

甘肃省白龙江径流演变特征及归因分析

李亚鹏¹, 张文睿², 孙栋元², 李斌¹, 陈学林³, 高国琰²

(1.甘肃省农村饮水安全管理办公室, 甘肃 兰州 730000; 2.甘肃农业大学
水利水电工程学院, 甘肃 兰州 730070; 3.甘肃省陇南水文水资源勘测中心, 甘肃 陇南 742500)

摘要: [目的] 综合分析甘肃白龙江径流量突变性及持续性, 定量解析气候与人类活动对年径流量变化的贡献率, 旨在为白龙江流域水资源规划与管理提供理论依据。[方法] 基于白龙江流域 1961—2021 年白云站、舟曲站、武都站和碧口站 4 个水文站逐年、月降雨量和径流量数据, 采用 Mann-Kendall 趋势、滑动 T 检验、R/S 分析和双累积曲线等方法对白龙江径流量演变特征进行研究及归因分析。[结果] ①白龙江各站年径流量呈现不同程度减小趋势, 且减少率从上游到下游呈增大趋势(碧口站 $[-3.07 \times 10^8 \text{ m}^3 / (10 \text{ a})]$ > 武都站 $[-1.49 \times 10^8 \text{ m}^3 / (10 \text{ a})]$ > 舟曲站 $[-4.20 \times 10^7 \text{ m}^3 / (10 \text{ a})]$ > 白云站 $[-3.40 \times 10^7 \text{ m}^3 / (10 \text{ a})]$ 的线性倾向率)。②白龙江上游最大月径流量发生在 9 月, 中下游发生在 7 月, 武都站年内径流极值比最大。③流域径流量突变点主要发生在 1969 年和 1994 年, 所有站两次突变径流变化率均为负值, 即突变前径流量高于多年平均值, 突变后相反。④Hurst 指数(H)表明白龙江中下游未来一段时间流域径流量将持续下降($H=0.53 \sim 0.77$)。⑤气候变化对流域径流量减小的贡献率为 94.85%, 人类活动影响的贡献率为 5.15%。[结论] 白龙江流域发生突变以后径流产生更为显著的下降趋势, 且未来持续此趋势。

关键词: 白龙江; 径流量; 趋势性; 归因分析; 甘肃省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)02-0232-09

中图分类号: P333

文献参数: 李亚鹏, 张文睿, 孙栋元, 等. 甘肃省白龙江径流演变特征及归因分析[J]. 水土保持通报, 2025, 45(2): 232-240. Li Yapeng, Zhang Wenrui, Sun Dongyuan, et al. Runoff evolution characteristics and attribution analysis of Bailong River in Gansu Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(2): 232-240. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.02.024; CSTR:32312.14.stbctb.2025.02.024.

Runoff evolution characteristics and attribution analysis of Bailong River in Gansu Province

Li Yapeng¹, Zhang Wenrui², Sun Dongyuan², Li Bin¹, Chen Xuelin³, Gao Guoyan²

(1.Gansu Provincial Rural Drinking Water Safety Management Office, Lanzhou, Gansu 730000, China;

2.College of Water Resources and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu

730070, China; 3.Gansu Longnan Hydrology and Water Resources Survey Center, Longnan, Gansu 742500, China)

Abstract: [Objective] The variability and persistence of runoff in the Bailong River, Gansu Province were comprehensively analyzed, and the contribution rates of climate change and human activities to annual runoff variations were analyzed quantitatively, in order to provide a theoretical basis for water resources planning and management in the Bailong River basin. [Methods] Based on annual and monthly rainfall and runoff data from Baiyun, Zhouqu, Wudu, and Bikou Stations in the Bailong River basin from 1961 to 2021, the Mann-Kendall trend test, sliding T-test, R/S analysis, and double cumulative curve method were employed to examine the evolution characteristics of runoff and identify the driving factors behind these changes. [Results] ① The annual runoff at Bailong River stations exhibited a declining trend to varying degrees, with runoff losses increasing from upstream to downstream. The linear tendency rates of runoff decline were Bikou

收稿日期: 2024-07-08

修回日期: 2024-12-26

采用日期: 2024-12-27

资助项目: 甘肃省高等学校青年博士基金项目“疏勒河流域社会生态水文演变过程研究”(2022QB-070); 甘肃省省级生态文明建设重点研发专项(24YFFF002); 甘肃省水利科学试验研究与技术推广项目(23GSLK092); 西汉水流域水文特性研究(甘水科外发[2017]76号)

第一作者: 李亚鹏(1977—), 女(汉族), 甘肃省武威市人, 高级工程师, 主要从事水文水资源分析评价、农村供水工程等方面研究和管理工
作。Email: 1145257743@qq.com。

通信作者: 孙栋元(1978—), 男(汉族), 甘肃省民乐县人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事水文水资源与干旱区水土资源方面的教学和科研工作。Email: sundy@gsau.edu.cn。

station $[-3.07 \times 10^8 \text{ m}^3 / (10 \text{ a})] > \text{Wudu station } [-1.49 \times 10^8 \text{ m}^3 / (10 \text{ a})] > \text{Zhouqu station } [-4.20 \times 10^7 \text{ m}^3 / (10 \text{ a})] > \text{Baiyun station } [-3.40 \times 10^7 \text{ m}^3 / (10 \text{ a})]$. ② The maximum monthly runoff in the upper reaches of the Bailong River occurred in September, whereas in the middle and lower reaches, it peaked in July. Wudu station exhibited the highest extreme ratio of annual maximum runoff. ③ Abrupt change points in runoff primarily occurred in 1969 and 1994, with negative change rates at all stations. This indicates that before the abrupt change, runoff was higher than the annual average, whereas after the abrupt change, it was lower. ④ The Hurst index ($H=0.53 \sim 0.77$) suggests that runoff in the middle and lower reaches of the Bailong River will continue to decline in the future. ⑤ Climate change contributed 94.85% to the reduction in watershed runoff, while human activities accounted for 5.15%. [Conclusion] The runoff in the Bailong River basin has shown a significant downward trend following abrupt changes, and this trend is expected to persist in the future.

Keywords: Bailong River; runoff volume; tendency; attribution analysis; Gansu Province

径流作为水资源的核心组成部分和主要表现形式,对生态环境和社会经济的可持续发展带来重要影响^[1]。气候变化和人类活动共同作用于河川径流,使其发生显著变化,势必给区域水资源管理带来了严峻挑战。为此深入分析径流变化特征,有助于深刻理解地表水资源变化规律,进而为流域水资源综合管理、合理开发利用以及生态环境保护提供有力的科学支撑^[2]。

国内外学者关于径流演变方面开展了大量研究,主要包括径流演变特征^[3]、归因分析、变化环境下情景假设研究^[4-5]、模拟预测演变趋势^[6] 4 个方面。而关于径流归因方面,温得平等^[7]对大通河径流进行归因分析,对比了弹性系数法和累积量斜率变化率法对径流变化的影响;孙月等^[8]采用双累积曲线法定量研究降水和人类活动对开都河径流变化的贡献量。

白龙江流域甘肃段地处甘肃东南部,是青藏高原东部边缘的典型地形气候过渡带,具备一系列独特的地质和气候特征。暴雨^[9-10],泥石流等地质灾害发生频繁。诸多学者针对白龙江径流量也开展不少相关研究,包括径流演变规律^[11]、气候变化和人类活动对径流影响^[12]、水文模型演算^[13]、水文特性研究等^[14]方面。虽然有关白龙江流域研究相对较为广泛,但是,大多涉及白龙江上游^[15]、区间^[16]、嘉陵江流域^[17],极少研究涵盖整个研究区域,且有关探讨影响径流量变化因素的研究居多,对于影响因素分析的相关研究较少。因此,本文选取白龙江流域白云站、舟曲站、武都站和碧口站 4 个水文站 1961—2021 年径流量作为基础数据,采用 MK 趋势检验,滑动 T 检验, R/S 分析法和双累积曲线,对白龙江年际和年内径流演变特征进行分析,运用双累积曲线法对径流变化进行归因分析,为流域生态环境保护、水资源有效管理和地质灾害防治提供关键技术支持。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

白龙江是嘉陵江最大支流,发源于甘肃省甘南州与四川省交界的郎木寺。流域位于 $32^{\circ}20' - 34^{\circ}10' \text{ N}$, $102^{\circ}30' - 105^{\circ}40' \text{ E}$,甘肃省段长 475 km^[18](见图 1)。流域面积 32 850 km²,流域在甘肃省境内占地面积 83%^[19]。

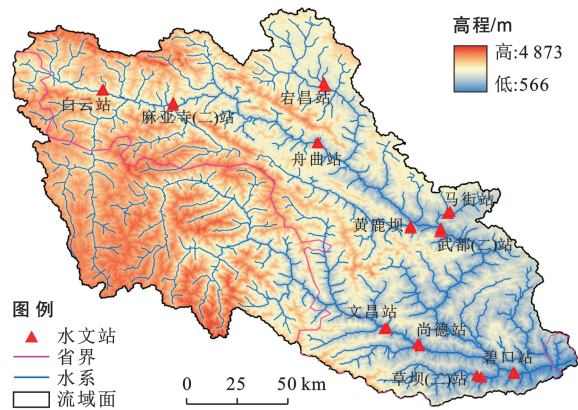


图 1 白龙江流域地形、水系及水文站分布

Fig.1 Distribution of topography, water systems and hydrological stations in Bailong River basin

依据流域内水文站分布,确定白云站所在位置为流域上游,舟曲站和武都站为流域中游,碧口站为流域下游,上游植被覆盖良好,蒸发量小;受山体影响,中游河道流速减小;下游河段气候温热,降水充沛^[20]。流域年平均气温 13.0° C ,相对湿度 60%,日照时间 1 800 h,蒸发量 2 500 mm,旱季雨季两极化明显,旱季长时间干旱,雨季降水集中,降雨量呈现由上游至下游递增变化趋势^[21]。流域内有白龙江水电站(位于流域上游)、碧口水电站(位于文县碧口镇境内)、橙子沟水电站、苗家坝水电站、麒麟寺水电站、宝珠寺水电站、代古寺水电站、紫兰坝水电站、昭化水电站等电站。水库工程通过蓄水在丰水期储存多余水

量,在枯水期放水补充河流流量,从而调节径流的季节性变化,有助于稳定河流流量,减少洪水和干旱的发生频率。电站的运营使得径流在时间和空间上的分配发生变化,如在电站发电过程中,部分水量被用于发电,导致下游径流量减少。

1.2 数据来源

所有数据均来源于甘肃省水文站,选用白云站、

舟曲站、武都站和碧口站 4 个水文站 1961—2021 年逐月、逐年实测径流量(其中碧口站 1986 年数据缺失,文章参考舟曲站水文站的年径流量,采用多重线性插补法进行插补得到),白云站、武都站和碧口站 3 个水文站逐月、逐年实测降雨量数据作为基础资料,进行径流量年际和年内变化特征及归因分析。水文站信息见表 1。

表 1 白龙江流域各水文站的概况

Table 1 Overview of hydrological stations in Bailong River basin

河段位置	站点	东经	北纬	径流时间序列	降水时间序列
上游	白云站	103.40	34.02	1960—2021 年	1965—2021 年
中游	舟曲站	104.37	33.78	1956—2021 年	
中游	武都站	104.92	33.38	1957—2021 年	1961—2021 年
下游	碧口站	105.25	32.75	1957—2021 年	1961—2021 年

1.3 研究方法

采用水文统计方法对白龙江流域径流量年内特征变化进行研究,利用线性趋势分析^[22],M—K 趋势性检验^[23],Sen's 斜率趋势分析法^[24]探究白龙江径流量年际趋势变化及显著性,通过滑动 T 检验法^[25]探究径流量突变特征,采用 R/S 分析法^[26]探究径流量在未来一段时间的变化趋势,再通过双累积曲线^[27-28]分析气候因子和人类活动对径流量的影响。

2 结果与分析

2.1 白龙江流域径流量的年内变化特征

对白龙江流域 4 个水文站径流量年内分配特征进行分析。由表 2 可知,白云站径流量 6—9 月达到峰值;舟曲站径流量 5 月达到高峰,7 月再次达到次

高峰;武都站径流量 4 月显著增加,5—9 月保持较高水平,之后下降;碧口站径流量 7 月达到最大值。总体来讲,上游白云站径流量最高峰出现时间迟于其余各站,舟曲站径流量最大值和最小值相差最小。所有站点的径流量均显示出显著的季节性变化,汛期(6—9 月)是径流量的高峰期,冬季(1—2 月)则径流量较低,与降雨量减少及冰雪融化较少有关。1—4 月,春季降水的增加和气温回升导致融雪水增加,并使所有站点的径流量逐渐增加。5—9 月是高径流量时期,受降水集中和气温升高的影响显著。10 月开始径流量逐渐减少,直到次年 2 月,其中,碧口站径流量最大,夏季峰值明显高于其他站点,按照极值比确定季节性变化显著排序为:武都站>白云站>碧口站>舟曲站。

表 2 1961—2021 年白龙江流域 4 个水文站月均径流量的分配特征

Table 2 Distribution characteristics of monthly average runoff at four stations of Bailong River basin from 1961 to 2021

月份	月均径流量/(10 ⁸ m ³)				百分比/%			
	白云站	舟曲站	武都站	碧口站	白云站	舟曲站	武都站	碧口站
1 月	0.22	0.88	1.48	3.11	3.92	3.56	3.64	3.83
2 月	0.19	0.73	1.23	2.67	3.48	2.98	3.02	3.28
3 月	0.22	0.80	1.34	2.95	3.92	3.24	3.30	3.63
4 月	0.28	1.14	2.06	4.48	4.93	4.62	5.08	5.51
5 月	0.46	2.26	3.99	7.82	8.23	9.17	9.84	9.61
6 月	0.53	2.79	4.51	8.84	9.54	11.31	11.12	10.87
7 月	0.75	3.55	5.68	11.63	13.33	14.39	14.01	14.29
8 月	0.73	3.21	4.97	10.28	13.01	13.00	12.24	12.64
9 月	0.84	3.42	5.4	10.57	15.04	13.87	13.31	13.00
10 月	0.70	3.12	5.17	9.35	12.51	12.64	12.74	11.49
11 月	0.40	1.64	2.87	5.65	7.11	6.66	7.08	6.95
12 月	0.28	1.12	1.88	3.99	4.99	4.55	4.64	4.90
极值比	4.42	2.59	4.62	4.36				

注:极值比为 12 个月最大径流量与最小径流量的比值。

2.2 白龙江流域径流量的年际变化特征

对白云站、舟曲站、武都站和碧口站 1961—2021 年的年径流量及 5 a 滑动平均值进行分析,得到径流量年际变化结果(如图 2 所示)。所有水文站变化趋势类似,均表现为 1965—1968 年呈上升趋势,1969—1972 年呈下降趋势,1973—1986 年呈波动上升趋势,1987—2019 年呈波动下降趋势,2020—2022 年呈大幅上升趋势。通过 M—K 趋势分析,线性趋势分析和

Sen's 斜率趋势分析对白龙江径流量趋势变化的显著性进行进一步分析,结果见表 3。4 个水文站径流量的 Sen's 指标均为负值,表现为减少趋势,M—K 趋势检验分析可知,所有站 Z 值均小于 0,表明白龙江年径流量均呈现下降趋势,白云站、武都站和碧口站具有显著的减小趋势($|Z| > 1.65$);而舟曲站 Z 值为 -1.257 ,未通过显著性检验,表明该站减少趋势不显著。

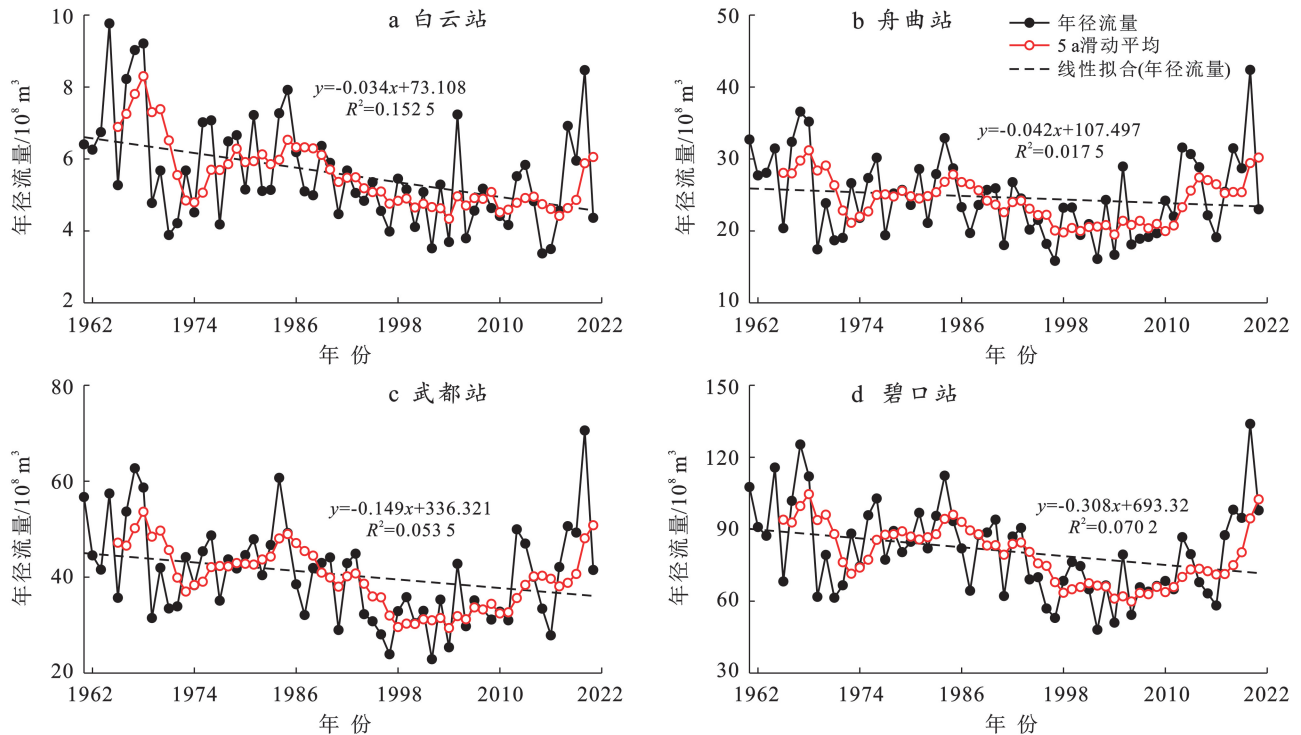


图 2 1961—2021 年白龙江流域径流的年际趋势变化

Fig.2 Interannual trend change of runoff in Bailongjiang River basin from 1961 to 2021

表 3 1961—2021 年白龙江流域各水文站径流量变化的趋势

Table 3 Trend of runoff variation at hydrological stations in Bailong River basin from 1961 to 2021

站名	多年平均径流量/ 10^8 m^3	极值比	M-K 趋势检验	Sen's 趋势分析	显著性	趋势	显著程度
			Z 值	Q 值	p 值		
白云站	5.59	2.90	-3.199	-0.034	$p < 0.01$	下降	显著
舟曲站	24.66	2.68	-1.257	-0.054	$p > 0.05$	下降	不显著
武都站	40.55	3.08	-2.247	-0.161	$p < 0.05$	下降	显著
碧口站	80.93	2.79	-2.502	-0.372	$p < 0.01$	下降	显著

图 3 为白龙江 4 个水文站不同年代四季径流量均值演变趋势图。由图 3 可知,上游白云站秋季径流量下降趋势比夏季明显,表现出夏季(35.06%)、秋季(34.29%)径流量所占的比例较大,春季(16.69%)、冬季(12.23%)所占的比例较小的特征。其余水文站均为夏季径流量比秋季径流量下降趋势明显,四季径流量所占比例分别为:①舟曲站的春季为 16.71%,夏季为 37.60%,秋季为 32.90%,冬季为 10.97%;武都站的春季为 17.80%,夏季为 36.55%,秋季为 32.74%,冬季为 11.15%;碧口站的春季为 18.41%,夏季为

37.15%,秋季为 31.19%,冬季为 11.91%。

2.3 白龙江流域径流突变性特征

通过滑动 T 检验判断白龙江流域主要突变点,由图 4 可知,白云站径流量在 1969—1971 年和 1975 年滑动 T 值的绝对值大于 2.31,通过了 0.05 显著检验,年径流量最早突变时刻出现在 1969 年,最晚突变时刻出现在 1987 年;舟曲站径流量在 1969,1994,2011 年滑动 T 值的绝对值大于 2.31,通过了 0.05 显著检验,年径流量最早突变时刻出现在 1969 年,最晚突变时刻出现在 2011 年;武都站径流量在 1969,1986,

1994, 1995年滑动 T 值的绝对值均大于 2.31, 通过了 0.05 显著检验, 年径流量最早突变时刻出现在 1969 年, 最晚突变时刻出现在 1995 年; 碧口站径流量在 1969, 1974, 1975, 1994 年滑动 T 值的绝对值均大于

2.31, 通过了 0.05 显著检验, 年径流量最早突变时刻出现在 1969 年, 最晚突变时刻出现在 1994 年。对比白龙江所有水文站点同时出现的突变年份可知在 1969 年和 1994 年径流量发生突变。

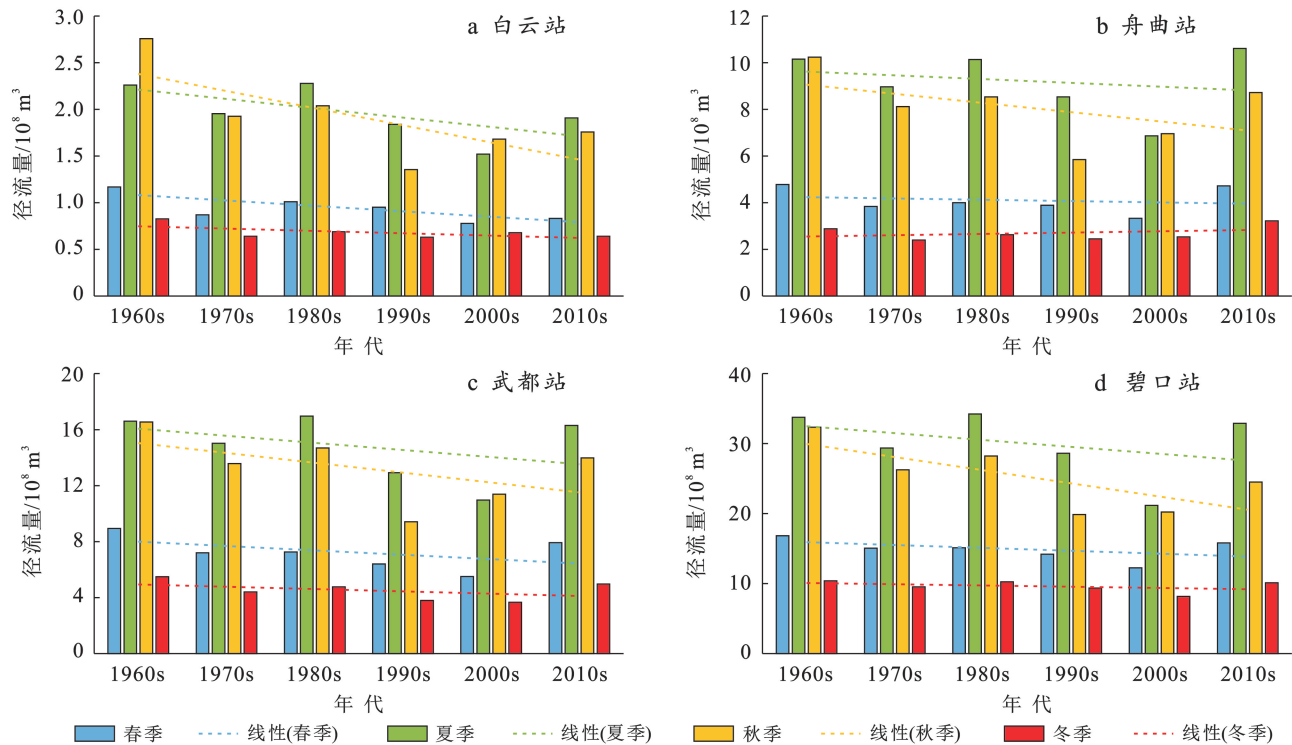


图3 1961—2020年不同年代白龙江流域各水文站四季的径流量

Fig.3 Seasonal runoff volumes of various hydrological stations in Bailong River basin during different decades from 1961 to 2020

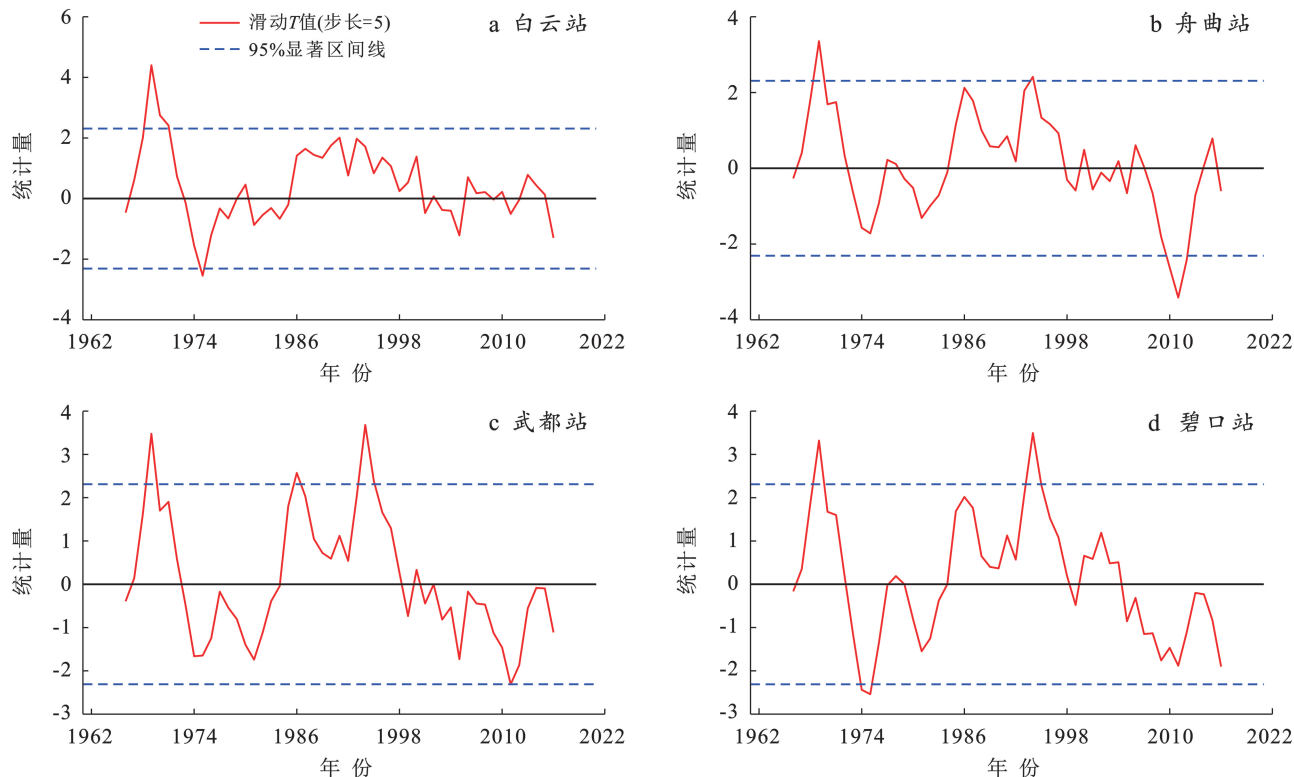


图4 1961—2021年白龙江流域各水文站年径流量的滑动 T 检验的特征

Fig.4 Sliding T -test characteristics of annual runoff at each hydrological station in Bailong River basin from 1961 to 2021

通过上述分析结果,以 1969 年和 1994 年为两个主要突变年份,分析突变前后径流量变化百分比结果(见图 5)。由图 5 可知,上游白云站在 1961—1969 年径流量呈现显著上升趋势,在 1970—1994 年变化趋势较弱,在 1995—2021 年呈显著上升趋势;中、下游

水文站年径流量均表现出在 1961—1969 年呈现显著下降趋势,在 1970—1994 年呈不明显的变化趋势,在 1995—2021 年研究时段均呈上升趋势特征。因此,通过分段研究可知白龙江年径流量一级突变点在 1969 年,二级突变点在 1994 年。

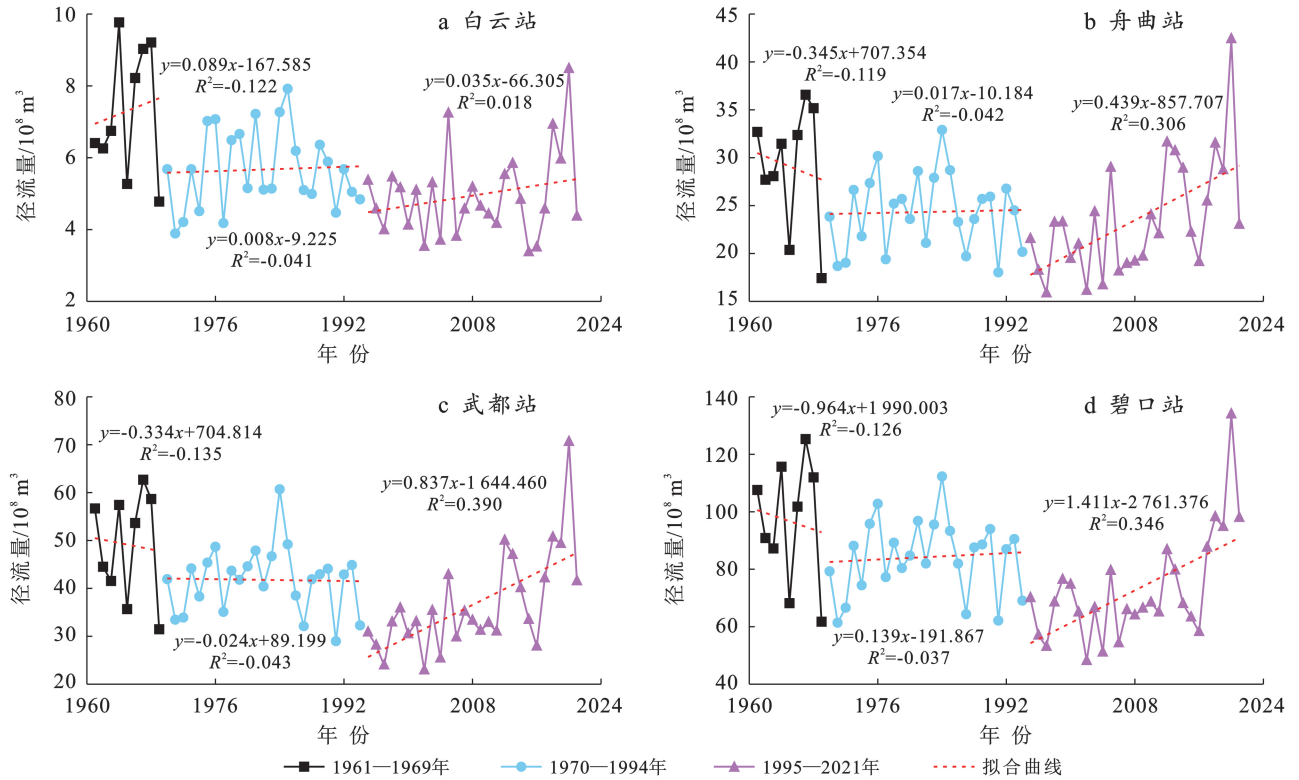


图 5 1961—2021 年白龙江流域各水文站年径流量各时段突变

Fig.5 Abrupt change of annual runoff volume at each hydrological station in Bailong River basin during different periods from 1961 to 2021

通过突变时段的变化率统计(表 4)分析可知,上游白云站年径流量在 3 个时间段中逐渐减少,尤其是在第一次突变后下降了 19.81%,第二次突变后再次下降了 16.97%。这种减少与流域内的降雨量减少、气候变化以及人类活动等因素有关。舟曲站的年径流量也呈现出减少趋势,但下降幅度相对较小。舟曲站周边的植被覆盖情况、水土保持措施以及人类活动的影响程度比其他站点更小,因此径流量变化率较低。武都站的径流量下降幅度较为明显,尤其是第二次突变后的变化率与第一次几乎相当。说明武都站受到周边气候变化的显著影响,降雨量减少或蒸发量增加是导致年径流量减少的原因。碧口站是 4 个站点中径流量最高的站点,也是径流的出口站点,其径流量的减少趋势也最为显著。尤其是在第二次突变时,径流量变化率达到-17.57%。这与下游水资源需求增加、流域开发利用程度上升,以及环境退化有关。

表 4 1961—2021 年白龙江流域各水文站年径流量在各突变时段的平均值与变化率

Table 4 Average value and change rate of annual runoff at each hydrological station in Bailong River basin during each abrupt change period from 1961 to 2021

站名	年径流量平均值/10 ⁸ m ³			突变径流变化率/%	
	1960—1969	1970—1994	1995—2021	第一次	第二次
白云站	7.30	5.85	4.86	-19.81	-16.97
舟曲站	29.10	24.77	22.86	-14.87	-7.72
武都站	49.16	41.78	35.45	-15.00	-15.16
碧口站	96.73	85.42	70.41	-13.23	-17.57

2.4 径流持续性特征

从表 5 的分析结果可知,白龙江 4 个水文站径流量全年 Hurst 指数分别为白云站(0.307 7)、舟曲站(0.534 8)、武都站(0.769 5)、碧口站(0.663 4),其中白云站 Hurst 指数小于 0.5,这表明未来径流量将与过去 61 a 左右的变化趋势相反,表现出负持续性特征,未来一段时间径流量将呈现上升趋势且持续性较

强。舟曲站、武都站和碧口站 Hurst 指数均大于 0.5, 表明未来径流量将与过去 61 a 左右的变化趋势相同, 表现出正持续性特征, 未来一段时间径流量将呈现下降趋势, 其中武都站全年 Hurst 指数最大为 0.769 5, 径流量表现为较强的上升持续性。舟曲站 Hurst 指数较小为 0.534 8, 径流量虽表现为下降趋势, 但是持续性较弱, 径流量可能会出现上升趋势。

表 5 1961—2021 年白龙江流域各水文站径流持续性的分析结果
Table 5 Analysis results of runoff sustainability at each hydrological station in Bailong River basin from 1961 to 2021

水文站	Hurst 指数	拟合 R^2	未来变化趋势	持续性强度
白云站	0.307 7	0.717 0	上升	较强
舟曲站	0.534 8	0.774 1	下降	较弱
武都站	0.769 5	0.874 0	下降	较强
碧口站	0.663 4	0.915 9	下降	较强

2.5 径流归因分析

利用双累积曲线法进一步分析气候变化和人类活动对白龙江径流量变化的贡献率及影响值, 以探讨

流域内径流突变点发生的可靠性, 基于上述径流突变性结果可知, 白龙江流域 3 个水文站(涵盖流域上、中、下游) 3 站径流量的突变年份均为 1994 年, 以 1994 年为变化点建立基准期和变化期, 分别建立两个时段内累积径流量与累积降雨量之间的线性回归方程(图 6), 拟合系数 R^2 值均大于 0.99, 表明降雨量和径流量之间的拟合相关性较高。将变化期累积降雨量带入基准期线性方程, 求得变化期的预测累积径流量, 结果见表 6。白云站、武都站和碧口站由气候变化引起的变化量分别为 -2.72×10^9 , -8.16×10^{10} , $-6.15 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 由人类活动引起的径流的变化量分别为 -1.76×10^9 , 3.16×10^{10} , $-4.00 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。因此, 白云站、武都站和碧口站气候变化对径流量减少的贡献率分别为 60.71%, 163.23% 和 60.61%, 人类活动对径流量变化的贡献率分别为 39.29%, -63.23% , 39.39%。四站气候变化和人类活动的均值为 94.85%, 5.13%, 表明白龙江流域径流量的减少主要受到气候变化的影响, 且流域中游的径流量减少受气候变化的影响程度最明显。

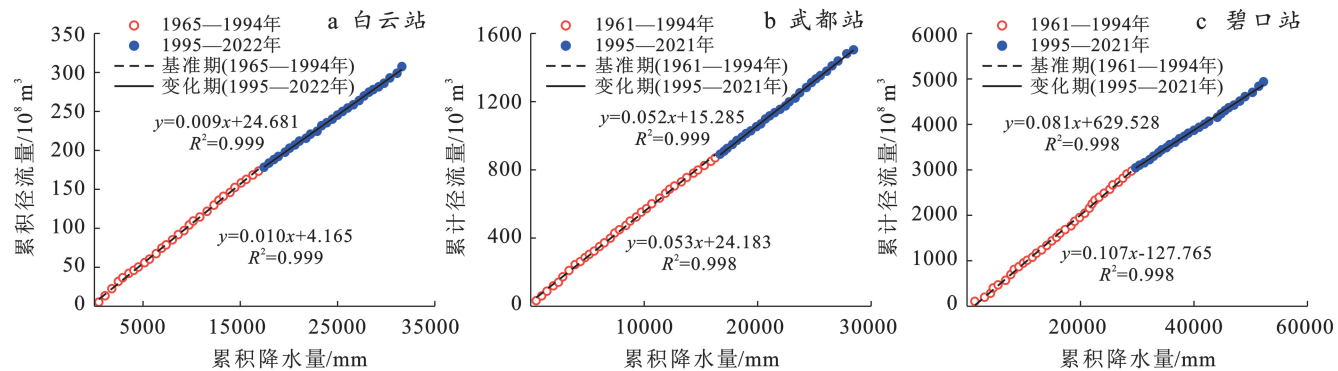


图 6 白龙江流域累积降雨量—径流量变化曲线

Fig. 6 Variation curve of accumulated rainfall and runoff in Bailong River basin

表 6 白龙江流域降雨量—径流量双累积曲线归因分析结果

Table 6 Attribution analysis results of rainfall and runoff double accumulation curve in Bailong River basin

站点名	河段	时段	径流量		气候变化影响		人类活动影响	
			实测值/ 10^8 m^3	计算值/ 10^8 m^3	影响值/ 10^8 m^3	比例/%	影响值/ 10^8 m^3	比例/%
白云站	上游	基准期	178.28	—	—	—	—	—
		变化期	133.48	151.08	-27.20	60.71	-17.60	39.29
武都站	中游	基准期	1 487.02	—	—	—	—	—
		变化期	986.78	670.49	-816.53	163.23	316.29	-63.23
碧口站	下游	基准期	2 975.79	—	—	—	—	—
		变化期	1 960.57	2 360.48	-615.30	60.61	-399.92	39.39
均值	—	—	—	—	—	94.85	—	5.15

3 结论

(1) 流域内径流年内分配极不均匀, 汛期(6—9 月)是径流量的高峰期, 冬季(1—2 月)则径流量较

低。上游秋季径流下降趋势比夏季明显, 中下游变化特征相反, 夏季明显于秋季。

(2) 白龙江流域年径流一级突变点在 1969 年, 二级突变点在 1994 年。综合分析可知, 上游白云站

和中上游舟曲站在第一突变周期年平均径流量降幅大于第二突变周期,径流量平均下降率为 17%,中下游武都站和下游碧口站的在第二突变周期年平均径流量的降幅大于第一突变周期,径流量的平均下降率为 16%,整体上,径流量呈现为突变前高于平均值,突变后低于平均值。

(3) 白云站表现出负持续性特征,在未来径流量呈现显著上升趋势,中、下游其他三站表现出正持续性特征,其中武都站全年径流变化特征尤为明显,在未来径流量将保持下降趋势。

(4) 气候变化是导致径流量减小的主要原因,贡献率达到 94.85%;人为因素贡献仅为 5.15%。

白龙江径流年际分配不均匀的主要原因为其属于降雨补给型河流,年降雨量在 400~700 mm 之间,且降雨多集中在 5—9 月,因此降水年内分配的不均匀性直接导致了径流年内分配的不均匀,同时也验证了流域内气候变化对径流量减少的贡献率远大于人为因素贡献率。后续研究可进一步细化突变前后降水、气温、蒸发蒸腾变化对径流的贡献率。

参考文献 (References)

- [1] 张昕,李忠勤,张国飞,等.近 30 a 新疆哈密地区的径流变化特征[J].甘肃农业大学学报,2014,49(3):113-119.
Zhang Xin, Li Zhongqin, Zhang Guofei, et al. Runoff variation characteristics in Hami region during recent 30 years [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2014,49(3):113-119.
- [2] 孙栋元,齐广平,马彦麟,等.疏勒河干流径流变化特征研究[J].干旱区地理,2020,43(3):557-567.
Sun Dongyuan, Qi Guangping, Ma Yanlin, et al. Variation characteristics of runoff in the mainstream of Shule River [J]. Arid Land Geography, 2020,43(3):557-567.
- [3] 张建云,王国庆,金君良,等.1956—2018 年中国江河径流演变及其变化特征[J].水科学进展,2020,31(2):153-161.
Zhang Jianyun, Wang Guoqing, Jin Junliang, et al. Evolution and variation characteristics of the recorded runoff for the major rivers in China during 1956—2018 [J]. Advances in Water Science, 2020,31(2):153-161.
- [4] 刘兆峰,王建萍,韩进军,等.基于 SWAT 模型的那棱格勒河流域径流模拟及水量平衡分析[J].盐湖研究,2024,32(1):48-56.
Liu Zhaofeng, Wang Jianping, Han Jinjun, et al. Runoff simulation and water balance analysis in the Nalenggele River basin using the SWAT model [J]. Journal of Salt Lake Research, 2024,32(1):48-56.
- [5] 宋益涛,王双涛,罗平平,等.变化环境下径流演变的研究方法进展[J].水资源与水工程学报,2022,33(2):68-76.
Song Yitao, Wang Shuangtao, Luo Pingping, et al. Advances in research methods of runoff evolution under changing environment [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2022,33(2):68-76.
- [6] 任智晶,赵雪花,郭秋岑,等.基于 LCD-SSA-BiLSTM 模型的月径流预测研究[J].水电能源科学,2024,42(4):1-5.
Ren Zhijing, Zhao Xuehua, Guo Qiucen, et al. Research on monthly runoff prediction method based on LCD-SSA-BiLSTM model [J]. Water Resources and Power, 2024, 42(4):1-5.
- [7] 温得平,历明月,弋博.大通河流域径流演变特征及其影响因素[J].中南民族大学学报(自然科学版),2024,43(5):593-602.
Wen Deping, Li Mingyue, Yi Bo. Runoff evolution characteristics and influence factors in the Datong River basin [J]. Journal of South-Central Minzu University (Natural Science Edition), 2024,43(5):593-602.
- [8] 孙月,刘思海,邢坤,等.近 60 年开都河源区径流演变及驱动因素定量分析[J].水生态学杂志,2023,44(6):10-18.
Sun Yue, Liu Sihai, Xing Kun, et al. Quantitative analysis of discharge and driving factors in the headwaters of Kaidu River over 60 years [J]. Journal of Hydroecology, 2023, 44(6):10-18.
- [9] 胡宏伟.白龙江流域舟曲—武都段大型泥石流活动趋势预测[D].北京:中国地质大学(北京),2019.
Hu Hongwei. Trend prediction of large debris flow activity in Zhouqu-Wudu section of Bailong River basin [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2019.
- [10] 熊木齐,孟兴民,庆丰,等.甘肃省陇南市白龙江流域泥石流灾害事件与降水特征的关系[J].兰州大学学报(自然科学版),2016,52(3):295-300.
Xiong Muqi, Meng Xingmin, Qing Feng, et al. Relationship between debris flow activities and precipitation characteristics in Bailong River basin of Longnan Region, Gansu Province [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2016,52(3):295-300.
- [11] 田黎明,齐识,马金珠,等.白龙江流域上游径流年内分配变化规律分析[J].水文,2012,32(4):82-87.
Tian Liming, Qi Shi, Ma Jinzhu, et al. Changes of annual runoff distribution in Upper Bailongjiang River [J]. Journal of China Hydrology, 2012,32(4):82-87.
- [12] 张晓晓,张钰,徐浩杰.白龙江上游径流变化特征及其对降水和人类活动的响应[J].水土保持通报,2015,35(2):14-19.
Zhang Xiaoxiao, Zhang Yu, Xu Haojie. Runoff variation characteristics and its responses to precipitation and human activities in upper reaches of Bailong River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015,35(2):14-19.
- [13] 王有恒,谭丹,景元书.HBV 水文预报模型在白龙江流

- 域的应用研究[J].水土保持通报,2015,35(3):218-221.
- Wang Youheng, Tan Dan, Jing Yuanshu. Application of HBV hydrology model in Bailong River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015,35(3):218-221.
- [14] 李文燕.白龙江近 60 年水文水资源演变及变异趋势分析研究[J].地下水,2015,37(6):144-145.
- Li Wenyan. Analysis and study on the evolution and variation trend of hydrological and water resources in Bailong River in recent 60 years [J]. Ground Water, 2015,37(6):144-145.
- [15] 张晓晓.白龙江中上游水文气象要素变化特征分析及径流影响因素研究[D].甘肃 兰州:兰州大学,2014.
- Zhang Xiaoxiao. Analysis on variation characteristics of hydrometeorological elements and study on runoff influencing factors in the middle and upper reaches of Bailong River [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014.
- [16] 白祖晖,李新,马亚丽.白龙江干流各区间径流变化特征分析[J].水利规划与设计,2021(6):50-56.
- Bai Zuhui, Li Xin, Ma Yali. Analysis on runoff variation characteristics in different intervals of main stream of Bailong River [J]. Water Resources Planning and Design, 2021(6):50-56.
- [17] 李姝琦.嘉陵江流域水文特征分析与径流反演[D].四川 成都:四川师范大学,2020.
- Li Shuyi. Hydrological characteristics analysis and runoff inversion in Jialing River basin [D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2020.
- [18] 马亚丽,李新,孙栋元,等.白龙江舟曲-武都区间干支流径流变化特征关系[J].水土保持研究,2021,28(3):94-100.
- Ma Yali, Li Xin, Sun Dongyuan, et al. Variation characteristics relation of runoff in the mainstream and tributaries between Zhouqu and Wudu region of Bailong River [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(3):94-100.
- [19] 陈学林,王学良,景宏.60 年来白龙江流域水文特征变化分析[J].水利规划与设计,2017(1):39-42.
- Chen Xuelin, Wang Xueliang, Jing Hong. Analysis on hydrological characteristics of Bailong River basin in the past 60 years [J]. Water Resources Planning and Design, 2017(1):39-42.
- [20] 牛最荣,陈学林,王学良.白龙江干流代表站径流变化特征及未来趋势预测[J].水文,2015,35(5):91-96.
- Niu Zuirong, Chen Xuelin, Wang Xueliang. Runoff variation characteristics of representative stations on mainstream of Bailongjiang River and trend prediction [J]. Journal of China Hydrology, 2015,35(5):91-96.
- [21] 魏宏庆,沈永平,魏鹏慧,等.白龙江中游干旱河谷水土流失与地理环境[J].干旱区地理,2019,42(5):1023-1028.
- Wei Hongqing, Shen Yongping, Wei Lihui, et al. Soil erosion and geographical environment in dry valley of the middle reaches of Bailong River [J]. Arid Land Geography, 2019,42(5):1023-1028.
- [22] 王盛,李文静,王金凤.湟沱河上游径流演变及其影响因素分析[J].甘肃农业大学学报,2020,55(3):162-169.
- Wang Sheng, Li Wenjing, Wang Jinfeng. Analysis on runoff variation characteristics and its influence factors in the upper reaches of Hutuo River basin [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2020,55(3):162-169.
- [23] 高彦春,王金凤,封志明.白洋淀流域气温、降水和径流变化特征及其相互响应关系[J].中国生态农业学报,2017,25(4):467-477.
- Gao Yanchun, Wang Jinfeng, Feng Zhiming. Variation trend and response relationship of temperature, precipitation and runoff in Baiyangdian Lake basin [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017,25(4):467-477.
- [24] 季宗虎,孙栋元,牛最荣,等.疏勒河流域降水变化特征研究[J].干旱区研究,2023,40(10):1583-1594.
- Ji Zonghu, Sun Dongyuan, Niu Zuirong, et al. Characteristics of precipitation changes in the Shule River basin [J]. Arid Zone Research, 2023,40(10):1583-1594.
- [25] 廖美玉,方秀琴,蒋心远,等.黄河流域近 40 年土地利用/覆被时空变化特征[J].水土保持学报,2024,38(2):165-177.
- Liao Meiyu, Fang Xiuqin, Jiang Xinyuan, et al. Spatio-temporal characteristics of land use/cover changes in the Yellow River basin over the past 40 years [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(2):165-177.
- [26] 张海宁,任源鑫,张新弟,等.1981—2016 年渭河流域上中下游极端气温差异研究[J].江西农业学报,2020,32(9):113-118.
- Zhang Haining, Ren Yuanxin, Zhang Xindi, et al. Study on difference of extreme temperature in upper, middle and lower reaches of Weihe River basin from 1981 to 2016 [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2020,32(9):113-118.
- [27] 张淑兰,王彦辉,于澎涛,等.定量区分人类活动和降水量变化对泾河上游径流变化的影响[J].水土保持学报,2010,24(4):53-58.
- Zhang Shulan, Wang Yanhui, Yu Pengtao, et al. Study for separating the impact of precipitation variation and human activities on runoff change of the upper reaches of Jing River [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010,24(4):53-58.
- [28] 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 Xingmin, Zhang Xiuqin, Gao Peng, et al. Theory of double mass curves and its applications in hydrology and meteorology [J]. Journal of China Hydrology, 2010,30(4):47-51.