

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.02.042; CSTR:32311.14.rswc.2025.02.042.

宋爱英, 高秉俊, 贺彦. 变化环境下黑河上游径流演变规律分析[J]. 水土保持研究, 2025, 32(2): 61-71.

Song Aiyong, Gao Bingjun, He Yan. Runoff evolution pattern under the changing environment in the upper reaches of Heihe River[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(2): 61-71.

变化环境下黑河上游径流演变规律分析

宋爱英, 高秉俊, 贺彦

(甘肃省张掖水文水资源勘测中心, 甘肃 张掖 734000)

摘要: [目的] 河川径流是西北干旱区重要的水资源, 辨析其变化特征及影响因素对于认识气候变化背景下的河流水文变化规律具有重要意义。[方法] 以黑河上游为研究区域, 根据水文站所控制的流域对黑河上游进行分区, 基于黑河上游各水文站径流、降水等数据, 结合累积距平、Mann-Kendall 检验、双累积曲线等方法, 探讨气候变化背景下径流演变规律。[结果] 1968—2022 年黑河上游各分区年径流量变化均呈显著增加趋势, 八宝河、野牛沟、区间干流和黑河上游年径流量分别以 0.29 亿 $\text{m}^3/10 \text{ a}$ 、0.69 亿 $\text{m}^3/10 \text{ a}$ 、0.39 亿 $\text{m}^3/10 \text{ a}$ 、1.36 亿 $\text{m}^3/10 \text{ a}$ 的速率增加, 八宝河、野牛沟、区间干流对于黑河上游流域径流量的贡献率分别为 28.11%、46.31%、25.58%, 野牛沟对流域径流量贡献率最大, 区间干流最小; 八宝河、野牛沟、区间干流和黑河上游的年径流量分别在 2002 年、2006 年、1979 年和 2002 年发生了由少到多的突变, 年径流量平均值突变后较突变前分别增加 41.76%、29.78%、67.49% 和 29.53%, 区间干流突变后较突变前年径流量年际变化大, 其他各区年径流量年际差异性变小; 降水和人类活动对八宝河流域径流变化的贡献率分别为 63.89% 和 36.11%, 对野牛沟流域径流变化的贡献率分别为 55.22% 和 44.78%, 对黑河上游径流量变化的贡献率分别为 53.89% 和 46.51%。[结论] 整体来说, 气候变化背景下黑河上游的年径流量呈显著增加趋势, 降水是径流变化的主要原因。

关键词: 径流量突变; 归因分析; 黑河上游

中图分类号: TV121⁺.4; P333

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)02-0061-11

Runoff evolution pattern under the changing environment in the upper reaches of Heihe River

Song Aiyong, Gao Bingjun, He Yan

(Zhangye Hydrology and Water Resources Survey Center of Gansu Province, Zhangye, Gansu 734000, China)

Abstract: [Objective] Runoff is an important water resource in the arid area of northwest China. The aims of this study are to analyze changing characteristics of runoff and influencing factors, and to understand the pattern of river hydrological change under the background of climate change. [Methods] The upper reaches of the Heihe River was taken as the research area. The upper reaches of the Heihe River was mainly zoned primarily based on the watershed controlled by hydrological stations. Based on the runoff and precipitation of each hydrological station in the upper reaches of the Heihe River, and a variety of methods of the cumulative anomaly, Mann-Kendall test, and double cumulative curve, the evolution pattern of runoff under the background of climate change was discussed. [Results] From 1968 to 2022, the changes in annual runoff showed a significant increasing trend in the upper reaches of the Heihe River, with the annual runoff in the Babaohe, the Yeniugou, the interval mainstream, and the whole area increasing at the rate of 0.29, 0.69, 0.39, and $1.36 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{decade}$, respectively. The contribution rates of the Babaohe, the Yeniugou, and the interval mainstream to watershed runoff were 28.11%, 46.31%, and 25.58%, respectively. The Yeniugou

收稿日期: 2024-06-27

修回日期: 2024-07-22

接受日期: 2024-08-03

资助项目: 国家自然科学基金项目(U22A20564); 甘肃省水利科学试验研究及技术推广计划项目(22GSLK068); 甘肃省水利科学试验研究及技术推广计划项目(22GSLK064)

第一作者: 宋爱英(1974—), 女, 甘肃白银人, 高级工程师, 主要从事水文水资源勘测、分析、评价等工作。E-mail: 511233816@qq.com

通信作者: 高秉俊(1984—), 男, 甘肃靖远人, 高级工程师, 主要从事水文水资源勘测、分析、评价、水质评价等工作。E-mail: 670419101@qq.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

contributed the most to watershed runoff and the interval mainstream the least. The annual runoff in the Babaohe, the Yeniugou, the interval mainstream, and the whole region experienced a sudden change from less rate to more rate in 2002, 2006, 1979, and 2002 during the study period. Compared to the annual runoff before the mutation change, the mean annual runoff after the mutation change increased by 41.76%, 29.78%, 67.49%, and 29.53%, respectively. The interannual variation of runoff in the Yeniugou was larger than that in the year before the mutation, and the interannual difference of annual runoff in other areas was smaller. The contribution rates of precipitation to runoff change in the Babaohe, the Yeniugou, and the whole area were 63.89%, 55.22%, and 53.89%, respectively, and the contribution of human factors to runoff variation in the Babaohe, the Yeniugou, and the whole area were 36.11%, 44.78%, and 46.51%, respectively. [Conclusion] The annual runoff showed a significant increasing trend under the background of climate change and precipitation was the main reason for runoff change in the upper reaches of the Heihe River.

Keywords: runoff mutation; attribution analysis; the upper reaches of Heihe River

水资源作为社会发展的战略性经济资源,随着不断变化的气候环境和日益加剧的人类活动,两者的共同作用对区域的水文循环产生了深远的影响,而径流是地表水资源的重要形式^[1]。已有研究表明,我国大部分区域的河川径流大多呈减少趋势,这对区域的水资源产生了较大的威胁与安全隐患^[2]。分流域看,松辽河、黄河和海河的径流呈减少趋势,长江、珠江、淮河和太湖流域的径流变化趋势较不明显^[3],其中,气候变化是松花江流域和长江流域径流演变的主导因素^[4],且气候对松花江流域的影响程度明显高于黄河流域,而人类活动是海河流域、辽河流域、淮河流域及珠江流域径流变化的关键因素^[5-8],黄河流域中,气候变化是兰州以上径流演变的主导因素,人类活动是兰州以下径流演变的主导因素^[9]。我国西北干旱区因其特殊的地理位置和复杂的气候条件,导致径流对气候变化和人类活动的响应较为敏感^[10]。因此,深入剖析径流演变的时空规律和驱动因素对区域的水资源科学管理和开发利用具有重要意义。

黑河作为我国西北地区第二大内陆河,是重要的生态安全屏障,其上游是整个流域的主要产流区^[11],厘清黑河上游的径流变化特征及驱动因素对保障黑河流域的水资源及生态安全很有必要。针对不同年际尺度,有学者对黑河上游径流的变化特征及影响因素方面进行了不少工作^[12-13],有研究表明,黑河上游径流量呈增加趋势^[14],其对气候变化的响应更为敏感,降水增加和气温升高是导致径流增加的主要原因,且降水是影响径流变化的关键因素^[15],郭阳等提出季节冻融变化是影响黑河上游径流变化中不可忽视的重要因素^[16]。以上研究大多主要以莺落峡水文站的数据为主来分析黑河上游径流的变化规律及影响因素,对上游祁连和札马什克水文站径流的研究尚显不足。

鉴于此,收集黑河上游莺落峡、札马什克和祁连

3 个水文站相关数据资料,利用趋势分析方法、突变诊断方法分析黑河上游长序列年径流量的变化特征。基于突变时间,利用双累积曲线定量评估不同驱动因素对黑河上游的影响程度,以期认识内陆河水资源变化规律,厘清径流演变机理提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黑河(98°30′—101°30′E,37°50′—42°40′N)是我国第二大内陆河,发源于祁连山北麓,地跨青海、甘肃和内蒙古三省,处于河西走廊中段^[17]。黑河流域以干流出山口水文站莺落峡以上的区域为黑河上游,河道长约 303 km,流域面积约 10 万 km²,主要地貌类型为山地,海拔 1 700~5 584 m,4 000 m 以上发育有现代冰川,平均气温不足 2℃,黑河上游径流主要来自冰川融水、积雪融水和山区降雨,年平均降水量 350 mm 左右,是径流的形成区^[18]。黑河上游分东西两支,东支八宝河,自东向西流长约 104 km,流域控制站为祁连水文站,西支野牛沟,由西向东流长约 190 km,流域控制站为札马什克水文站,东西两支汇于黄藏寺折向北流,流程 90 km 至莺落峡进入河西走廊平原为黑河(图 1)。本研究对黑河上游进行分区,以祁连水文站作为控制站的八宝河流域为Ⅰ区,以札马什克作为控制站的野牛沟流域为Ⅱ区,以八宝河和野牛沟到出口口的区间干流区域为Ⅲ区,以莺落峡作为控制站的流域为黑河上游全区(表 1)。

1.2 数据来源

本次选取黑河上游出口控制站莺落峡水文站、上游东支八宝河控制站祁连水文站和西支野牛沟控制站札马什克水文站 1968—2022 年共 55 a 实测年径流量和降水量资料,资料系列较长。其中,莺落峡水文站、祁连水文站和札马什克水文站的径流资料来

源于甘肃省张掖水文水资源勘测中心按照国家标准规范实施观测、进行整编、经过审查验收的成果,资料可靠,精度较高,可以用于各种分析、评价和科研。同时黑河上游未建有大型水利工程,各水文站自建站以来,测验断面均未改变,人类活动较少,资料满足一致性。

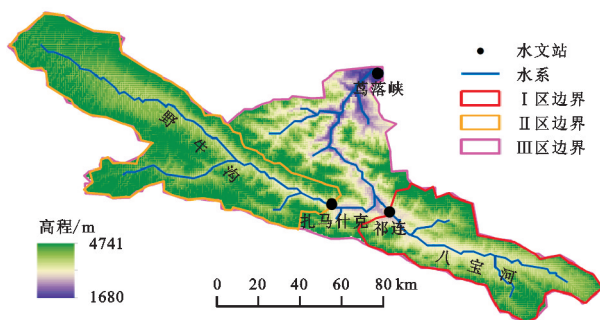


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

表1 黑河上游水文站信息

Table 1 Information of hydrological station

分区	范围	代表性水文站	时间尺度	坐标	
				东经	北纬
I区	八宝河	祁连	1968—2022	100°14′	38°12′
II区	野牛沟	札马什克	1968—2022	99°59′	38°14′
III区	区间干流	莺落峡—札马什克—祁连	1968—2022		
全区	黑河上游	莺落峡	1968—2022	100°11′	38°48′

1.3 研究方法

1.3.1 累积距平法 累积距平法用来分析水文要素变化的趋势性和阶段性,通过计算实测径流量与序列平均值的差值并进行累加,得出径流量序列差积曲线,以曲线的波动变化可以判断水文气象要素的丰平枯变化^[19]。

$$\hat{R}_i = \sum_{j=1}^i (R_j - \bar{R}) \quad (1)$$

式中: \hat{R}_i 为第*i*年的径流累积距平值; R_i 为第*i*年的径流量; \bar{R} 为多年平均径流量。

1.3.2 趋势分析方法

(1) 线性倾向估计法。线性倾向估计主要是用最小二乘法的原理建立两个变量之间的一元线性回归模型,对回归系数*k*和回归常数*b*进行估计^[19]。

$$r = b + kt \quad (2)$$

式中: r 为水文要素估计预测值; t 为时间; b 为回归常数; k 为回归系数, k 值的幅度就是序列升降的速率,即 $k > 0$ 时,说明*r*随着*t*的增加而增加,反之亦然。

(2) 滑动平均法。由于水文序列具有随机性和波动性,所以采用滑动平均法将序列中的元素进行滑动平均后,在一定程度上消除波动的影响,修正水文序列中个别值的差异性,计算公式为^[19]:

$$y_t = \frac{1}{2k+1} \sum_{j=i}^{i+k-1} x_i, i=1,2,3,\dots,n \quad (3)$$

式中: k 为单侧平滑时距,5 a滑动平均时*k*为2。

1.3.3 突变诊断方法

(1) Mann-Kendall 突变检验。Mann-Kendall 检验法可以分析序列的突变特征,根据最后得到的 UB 序列和 UF 序列的不同,决定了水文要素突变的发生时间,计算如下^[20]:

构造一个秩序列,该时间序列*X*具有*n*个样本数量:

$$\begin{cases} S_k = \sum_{i=1}^k r_i \\ r_i = \begin{cases} 0 & x_i \leq x_j \\ 1 & x_i > x_j \end{cases} \quad j=1,2,\dots,I \end{cases} \quad (4)$$

假设时间序列的随机独立性,界定统计量:

$$UF_k = \frac{s_k - E(s_k)}{\sqrt{\text{var}(s_k)}}, \quad k=1,2,\dots,n \quad (5)$$

在 $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ 相互独立时:

$$E(s_k) = \frac{n(n-1)}{4}, \quad \text{var}(s_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (6)$$

式中: $E(s_k)$, $\text{var}(s_k)$ 是累计数*s_k*的均值和方差。

$UF > 0$ 表示该序列升高, $UF < 0$ 表示该序列降低。若 UF 曲线与 UB 曲线在置信区间内存在交点,表明序列在该点发生突变。

(2) Pettitt 突变检验。Pettitt 检验是一种基于秩的非参数统计检验,该检验将一系列随机变量分成 X_1, X_2, \dots, X_t 和 $X_{t+1}, X_{t+2}, \dots, X_T$ 两组样本,统计量 U_T 定义如下^[21]:

$$U_{tT} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^T \text{sgn}(x_i - x_j) \quad (7)$$

式中: T 为时间序列总长度, $t=1,2,\dots,T-1$;最可能的变化点*T*处满足下式:

$$K_t = |U_{tT}| = \max |U_{tT}| \quad (8)$$

$$p = 2 \exp[-6K_t^2 / (T^2 + T^3)] \quad (9)$$

式中: K_t 为突变统计量; U_{tT} 为最可能突变点*T*处的 Pettitt 检验统计量; p 为显著性统计量,在给定的*a*为 0.05 置信水平上,若 $p < p_a$,在置信水平*a*上 U_T 是一个突变点。

1.3.4 归因分析方法 用双累积曲线法定量区别径流变化影响因子^[22]。以径流突变时间划分基准期和变化期,建立基准期降水—径流量双累积曲线的线性关系式:

$$\sum R = k \sum P + b \quad (10)$$

式中: $\sum R$, $\sum P$ 分别为累积径流量(10^8 m^3)、累积降水量(mm); k , b 为计算参数。

径流变化对人类活动和气候变化的响应可表示为:

$$\begin{cases} C_H = (\Delta R_H / \Delta R) \times 100\% \\ C_C = (\Delta R_C / \Delta R) \times 100\% \end{cases} \quad (11)$$

式中: C_C , C_H 分别为气候变化、人类活动对径流变化的贡献率; ΔR_C , ΔR_H 分别为气候变化和人类活动引起的径流变化量; ΔR 为基准期与变化期实测径流量的变化值。

2 结果与分析

2.1 径流系列的代表性分析

分析祁连、札马什克和莺落峡水文站的实测径流资料, 绘制黑河上游各分区历年累积距平曲线

(图 2), I 区径流量变化过程为: 1968—1979 年, 1991—1996 年, 2010—2015 年为枯水年, 1987—1990 年, 2003—2009 年, 2016—2022 年为丰水年, 1980—1986 年, 1997—2002 年为平水年。II 区径流量变化过程为: 1968—1979 年, 1990—1995 年, 2000—2006 年为枯水年, 1985—1989 年, 2007—2022 年为丰水年, 1980—1984 年, 1996—1999 年为平水年。III 区和全区径流量均经历了多个丰枯转化期, III 区径流量经历了 4 个丰水期, 4 个枯水期, 4 个平水期, 全区径流量经历了 4 个枯水期, 3 个丰水期, 2 个平水期。分析发现各分区径流量均呈现多个丰、平、枯变化过程, 可见资料的代表性较好。

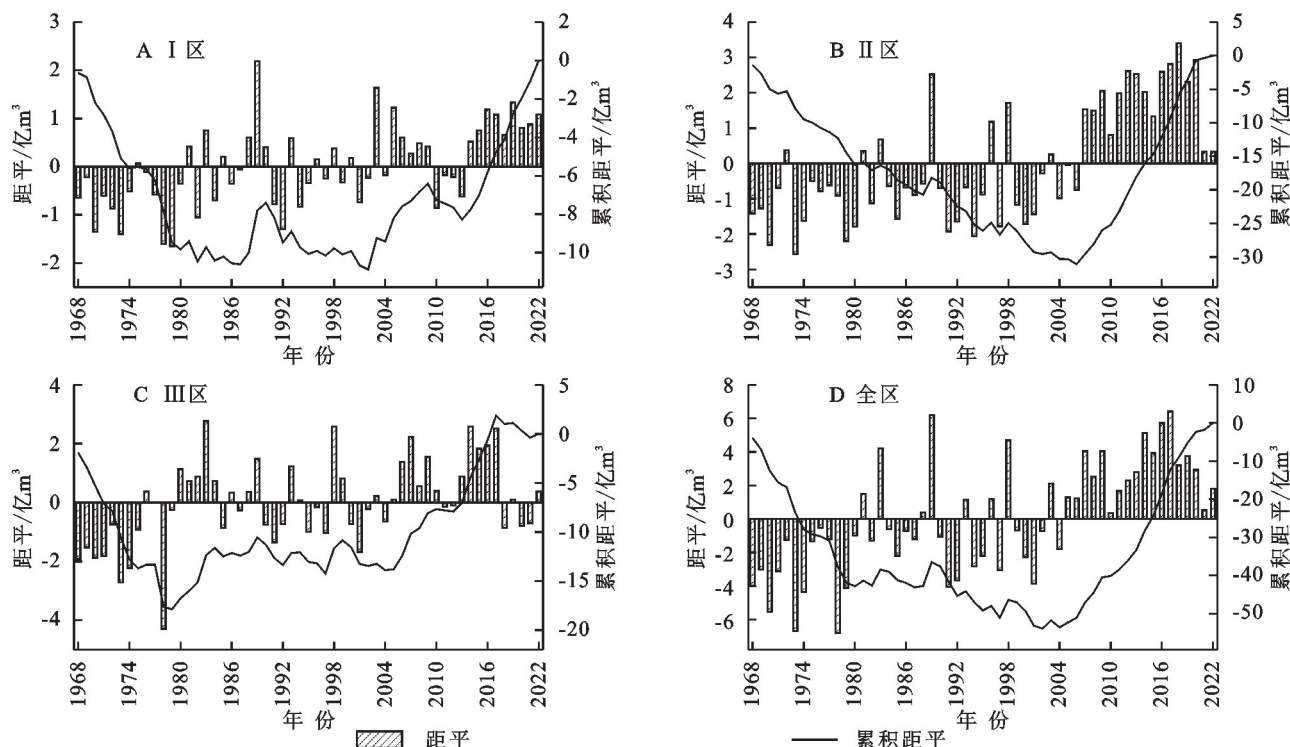


图 2 黑河上游年径流量累积距平曲线

Fig. 2 The cumulative departure curve of annual runoff in the upper reaches of Heihe River

2.2 径流量演变趋势

黑河上游各分区年径流量年际变化如图 3 所示。结合图 3 和表 2 可知, 黑河上游年径流量总体以 $1.36 \text{ 亿 m}^3/10 \text{ a}$ 的速率显著增加, 多年平均径流量为 16.90 亿 m^3 , 年径流量最大值为 23.31 亿 m^3 (2017 年), 最小值为 10.10 亿 m^3 (1978 年), 极值比为 2.31。各分区年径流量变化也均呈显著增加趋势, I 区、II 区、III 区年径流量分别以 $0.29 \text{ 亿 m}^3/10 \text{ a}$, $0.69 \text{ 亿 m}^3/10 \text{ a}$, $0.39 \text{ 亿 m}^3/10 \text{ a}$ 的速率增加, 1968—2022 年 I 区、II 区、III 区多年平均径流量分别为 4.75 亿 m^3 , 7.83 亿 m^3 , 4.32 亿 m^3 , 对于流域径流量的贡献率分别为 28.11%, 46.31%, 25.58%, 可见 II 区对全区径流量贡献率最大, III 区最小。

2.3 径流量突变诊断

黑河上游各分区年径流量均发生了突变, 其中 I

区年径流量突变检验的 UF 和 UB 曲线相交于 2002 年、2009 年和 2010 年, 只有 2002 年在置信水平 0.05 相应的置信区间, 因此年径流量突变发生在 2002 年 (图 4A); II 区年径流统计量曲线 UF 和 UB 相交于 2006 年, 且交点在置信区间, 年径流量在 2006 年发生了突变 (图 4B); III 区年径流量的 UF 和 UB 曲线相交于 1976 年和 1979 年, 年径流量突变时间可能为 1976 年和 1979 年 (图 4C); 全区年径流量的 UF 和 UB 曲线相交于 2002 年, 且交点在置信区间, 表明年径流量在 2002 年发生突变 (图 4D)。结合图 5 进一步确定, 黑河上游年径流量在 2002 年发生了突变, I 区、II 区、III 区年径流量分别在 2002 年、2006 年、1979 年发生了突变。

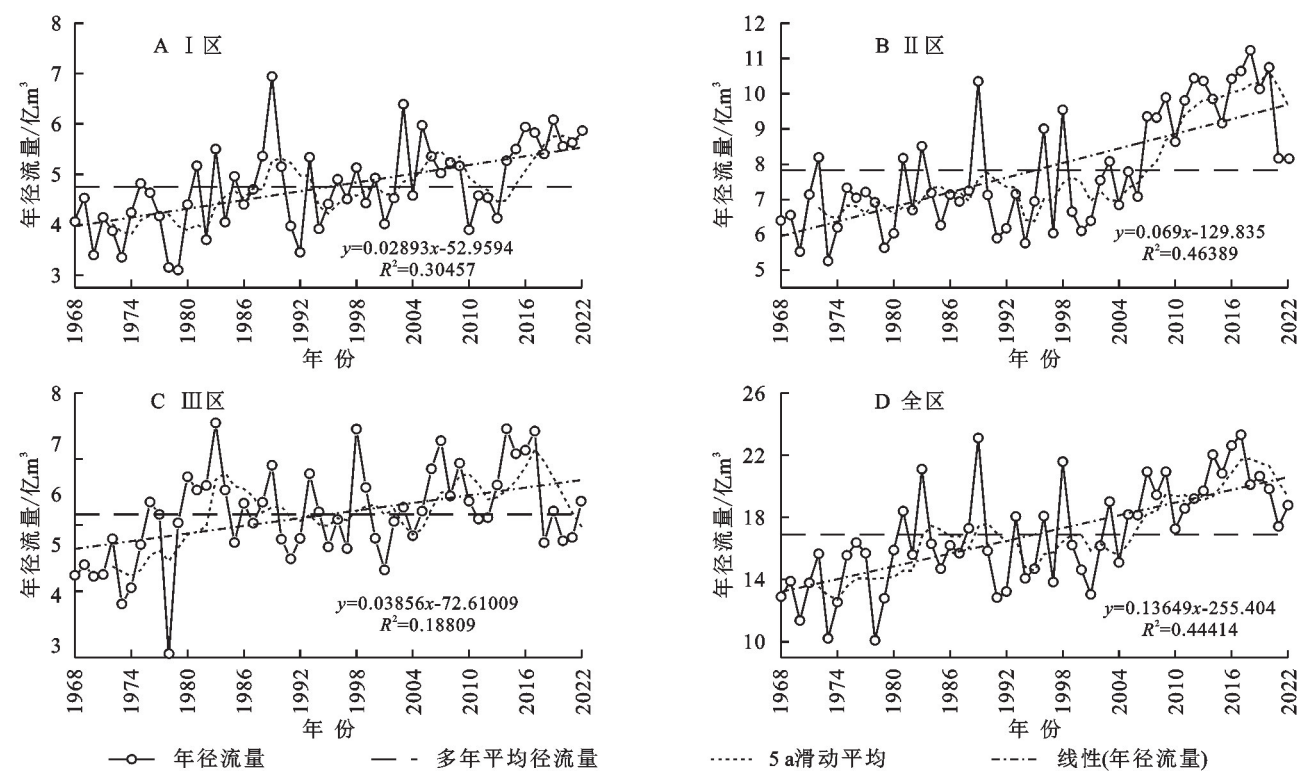


图 3 黑河上游年径流量趋势变化图

Fig. 3 Trend diagram of annual runoff in the upper reaches of Heihe River

表 2 黑河上游年径流量趋势检验结果

Table 2 Test results of annual runoff trend in the upper reaches of Heihe River

年径 流量	Spearman 秩次检验法			Kendall 检验法			Z 检验法			趋势 结果
	统计值 T	临界值	显著性	统计值 U	临界值	显著性	统计值 Z	临界值	显著性	
I 区	5.13	2.01	显著	4.48	1.96	显著	0.42	0.18	显著	显著增加
II 区	5.90	2.01	显著	4.95	1.96	显著	0.46	0.18	显著	显著增加
III 区	3.34	2.01	显著	3.17	1.96	显著	0.29	0.18	显著	显著增加
全区	6.54	2.01	显著	5.25	1.96	显著	0.49	0.18	显著	显著增加

由表 3 可知,黑河上游和各分区突变后多年平均径流量均大于突变前多年平均径流量,年径流量均经历了由少到多的突变,I 区、II 区、III 区和全区年径流量平均值突变后较突变前分别增加 41.76%,29.78%,67.49%和 29.53%。III 区突变后年径流量的变差系数大于突变前,突变后年径流量年际变化大,其他各区突变后年径流量的变差系数均小于突变前,表明突变后年径流量年际差异性变小。

2.4 降水量演变趋势

图 6 是黑河上游年降水量变化趋势,由图 6 可知,黑河上游年降水量总体以 4.56 mm/10 a 的速率呈不显著增加趋势,多年平均降水量为 364.40 mm,年降水量最大值为 506.80 mm(1998 年),年降水量最小值为 279.72 mm(1970 年),极值比为 1.81。I 区年降水量总体以 22.19 mm/10 a 的速率呈显著增加趋势,II 区年降水量总体以 5.12 mm/10 a 的速率呈不显著减少趋势,1968—2022 年 I 区和 II 区的多年平均降水量分别为 394.25 mm 和 442.56 mm,I 区和 II 区年降水量最大

值均发生在 1998 年,分别为 563.00 mm 和 624.50 mm, I 区年降水量最小值为 250.11 mm(1970 年), II 区年降水量最小值为 300.20 mm(2010 年)。

2.5 径流量归因分析

为探讨驱动因素对黑河上游径流量演变的影响,选取对黑河径流量变化造成影响的降水和人类活动进行定量分析。根据黑河上游年径流量变化趋势分析和突变检验,分别以黑河上游各分区年径流量突变时间为界限,划分基准期和变化期,I 区和全区基准期和变化期分别为 1968—2002 年和 2003—2022 年,II 区基准期和变化期分别为 1968—2006 年和 2007—2022 年,基于 1968—2022 年黑河上游各分区径流量和降水量的双累积曲线(图 7),结合表 4 可知,I 区降水引起径流量增加 1.15 亿 m³,贡献率为 63.89%,人类活动引起径流量增加 0.65 亿 m³,贡献率为 36.11%;II 区降水引起径流量增加 1.11 亿 m³,贡献率为 55.22%,人类活动引起径流量增加 0.9 亿 m³,贡献率为 44.78%;黑河上游全区降水引起径流量增加 2.30 亿 m³,贡献率为 53.49%,人类活动引

起径流量增加 2.00 亿 m^3 , 贡献率为 46.51%。整体来

看, 降水是黑河上游径流变化的主要影响因素。

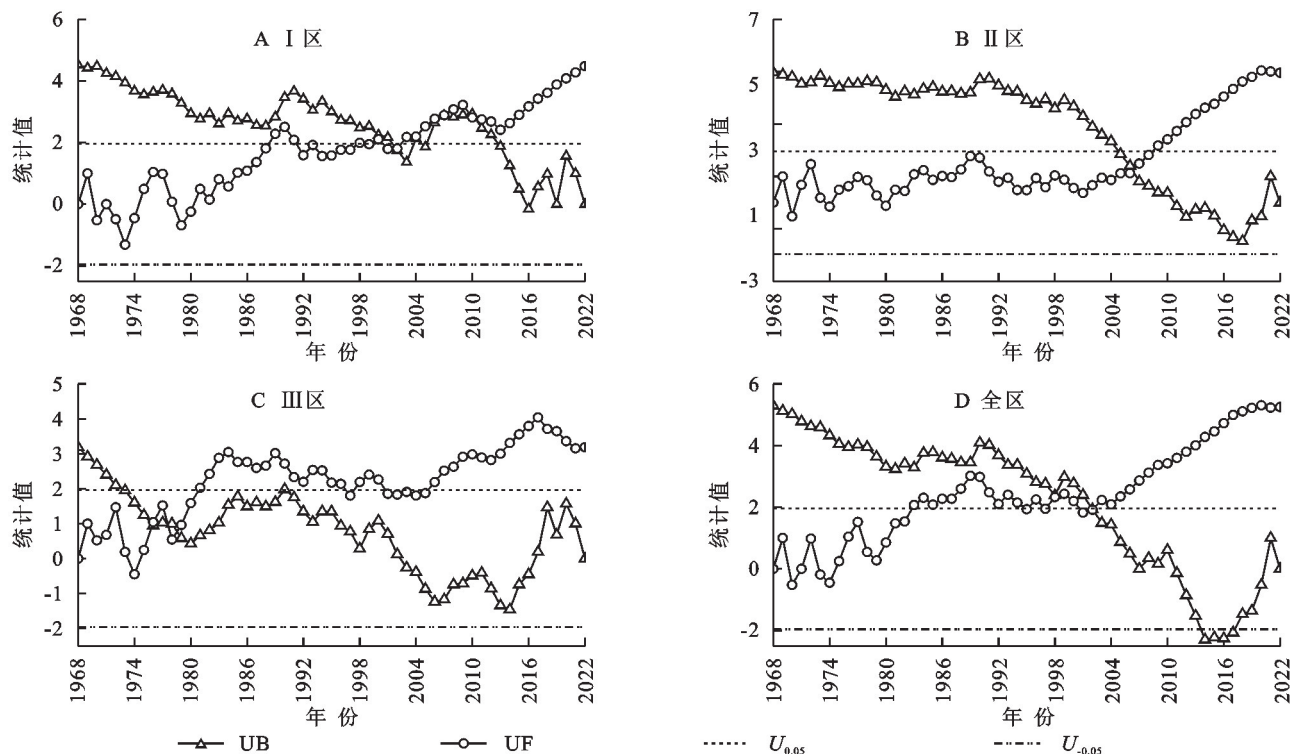


图 4 黑河上游年径流量 Mann-Kendall 突变检验

Fig. 4 Mann-Kendall mutation test of annual runoff in the upper reaches of Heihe River

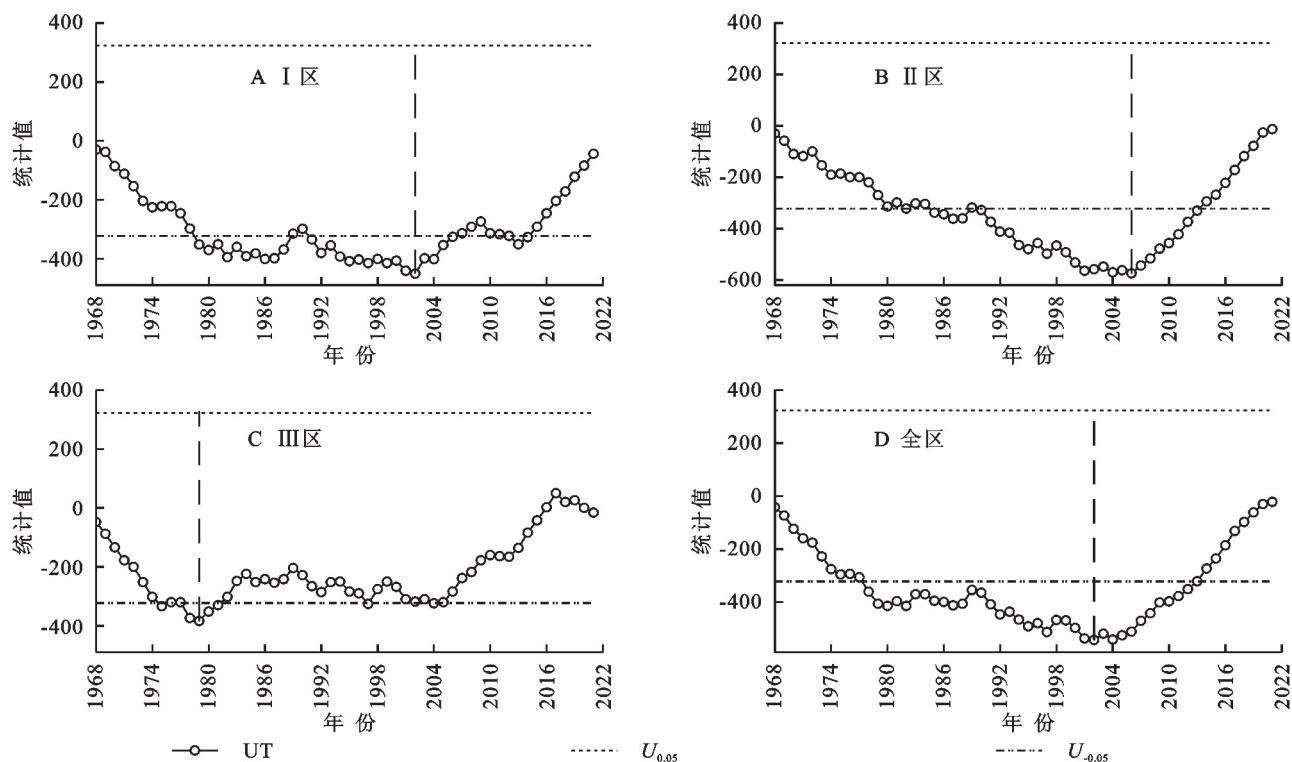


图 5 黑河上游年径流量 Pettitt 突变检验

Fig. 5 Pettitt mutation test of annual runoff in the upper reaches of Heihe River

3 讨论

3.1 以往研究中的径流变化趋势

不同的研究其径流变化趋势不同, 图 8 是黑河上

游径流演变趋势研究的统计结果。根据前文研究结果, I 区年径流量的增加率为 1.18 mm/a, 这与李云武等^[23]的研究结果 0.98 mm/a 差距较小, 主要原因是本研究与其研究时段接近一致; II 区、III 区和全区

年径流量的增加率分别为 1.50 mm/a,1.31 mm/a, Cong^[25]、张鹏^[26]、彭莉斌^[27]等的较长,导致其年径流 1.36 mm/a,这 3 个区的研究时段序列相较 Cai^[24]、量的增加率差距较大。

表 3 黑河上游年径流量突变前后统计表

黑河 流域	突变 年份	多年平均 径流量/亿 m ³	突变前		突变后	
			均值/亿 m ³	变差系数	均值/亿 m ³	变差系数
I 区	2002	4.75	4.31	1.01	6.11	0.55
II 区	2006	7.83	6.75	0.95	8.76	0.36
III 区	1979	4.32	2.83	1.52	4.74	1.59
全区	2002	16.90	14.56	1.09	18.86	0.43

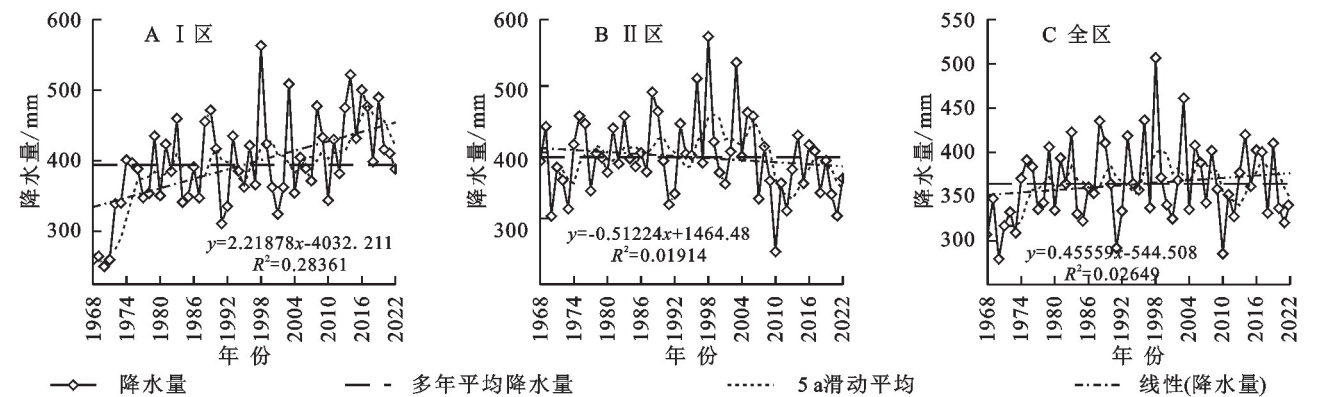


图 6 黑河上游年降水量演变趋势

Fig. 6 The changing trend of precipitation in the upper reaches of Heihe River

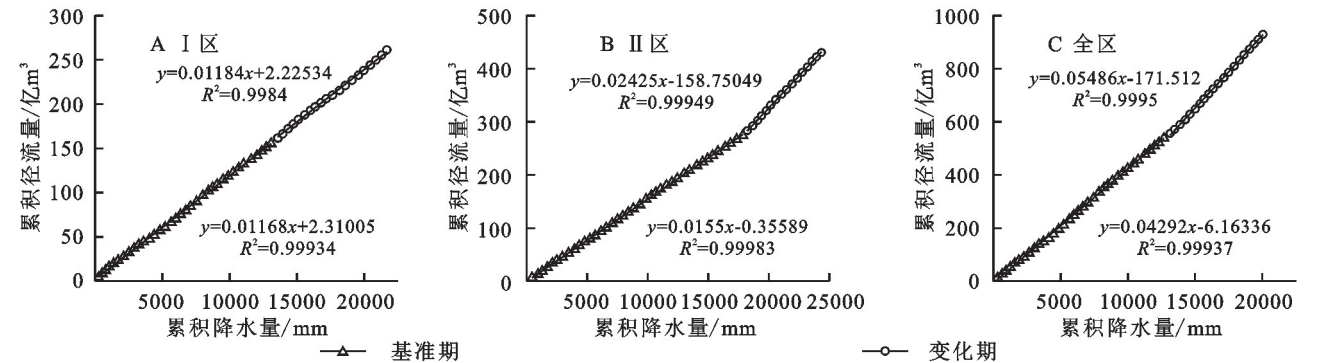


图 7 黑河上游径流—降水双累积曲线

Fig. 7 Bicumulative runoff-precipitation curves in the upper reaches of Heihe River

表 4 径流变化原因量化结果

Table 4 The quantification of the causes of runoff changes

黑河 上游	径流量及其变化				降水		人类活动	
	突变前	突变后	突变后	变化	影响量/	贡献率/	影响量/	贡献率/
	实测值/亿 m ³	实测值/亿 m ³	计算值/亿 m ³	总量/亿 m ³	亿 m ³	%	亿 m ³	%
I 区	4.31	6.11	5.46	1.80	1.15	63.89	0.65	36.11
II 区	6.75	8.76	7.86	2.01	1.11	55.22	0.90	44.78
全区	14.56	18.86	16.86	4.3	2.30	53.49	2.00	46.51

3.2 以往研究中的径流突变点及贡献率

由图 9 和图 10 可知,前人对径流突变点及贡献率的研究主要集中于黑河上游^[26-43],针对分区的研究较少,其研究时段也各不相同,近几年的研究主要分布在 1945—2020 年、1954—2020 年和 1960—2018 年等,而本研究将研究时间序列延长至 2022 年,其中

I 区、II 区、III 区和全区的径流突变点分别为 2002 年、2006 年、1979 年和 2002 年,这与聂晶等^[28]的研究结果较为一致。通过对径流量的归因分析得到降水是黑河上游径流量变化的主要因素,这与陈吉平^[15]、Shang^[29]等的研究结果一致。综上,本研究具有一定的可靠度。

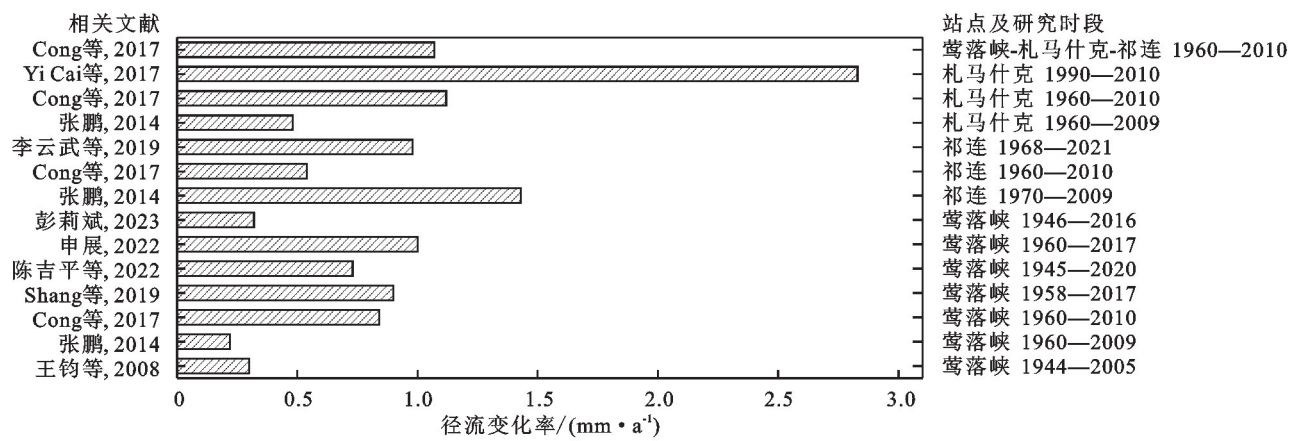


图 8 以往研究中的径流变化趋势

Fig. 8 Trends in runoff from previous studies

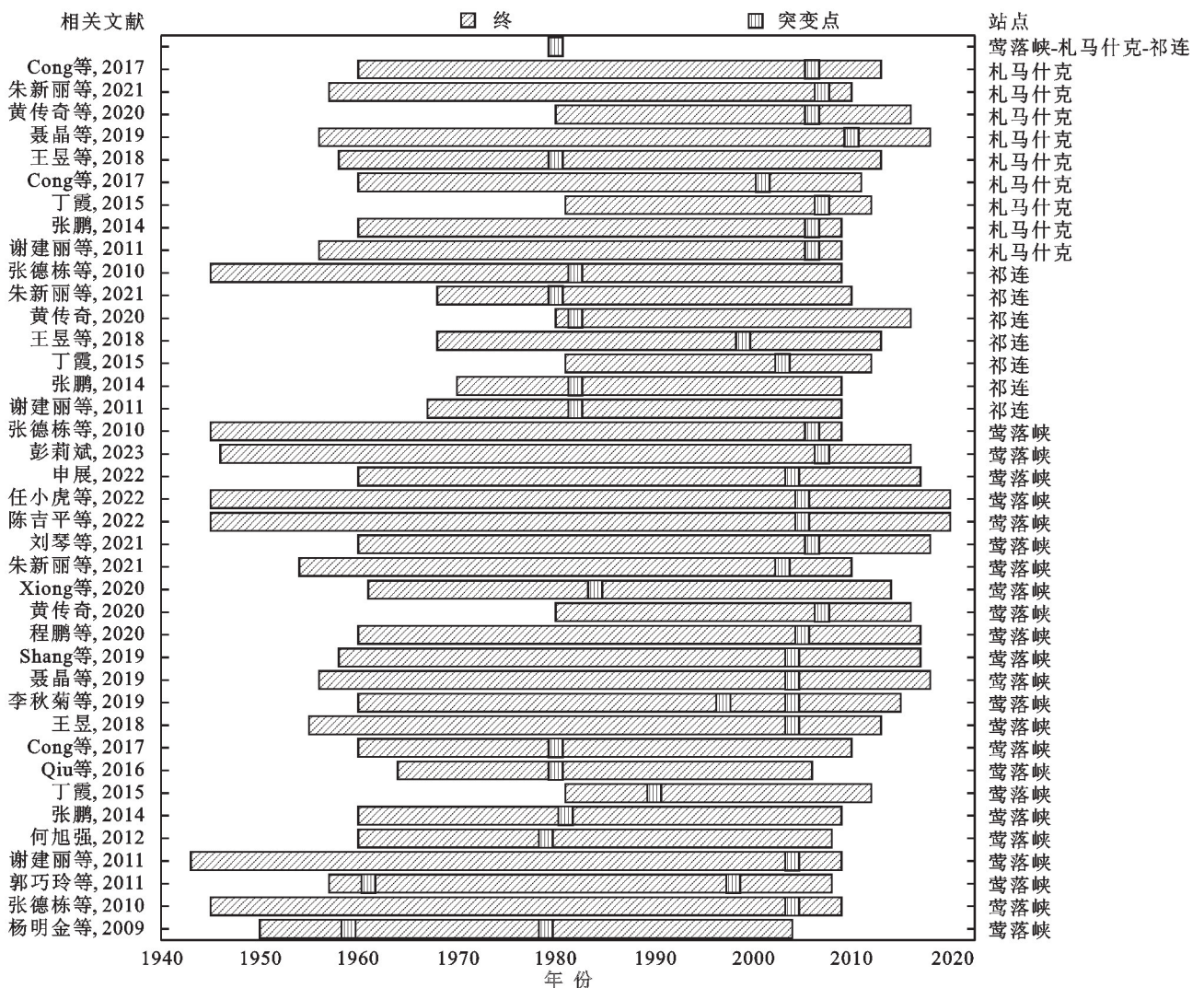


图 9 以往研究中的径流突变点

Fig. 9 Runoff mutation sites from previous studies

3.3 降水变化对径流的影响

由以上研究可知,黑河上游的年径流量呈增加趋势,且降水是影响其变化的主要因素。由图 11 可知,黑河上游径流量与降水量呈正相关关系,变化趋势基本一致。相较于变化时期,基准时期的相关性较好。

值得注意的一点是,尽管Ⅰ区、Ⅱ区和全区径流量呈增加趋势,但伴随着降水变化,这种趋势经历从基准期到变化期减小的过程。相对于基准期,变化期径流对降水的敏感性减弱,表明随着降水对径流变化的影响程度正在逐渐减小。

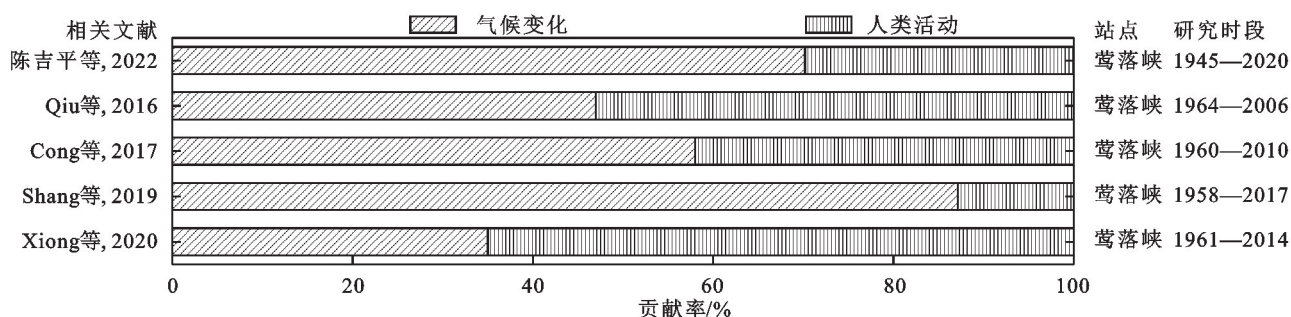


图10 以往研究中气候变化和人类活动对径流的贡献率

Fig. 10 Responses of runoff changes to climatic and human factors in previous studies

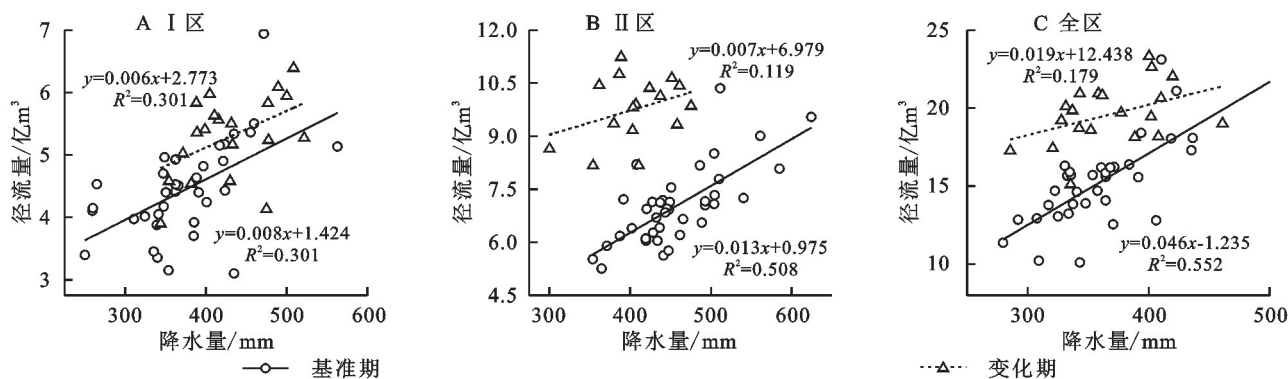


图11 黑河上游径流与降水相关性

Fig. 11 Runoff and precipitation correlations in the upper reaches of Heihe River

4 结论

(1) 黑河上游年径流量变化均呈显著增加趋势。I区、II区、III区和全区年径流量分别以0.29亿m³/10a, 0.69亿m³/10a, 0.39亿m³/10a, 1.36亿m³/10a的速率增加, I区、II区、III区对于流域径流量的贡献率分别为28.11%, 46.31%, 25.58%, II区对全区径流量贡献率最大, III区最小。

(2) II区、III区和全区的年径流量分别在2002年、2006年、1979年和2002年发生了由少到多的突变, 突变后年径流量平均值较突变前分别增加41.76%, 29.78%, 67.49%和29.53%, 这与降水增加有关。

(3) 径流归因分析, 发现降水对I区、II区和全区径流量变化的贡献率分别为63.89%, 55.22%, 53.89%。整体来看, 降水是黑河上游径流变化的主要影响因素。

参考文献(References):

- [1] 李晶, 刘时银, 张世强, 等. 中国西北山区融雪径流模拟研究回顾与展望[J]. 冰川冻土, 2022, 44(3): 1029-1040.
Li J, Liu S Y, Zhang S Q, et al. Review on snowmelt runoff simulation in mountain regions, Northwest China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(3): 1029-1040.
- [2] 徐宗学, 班春广, 张瑞. 我国主要河川径流演变规律与归因及其区域特征[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(1): 1-8.
Xu Z X, Ban C G, Zhang R. Evolution law, attribution

and regional characteristics of runoff for major rivers in China[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(1): 1-8.

- [3] 杨丽英, 赵学民, 刘伟. 全国七大流域设计径流变化分析及成果修订[J]. 水文, 2018, 38(6): 84-88.
Yang L Y, Zhao X M, Liu W. Analysis and revision of design runoff of seven major river basins in China[J]. Journal of China Hydrology, 2018, 38(6): 84-88.
- [5] 韩雁, 张士锋. 海河流域径流变异特征及其影响因素研究[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(1): 7-13.
Han Y, Zhang S F. Characteristics of runoff variations and their influencing factor in Haihe River Basin [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2021, 32(1): 7-13.
- [6] 田蕾, 王随继. 近60年来辽河流域径流量变化及其主控因素分析[J]. 水土保持研究, 2018, 25(1): 153-159.
Tian L, Wang S J. Analysis of the runoff change and main influencing factors in the Liaohe River Basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(1): 153-159.
- [7] 叶婷, 石朋, 钟华, 等. 基于Budyko假设和微分方程的淮河上中游径流变化归因分析[J]. 河海大学学报: 哲学社会科学版, 2022, 50(5): 25-32.
Ye T, Shi P, Zhong H, et al. Attribution analysis of runoff change in the upper and middle Huaihe River based on Budyko hypothesis and differential equation [J]. Journal of Hohai University: Philosophy and Social Sciences, 2022, 50(5): 25-32.
- [8] 杨远东, 王永红, 蔡斯龙, 等. 1960—2017年珠江流域下

- 游径流年际与年内变化特征[J].水土保持通报,2019,39(5):23-31.
- Yang Y D, Wang Y H, Cai S L, et al. Interannual and intra-annual variation characteristics of runoff in downstream areas of Pearl River Basin during 1960—2017[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019,39(5):23-31.
- [9] 周祖昊,刘佳嘉,严子奇,等.黄河流域天然河川径流量演变归因分析[J].水科学进展,2022,33(1):27-37.
- Zhou Z H, Liu J J, Yan Z Q, et al. Attribution analysis of the natural runoff evolution in the Yellow River basin [J]. Advances in Water Science, 2022,33(1):27-37.
- [10] 文广超,王文科,段磊,等.青海柴达木盆地巴音河上游径流量对气候变化和人类活动的响应[J].冰川冻土, 2018,40(1):136-144.
- Wen G C, Wang W K, Duan L, et al. Response of runoff to climate change and human activity in the upper reaches of the Bayin River, Qaidam Basin, Qinghai Province [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018,40(1):136-144.
- [11] 程建忠,陆志翔,邹松兵,等.黑河干流上中游径流变化及其原因分析[J].冰川冻土,2017,39(1):123-129.
- Cheng J Z, Lu Z X, Zou S B, et al. Variation of the runoff in the upper and middle reaches of the main Heihe River and its causes[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017,39(1):123-129.
- [12] 席海潮,解阳阳,刘赛艳,等.径流变异对黑河流域上游径流统计特征与频率分析的影响[J].灌溉排水学报, 2023,42(7):75-85.
- Xi H C, Xie Y Y, Liu S Y, et al. Runoff variation and its effect on statistical characteristics and frequency of runoff in the upper reaches of Heihe River Basin[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023,42(7):75-85.
- [13] 梁鹏飞,辛惠娟,李宗省,等.祁连山黑河径流变化特征及影响因素研究[J].干旱区地理,2022,45(5):1460-1471.
- Liang P F, Xin H J, Li Z X, et al. Runoff variation characteristics and influencing factors in the Heihe River Basin in the Qilian Mountains[J]. Arid Land Geography, 2022,45(5):1460-1471.
- [14] 丁霞,牛最荣,黄维东,等.气候变化对黑河上游径流量的影响研究[J].水利水电技术,2014,45(8):23-26.
- Ding X, Niu Z R, Huang W D, et al. Study on influence of climatic variation on runoff of Upper Heihe River[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2014, 45(8):23-26.
- [15] 陈吉平,牛最荣,王启优,等.黑河上游径流演变规律及其变化原因分析[J].甘肃农业大学学报,2022,57(6): 148-154,163.
- Chen J P, Niu Z R, Wang Q Y, et al. Analysis of the runoff development law and its causes in the upper reaches of the Heihe River[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2022,57(6):148-154,163.
- [16] 郭阳,张廷军,曹琳,等.黑河上游地表冻融指数与径流关系[J].水土保持通报,2018,38(3):222-227.
- Guo Y, Zhang T J, Cao L, et al. Relationship between surface freezing/thawing index and runoff in upper reaches of Heihe River[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018,38(3):222-227.
- [17] 王昱,连运涛,范严伟,等.黑河流域上游水沙变化特征及成因分析[J].水土保持通报,2018,38(2):1-7.
- Wang Y, Lian Y T, Fan Y W, et al. Variations of runoff and sediment load and its causes in upper reaches of Heihe River Basin[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018,38(2):1-7.
- [18] 陈虹举,杨建平,谭春萍.基于概率分布法的典型内陆河流域径流未来变化[J].冰川冻土,2020,42(4):1299-1307.
- Chen H J, Yang J P, Tan C P. Estimating runoff variation in the future in a typical inland river based on the probability distribution method[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020,42(4):1299-1307.
- [19] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,1999.
- Wei F Y. Modern Climate Statistical Diagnosis and Prediction Technology[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1999.
- [20] Mann H B. Nonparametric tests against trend [J]. Econometrica, 1945,13(3):245.
- [21] Pettitt A N. A non-parametric approach to the change-point problem[J]. Applied Statistics, 1979,28(2):126.
- [22] 穆兴民,张秀勤,高鹏,等.双累积曲线方法理论及在水文气象领域应用中应注意的问题[J].水文,2010,30(4):47-51.
- Mu X M, Zhang X Q, Gao P, et al. Theory of double mass curves and its applications in hydrology and meteorology[J]. Journal of China Hydrology, 2010,30(4):47-51.
- [23] 李云武,崔力超,王冠星.黑河上游八宝河流域径流变化及其对气候变化的响应[J].水文,2019,39(2):39-43.
- Li Y W, Cui L C, Wang G X. Runoff variations in responding to climate change in babaohe river basin of upper Heihe River[J]. Journal of China Hydrology, 2019,39(2):39-43.
- [24] Cai Y, Huang W R, Teng F, et al. Effects of changing climate on glacier shrinkage and river flow in the upper Heihe River Basin, China [J]. Journal of Coastal Research, 2014,68:121-128.
- [25] Cong Z T, Shahid M, Zhang D W, et al. Attribution of runoff change in the alpine basin: A case study of the Heihe Upstream Basin, China [J]. Hydrological Sciences Journal, 2017,62(6):1013-1028.
- [26] 张鹏.黑河上游水文特性分析研究[D].兰州:兰州大学,2014.
- Zhang P. Hydrological characteristics analysis in the

- upstream of Heihe river [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014.
- [27] 彭莉斌. 祁连山北坡山区径流变化及对环境响应研究 [D]. 兰州: 西北师范大学, 2023.
- Peng L B. Research on runoff changes and responses to environmental factors in mountainous areas in northern Qilian Mountains [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2023.
- [28] 聂晶, 吴彦昭. 甘肃省黑河干流径流多年变化特性研究 [J]. 甘肃水利水电技术, 2019, 55(5): 10-12, 24.
- Nie J, Wu Y Z. Study on the characteristics of multi-year changes in runoff from the Black River dry stream in Gansu Province [J]. Gansu Water Resources and Hydropower Technology, 2019, 55(5): 10-12, 24.
- [29] Shang X X, Jiang X H, Jia R N, et al. Land use and climate change effects on surface runoff variations in the upper Heihe River Basin [J]. Water, 2019, 11(2): 344.
- [30] 朱新丽, 李彦彬, 李红星, 等. 基于小波多孔算法的黑河径流变异规律分析 [J]. 水利水电技术, 2021, 52(10): 46-58.
- Zhu X L, Li Y B, Li H X, et al. Analysis of Hei River runoff variation law based on A'tuous algorithm [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(10): 46-58.
- [31] 黄传奇. 基于 Budyko 模型的黑河上游多年冻土退化对径流影响定量研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- Huang C Q. Quantitative research on the influence of permafrost degradation on runoff in upper reaches of Heihe based on Budyko model [D]. Beijing: China University of Geosciences(Bei Jing), 2020.
- [32] 谢建丽, 张德栋, 刘圆圆. 祁连山区主要河流径流演变及趋势预测分析 [J]. 水文, 2011, 31(5): 88-91.
- Xie J L, Zhang D D, Liu Y Y. Forecasting runoff change trend of main rivers in Qilian Mountain Area [J]. Journal of China Hydrology, 2011, 31(5): 88-91.
- [33] 张德栋, 王毓森. 黑河干支流径流量演变趋势分析 [J]. 甘肃水利水电技术, 2010, 46(10): 3-4, 21.
- Zhang D D, Wang Y S. Trend analysis of the evolution of the runoff of the dry tributaries of the Heihe River [J]. Gansu Water Resources and Hydropower Technology, 2010, 46(10): 3-4, 21.
- [34] 任小虎, 朱咏, 郑洋, 等. 梯级水电站对黑河出山口径流及洪水过程的影响 [J]. 长江科学院院报, 2022, 39(10): 31-37.
- Ren X H, Zhu Y, Zheng Y, et al. Impacts of cascade hydropower stations on runoff and flood process at mountain exit of Heihe River [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39(10): 31-37.
- [35] 刘琴, 沈天成, 程鹏. 1960—2018 年黑河上游径流量变化特征分析 [J]. 甘肃科学学报, 2021, 33(4): 26-33.
- Liu Q, Shen T C, Cheng P. Analysis on the characteristics of runoff variation in the upper Heihe from 1960 to 2018 [J]. Journal of Gansu Sciences, 2021, 33(4): 26-33.
- [36] 李秋菊, 李占玲, 王杰. 黑河流域上游径流变化及其归因分析 [J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(3): 31-39.
- Li Q J, Li Z L, Wang J. Variation and attribution of runoff over the upper reaches of Heihe River Basin [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(3): 31-39.
- [37] 郭巧玲, 杨云松, 鲁学纲. 黑河流域 1957—2008 年径流变化特性分析 [J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(3): 77-81.
- Guo Q L, Yang Y S, Lu X G. Analysis of variation character of annual runoff in Heihe River Basin from 1957 to 2008 [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2011, 22(3): 77-81.
- [38] 杨明金, 张勃, 王海青, 等. 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 M J, Zhang B, Wang H Q, et al. The study on the change of mountainous runoff in Heihe River Basin from 1950 to 2004 [J]. Resources Science, 2009, 31(3): 413-419.
- [39] 申展. 基于 SWAT 模型的黑河绿洲区径流模拟与变化分析 [D]. 西安: 西安科技大学, 2022.
- Shen Z. Simulation analysis of runoff change in Heihe oasis area based on SWAT model [D]. Xian: Xi'an University of Science and Technology, 2022.
- [40] 王钧, 蒙吉军. 黑河流域近 60 年来径流量变化及影响因素 [J]. 地理科学, 2008, 28(1): 83-88.
- Wang J, Meng J J. Characteristics and Tendencies of Annual Runoff Variations in the Heihe River Basin During the Past 60 years [J]. Scientia Geographica Sinica, 2008, 28(1): 83-88.
- [41] 何旭强, 张勃, 孙力炜, 等. 气候变化和人类活动对黑河上中游径流量变化的贡献率 [J]. 生态学杂志, 2012, 31(11): 2884-2890.
- He X Q, Zhang B, Sun L W, et al. Contribution rates of climate change and human activity on the runoff in upper and middle reaches of Heihe River Basin [J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(11): 2884-2890.
- [42] Qiu L, Peng D Z, Xu Z X, et al. Identification of the impacts of climate changes and human activities on runoff in the upper and middle reaches of the Heihe River Basin, China [J]. Journal of Water and Climate Change, 2016, 7: 251-262.
- [43] Xiong M L, Huang C S, Yang T. Assessing the impacts of climate change and land use/cover change on runoff based on improved budyko framework models considering arbitrary partition of the impacts [J]. Water, 2020, 12(6): 1612.