, et al. Change trend and period of annual runoff in upstream watershed of Miyun Reservoir [J]. Journal of China Hydrology, 2013(6): 81-84. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2013.06.017.
- [12] 章毓武, 丛振涛, 倪广恒. 基于中国气象资料的趋势检验方法对比分析 [J]. 水科学进展, 2013(4): 490-496. (ZHANG D W, CONG Z T, NI G H. Comparison of three mann-kendall methods based on the China's meteorological data [J]. Advances in Water Science, 2013(4): 490-496. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2013.04.019.
- [13] 桑燕芳, 王栋. 水文序列小波分析中小波函数选择方法 [J]. 水利学报, 2008(3): 295-300, 306. (SANG Y F, WANG D. Wavelets selection method in hydrologic series wavelet analysis [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008(3): 295-300, 306. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2008(3).006.
- [14] 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(4): 36-40. (LEI H F, XIE P, CHEN G C, et al. Comparison and analysis on the performance of hydrological time series change point testing methods [J]. Water Resources and Power, 2007(4): 36-40. (in Chinese))
- [15] 傅丽昕. 近 57 年来和丰县气温和降水量的趋势性及突变特征分析 [J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(4) 38-41. (FU L X. Tendency and mutation analysis of annual temperature and precipitation of Hefeng county in recent 57 years [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(4) 38-41. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nslrdqk.2014.04.009.
- [16] 于延胜, 陈兴伟. 基于 Mann-Kendall 法的水文序列趋势成分比重研究 [J]. 自然资源学报, 2011(9): 1585-1591. (YU Y S, CHEN X W. Study on the percentage of trend component in a hydrological time series based on mann-kendall method [J]. Journal of Natural Resources, 2011(9): 1585-1591. (in Chinese)) DOI: 10.11849/zrzyxb.2011.09.014.
- [17] 符淙斌, 王强. 气候突变的定义和检测方法 [J]. 大气科学, 1992, 16(4): 482-493. (FU C B, WANG Q. The definition and detection of the abrupt climate change [J]. Scientia Atmosphere Sinica, 1992, 16(4): 482-492. (in Chinese)) DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.1992.04.11.
- [18] 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. (DING A Z, ZHAO Y J, HAO D, et al. Analysis of variation characteristics of runoff and their influencing factors in the Yongding River Basin [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(1): 17-22. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2013.01017.
- [19] KMPL Ichiyangl. Precipitation in Nepal between 1987 and 1996 [J]. International Journal of Climatolgy. 2007, 15(2): 1753-1762. DOI: 10.1002/joc.1492.
- [20] 林凯荣, 何艳虎, 陈晓宏. 气候变化及人类活动对东江流域径流影响的贡献分解研究 [J]. 水利学报, 2012(11): 1312-1321. (LIN K R, HE Y H, CHEN X H. Identifying the quantitative effect of climate change and human activity on runoff in the Dongjiang River Basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012(11): 1312-1321. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2012.11.001.
- [21] 王国庆, 张建云, 刘九夫, 等. 气候变化和人类活动对河川径流影响的定量分析 [J]. 中国水利, 2008(2): 55-58. (WANG G Q, ZHANG J Y, LIU J F. Quantitative assessment for climate change and human activities impact on river runoff [J]. China Water Resources, 2008(2): 55-58. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2008.02.016.