

白龙江舟曲—武都区间干支流径流变化特征关系

马亚丽¹, 李新², 孙栋元¹, 白祖晖²

(1.甘肃农业大学 水利水电工程学院, 兰州 730070; 2.甘肃省水利水电勘测设计研究院有限责任公司, 兰州 730000)

摘要:河川径流是水资源的重要组成部分,探究白龙江舟曲—武都区间干支流的径流变化特征及其关系,对认识该区域水资源状况及其合理开发利用具有重要意义。基于白龙江干支流5个水文站实测径流资料,采用累积距平法、双累积曲线、Mann-Kendall检验等方法,对白龙江干支流1981—2015年径流变化特征关系进行分析研究。结果表明:各站年径流量整体呈显著下降趋势,显著性水平均在0.05以上,径流减少的倾向率舟曲—武都区间干流、黄鹿坝、宕昌、马街分别为 $-2.16, -0.84, -0.56, -0.05$ 亿 $\text{m}^3/10\text{a}$,舟曲—武都区间干流35年间减少量高达7.56亿 m^3 ,相比区间干流减少量,支流拱坝河减少量占比38.89%,对于区间干流的变化有明显影响。舟曲—武都区间干流多年平均径流量14.13亿 m^3/a ,区间入流以6.01亿 m^3/a 占比42.56%,北峪河马街站占比最小仅为0.99%,区间入流量明显高于支流径流量。区间干流及3个支流年径流突变的临界年份分别为1986年、1986年、1994年、1991年。拱坝河支流对舟曲—武都区间干流径流变化影响最大,影响率高达44.97%,其次区间入流、岷江支流分别为37.74%,16.29%,小支流北峪河的影响最小仅为1%。

关键词:支流; 径流变化; 趋势分析; 突变分析; 白龙江

中图分类号:P333.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)03-0094-07

Variation Characteristics Relation of Runoff in the Mainstream and Tributaries Between Zhouqu and Wudu Region of Bailong River

MA Yali¹, LI Xin², SUN Dongyuan¹, BAI Zuhui²

(1.College of Water Resources and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2.Gansu Survey and Design Research Institute for Water Resources and Hydropower Limited Liability Company, Lanzhou 730000, China)

Abstract: River runoff is an important part of water resources. It is of great significance to explore the characteristics and relations of runoff changes of the mainstream and tributaries between Zhouqu and Wudu region of Bailong River for understanding the regional water resources situation and its rational development and utilization. Based on the measured runoff data of five hydrological stations in the mainstream and tributaries of the Bailong River, we used anomaly accumulation, double accumulation curve, Mann-Kendall test to analyze and study the characteristic relationship of runoff change of the mainstream and tributaries in the Bailong River from 1981 to 2015. The results showed that: the runoff of all stations showed a downward trend overall and the significance level reached above 0.05; the trend rate of runoff reduction were $-2.16, -0.84, -0.56$ and -0.05 hundred million m^3/decade for the main stream of Zhouqu—Wudu interval, Huangluba, Dangchang, Majie, and the decrease was 75.6 million m^3 for the main stream between Zhouqu and Wudu in 35 years; compared with the reduction of the interval mainstream, the reduction of Gongba River accounted for 38.89%, which had a significant influence on the change of the interval mainstream; the average annual runoff of mainstream between Zhouqu and Wudu in Bailong River was 1.413 billion m^3 and the interval inflow was 601 million m^3/a , accounting for 42.56%, and that of Majie station in the Beiyu River was 0.99% at the minimum; the interval inflow was significantly higher than the tributary runoff; the critical years of annual

收稿日期:2020-06-16

修回日期:2020-07-01

资助项目:甘肃省水利科学试验研究与技术推广计划项目(甘水科外发[2018]70号-3,甘水科外发[2017]76号-10);甘肃农业大学水利水电工程学院青年教师科技创新基金(SLSDXY-QN2019-04)

第一作者:马亚丽(1987—),女,河北保定人,助教,主要从事水文与水资源方面的研究。E-mail:gsaumayl@163.com

通信作者:孙栋元(1978—),男,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研究工作。E-mail:gsausundy@126.com

runoff abrupt transition in the mainstream and the three tributaries were 1986, 1986, 1994 and 1991, respectively; the Gongba River had the greatest influence on the runoff change of the mainstream between Zhouqu and Wudu with an influence rate of 44.97%, followed by 37.74% and 16.29% for the interval inflow and Minjiang River, and the least influence was 1% for the small tributary Beiyu River.

Keywords: tributary; runoff change; trend analysis; mutation analysis; Bailong River

在气候变化和人类活动的共同作用下,河川径流作为最为直接和敏感的环境要素已经或正在发生着变化^[1],极端灾害事件频发,干旱区域河川径流在明显减少,湿润地区洪涝事件增多增强^[2],河流水文情势的变化必将给区域生态平衡和水资源管理带来严峻挑战^[3],因此,判别水文情势的变化特征特点对于确保区域生态平衡和水资源安全具有重要意义,尤其在水资源普遍缺乏的西北干旱、半干旱地区,河川径流作为水资源的重要组成部分,对于其径流变化特征研究更具有现实意义及国家战略性。近些年来,许多学者针对包括流量、气温、降雨等水文气象要素的变化特征、相互关系及其驱动因子进行研究,已经取得一定研究成果。研究表明黄羊河流域径流的多年变化是相对稳定的,气候变化与人类活动对径流减少的贡献率分别为 46.24% 和 53.76%^[4]。辽河实测径流量自 20 世纪 70 年代以来减少明显^[5]。在气候变化和人类活动的双重影响下,黄河的水文过程发生了剧烈变化,河川径流量显著变化,且不同河段河川径流量变化规律也有所不同^[6-7]。泾河年径流量、汛期径流量与非汛期径流量均呈现出显著减少趋势,其 Hurst 指数均大于 0.5,表明未来与当前趋势有一定持续性,预测未来将呈现持续减少趋势^[8]。近年来随着资源、环境被越来越多专家和学者关注,对于白龙江相关的研究重点集中在流域生态环境、地质灾害预测与防治、气候变化、河川径流等方面。巩杰等^[9]基于遥感数据,运用 GIS 和 InVEST 模型分析了甘肃白龙江流域生境质量时空分异特征,认为生境质量总体表现出先降低后缓慢增加的趋势。陈宗良等^[10]以白龙江流域中上游第四纪沉积物为研究对象,认为其灾害效应主要表现为崩滑效应和对泥石流流的补给效应。魏宏庆等^[11]剖析了白龙江中游干旱河谷地理环境与水土流失作用关系,并配置水土保持防治措施体系,为建立综合治理模式提供有效参考。张晓晓等^[12]以 1961—2010 年白龙江上游径流与降水资料为基础,表明上游径流呈极显著减少趋势,且 1990 年以后人类活动逐渐成为影响径流变化的主要因素。以往对于白龙江河川径流的研究多集中于河流干流的一个或多个水文站的径流变化特征分析研究,缺乏对于干流与支流变化特征关系的探讨研究,本文以白

龙江舟曲—武都区间段干支流的径流变化特征关系为研究对象,采用干流 2 个水文站及支流 3 个水文站 1981—2015 年 35 a 的同期逐月径流资料对白龙江干支流径流变化特征进行研究,从多角度揭示径流变化趋势、突变特点及干支流之间的关系,以期为水资源的开发利用及河流治理与保护提供科学依据。

1 研究区概况

白龙江是长江左岸嘉陵江上游的最大支流,即长江的二级支流,嘉陵江的一级支流。发源于甘肃省甘南州与四川省交界的郎木寺,流经甘肃省东南部的迭部县、舟曲县、宕昌县、武都区和文县,经碧口镇流出甘肃省省界,最终在四川省广元市昭化县宝轮镇附近汇入嘉陵江。地理坐标东经 102°30′—105°40′,北纬 32°20′—34°10′,甘肃省段长 475 km,流域面积为 1.84×10⁴ km²。地势西北高、东南低,主要表现为山地地貌、河谷地貌。流域地处暖温带与亚热带过渡地段,夏季高温多雨,冬季温暖少雨,年均温 6~14.9℃,年降水量约 400~850 mm,且主要集中在 5—10 月^[13],旱雨季明显,年降水由南向北呈现递减趋势,东南多于西北,相对湿度 60%,日照时间 1 800 h,蒸发量达 2 500 mm^[11]。

2 资料与方法

2.1 水文观测数据

采用 1981—2015 年白龙江流域(舟曲站、武都站、宕昌站、黄鹿坝站、马街站)5 个水文站 35 a 同期逐月径流数据资料,所用数据均来自甘肃省水文水资源勘测局。其中舟曲站、武都站位于白龙江干流,宕昌站、黄鹿坝站、马街站位于舟曲—武都区间段的一级支流,即岷江、拱坝河、北峪河。舟曲—武都区间干流径流量为舟曲站和武都站来水量之差;区间入流为 5 个水文站之间的来水量,即武都站与其他 4 站来水量之差;宕昌径流量为岷江宕昌以上流域来水量;黄鹿坝径流量为拱坝河黄鹿坝以上流域来水量;马街径流量为北峪河马街以上流域来水量。水文测站基本信息见表 1。

2.2 研究方法

(1) 累积距平法。累积距平法利用累积距平曲线反映变化趋势,若累积距平曲线显示上升趋势,则累积

距平值增加,距平值为正;若显示下降趋势,则累积距平值减少,距平值为负;同时可判断发生突变时间。

表 1 水文测站基本信息

站名	东经	北纬	地理位置	河流	断面属性
舟曲	104°22′	33°47′	舟曲县	白龙江	干流断面
武都	104°55′	33°23′	武都区	白龙江	干流断面
宕昌	104°24′	34°02′	宕昌县	岷江	支流断面
黄鹿坝	104°47′	33°24′	武都区	拱坝河	支流断面
马街	104°57′	33°27′	武都区	北峪河	支流断面

累积距平值表示为:

$$W_j = \sum_{i=1}^j (W_i - \bar{W}) \quad (j \leq n) \quad (1)$$

式中: W_j 表示在第 j 年的累积距平值; W_i 表示为第 i 年数值; n 表示为序列长度; \bar{W} 表示为序列平均值。

(2) Mann-Kendall 趋势检验。假定 $H_0 = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为时间序列, n 为时间序列的长度, x_k, x_j 分别为第 k, j 年的流量值,在满足零假设 (H_0) 即数据序列没有趋势时,定义统计量 S

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k)$$

$$\text{其中 } \text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & x_j - x_k > 0 \\ 0 & x_j - x_k = 0 \\ -1 & x_j - x_k < 0 \end{cases} \quad 1 < k < j < n \quad (2)$$

确定方差 V 和标准正态系统变量 U

$$V = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (3)$$

$$U = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{V}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{V}} & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $U > 0$, 序列呈增加(上升)趋势; $U < 0$ 为减少(下降)趋势;若 $|U|$ 越大,表示序列趋势变化越显著,当显著水平 α 给定时, $|U|$ 大于置信区间临界值 1.28, 1.96, 2.58 时,分别表示通过了信度 90%, 95%, 99% 的显著性检验; H_0 数据无趋势的假设被拒绝^[14-17]。

(3) Mann-Kendall 突变检验。首先构建时间序列的秩序列为:

$$S_k = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \alpha_{ij}$$

$$\text{其中 } \alpha_{ij} = \begin{cases} 1 & x_j > x_i \\ 0 & x_j \leq x_i \end{cases} \quad 1 < i < j < n \quad (5)$$

$$\text{定义统计量 } UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{\text{var}(S_k)}} \quad (6)$$

式中: $E(S_k)$ 和 $\text{Var}(S_k)$ 为 S_k 的数学期望和方差,其不偏估计量表达式为

$$E(S_k) = \frac{k(k-1)}{4} \quad (7)$$

$$\text{var}(S_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \quad (8)$$

将原有时间序列进行逆序,对逆时间序列计算,获得 $UB_k = -UF_k$ 。根据 UF_k 大于 0 或小于 0,判断序列上升或下降趋势,若 UF_k 和 UB_k 序列点在置信范围内存在交点,则说明该交点是突变点^[14-17]。

(4) 双累积曲线。双累积曲线是在直角坐标系中两个不同变量同期内连续累加值所构建的关系曲线,常用于水文气象要素长期演变趋势及一致性的检验分析^[18]。干流径流量与支流径流量及各支流径流量所构建的双累积曲线可利用关系曲线斜率表征水文变量的阶段性特征,从而探究河川径流演变趋势过程,并依据回归分析曲线构建的两变量关系式,进一步量化分析各支流对径流情势演变过程的影响程度^[19-20]。

3 结果与分析

3.1 干支流径流量年际变化及趋势

舟曲—武都区间白龙江干流多年平均径流量为 14.13 亿 m^3/a ,该区间上的 3 条支流,岷江宕昌站、拱坝河黄鹿坝站、北峪河马街站多年平均径流量依次为 3.14 亿 m^3/a , 4.84 亿 m^3/a , 0.14 亿 m^3/a ,干流区间入流 6.01 亿 m^3/a ,占比分别为 22.22%, 34.22%, 0.99%, 42.56%,区间入流量最大,北峪河支流径流量最小,不足 1%。径流量与不同站点的集水面积大小及气候条件、地形地貌有关,降雨量、集水面积、坡度越大,其径流量也相应越大。各站年径流量整体呈现下降趋势,其中 1981—1993 年径流量均值大于多年平均水平,为丰水期,1994—2015 年径流量均值小于多年平均值,为枯水期,具体见图 1;各站累积距平曲线均呈现先上升后下降趋势,以 1993 年为分界点,1993 年前高于多年均值,1993 年后低于多年均值,具体见图 2。各站径流量线性倾向变化率不同,舟曲—武都区间干流线性倾向变化率最大,为 -2.16 亿 $\text{m}^3/10 \text{ a}$, 35 a 减少量达到 7.56 亿 m^3 ,其次黄鹿坝站为 -0.84 亿 $\text{m}^3/10 \text{ a}$,宕昌站为 -0.56 亿 $\text{m}^3/10 \text{ a}$,马街变化率最小,仅为 -0.05 亿 $\text{m}^3/10 \text{ a}$, 35 a 减少量达到 0.18 亿 m^3 。相比区间干流减少量,支流拱坝河占比 38.89%,支流岷江占比 25.93%,北峪河占比 2%,区间入流占比 32.8%,可见支流拱坝河和区间入流对于区间干流的变化有明显影响。白龙江流域自 20 世纪 50 年代以来,特别是 90 年代以来,由于气候变化和大肆砍伐森林等人类活动的影响,降雨量总体上呈现显著下降趋势,并且降水是白龙江流域径流的主要补给来源,舟曲—武都区间降雨量的显著减

少趋势是导致径流显著性下降的主要原因,径流变化

趋势与降雨量总体趋势相一致。

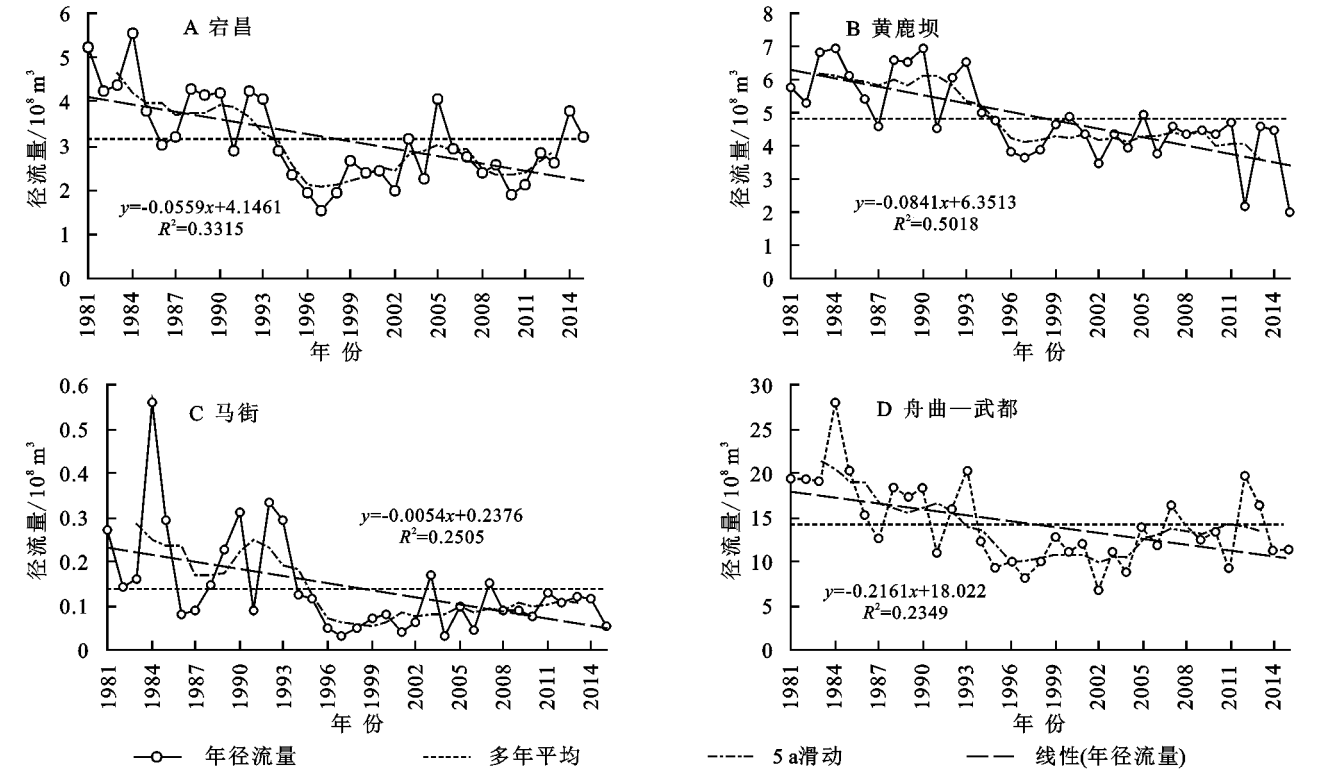


图1 干支流径流量年际变化过程

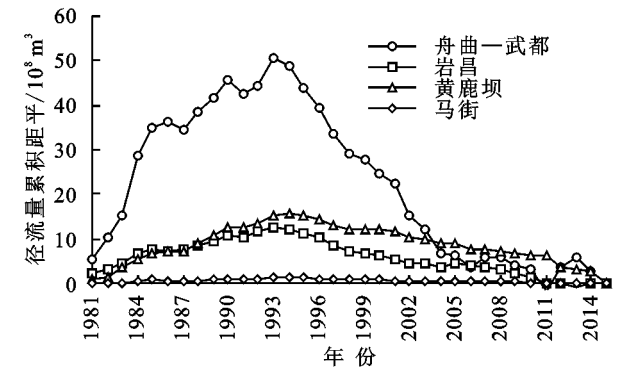


图2 干支流径流量累积距平

采用 M-K 法对各水文站的年径流系列进行趋势检验,将计算结果与显著性水平分别为 0.1,0.05,0.01 的置信区间临界值 $\pm 1.28, \pm 1.96, \pm 2.58$ 对比,可以看出宕昌、黄鹿坝检验统计量 U 均小于 -2.58 ,达到了 0.01 的显著性水平,马街、舟曲—武都干流区间检验统计量 U 均小于 -1.96 ,达到了 0.05 的显著性水平,且统计量 U 全部为负值,可见,年径流变化趋势呈现显著下降趋势,显著性水平均在 0.05 以上。对比图 1 中干支流径流量年际变化过程,计算结果与年际变化趋势一致。径流变化趋势检验结果见表 2。

3.2 干支流径流量变化突变分析

白龙江支流岷江上的宕昌站统计量 UF_k 除 1984 年外,均小于 0,呈现下降趋势,与 M-K 趋势检验结果一致,显著性水平 0.01,在 95% 的置信水平条件

下,年径流突变的临界年份为 1986 年。支流拱坝河上黄鹿坝站 UF_k 除 1983—1986 年、1990 年大于 0,呈现上升趋势,其他年份均小于 0,为下降趋势,显著性水平 0.01,突变年份为 1994 年。支流北峪河上马街站 UF_k 除 1984—1985 年、1992—1994 年大于 0,呈现上升趋势,其他年份均小于 0,为下降趋势,显著性水平 0.05,突变年份为 1991 年。舟曲—武都区间白龙江干流 UF_k 除 1985 外,其他年份均小于 0,为下降趋势,显著性水平 0.05,突变年份为 1986 年,具体见图 3。径流突变主要源于降雨等气象因素存在显著的变化,径流突变的临界年份前后均值变化明显,径流的形成除受流域气候因素的影响,还与下垫面等因素密切相关。各支流具有空间异质性,地形地貌、气象、地质、植被等各方面存在差异,地势西北高东南低,为典型的高、中山峡谷区,气候分布不均匀,自西北向东南由亚热带湿润气候过渡到高寒湿润气候,降水自上游至中游逐渐减小,多方面因素共同作用造成各支流突变年份并不完全一致。

表2 白龙江干支流径流量变化趋势检验

区间	宕昌	黄鹿坝	马街	舟曲—武都
检验统计量 U	-3.12	-4.00	-2.30	-2.41
显著性水平	0.01	0.01	0.05	0.05
变化倾向率/($\text{亿 m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)	-0.056	-0.084	-0.005	-0.216
变化趋势	↓	↓	↓	↓

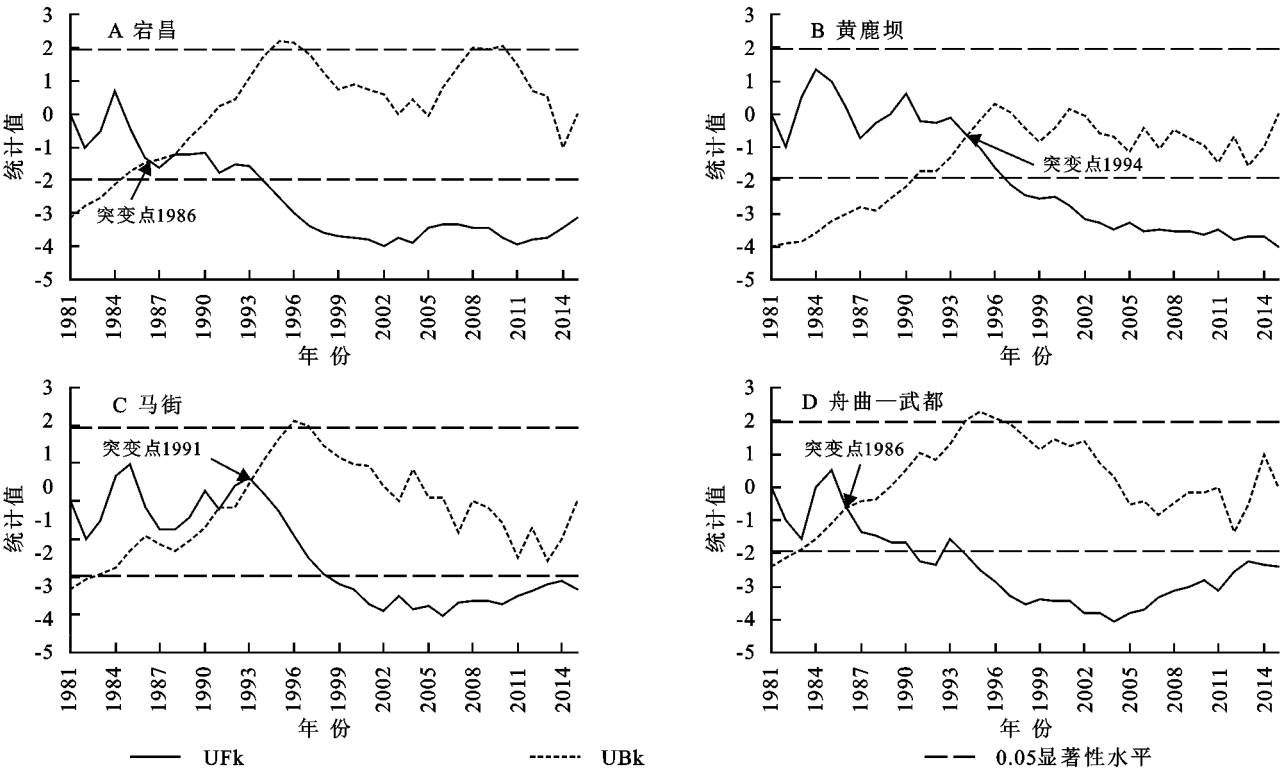


图 3 干支流径流量 M-K 突变检验

各站以突变点划分前后时段为基准期与变化期，统计不同时段的径流特征参数值，见表 3。各站年径流量均呈下降趋势，宕昌站由基准期 4.37 亿 m³/a 降至变化期 2.89 亿 m³/a，较基准期减少 33.87%；黄鹿坝站由基准期 5.94 亿 m³/a 降至变化期 4.10 亿 m³/a，减少率 30.98%；马街站由基准期 0.22 亿 m³/a 降至变化期 0.10 亿 m³/a，减少率 54.55%；舟曲—武都区区间干流由基准期 20.16 亿 m³/a 降至变化期 12.88 亿 m³/a，减少率 36.11%，尽管年径流量最小，突变年份前后马街减少率最大，其次为舟曲—武都区区间干流。各站各时期变差系数与极值比存在差异，表明各站径流年际波动变化明显。宕昌 1986 年前后由特丰水年变为平水年，黄鹿坝 1994 年前后由特丰水年变为偏枯水年，马街 1991 年前后由特丰水年变为特枯水年，舟曲—武都区区间干流 1986 年前后由特丰水年变为平水年。突变年份前后各时期呈现不同的年景分布，与各支流的地形地貌、气象、植被覆盖等气候及下垫面条件差异有关。

3.3 干支流变化特征关系

根据舟曲—武都区区间干流 M-K 突变检验，突变点为 1986 年，以 1986 年为界，1981—1986 年为基准期，1987—2015 年为变化期，利用累积量斜率变化率 (SCRCQ 法) 探讨舟曲—武都区区间 3 条支流对于白龙江干流的影响，计算得到各支流和区间入流对舟曲—武都区区间干流 1986 年前后出现变化的影响率大

小，是变化期对比基准期斜率变化的反映，从各部分径流 1986 年前后变化率的角度得到各部分的影响率。具体见表 4。

表 3 干支流径流量时段变化特征

站点	时段	均值/ (亿 m ³ · a ⁻¹)	极值比	变差 系数	距平 百分率	年景
宕昌	1981—1986	4.37	1.84	0.21	39.17	特丰水年
	1987—2015	2.89	2.78	0.28	-7.96	平水年
	1981—2015	3.14	3.62	0.32	—	—
黄鹿坝	1981—1994	5.94	1.54	0.14	22.73	特丰水年
	1995—2015	4.1	2.44	0.19	-15.29	偏枯水年
	1981—2015	4.84	3.46	0.25	—	—
马街	1981—1991	0.22	7.07	0.66	57.14	特丰水年
	1992—2015	0.1	10.71	0.71	-28.57	特枯水年
	1981—2015	0.14	18.09	0.80	—	—
舟曲—武都	1981—1986	20.16	1.84	0.21	42.68	特丰水年
	1987—2015	12.88	3.00	0.28	-8.85	平水年
	1981—2015	14.13	4.12	0.32	—	—

根据舟曲—武都区区间的白龙江干流累积径流量—年份曲线(图 4)，基准期斜率为 19.83，变化期斜率 12.19，变化期较基准期的变化率—38.55%。依据舟曲—武都干流累积径流量—支流各站累积径流量曲线(图 5)，支流岷江宕昌站基准期斜率由 4.82 变为变化期斜率 4.52，变化率—6.28%，对舟曲—武都干流径流变化影响率为 16.29%；支流拱坝河黄鹿坝站基准期斜率由 3.29 变为变化期斜率 2.72，变化率—17.34%，对舟曲—武都干流径流变化影响率为 44.97%；支流北峪河为一条

径流量较小的支流,多年平均径流量仅为 0.14 亿 m^3/a ,占舟曲—武都干流多年径流量的 0.99%,比重不足 1%,对于舟曲—武都区间干流影响十分有限,这里考虑其影响率为 1%;与三条支流影响率做差,剩余的干流区间入流影响率为 37.74%。可见,对于舟曲—武都区间白龙江干流径流变化,拱坝河支流变

化影响最大,其次是干流区间入流变化、岷江支流变化,最后是北峪河小支流的影响。影响率大小除与各支流的径流量大小有关,也与其径流变化率相关,北峪河马街站径流量占比不足 1%,影响率最小,虽然区间入流径流量大于拱坝河黄鹿坝径流量,但因拱坝河径流变化率较大,其影响率最大。

表 4 支流径流对干流径流影响影响率

时期	舟曲—武都		宕昌		影响率/%	黄鹿坝		影响率/%	马街	区间入流
	斜率	变化率/%	斜率	变化率/%		斜率	变化率/%		影响率/%	影响率/%
1981—1986	19.83	—	4.82	—		3.29	—			
1987—2015	12.19	−38.55	4.52	−6.28	16.29	2.72	−17.34	44.97	1	37.74

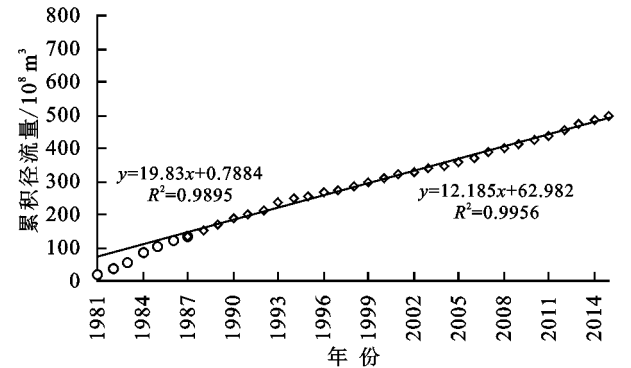


图 4 舟曲—武都累积径流一年份曲线

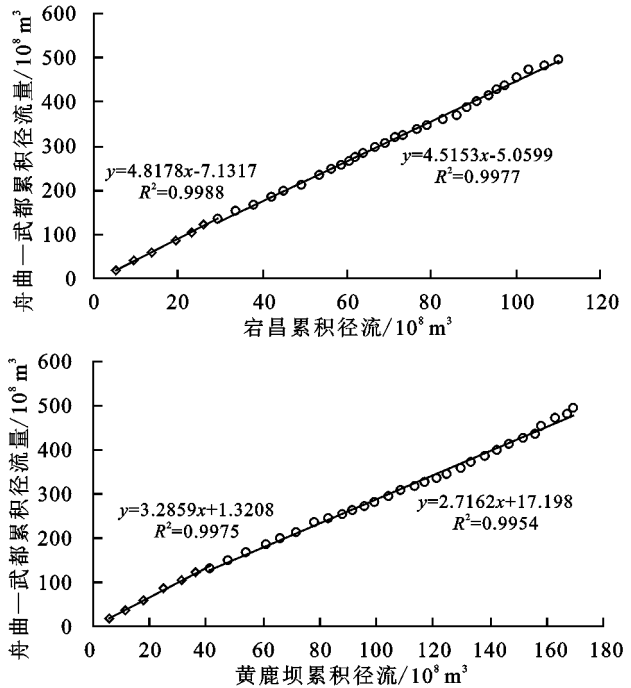


图 5 宕昌站和黄鹿坝站径流双累积曲线

4 结论

(1) 1981—2015 年 35 a 舟曲—武都区间白龙江干流多年平均径流量 14.13 亿 m^3/a ,岷江宕昌站、拱坝河黄鹿坝站、北峪河马街站、舟曲—武都干流区间入流分别为 3.14 亿 m^3/a ,4.84 亿 m^3/a ,0.14 亿 m^3/a ,6.01 亿 m^3/a ,舟曲—武都干流区间入流占比最大为 42.56%,其次支流拱坝河 34.22%,

支流北峪河占比最小为 0.99%,可见就径流量而言,区间入流量明显高于支流径流量。各站径流年际变化整体呈现显著下降趋势,且显著性水平达到 0.05 以上。

(2) 各站径流量线性倾向变化率不同,线性倾向变化率舟曲—武都区间干流最大,为 $-2.16 \text{ 亿 m}^3/10 \text{ a}$,35 a 减少量高达 7.56 亿 m^3 ,其次黄鹿坝和宕昌 $-0.84 \text{ 亿 m}^3/10 \text{ a}$ 、 $-0.56 \text{ 亿 m}^3/10 \text{ a}$,减少量分别为 2.94 亿 m^3 ,1.96 亿 m^3 ,马街变化率最小为 $-0.05 \text{ 亿 m}^3/10 \text{ a}$,减少量 0.18 亿 m^3 ,相比区间干流减少量,支流拱坝河占比 38.89%,支流岷江占比 25.93%,北峪河占比 2%,区间入流占比 32.8%,可见支流拱坝河和区间入流对于区间干流的变化有明显影响。

(3) 在 95%的置信水平条件下,舟曲—武都区间白龙江干流、白龙江支流岷江上的宕昌站、白龙江支流拱坝河上黄鹿坝站、白龙江支流北峪河上马街站突变年份依次为 1986 年、1986 年、1994 年、1991 年,突变年份前后年景分别为特丰水年—平水年、特丰水年—平水年、特丰水年—偏枯水年、特丰水年—特枯水年。各站统计量 Ufk 除个别年份外,大部分年份均小于 0,呈现下降趋势,与 M-K 趋势检验结果一致。

(4) 对于舟曲—武都区间白龙江干流径流变化,舟曲—武都区间干流变化期较基准期的变化率 -38.55% 、支流岷江宕昌站变化率 -6.28% 、支流拱坝河黄鹿坝站变化率 -17.34% ,1986 年前后拱坝河变化大于岷江,拱坝河支流变化影响最大,为 44.97%,其次是干流区间入流变化,影响率为 37.74%,再其次为岷江支流变化,影响率 16.29%,最后是北峪河小支流的影响,影响率为 1%。

参考文献:

[1] Hu W, Liu H, Bao A, et al. Influences of environmental changes on water storage variations in Central Asia[J]. Journal of Geographical Sciences, 2018,28(7):985-1000.
[2] 王国庆,张建业,管晓祥,等.中国主要江河径流变化成因定量分析[J].水科学进展,2020,31(3):313-323.

- [3] Wang G, Wang Y. Managing water for sustainable utilization as China warms[J]. *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources*, 2019, 17(1):10-13.
- [4] 贾飞飞,李鑫,孙翠洋,等.1951—2016 年黄羊河流域径流变化特征及影响因素分析[J].*辽宁师范大学学报:自然科学版*,2019,42(2):262-267.
- [5] 冯禹昊.基于 Morlet 小波的辽河径流量变化及其成因分析[J].*水土保持研究*,2019,26(2):208-215.
- [6] 赵阳,胡春宏,张晓明.近 70 年黄河流域水沙情势及其成因分析[J].*农业工程学报*,2018,34(21):112-119.
- [7] 刘昌明,田巍,刘小莽,等.黄河近百年径流量变化分析与认识[J].*人民黄河*,2019,41(10):11-15.
- [8] 王娇,姜仁贵,解建仓,等.泾河流域径流量变化特征研究[J].*水资源与水工程学报*,2018,29(6):88-93.
- [9] 巩杰,马学成,张玲玲,等.基于 InVEST 模型的甘肃白龙江流域生境质量时空分异[J].*水土保持研究*,2018,25(3):191-196.
- [10] 陈宗良,叶振南,王志宏,等.白龙江流域中上游第四纪沉积物的发育特征及其灾害效应[J].*水文地质工程地质*,2019,46(2):29-36.
- [11] 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.
- [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):14-19,26.
- [13] 巩杰,柳冬青,马学成,等.甘肃省白龙江流域生态承载力的时空变化[J].*水土保持通报*,2017,37(6):242-247.
- [14] 白君瑞,徐宗学,班春广,等.基于 Z 指数的雅鲁藏布江流域径流丰枯变化及其特征分析[J].*北京师范大学学报:自然科学版*,2019,55(6):715-723.
- [15] 李勃,穆兴民,高鹏,等.1956—2017 年黄河干流径流量时空变化新特征[J].*水土保持研究*,2019,26(6):120-126,132.
- [16] 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(2):1-13.
- [17] 李琬欣,熊东红,张素,等.四川凉山州孙水河流域近 60 年来径流趋势特征分析[J].*水土保持学报*,2020,34(2):130-137.
- [18] 赵阳,胡春宏,张晓明,等.近 70 年黄河流域水沙情势及其成因分析[J].*农业工程学报*,2018,34(21):112-119.
- [19] Zhao G, Li E, Mu X, et al. Changing trends and regime shift of streamflow in the Yellow River basin[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2015, 29(5):1331-1343.
- [20] 冯家豪,赵广举,穆兴民,等.黄河中游区间干支流径流变化特征与归因分析[J].*水力发电学报*,2020,39(4):1-15.

(上接第 93 页)

- [17] Mudroch A, Azcue J. Manual of aquatic sediment sampling [M]. Boca Raton, Florida: Lewis Publishers, 1995.
- [18] Varol M, Şen B. Assessment of nutrient and heavy metal contamination in surface water and sediments of the upper Tigris River, Turkey[J]. *Catena*, 2012, 92:1-10.
- [19] Nasirian H, Irvine K N, Sadeghi S M T, et al. Assessment of bed sediment metal contamination in the Shadegan and Hawr Al Azim wetlands, Iran [J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2016, 188(2): 107, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5117-6>.
- [20] Marvin C H, Charlton M N, Stern G A, et al. Spatial and temporal trends in sediment contamination in Lake Ontario[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2003, 29(2):317-331.
- [21] 李志清,吴苏舒,诸晓华.石臼湖表层沉积物营养盐与重金属分布及污染评价[J].*水资源保护*,2020,36(2):73-78.
- [22] 钟文聪,王朝晖,江涛.渤海中部海域表层沉积物生源要素分布特征及其环境评价分析[J].*海洋环境科学*,2020,39(1):39-45,52.
- [23] 李磊,平仙隐,王云龙.春、夏季长江口海域表层沉积物中重金属污染的模糊综合评价及来源分析[J].*海洋环境科学*,2014,33(1):46-52.
- [24] 付雁鹏,高嘉瑞.模糊数学在水质评价中的应用[M].武汉:华中工学院出版社,1986.
- [25] 杨光丽.模糊综合评价法在土壤环境质量评价中的应用实例[J].*气象与环境学报*,2008,63(3):63-66.