

# Analysis of Runoff Evolution Trend of Luohe River Basin from 1961 to 2016

Wenchuan Wang<sup>1</sup>, Xian Liu<sup>1</sup>, Dongmei Xu<sup>1</sup>, Xin Shi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

<sup>2</sup>School of Art and Design, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Email: wangwen1621@163.com, wangwenchuan@ncwu.edu.cn

Received: Dec. 18<sup>th</sup>, 2019; accepted: Dec. 31<sup>st</sup>, 2019; published: Jan. 7<sup>th</sup>, 2020

## Abstract

The trends and stages of runoff and precipitation in Luohe River basin, in the past 56 years (1961-2016) were analyzed using methods of Mann-Kendall trend test and mutation analysis, accumulated anomaly curve, and double mass curve. The influences of human activities and precipitation on runoff change were also quantified. The data came from observed runoff at Changshui hydrometric station and observed daily precipitation at three adjacent meteorological stations in the Luohe River basin. Research findings demonstrated that the runoff and precipitation in Luohe River basin changed obviously in different stages, both of which experienced the period's high-flow of and low-flow. Both annual runoff and annual precipitation were on the decline, but runoff decline was more significant. Runoff changed abruptly in 1977. After the abrupt change, runoff decreased obviously under the influence of human activities and precipitation, the contribution rate of human activities and precipitation to the decrease of runoff was 89.14% and 10.86% respectively. The analysis results show that human activities are the main influencing factors of runoff change in Luohe River basin.

## Keywords

Runoff, Precipitation, Runoff Changes, Mann-Kendall Testing, Rate of Contribution, Luohe River Basin

# 洛河流域1961~2016年径流演变趋势特征分析

王文川<sup>1</sup>, 刘 献<sup>1</sup>, 徐冬梅<sup>1</sup>, 石 信<sup>2</sup>

<sup>1</sup>华北水利水电大学水利学院, 河南 郑州

<sup>2</sup>华北水利水电大学艺术与设计学院, 河南 郑州

Email: wangwen1621@163.com, wangwenchuan@ncwu.edu.cn

收稿日期: 2019年12月18日; 录用日期: 2019年12月31日; 发布日期: 2020年1月7日

作者简介: 王文川(1976-), 男, 河南鹿邑人, 博士, 教授, 博导, 主要从事水文水资源系统分析、遥感信息处理等方面的研究。

## 摘要

利用洛河流域的长水水文站56年的径流量资料和流域内3个气象站同期日降水观测资料,应用了Mann-Kendall检验和突变分析法、距平累积曲线、双累积曲线等方法分析了洛河流域1961~2016年的径流量和降水量变化的趋势性和阶段性,定量分析了人类活动和降水对流域径流量变化的影响程度。结果表明:洛河流域径流量和降水量变化阶段性明显,都经历了枯水期和丰水期;年径流量和年降水量整体呈下降趋势,但径流量下降趋势较降水量更为显著;径流量的突变年份为1977年,突变年份之后在人类活动和降水的影响下径流量明显降低,人类活动和降水分别对径流量降低的贡献率为89.14%和10.86%。分析结果表明人类活动是洛河流域径流变化的主要影响因素。

## 关键词

径流, 降水, 径流变化, Mann-Kendall检验法, 贡献率, 洛河流域

Copyright © 2020 by author(s) and Wuhan University.

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

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



Open Access

## 1. 研究背景

水资源是保障人类生产、生活和维持生态平衡的基础性资源[1]。河川径流变化是影响流域水资源开发利用的主控因素,通过对流域径流量演化规律及其主控因素进行分析,一方面为流域水资源的开发利用与生态环境保护提供科学依据,同时对社会经济的发展也具有理论指导意义[2]。

径流演变过程隐含着突变、趋势性和多时间尺度等特性,同时具有复杂的线性、非线性特征[3]。其中气候因素以及人类活动变化是影响河川径流变化的最主要的两大因素,气候因素会造成降水的改变,影响地下水、地表水的多少,从而引起径流量的变化,人类活动通过改变下垫面而影响河川径流的产汇流机制,径流量也随之会发生改变[4]。目前,很多学者对径流变化已经做了一些有意义的研究,如:穆兴民等人认为松花江流域在100年时间尺度上径流量并未表现出显著的增加或减少趋势,但径流量的年际变化有明显的阶段性特征[5]。王浩等人对嫩江流域的径流演变规律的研究得出在枯水年段人类用水对径流的影响较大[3]。夏军等人以汉江上游为例,探讨了变化环境下气候变化和人类活动对流域径流的影响,得出人类活动对汉江上游径流的影响较大,且其对径流变化的影响呈增长的趋势[6]。高培、刘明哲等人对新疆玛纳斯河径流演变做了分析,表明气候因子是驱动玛纳斯河红山嘴水文站以上径流变化的主导因素[7]。流域内气候变化以及人类活动影响是河川径流量变化的重要体现,是全球水科学研究的热点之一[8]。通过分析流域径流量的演变趋势特征及影响因素,对全面理解水资源特性、科学认识水循环过程和实现水资源的可持续利用具有重要的理论和现实意义。

洛河是黄河流域的十大支流之一,区域水资源的开发利用程度已较高,也没有再建大型水库工程的潜力可控[9]。因此分析洛河流域径流变化趋势、原因及其影响因素,可为该地区水资源合理开发利用及生态环境保护提供科学依据。本研究利用洛河流域近56年的水文、气象资料,通过对降水量和径流量的基本变化特征、阶段性变化特征和趋势性进行分析,最后通过建立径流-降水双累积曲线定量分析人类活动及降水对径流变化的影响程度。

## 2. 研究区概况

洛河是黄河十大支流之一,是黄河右岸重要支流,洛河发源于陕西省渭南市华州区西南与蓝田县、临渭区

交界的箭峪岭侧木岔沟，流经陕西省东南部及河南省西北部，至河南省巩义市汇入黄河。河道全长 447 km，流域面积 18,881 km<sup>2</sup>，是黄河小浪底至花园口区间的最大的一条支流。洛河是黄河主要洪水来源之一。流域地势北缘秦岭、华山，南顺蟒岭、伏牛山，总趋势西北高、东南低。河流流向与黄河干流大致平行。流域土石山区占流域面积 45.2%，主要分布在上中游地区，有大片森林覆盖，植被较好，水源涵养较好；黄土丘陵区占流域面积 51.3% [9]。流域简图见图 1。

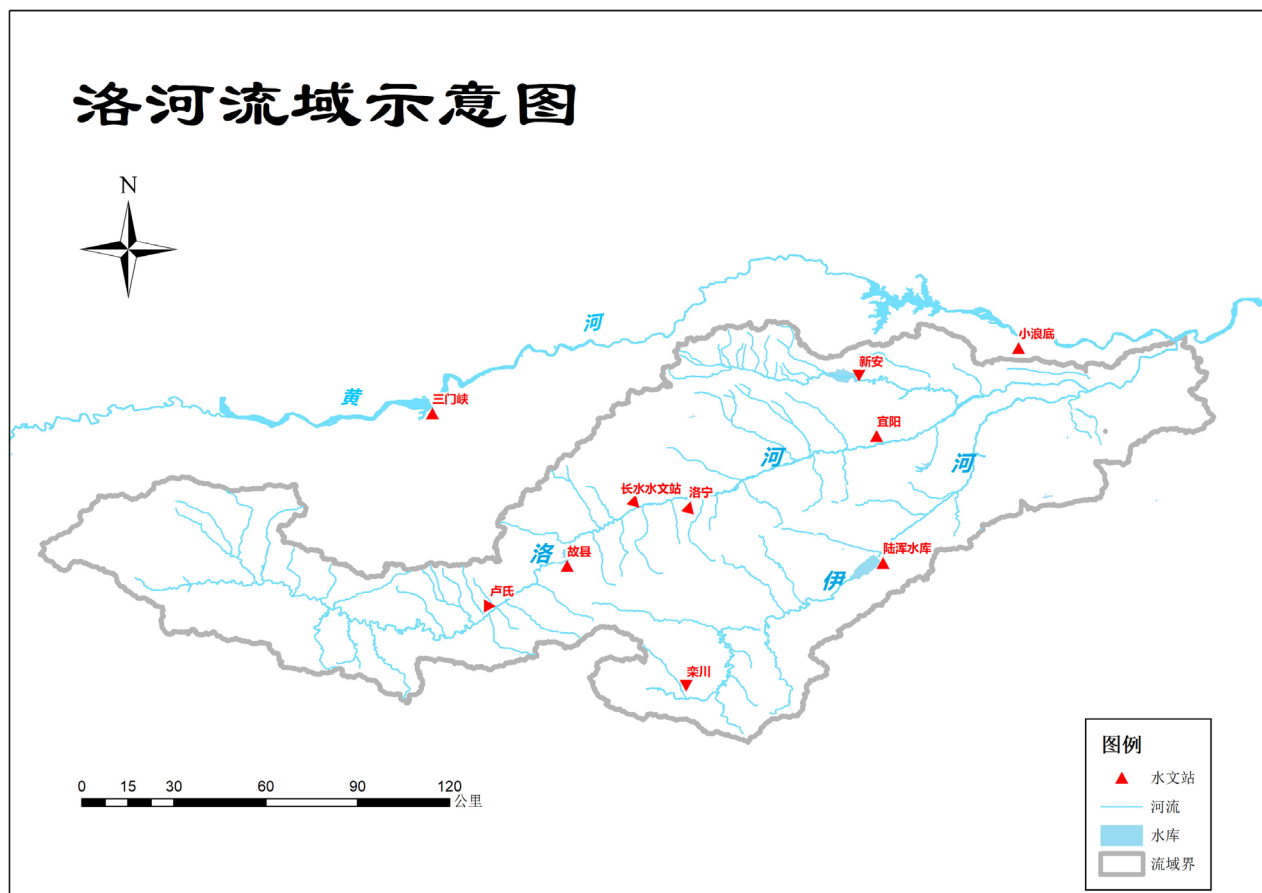


Figure 1. Sketch map of Luohe River basin

图 1. 洛河流域示意图

### 3. 数据来源和研究方法

#### 3.1. 数据来源

本文所用降水数据来自洛河流域附近三个气象站(三门峡站、孟津站、西峡站) 1961~2016 年的逐日实测降水数据，径流数据来自长水水文站 1961~2016 年的实测径流水文资料。

#### 3.2. 研究方法

利用搜集到的水文与气象资料，分别运用 Mann-Kendall 检验法、距平累积法分析洛河流域径流和降水变化的趋势性、突变性及阶段性特征，最后建立径流 - 降水的双累积曲线定量分析人类活动及降水对径流的影响程度。

##### 3.2.1. Mann-Kendall 趋势检验和突变检验

Mann-Kendall 检验法作为非参数检验方法，不受数据分布特征的影响，广泛应用于水文和气象时间序列的

变化趋势分析[10] [11] [12] [13]。已知某时间序列数据，利用 Mann-Kendall 法可计算得到两组数据序列  $UF_k$  和  $UB_k$ 。若  $UF_k > 0$ ，表明数据序列呈增加趋势；若  $UF_k < 0$  表明数据序列呈下降趋势；当其超过显著性水平线时，表明上升或下降趋势显著。如果  $UF_k$  与  $UB_k$  出现交点，且交点在显著性水平线之间，此交点对应的时间为突变开始的时间[14]。

### 3.2.2. 距平累积法

距平累积是一种常用的，可以通过曲线直接判断变化趋势的方法[15]。流域内降水量和径流量的阶段性变化特征可以通过绘制年降水量和年径流量的距平累积曲线准确地反映出来[16]，计算公式为：

$$X = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \quad (1)$$

式中： $X$  为年径流量或年降水量序列的距平累积值； $\bar{x}$  为年径流量或年降水量序列的平均值； $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ， $n$  是径流量或降水量序列样本总数。

### 3.2.3. 双累积曲线法

双累积曲线(Double Mass Curve，简称 DMC)方法[17]是检验两个参数间关系一致性及其变化的常用方法。目前广泛应用于有水文气象要素的长期演变趋势分析以及气象要素一致性的检验、缺值的插补或资料修正。

在 Mann-Kendall 法分析径流变化的基础上，建立基于降水、径流双累积曲线法的统计学模型模拟降水径流变化过程，分析径流对降水及人类活动变化的响应机理。在降水量与径流量双累积曲线中，累计降水量作为自变量，累积径流量受人类活动及降水量的共同作用，在找出突变年份的基础上结合降水和径流变化特点，通过双累积曲线可以分辨气候变化和人类活动的作用。

### 3.2.4. 径流变化因素贡献识别

本文利用文献[18] [19] [20]中的公式分别计算人类活动对径流变化的贡献值  $\Delta W_H$  和降水变化对径流变化的贡献值  $\Delta W_C$ ，并利用突变前后径流变化量  $\Delta W_V$ ，计算二者的贡献率  $\eta_C$ 、 $\eta_L$ ，进而定量分析人类活动及降水对径流量的影响程度，具体计算如下：

径流变化总量：

$$\Delta W_V = W_{\text{post}} - W_{\text{pre}} \quad (2)$$

人类活动引起的径流变化量：

$$\Delta W_H = W_{\text{post}} - W_{\text{sim}} \quad (3)$$

降水变化引起的径流变化量：

$$\Delta W_C = W_{\text{sim}} - W_{\text{pre}} \quad (4)$$

人类活动贡献率：

$$\eta_C = \frac{|\Delta W_C|}{\Delta W_V} \times 100\% \quad (5)$$

降水变化贡献率：

$$\eta_L = \frac{|\Delta W_H|}{\Delta W_V} \times 100\% \quad (6)$$

式中： $W_{\text{post}}$  为突变后时间段内实测多年平均径流量； $W_{\text{pre}}$  为突变前时间段内实测多年平均径流量； $W_{\text{sim}}$  为利用突变后降水数据输入模型中模拟的多年理论平均径流量。

## 4. 结果和讨论

### 4.1. 径流量、降水量变化的基本特征

以 5a 时间为一组进行时间分段, 在 1961~1965 年洛河流域平均径流量和平均降水量为最大值, 分别为  $18.99 \times 10^8 \text{ m}^3$  和 689.82 mm, 最小值都在 1991~1995 年, 分别为  $3.87 \times 10^8 \text{ m}^3$  和 536.36 mm, 洛河流域降水变化在 1996~2000、2001~2005 年 2 个时段的相对显著, 其中, 1996~2000 年的极值比最大, 为 2.70, 变差系数为 0.33, 其次是 2001~2005 年的极值比为 2.23, 变差系数 0.28。在 2001~2005 年洛河流域的径流量变差系数和极值比是最大的, 分别为 0.8 和 8.37。整体上降水量的变差系数和极值比均小于径流量的变差系数和极值比, 可知降水量和径流量的变化趋势并不完全一致(表 1)。

降水是径流的基本来源, 径流量和降水量演变规律的差异性可表征为人类活动对径流的影响[21], 所以人类活动对径流的影响是引起洛河流域径流变化的影响因素之一。

**Table 1.** Variation characteristics of annual precipitation and runoff of Luohe River basin in different periods

**表 1.** 洛河流域不同时段年均降水量、年均径流量变化特征

年限	降水量			径流量		
	平均值/mm	极值比	变差系数	平均值/( $10^8 \text{ m}^3$ )	极值比	变差系数
1961~1965	689.82	1.75	0.21	18.99	3.56	0.51
1966~1970	541.52	1.56	0.15	11.36	1.79	0.10
1971~1975	623.26	1.61	0.19	10.18	2.92	0.41
1976~1980	568.48	1.72	0.16	7.32	1.47	0.14
1981~1985	676.36	1.69	0.22	14.11	2.88	0.36
1986~1990	547.4	1.53	0.15	5.75	6.23	0.49
1991~1995	536.36	1.62	0.18	3.87	4.08	0.47
1996~2000	548.60	2.70	0.33	4.39	3.08	0.37
2001~2005	568.40	2.23	0.28	5.58	8.37	0.80
2006~2010	538.46	1.55	0.16	4.67	4.66	0.43
2011~2016	548.45	1.76	0.21	4.39	4.74	0.53

### 4.2. 径流量、降水量变化的阶段性

采用距平累积法绘制出年径流量、年降水量时间序列的距平累积曲线(如图 2), 通过曲线分析洛河流域径流、降水的阶段性特征变化。结果表明: 洛河流域在 1961~2016 年降水量可分为两个阶段, 多水期 1961~1982 年的平均降水量为 599.75 mm, 少水期 1983~2016 年的平均降水量为 566.61 mm。采用同样的方法可分析洛河流域 1961~2016 年径流量变化过程以 1985 年为界限分为丰 - 枯两个阶段。丰水期在 1961~1984 年的多年平均径流量为  $12.45 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 枯水期在 1985~2016 年的多年平均径流量为  $4.96 \times 10^8 \text{ m}^3$  (见表 2)。从图中可知径流量的波动性弱于降水量的波动性, 故径流量和降水量的阶段性变化有一定的差异性。

### 4.3. 径流量、降水量的趋势性检验及突变性分析

#### 4.3.1. Mann-Kendall 趋势检验

趋势性可以总体反映降水、径流演变的总体变化规律, 通过采用 Mann-Kendall 法可以进一步检验洛河流域降水量、径流量趋势变化及其突变点。径流量时序变化的 Mann-Kendall 趋势检验值  $Z$  为 -5.11, 而降雨量时序变化的 Mann-Kendall 趋势检验值  $Z$  为 -1.37 (表 3), 均为负值, 说明洛河流域 1961~2016 年径流量和降水量整体呈下降趋势; 且由于径流量  $|Z| > 1.96$ , 通过了显著水平  $\alpha = 0.05$  的检验, 认为下降趋势显著, 而降水量没有通过该检测,

说明降水量下降趋势没有径流量下降趋势明显,可知 Mann-Kendall 趋势检验与线性趋势检验结果是一致的(图 3)。

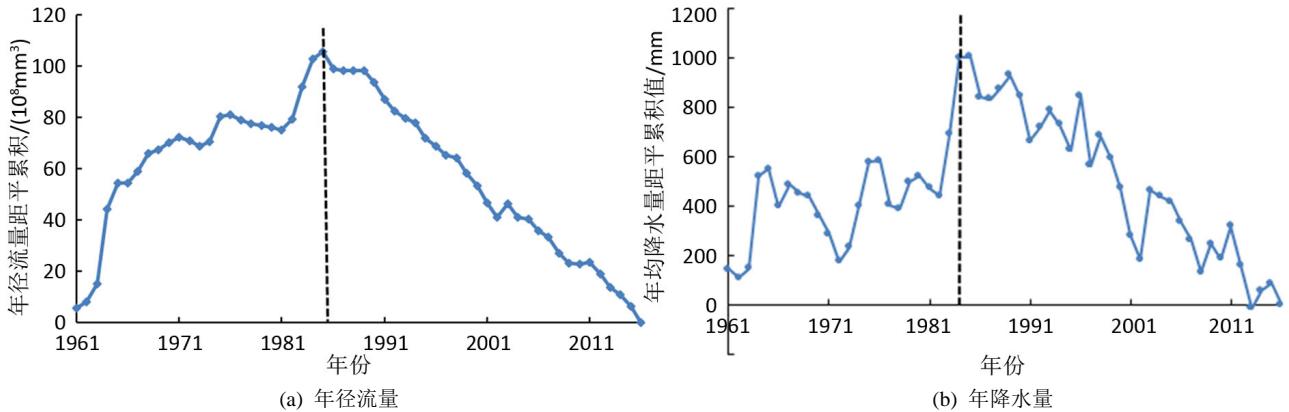


Figure 2. Curves of accumulated anomaly of annual runoff and annual precipitation in Luohe River basin

图 2. 洛河流域年径流量、年降水量距平累积曲线

Table 2. Staged characteristics of runoff in Luohe River basin

表 2. 洛河流域径流量阶段性特征

年限	径流特性	径流量平均值/(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )	年限	降水特性	降水量平均值/mm
1961~1984	丰水	12.45	1961~1982	多水	599.75
1985~2016	枯水	4.96	1983~2016	少水	566.61

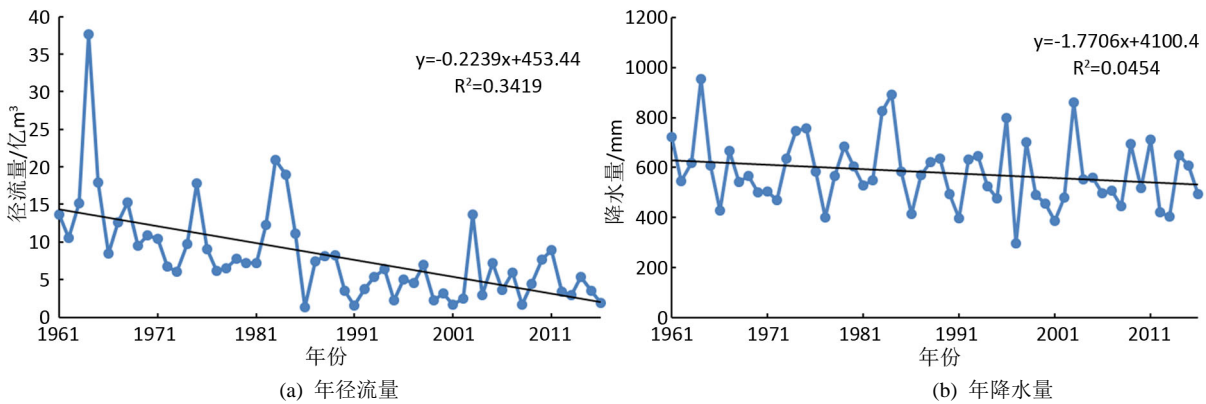


Figure 3. Trends of annual runoff and annual precipitation in Luohe River basin

图 3. 洛河流域年径流量、年降水量变化趋势线

Table 3. Mann-Kendall test result of runoff and precipitation in Luohe River basin

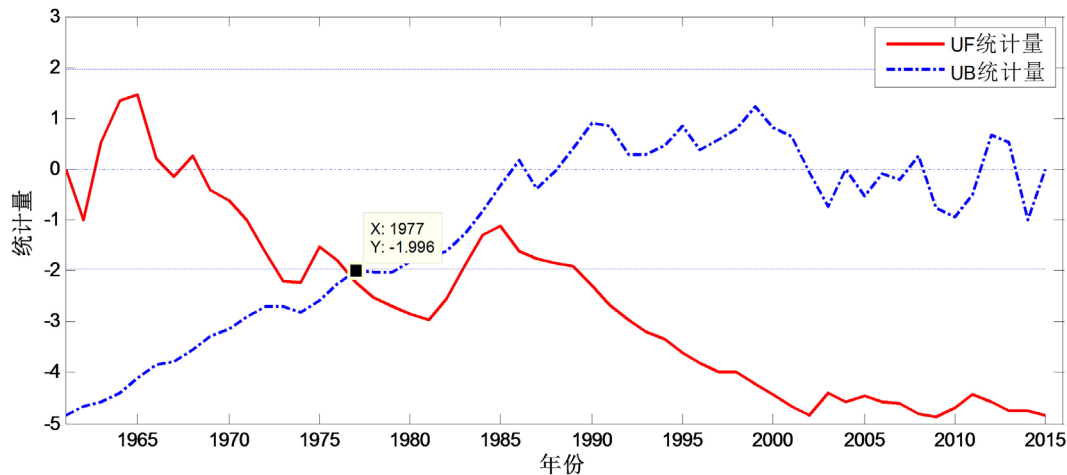
表 3. 洛河流域降水量、径流量变化趋势 Mann-Kendall 检验

显著性水平 $\alpha$	$Z_{1-\alpha/2}$	径流量		降水量	
		检验统计量 Z	显著性	检验统计量 Z	显著性
0.05	1.96	-5.11	显著	-1.37	不显著

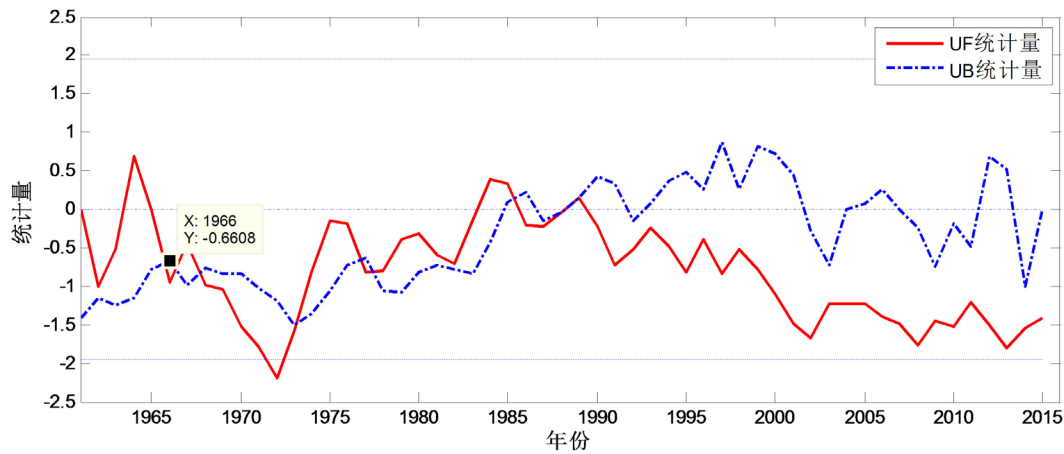
### 4.3.2. Mann-Kendall 突变性检验分析

采用 Mann-Kendall 突变检验法对洛河流域年径流量、年降雨量进行突变性分析,根据 Mann-Kendall 突变分析方法计算  $UF_K$  和  $UB_K$  值,并画出 Mann-Kendall 突变分析统计量  $UF_K$  和  $UB_K$  曲线(图 4)。从(图 a)中可以看出,

1968 年开始,  $UF_K$  曲线开始小于 0, 表明从这一时期开始, 年径流量是呈下降趋势的, 并且从 1977 年开始  $UF_K$  曲线开始超出 0.05 显著水平下限, 这说明在这一时期年径流量下降速度加快, 而且下降的趋势显著。同时进一步发现,  $UF_K$  和  $UB_K$  曲线在 1977 年存在一个交点。从(图 b)中可以看出  $UF_K$  和  $UB_K$  曲线有多个交点, 第一个交点出现在 1966 年, 从 1965 年开始,  $UF_K$  曲线处于 0 刻度线以下, 表明从这一时期开始, 年降水量呈下降趋势,  $UF_K$  曲线在 0.05 显著性水平线之内, 所以下降趋势不显著。年径流量和年降水量发生突变的时间点不一致, 可知除了降水对径流下降的影响外, 人类的活动也与之有关。



(a) 年径流量 Mann-Kendall 突变检验



(b) 年降水量 Mann-Kendall 突变检验

**Figure 4.** Mann-Kendall analysis result of abrupt changes in annual runoff and annual precipitation in Luohe River basin

**图 4.** 洛河流域年径流量、年降水量 Mann-Kendall 突变检验分析

#### 4.4. 人类活动及降水对径流量的影响

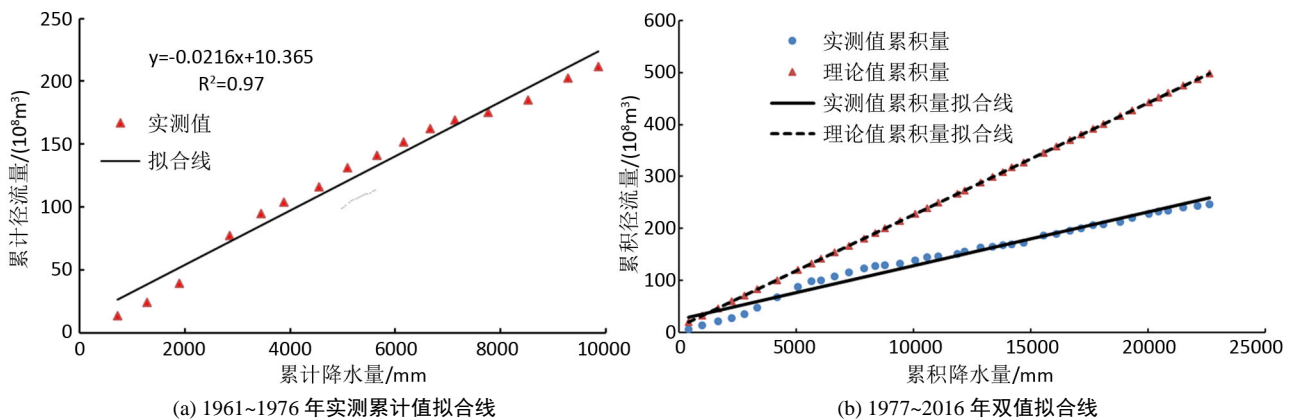
为了定量分析人类活动及降水分别对径流量的影响, 建立 1961~1976 年降水 - 径流双累积曲线图, 其基准关系式为  $\sum R = 0.0216\sum P + 10.365$  ( $R^2 = 0.9758$ ), 其中  $\sum R$  是累计径流量;  $\sum P$  是累计降水量;  $R^2$  是降水量和径流量双累积曲线拟合相关程度。该阶段实测多年平均径流量为  $13.23 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 而理论年平均径流量为  $13.96 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 绝对误差为  $0.73 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 相对误差为 5.52%, 表明该方法的拟合精度较高(表 4 和图 5)。将突变年份后 1977~2016 年降水量代入基准关系式中得到突变年份后每年的累计径流量理论值。绘制 1977~2016 年降水 - 实

测径流双累积曲线和降水 - 理论径流双累积曲线。可知除降水对径流有影响外，人类活动的影响使径流变小，而且影响较为显著。

**Table 4.** Calibration result of simulated runoff in Luohe River basin  
**表 4.** 洛河流域径流量模拟率定结果

年限	实测年均径流量/(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )	理论年均径流量/(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )	绝对误差/(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )	相对误差/%
1961~1976	13.23	13.96	0.73	5.52

将 1961~2016 年的累计降水量代入上述基准关系式中，得到累计径流量，经过反推计算出每年径流量的理论值。计算 1961~1976 年和 1977~2016 年 2 个阶段的理论平均径流、实测平均径流，进一步计算人类活动和降水的变化各产生的径流量。1977 年后，径流量的实测值和理论值相差较大，1977~2016 年的实测平均径流为  $6.14 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，而平均理论值为  $12.46 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。最后引用贡献率的概念来定量分析 1977 年后人类活动及降水对径流量的影响程度，人类活动对径流降低的贡献率较大为 89.14%，而降水对径流降低的贡献率为 10.86%（见表 5）。说明人类活动对洛河流域径流量降低有很大的影响。



**Figure 5.** Double accumulation curves of precipitation and runoff in Luohe River basin

**图 5.** 洛河流域年降水和年径流双累积曲线

**Table 5.** Statistical values of the impacts of human activities and precipitation on runoff in Luohe River basin

**表 5.** 人类活动和降水对洛河流域径流影响的统计值

年限	平均降水量/mm	实测年均径流量/(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )	计算年均径流量/(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )	降水对径流影响量/(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )	人类活动对径流影响量/(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )
1961~1976	616.2	13.23	13.96		
1977~2016	565.0	6.14	12.46	-0.77	-6.32
贡献率/%				-10.86	-89.14

## 5. 结论

本文采用距平累积法、Mann-Kendall 检验法等方法对洛河流域 1961~2016 年的径流量和降水量进行了分析，利用双累积曲线及贡献率定量分析了人类活动和降水对径流的影响，主要结论如下：

1) 洛河流域径流量和降水量变化呈明显的现阶段性特征；降水量和径流量的阶段变化有一定的差异性，且径流量的波动性弱于降水量的波动性。

2) 洛河流域在 1961~2016 年径流量和降水量整体呈下降趋势，经 Mann-Kendall 趋势检验表明径流量呈显著下降趋势，降水量呈不显著下降趋势，径流量下降趋势比降水量明显，径流量在 1977 年发生突变。



3) 通过引用贡献率定量分析了人类活动和降水对径流的影响。人类活动和降水分别对径流影响量为  $6.32 \times 10^8 \text{ m}^3$  和  $0.77 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 对径流降低的贡献率分别为 89.14% 和 10.86%。通过上述结果可知, 在洛河流域径流减少原因中, 人类活动起着重要的作用。

4) 本文虽然定量分析了人类活动及降水对径流变化的影响, 但未考虑温度、蒸发量以及人类活动中的土地利用、水土保持措施等因素对径流的影响, 未来可以进一步量化分析洛河流域径流变化的原因。

## 基金项目

国家自然科学基金项目(51509088, 51709108); 河南省高校科技创新团队(18IRTSTHN009); 河南省水环境模拟与治理重点实验室(2017016)。

## 参考文献

- [1] 师于杰. 塔里木河“三源一干”近 60 年径流演变规律分析[J]. 水资源开发与管理, 2019(7): 12-23.  
SHI Yujie. Analysis of runoff evolution law of “three sources and one stem” in Tarim River in recent 60 years. Water Resources Development and Management, 2019(7): 12-23. (in Chinese)
- [2] 李二辉, 穆兴民, 赵广举. 1919~2010 年黄河上中游区径流量变化分析[J]. 水科学进展, 2014, 25(2): 155-163.  
LI Erhui, MU Xingmin and ZHAO Guangju. Temporal changes in annual runoff and influential factors in the upper and middle reaches of Yellow River from 1919-2010. Advances in Water Science, 2014, 25(2): 155-163. (in Chinese)
- [3] 唐蕴, 王浩, 严登华, 唐克旺. 嫩江流域近 45 年来径流演变规律研究[J]. 地理科学, 2009, 29(6): 864-868.  
TANG Yun, WANG Hao, YAN Denghua and TANG Kewang. Evolutionary regularity of runoff of Nenjiang River basin in period 1956-2000. Scientia Geographica Sinica, 2009, 29(6): 864-868. (in Chinese)
- [4] 潘娅英, 骆月珍, 王亚男, 张青, 朱占云. 新安江流域降水、径流演变特征分析[J]. 水土保持研究, 2018, 25(6): 121-125.  
PAN Yaying, LUO Yuezhen, WANG Yanan, ZHANG Qing and ZHU Zhanyun. Characteristics of evolution of precipitation and runoff in Xin'an River basin. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(6): 121-125. (in Chinese)
- [5] 宋小燕, 穆兴民, 高鹏. 松花江哈尔滨站近 100 年来径流量变化趋势[J]. 自然资源学报, 2009, 24(10): 1803-1809.  
SONG Xiaoyan, MU Xingmin and GAO Peng. Trends of runoff variation from 1900 to 2005 at Harbin Station of Songhua River. Journal of Natural Resources, 2009, 24(10): 1803-1809. (in Chinese)
- [6] 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.  
XIA Jun, MA Xieyi, ZOU Lei, et al. Quantitative analysis of the effects of climate change and human activities on runoff in the Upper Hanjiang River basin. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(1): 1-6. (in Chinese)
- [7] 高培, 刘明哲. 新疆玛纳斯河径流演变过程及驱动力分析[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(10): 47-52.  
GAO Pei, LIU Mingzhe. The evaluation on runoff of Manas River and the analysis on driving-force. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(10): 47-52. (in Chinese)
- [8] MILLY, P. C. C. D., DUNNE, K. A. and VECCHIA, A. V. Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. Nature, 2005, 438: 347-350. <https://doi.org/10.1038/nature04312>
- [9] 刘晓伟, 刘龙庆, 王玉华, 陈静. 人类活动影响下的洛河产汇流特性变化[J]. 西北水资源与水工程, 2003, 14(4): 4-7.  
LIU Xiaowei, LIU Longqing, WANG Yuhua and CHEN Jing. Change in characteristics of runoff generation and convergence in Luohe River under the influence of human activities. Northwest Water Resources & Water Engineering, 2003, 14(4): 4-7. (in Chinese)
- [10] 张修宇, 左其亭. 变化环境下塔里木河流域径流序列变化特征及成因分析[J]. 水利水电技术, 2013, 44(10): 6-12.  
ZHANG Xiuyu, ZUO Qiting. Analysis on changing characteristics and causation of runoff series of Tarim River Basin under varying environment. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013, 44(10): 6-12. (in Chinese)
- [11] 徐长江, 范可旭, 肖天国. 金沙江流域径流特征及变化趋势分析[J]. 人民长江, 2010, 41(7): 10-14.  
XU Changjiang, FAN Kexu and XIAO Tianguo. Runoff characteristics and variation tendency of Jinsha River Basin. Yangtze River, 2010, 41(7): 10-14. (in Chinese)
- [12] 杨明金, 张勃, 王海青, 袁健萍. 黑河流域 1950 年~2004 年出山径流变化规律分析[J]. 资源科学, 2009, 31(3): 413-419.  
YANG Mingjin, ZHANG Bo, WANG Haiqing and YUAN Jianping. The study on the change of mountainous runoff in Heihe River basin from 1950-2004. Resources Science, 2009, 31(3): 413-419. (in Chinese)
- [13] TAO, H., GEMMER, M., BAI, Y., et al. Trends of streamflow in the Tarim River basin during the past 50 years: Human impact or climate change. Journal of Hydrology, 2011, 400(1/2): 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.01.016>

- [14] 董弟文, 王大伟, 田世英. 近 60 年和田河源区径流特征及对气候变化的响应[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 16(6): 536-543.  
DONG Diwen, WANG Dawei and TIAN Shiyong. Characteristics of runoff and response to climate change in the Hotan River source area in recent six decades. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018, 16(6): 536-543. (in Chinese)
- [15] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007.  
WEI Fengying. Modern climate statistical diagnosis and prediction techniques. Beijing: China Meteorological Press, 2007. (in Chinese)
- [16] 张贤芳, 舒强, 李偲. 叶尔羌河近 48 年来径流演变规律研究[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(1): 93-97.  
ZHANG Xianfang, SHU Qiang and LI Cai. Rules of runoff variation of Yarkand River in recent 48 years. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(1): 93-97. (in Chinese)
- [17] 胡彩虹, 王艺璇, 管新建, 石志民. 基于双累积曲线法的径流变化成因分析[J]. 水资源研究, 2012, 1(4): 204-210.  
HU Caihong, WANG Yixuan, GUAN Xinjian and SHI Zhimin. The causes of runoff variation based on double cumulative curve analysis method. Journal of Water Resources Research, 2012, 1(4): 204-210. (in Chinese)
- [18] 黄斌斌, 郝成元, 李若男, 郑华. 气候变化及人类活动对地表径流改变的贡献率及其量化方法研究进展[J]. 自然资源学报, 2018, 33(5): 899-910.  
HUANG Binbin, HAO Chengyuan, LI Ruonan and ZHENG Hua. Research progress on the quantitative methods of calculating contribution rates of climate change and human activities to surface runoff changes. Journal of Natural Resources, 2018, 33(5): 899-910. (in Chinese)
- [19] 李万志, 刘炜, 张调风, 等. 气候和人类活动对黄河源区径流量变化的贡献率研究[J]. 冰川冻土, 2018, 40(5): 985-992.  
LI Wanzhi, LIU Wei, ZHANG Tiaofeng, et al. The contribution rate of climate and human activities on runoff change in the source regions of Yellow River. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(5): 985-992. (in Chinese)
- [20] 秦琳琳, 过寒超. 近 60 年黄泽江流域降雨径流变化趋势及突变分析[J]. 人民珠江, 2019, 40(7): 30-36.  
QIN Linlin, GUO Hanchao. Variation trend and mutation analysis of the rainfall and runoff in Huangze River basin during the last 60 years. Pearl River, 2019, 40(7): 30-36. (in Chinese)
- [21] 白桦, 穆兴民, 高鹏. 嘉陵江流域降水及径流演变规律分析[J]. 水土保持研究, 2012, 19(1): 102-106.  
BAI Hua, MU Xingmin and GAO Peng. Analysis on spatio-temporal variation of precipitation and streamflow in the Jialiang-jiang River basin. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(1): 102-106. (in Chinese)