

# 堵河流域径流变化趋势及特征分析

顾绍峰<sup>1</sup>, 余蔚卿<sup>2</sup>, 吴素娟<sup>1</sup>, 姜有雪<sup>1</sup>

<sup>1</sup>湖北省电力有限公司黄龙滩水力发电厂, 湖北 十堰

<sup>2</sup>长江勘测设计研究有限责任公司, 湖北 武汉

Email: hltgsf@126.com, yuweiqing@cjwsjy.com.cn

收稿日期: 2021年7月2日; 录用日期: 2021年8月17日; 发布日期: 2021年8月27日

## 摘要

研究堵河流域径流变化趋势及特征, 指导气候变化和人类活动影响下的流域水资源规划配置与水力发电具有重要意义。采用累积距平法和Spearman法分析堵河流域1961~2017年的年径流变化趋势, 采用Man-Kendall突变检验法分析年径流突变情况, 并分析了径流的年内、年际分配状况。结果表明: ① 堵河流域径流年内分配不均匀性较强, 年际变化剧烈, 1991年以来, “枯水”状况增加; ② 年径流在1961~2017年期间趋势不明显, 小幅增长未通过显著性检验; ③ 年径流的突变年份为1991年。堵河流域径流的突变以及年内、年际不均匀性加剧是气候变化与人类活动影响下的体现。

## 关键词

径流变化, 气候变化, 人类活动, 趋势分析, 堵河流域

# Analysis on Runoff Variation Trend and Characteristics in Duhe River

Shaofeng Gu<sup>1</sup>, Weiqing Yu<sup>2</sup>, Sujuan Wu<sup>1</sup>, Youxue Jiang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Hubei Electric Power Co., Ltd. Huanglongtan Hydropower Plant, Shiyan Hubei

<sup>2</sup>Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan Hubei

Email: hltgsf@126.com, yuweiqing@cjwsjy.com.cn

Received: Jul. 2<sup>nd</sup>, 2021; accepted: Aug. 17<sup>th</sup>, 2021; published: Aug. 27<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

The study on the runoff variation and characteristics of the Duhe River basin is of great significance to guide the planning and allocation of water resources and hydropower generation under the influence of

作者简介: 顾绍峰, 男, 工程师, 大学专科学历, 主要从事水库调度工作, 研究方向为水电站水库防洪调度与节水增效技术。

文章引用: 顾绍峰, 余蔚卿, 吴素娟, 姜有雪. 堵河流域径流变化趋势及特征分析[J]. 水资源研究, 2021, 10(4): 426-434.

DOI: 10.12677/jwrr.2021.104046

climate change and human activities. Both the cumulative anomaly method and Spearman method were used to analyze the annual runoff change trend from 1961 to 2017, the Man-Kendall catastrophe test was used to analyze the annual runoff abrupt change, and the annual and inter-annual distribution of runoff are analyzed. The results show that: 1) The annual distribution of runoff is uneven and the inter-annual variation is violent. The "low water" situation has increased since 1991; 2) The trend of annual runoff is not obvious from 1961 to 2017, and the slight increase fails to pass the significance test; 3) The abrupt change of annual runoff is 1991. The abrupt change of runoff and the intensification of intra-annual and inter annual heterogeneity are the embodiment under the influence of climate change and human activities.

## Keywords

Runoff Variation, Climate Change, Human Activities, Trend Analysis, Duhe River Basin

Copyright © 2021 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



## 1. 引言

气候变化的影响下,全球水循环、水资源分布状况均产生了巨大改变[1],同时人类活动的干预下,径流演变规律也逐渐改变[2]。堵河是汉江最大的支流,发源于大巴山,水源最终汇入丹江口水库。丹江口水库是南水北调中线工程水源地,自水库蓄水以来,丹江口水库回水顶托直接影响堵河口[1]。同时,随着流域内经济的高速发展和人口增长,水资源供需矛盾逐渐加剧,因此研究堵河流域的径流变化趋势对指导变化环境与人类活动影响下的流域水资源规划与配置、水力发电有着重要意义。

许多学者对长江流域径流演变特征开展了大量研究。严栋飞等[3]分析了武侯站、洋县站、汉中和石泉站等四个汉江上游站点的多年径流数据,发现自上世纪50年代以来汉江上游径流呈现减少趋势,且四个站点在1990年均发生了突变。李桃英等[4]利用汉江上游安康水文站1950~2007年的长序列实测径流资料分析发现,汉江上游径流在上世纪90年代以前呈增加趋势,但在此之后却有着显著减少的趋势。陈华等[5]通过研究汉江流域年径流量,识别出突变点为1991年,并发现春季和冬季时期汉江大部分子流域径流量都呈现出显著减少的趋势。李林等[6]、秦年秀等[7]、赵军凯等[8]研究发现长江流域内,上游、中游径流量减少,而下游地区径流量增加。曹建廷等[9]对长江源区1956~2000年径流的年际变化特征进行研究,发现长江源区径流量具有微弱的减少趋势。

本文以堵河流域下游黄龙滩水库入流序列为研究对象,采用累积距平法和Spearman法对堵河流域径流趋势进行分析,采用Man-Kendall突变检验法研究径流的突变情况,并分析径流的年内、年际分配状况,可为环境变化与人类活动影响下合理开发利用水资源、促进流域经济发展提供有力参考。

## 2. 基础数据与研究方法

### 2.1. 堵河流域概况与基础数据

堵河是汉江最大的支流,干流全长约354公里,流域面积约12430平方公里,平均坡降4.81%,流域平均海拔高度1034m,自然落差1586m。流域多年平均降水量约990mm,年径流深约500mm,属湿润半湿润地带。黄龙滩水电站位于堵河口以上4km的峡谷口处,控制流域面积11,140平方公里,坝址多年平均流量191m<sup>3</sup>/s;

水库正常蓄水位 247.0 m，死水位 222.0 m，设计洪水位 248.2 m，调节库容 5.985 亿 m<sup>3</sup>，总库容 11.7 亿 m<sup>3</sup>；黄龙滩水库于 1976 年竣工，是一个以发电为主，供水、航运、发展渔业等综合效益的大型水利枢纽。堵河流域及黄龙滩水库示意图如图 1。

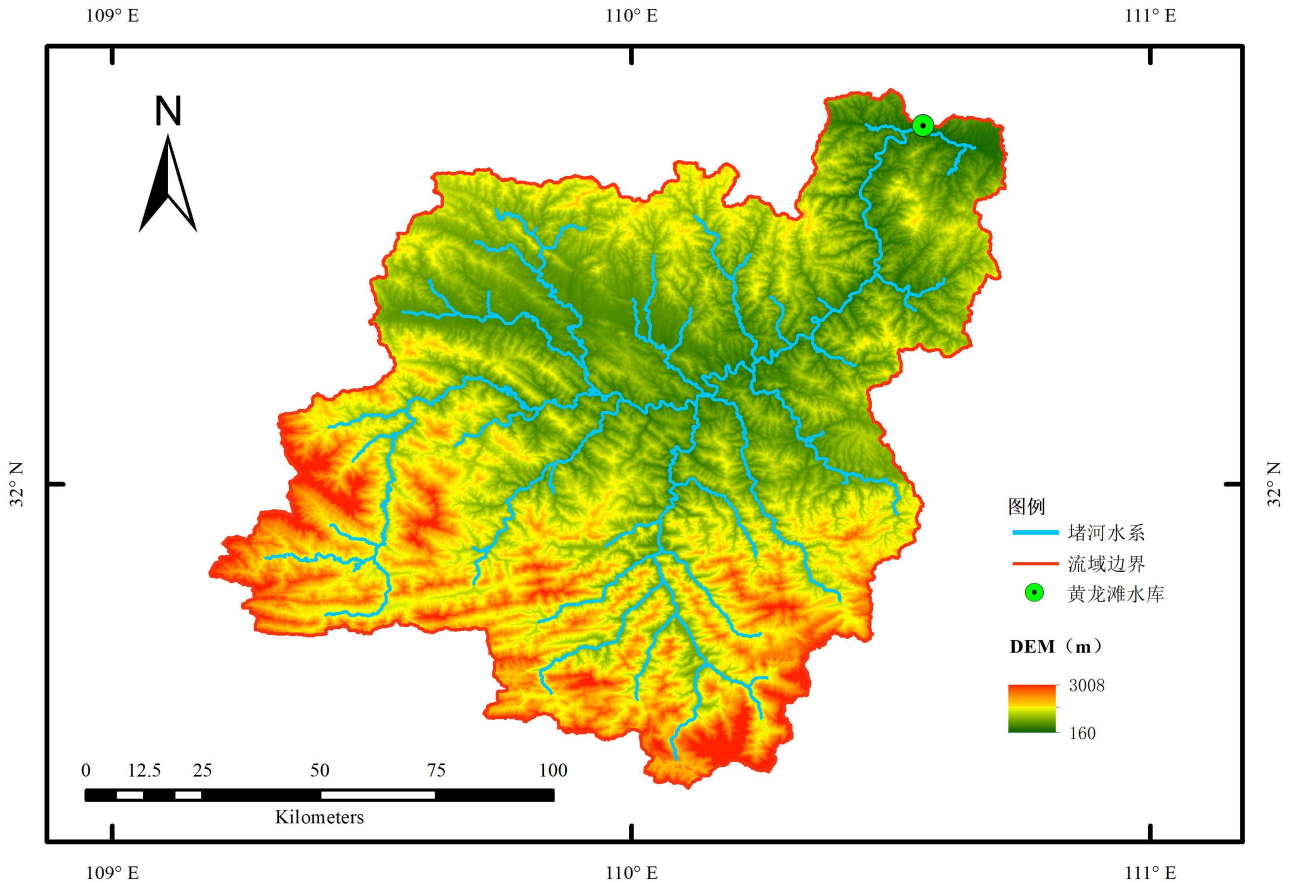


Figure 1. Schematic diagram of Duhe River and Huanglongtan Reservoir  
图 1. 堵河流域及黄龙滩水库示意图

综合考虑现有水文资料情况，利用黄龙滩水库 1961~2017 年月径流系列，进行堵河流域径流变化趋势分析。

## 2.2. 研究方法

### 2.2.1. 径流年内分配特征分析

#### 1) 不均匀性分析

年内分配不均匀程度常采用径流年内分配变差系数  $C_v$  和径流年内分配完全调节系数  $C_r$  来衡量[10] [11] [12]；年内丰枯月径流分配不均匀程度越高  $C_v$ 、 $C_r$  值越大。 $C_v$ 、 $C_r$  计算公式为：

$$C_v = \sqrt{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} \left( Q_i - \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} Q_i \right)^2} / \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} Q_i \quad (1)$$

$$C_r = \sum_{i=1}^{12} \phi_i \left( Q_i - \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} Q_i \right) / \sum_{i=1}^{12} Q_i, \quad \phi_i = \begin{cases} 0 & Q_i < \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} Q_i \\ 1 & Q_i \geq \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} Q_i \end{cases} \quad (2)$$

式中： $Q_i$ 为第*i*月径流。

2) 变化幅度分析

采用极值比  $C_m$  反应径流年内分配的相对变化幅度[13]，计算公式为：

$$C_m = \frac{Q_{\max}}{Q_{\min}} \tag{3}$$

式中： $Q_i$ 为第*i*月径流， $Q_{\max}$ 为年内最大月径流、 $Q_{\min}$ 为年内最大月径流最小月径流。

2.2.2. 径流丰平枯分析

采用距平百分率作为径流丰枯等级的划分依据[14]，以展示径流的多年变化特征。径流丰枯等级划分标准如表 1。

Table 1. Runoff grade classification standard

表 1. 径流丰枯等级划分标准

距平百分率(%)	$(-\infty, -20)$	$[-20, -10)$	$[-10, 10]$	$(10, 20]$	$(20, +\infty)$
丰枯等级	枯水	偏枯	平水	偏丰	丰水

2.2.3. 趋势分析方法

选用累积距平法和 Spearman 法分析径流系列变化趋势。

1) 累积距平法

计算流量序列每一年的径流量距平后，按照年份顺序进行累积叠加，即得到累积距平序列：

$$M_i = \sum_1^i (Q_i - \bar{Q}) \tag{4}$$

式中： $M_i$ 为第*i*年的累积距平值。

2) Spearman 法

将径流序列  $Q_i (i=1, 2, \dots, n)$ ，从大到小排列，统计检验秩次相关系数  $R_s$  可表达为：

$$R_s = 1 - 6 \sum_{i=1}^N (z_i - t_i)^2 / (N^3 - N) \tag{5}$$

式中： $z_i$ 为第*i*年径流序列的秩， $t_i$ 为  $Q_i$ 按时间排列的序号。若  $R_s < 0$  则径流呈递减趋势，反之则呈递增趋势。

采用 *t* 检验方法，在给定的显著性水平下比较统计量与临界值的关系，以检验径流时间序列的变化趋势是否显著。统计量 *T* 可表达为：

$$T = r \sqrt{\frac{n-4}{1-r^2}} \tag{6}$$

2.2.4. 突变分析方法

Man-Kendall 突变检验法不要求被分析样本遵从一定的分布，适用于气象、水文等非正态分布数据[2]。对径流序列  $Q_i$  构造秩序列  $u_k$ ：

$$u_k = \sum_{i=1}^n s_i \quad k = 2, 3, \dots, n \quad s_i = \begin{cases} 1, Q_i > Q_j \\ 0, Q_i \leq Q_j \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, i \tag{7}$$

在径流时间序列随机独立的假定下，定义统计量：

$$UF_k = \frac{u_k - E(u_k)}{\sqrt{\text{var}(u_k)}} \quad k = 1, 2, 3, \dots, n \tag{8}$$

$$E(u_k) = \frac{k(k-1)}{4}, \text{var}(u_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \quad k = 2, 3, \dots, n$$

统计量  $UF_k$  服从标准正态分布，将径流时间序列  $Q_t$  逆序重复上述过程，求得统计量  $UB_k$ ，若  $UF_k$  和  $UB_k$  两条曲线出现交点，则交点对应的时刻即为突变点。

### 3. 结果与分析

#### 3.1. 径流年内分配特征

将黄龙滩水库 1961~2017 年月经流资料划分为 5 个年代，列出了不同年代段内堵河流域径流年内月均分配统计情况(表 2)，并依此绘制了月经流变化曲线(图 2)。

堵河流域在不同的年代时期，径流的年内分配状况也有所不同，年内月经流最大值集中在 7 月和 8 月。在部分年代出现了“双峰型”月经流曲线，1961~1969 年代的首次峰值出现在 5 月，相比其他年代峰值出现较早。1961~2017 年总月平均径流变化曲线则呈现“单峰型”，峰值出现在 8 月，年内径流变化趋势表现为 1~2 月基本不变，3~7 月急速增长，8~9 月维持高位，10~12 月急剧减少。汛期径流(5~10 月)占全年径流的 75%左右。年径流与汛期径流的年际变化吻合，说明年径流的整体趋势主要取决于汛期径流的变化。

Table 2. Percentage of monthly runoff in the upstream of Duhe River (%)

表 2. 堵河流域各月平均径流量占年平均径流量的百分比(%)

年代	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
1961~1969	2.14	2.46	3.67	6.84	10.97	7.87	17.25	14.63	13.20	11.61	5.97	3.38
1970s	2.32	2.51	3.27	7.32	10.32	11.56	13.24	15.75	14.91	10.24	5.51	3.05
1980s	2.64	2.57	3.82	6.17	8.58	13.85	14.54	15.15	14.50	9.81	5.26	3.11
1990s	2.91	3.68	4.51	6.23	10.79	12.59	16.48	13.74	10.76	8.68	6.65	2.98
2000s	2.46	2.78	3.39	6.53	9.06	12.08	15.53	18.36	11.62	8.89	5.73	3.57
2010~2017	2.27	2.25	3.80	7.18	9.40	12.14	10.23	14.94	15.12	12.40	6.86	3.42
1961~2017	2.46	2.70	3.72	6.70	9.78	11.80	14.53	15.51	13.39	10.20	5.94	3.25

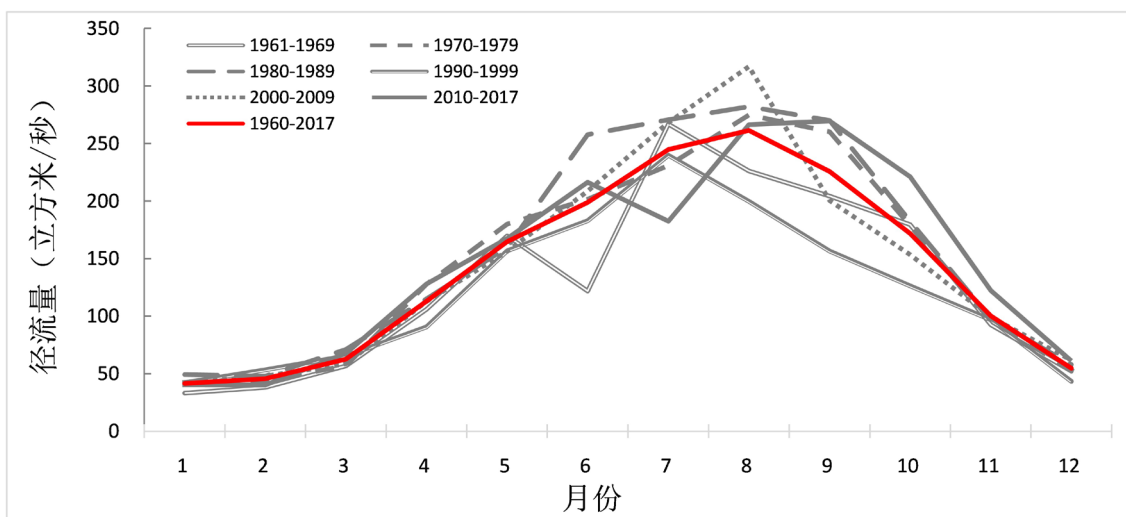


Figure 2. Variation curve of monthly runoff in Duhe River

图 2. 堵河流域月经流变化过程

堵河流域在整个径流序列时间段内的年内分配指标计算结果如表 3，整体而言堵河流域径流的年内分配状况不均匀程度较高，这也与图 2 月径流在年内的分布状况十分吻合(汛期径流量占全年径流量的 70%以上)。

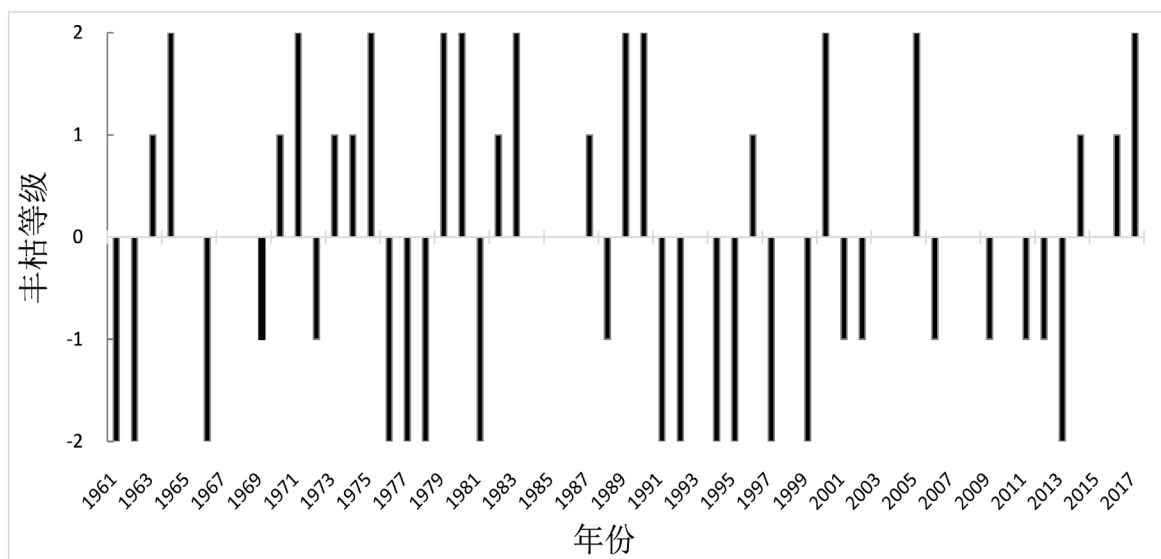
**Table 3.** The intra-annual distribution factors of runoff in the Duhe River

**表 3.** 堵河流域年内分配指标计算结果

时段	$C_v$	$C_r$	$C_m$
1961~2017	1.69	0.25	6.30

### 3.2. 径流丰枯变化特征

根据各年对多年平均径流量的距平百分率划分标准，得到了堵河流域 1961~2017 年径流量的丰枯等级，如图 3 (图中纵坐标“-2”表示枯水；“-1”表示偏枯；“0”表示平水；“1”表示偏丰；“2”表示丰水)。堵河流域各年径流量变化剧烈，在 1961~2017 年内，枯水年出现次数与平水年出现次数均为 24.56%，偏枯与偏丰年数均占 15.79%，丰水年则占 19.30%。在时间分布上，1990 年以前各丰枯年份交替出现，而在 1991 年以后则出现枯水状况年数明显增加的趋势。



**Figure 3.** The high-water period and dry period of annual runoff in the Duhe River

**图 3.** 堵河流域各年径流丰枯等级

### 3.3. 径流趋势分析

#### 3.3.1. 径流时序的年际变化

1961~2017 年之间，堵河流域的年径流量呈现增加趋势，年径流量平均值为  $44.29 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，57 年内有 27 年径流量大于平均值，30 年径流量小于平均值。其中 1961 年径流量最小，仅有  $20.78 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，2017 年径流量最大，为  $75.15 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，是 1961 年的 3.62 倍。堵河流域径流量的年际变化如图 4 所示。

#### 3.3.2. 年径流量趋势分析

堵河流域年径流量累积距平曲线见图 5，堵河流域 1991 年以前年径流量总体呈现增加的趋势，而在 1991 年以后总体呈现减少的趋势，在部分时间段也存在一定的小幅增减。



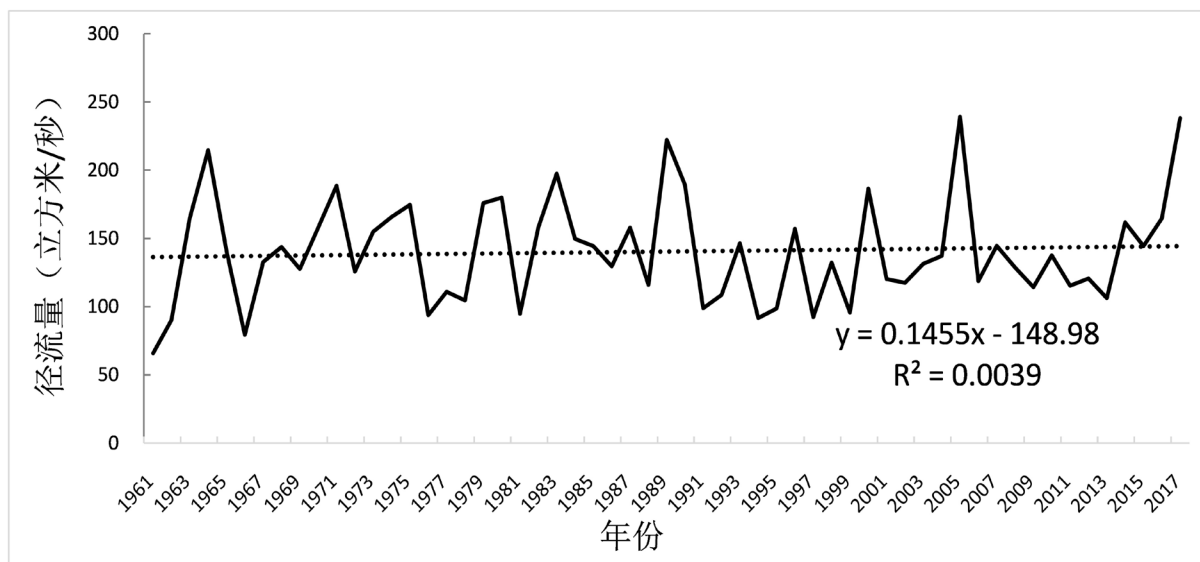


Figure 4. Variation processes of annual runoff in the Duhe River

图 4. 堵河流域年径流变化过程

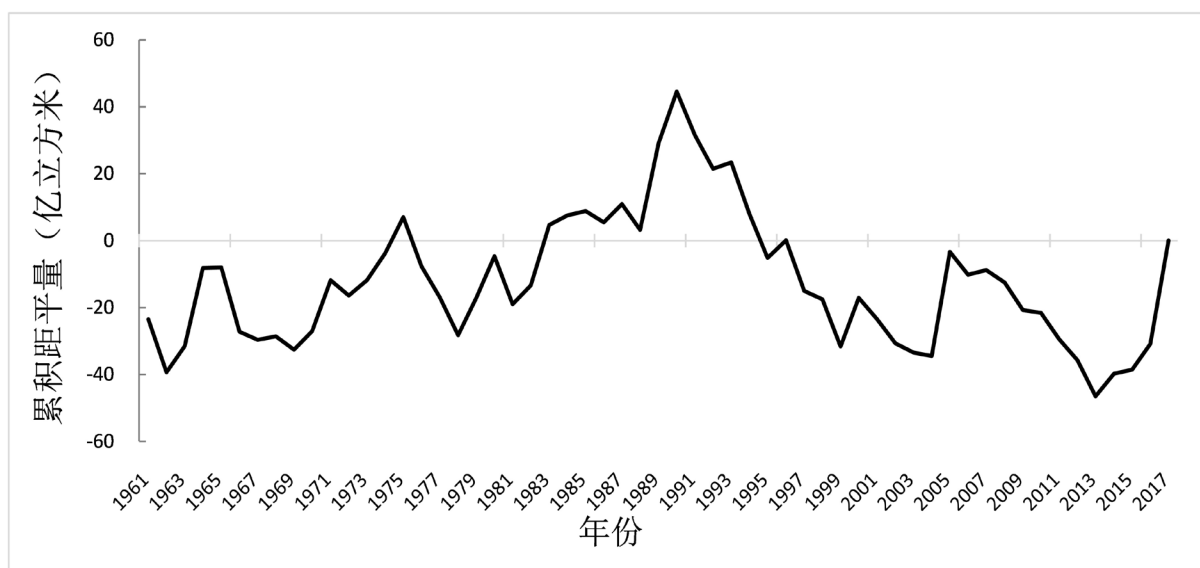


Figure 5. The cumulative anomaly curve of annual runoff in the upstream of Duhe River

图 5. 堵河流域年径流量累积距平曲线

Spearman 方法计算秩次相关系数  $r_n$  为 0.02，说明堵河流域的年径流量存在增加的趋势；对应的统计量 T，发现显著性水平  $\alpha = 0.05$  的情况下，未超过临界值，说明堵河流域的增加趋势未达到对应的显著性水平。

### 3.4. 径流突变分析

Man-Kendall 突变检验显示， $UF_k$  和  $UB_k$  两条曲线在 1991 年处相交，表明堵河流域年径流在 1991 年发生突变，这也与 1991 年以后枯水状况出现频率增高、年径流量累积距平曲线在 1991 年达到峰值结果相吻合。堵河流域年径流量的 Man-Kendall 突变检验结果见图 6。引发堵河流域年径流量发生突变的因素可能是气候变化、森林植被变化和水电开发活动等。

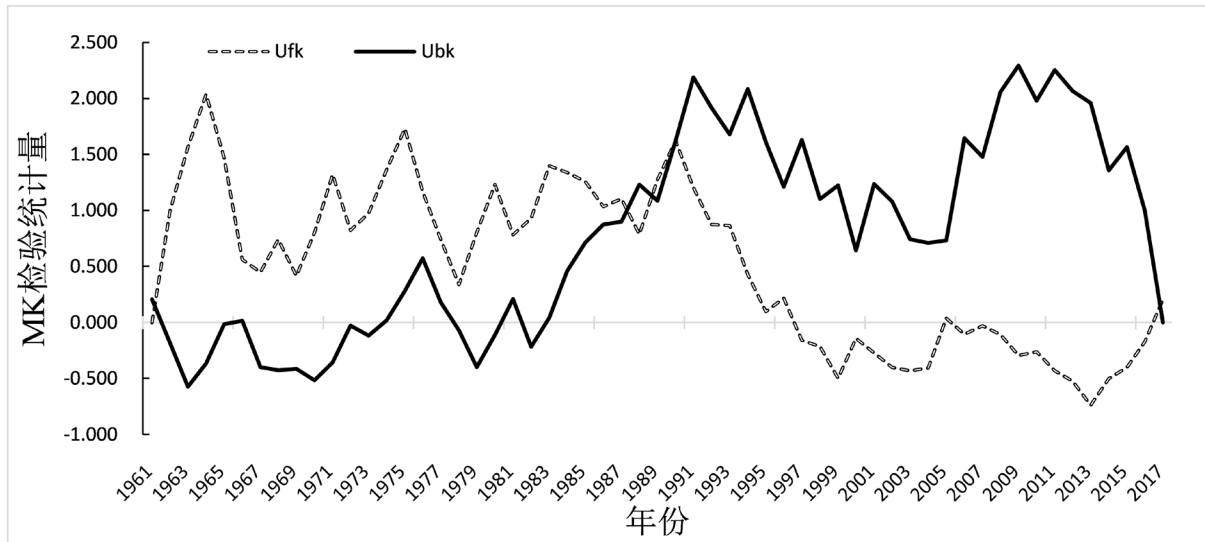


Figure 6. Man-Kendall mutation test results in the Duhe River

图 6. 堵河流域 Man-Kendall 突变检验结果

#### 4. 结论

利用累积距平法、Spearman 法和 Man-Kendall 突变检验法等方法,对堵河流域 1961~2017 年径流演变特征进行分析,主要结论如下:

1) 堵河流域径流量年内分配不均匀性较强,年径流量的 70% 以上都集中在汛期(5 月到 10 月),年径流量的整体趋势取决于汛期径流的变化情况。

2) 堵河流域年径流丰枯状况多变,且 1991 年以后枯水状况出现频率明显较之前增高,未来或将影响流域内水资源的规划与利用。

3) 堵河流域年径流量增减趋势不明显;年径流量在 1991 年发生突变,说明在气候变化与人类活动等因素的影响下,流域内水资源状况发生了改变,流域内水资源规划与利用、水力发电将迎来挑战。

#### 参考文献

- [1] 袁林山,张家余,张力,等.气候变化对水电站发电出力的影响研究[J].中国农村水利水电,2020(9):231-235.  
YUAN Linshan, ZHANG Jiayu, ZHANG Li, et al. Research on the impacts of climate change on the power generation of hydropower station. China Rural Water and Hydropower, 2020(9): 231-235. (in Chinese)
- [2] 胡慧杰,崔凯,曹茜,等.黄河近百年径流演变特征分析[J].人民黄河,2019,41(9):14-19.  
HU Huijie, CUI Kai, CAO Qian, et al. Analysis of the characteristics of runoff evolution in Yellow River in recent 100 years. Yellow River, 2019, 41(9): 14-19. (in Chinese)
- [3] 严栋飞,解建仓,姜仁贵,等.汉江上游径流变化趋势及特征分析[J].水资源与水工程学报,2016,27(6):13-19.  
YAN Dongfei, XIE Jiancang, JIANG Rengui, et al. Trends and characteristics of runoff for upper Hanjiang River. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2016, 27(6): 13-19. (in Chinese)
- [4] 李桃英,殷峻暹,张丽丽,等.汉江上游径流演变趋势及影响因素分析[J].人民长江,2011,42(9):19-22.  
LI Taoying, YIN Junxian, ZHANG Lili, et al. Analysis on runoff evolution trend of upper Hanjiang River and its influential factors. Yangtze River, 2011, 42(9): 19-22. (in Chinese)
- [5] 陈华,闫宝伟,郭生练,等.汉江流域径流时空变化趋势分析[J].南水北调与水利科技,2008(3):49-53.  
CHEN Hua, YAN Baowei, GUO Shenglian, et al. Temporal and spatial trends analysis of the runoff in Hanjiang River. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2008(3): 49-53. (in Chinese)
- [6] 李林,王振宇,秦宁生,等.长江上游径流量变化及其与影响因子关系分析[J].自然资源学报,2004(6):694-700.  
LI Lin, WANG Zhenyu, QIN Ningsheng, et al. Analysis of the relationship between runoff amount and its impacting factor in



- the upper Yangtze River. *Journal of Natural Resources*, 2004(6): 694-700. (in Chinese)
- [7] 秦年秀, 姜彤, 许崇育. 长江流域径流趋势变化及突变分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2005(5): 589-594.  
QIN Nianxiu, JIANG Tong and XU Chongyu. Trends and abruptness analysis on the discharge in the Yangtze River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005(5): 589-594. (in Chinese)
- [8] 赵军凯, 李九发, 戴志军, 等. 长江宜昌站径流变化过程分析[J]. *资源科学*, 2012, 34(12): 2306-2315.  
ZHAO Junkai, LI Jiufa, DAI Zhijun, et al. Analysis the runoff variation of Yangtze River in Yichang. *Resources Science*. 2012, 34(12): 2306-2315. (in Chinese)
- [9] 曹建廷, 秦大河, 罗勇, 等. 长江源区 1956-2000 年径流量变化分析[J]. *水科学进展*, 2007(1): 29-33.  
CAO Jianting, QIN Dahe, LUO Yong, et al. Discharge changes of the Yangtze River in source area during 1956-2000. *Advances in Water Science*, 2007(1): 29-33. (in Chinese)
- [10] 郑红星, 刘昌明. 黄河源区径流年内分配变化规律分析[J]. *地理科学进展*, 2003(6): 585-590+649.  
ZHENG Hongxing, LIU Changming. Changes of annual runoff distribution in the headwater of the Yellow River basin. *Progress in Geography*, 2003(6): 585-590+649. (in Chinese)
- [11] 王金星, 张建云, 李岩, 等. 近 50 年来中国六大流域径流年内分配变化趋势[J]. *水科学进展*, 2008(5): 656-661.  
WANG Jinxing, ZHANG Jianyun, LI Yan, et al. Variation trends of runoffs seasonal distribution of the six larger basins in China over the past 50 years. *Advances in Water Science*, 2008(5): 656-661. (in Chinese)
- [12] 陆建宇, 王秀庆, 王学斌, 陆宝宏. 径流年内分配不均匀性的度量指标及其应用[J]. *水力发电*, 2015(11): 24-28+54.  
LU Jianyu, WANG Xiuqing, WANG Xuebin and LU Baohong. Measurement index of nonuniformity of intra-annual runoff distribution and its application. *水力发电*, 2015(11): 24-28+54. (in Chinese)
- [13] 赵雪花. 河川径流时间序列研究方法与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015.  
ZHAO Xuehua. Research method and application of river runoff time sequence. Beijing: China Water & Power Press, 2015. (in Chinese)
- [14] 朱燕梅, 黄炜斌, 陈仕军, 等. Logistic 回归模型在径流丰枯形势预测上的应用[J]. *水电能源科学*, 2020, 38(12): 16-19+23.  
ZHU Yanmei, HUANG Weibin, CHEN Shijun, et al. Application of the logistic regression model in runoff wetness-dryness prediction. *Water Resources and Power*, 2020, 38(12): 16-19+23. (in Chinese)