

# 白龙江上游径流变化特征及其对降水和人类活动的响应

张晓晓, 张 钰, 徐浩杰

(兰州大学 资源环境学院, 甘肃 兰州 730000)

**摘 要:** [目的] 研究近 50 a 来白龙江上游径流变化特征, 并进一步分析径流对降水的滞后效应以及降水与人类活动对径流变化的影响。[方法] 以 1961—2010 年白龙江上游武都水文站的月径流数据和白龙江上游气象站月降水量数据为基础, 采用集中度和集中期、Mann—Kendall 法、R/S 分析法等多种数理统计方法, 分析了近 50 a 来白龙江上游径流量在年际、季节和月尺度上的变化特征, 并预测了其未来可能的变化趋势。[结果] 白龙江上游径流年内分配极不均匀, 多年平均集中度  $C_d$  达 34.92%。近 50 a 来白龙江上游年径流量呈极显著减少趋势 ( $p < 0.001$ ), 变化率为  $-3.942 \times 10^8 \text{ m}^3/10 \text{ a}$ , Hurst 指数为  $0.98 > 0.5$ , 表明未来一段时间内白龙江上游年径流量可能继续呈减少趋势。四季和 1—12 月径流量均呈显著减少趋势 ( $p < 0.05$ ), 年径流量在 1990 年发生由多到少的突变。白龙江上游径流对降水的响应存在滞后效应, 且滞后时间有微弱延长趋势。近 50 a 来白龙江上游径流系数呈显著减小趋势 ( $p < 0.001$ ), 降水量转化为径流的部分逐年减少, 径流系数在 1990 年后减少了 0.14。[结论] 1990 年之前, 白龙江上游径流变化主要受降水影响; 1990 年以后, 人类活动逐渐成为影响白龙江上游径流变化的主要因素。

**关键词:** 白龙江上游; 径流变化; 降水变化; 人类活动

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)02-0014-06

中图分类号: P339

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.02.005

## Runoff Variation Characteristics and Its Responses to Precipitation and Human Activities in Upper Reaches of Bailong River Basin

ZHANG Xiaoxiao, ZHANG Yu, XU Haojie

(College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China)

**Abstract:** [Objective] Researching the characteristics of runoff changing in the upper reaches of Bailong River in recent 50 years, and further analyzing the lagging effect of runoff to precipitation and the impacts of precipitation and human activities on runoff changes. [Methods] Based on monthly runoff observation data in Wudu hydrological station and monthly rainfall data in weather stations in the upper reaches of Bailong River basin in 1961—2010, the monthly, seasonal and annual variations of runoff in upper reaches of Bailong River basin and its tendency were analyzed using methods of concentration frequency, concentration period, Mann—Kendall test, rescaled range analysis, and so on. [Results] The annual runoff distribution in the studied area was extremely uneven. The multi-year average of runoff concentration frequency was about 34.92%; the inter-annual change of annual runoff demonstrated a decreasing trend significantly, at a rate of  $-3.942 \times 10^8 \text{ m}^3/10 \text{ a}$  ( $p < 0.001$ ). The Hurst index was 0.98, which indicated that the decreasing trends of runoff in the studied area will continue in the future. The seasonal and monthly change of runoff also decreased significantly ( $p < 0.05$ ). The annual runoff dropped off abruptly in 1990 which indicated that annual runoff showed a significantly decreasing trend. There was an about 22.6 days hysteresis in the response of runoff to precipitation, and the hysteresis had slightly rising trend. The annual runoff coefficient showed that the runoff from rainfall decreased significantly ( $p < 0.001$ ) with the time due to plant interception, infiltration and evaporation in recent 50 years. The runoff coefficient after 1990 decreased by 0.14 as compared

收稿日期: 2013-12-10

修回日期: 2014-07-10

资助项目: 国家自然科学基金项目“黑河上游土壤水文异质性观测试验及其对山区水文过程的影响”(91125010)

第一作者: 张晓晓(1988—), 女(汉族), 黑龙江省齐齐哈尔市人, 硕士研究生, 研究方向为工程水文学。E-mail: xxzhang2011@lzu.edu.cn。

通信作者: 张钰(1963—), 男(汉族), 甘肃省平凉市人, 博士, 副教授, 主要从事水资源规划论证评价和水土保持方面的研究。E-mail: gszhangyu@126.com。

with the previous period. [Conclusion] Before 1990, precipitation was the dominant factors, whilst, the variations of runoff in the studied area were mainly attributed to human activities after 1990.

**Keywords:** the upper reaches of Bailong River basin; runoff change; precipitation variation; human activities

河川径流是水循环的重要环节,又是水量平衡的基本要素,其变化规律及影响因素是水文学研究的重要课题<sup>[1-3]</sup>。河川径流的时空变化主要受到气候变化及人类活动两方面因素的影响,其演变过程存在规律性。近几十年来,随着全球气候变暖和人类活动的加剧,河川径流发生了显著变化。因此,研究近几十年来河川径流演化过程及机制,不仅有助于认识流域水循环对气候变化和人类活动的响应,同时对流域内水资源的合理开发和配置均具有重要意义<sup>[4-5]</sup>。白龙江系嘉陵江支流,是甘肃省东南部重要的水源地。近几十年来,受气候变化和人类活动的影响,白龙江流域水资源发生了显著变化。研究白龙江流域径流变化特征及影响因素,对制定区域经济社会发展战略,促进区域工农业生产和生态环境可持续发展均具有重要参考价值<sup>[6-7]</sup>。目前已有不少研究涉及白龙江流域径流年内、年际变化特征及径流变化与气象要素相互关系等<sup>[8-11]</sup>,但在径流对降水的滞后效应以及降水和人类活动对径流变化的影响等方面的研究还较少。本研究基于实测降水和径流资料,以白龙江上游为研究区,采用集中度和集中期、Mann—Kendall 法、R/S 分析法等研究近 50 a 来白龙江上游径流变化特征,并进一步分析径流对降水的滞后效应以及降水与人类活动对径流变化的影响,旨在揭示全球变化大背景下,白龙江上游径流变化特征及由降水变化引起的水文效应,为流域水资源管理利用和生态预警提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

白龙江属长江二级支流,嘉陵江一级支流,河流全长 535 km,流域面积 32 810 km<sup>2</sup>,发源于甘肃省碌曲县与四川省若尔盖县交界的郎木寺乡,向东流经碌曲、若尔盖、迭部、舟曲、宕昌、武都、文县、青川及广元 9 个县(市),于昭化县旧城北部汇入嘉陵江,主要支流包括岷江、白水江、达拉河、大团峪河、拱坝河和清江河。白龙江流域位于秦巴山地西部,青藏高原东缘,横跨甘肃和四川两省,受构造运动和流水侵蚀作用影响,该区多高山峡谷地貌,地貌类型包括山地、丘陵和盆地,地理位置介于 102° 31′—105° 45′ E, 32° 10′—34° 23′ N,海拔介于 450~4 900 m,相对高差 1 000~2 000 m,地势由西北向东南递减。武都水文

站(104°55′E,33°24′N)以上流域为白龙江上游,其测验断面位于武都县城区北峪河与白龙江交汇口下游约 100 m 处,断面以上控制面积为 14 288 km<sup>2</sup>,多年平均径流量为 3.98×10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>。白龙江流域气候类型复杂多样,具有明显的季风气候特征,流域上游气候属高寒湿润型,年平均气温 1~4 ℃,年降水量 450~850 mm,主要集中在 5—9 月份,雨量约占年降水总量的 78.44%。年蒸发量 400~480 mm,主要集中在 5—9 月份,蒸发量约占年总量的 86.85%。径流主要集中在 5—10 月份,约占年径流总量的 73.01%。

### 1.2 数据来源

1961—2010 年武都水文站月径流量数据来自甘肃省水文年鉴与水资源公报。选取 1961—2010 年白龙江流域及其周边区域 20 个典型气象站月降水量数据,具体包括玛曲、碌曲、临潭、卓尼、岷县、郎木寺、迭部、宕昌、若尔盖、礼县、西和、成县、武都、南坪、文县、康县、平武、青川、广元和剑阁站。引入经度、纬度、海拔这 3 个主要影响降水时空分布的影响因子,采用多元线性回归加残差分析法<sup>[12]</sup>对降水量进行空间插值,得到白龙江上游降水量的空间插值数据。采用交叉检验法,以误差平均值和误差标准差为指标对插值前后的数据进行 *T* 检验。检验结果表明,在 99% 的置信度下绝大部分数据的显著性概率均大于 0.01,插值结果可靠。

### 1.3 分析方法

采用 Mann—Kendall 法、集中度和集中期、R/S 分析法、降水—径流深度双累积曲线法等数理统计方法,研究了白龙江上游径流年际、季节(春、夏、秋、冬四季分别为 3—5 月、6—8 月、9—11 月和 12 月—翌年 2 月)及月尺度上的变化特征,并建立了降水和径流之间的关系。

1.3.1 Mann—Kendall 检验法 采用 Mann—Kendall 非参数检验方法进行趋势分析,其优点是受异常值和数据分布特征的影响较小,被广泛应用于水文和气象时间序列的变化趋势分析<sup>[13]</sup>。利用 Mann—Kendall 统计值进行趋势显著性检验时,先假设数据序列平稳且随机独立,通过两尾检验于正态分布表中查出一定显著性水平下的临界检验值。当统计值大于临界检验值时,认为数据序列变化趋势显著。同时 Mann—Kendall 统计值为正时表示序列呈上升趋势,当 Mann—Kendall 统计值为负时表示序列呈下降趋

势。Mann—Kendall 统计值的绝对值越大,表明序列变化趋势越显著。将数据序列逆序,再重复 Mann—Kendall 计算过程,得到另一统计值,若两组统计值的交叉点位于信度之间,该点便是突变点的开始。本研究采用 Mann—Kendall 法研究了白龙江上游径流的年际变化趋势及突变情况。

1.3.2 集中度和集中期 集中度和集中期是采用逐月径流来反映年内径流集中程度和最大径流出现时间的重要指标<sup>[14-15]</sup>。集中度和集中期的计算是将一年内各月径流作为向量,月径流的大小为向量的长度,所处的月份为向量的方向。从 1 月到 12 月每月的方位角分别为 0,30,60,⋯,360 度,并把每个月的径流分解为  $x$  和  $y$  两个方向上的分量,其计算公式为:

$$R_x = \sum_{i=1}^{12} R(t) \cos \theta, R_y = \sum_{i=1}^{12} R(t) \sin \theta,$$

$$C_d = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} / \sum_{i=1}^{12} R(t), D = \arctg(R_y / R_x) \quad (1)$$

式中: $R$ ——径流; $C_d$ ——集中度; $D$ ——集中期。

1.3.3  $R/S$  分析法 利用  $R/S$  分析法计算径流的长期相关性特征<sup>[16]</sup>,其计算方法为:给定一时间序列  $X_i, i=1, 2, \dots, n$ ,对于任意正整数  $n$ ,定义:

均值序列:

$$\bar{X}_j = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j X_i \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

累积离差序列:

$$Y_\xi = \sum_{i=j=1}^n (X_i - \bar{X}_i) \quad (\xi=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

极差序列:

$$R_\xi = \max Y_\xi - \min Y_\xi \quad (\xi=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

标准差序列:

$$S_\xi = \left[ \frac{1}{\xi} \sum_{i=j=1}^n (X_i - \bar{X}_i)^2 \right]^{1/2} \quad (\xi=1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

考虑比值序列:

$$\frac{R}{S}(\xi) = \frac{R_\xi}{S_\xi} \quad (\xi=2, 3, \dots, n) \quad (6)$$

如果存在:  $E\left[\frac{R}{S}(\xi)\right] \approx C\xi^H \quad (\xi \rightarrow \infty)$ , 则表明所

分析的时间序列存在 Hurst 现象。 $H$  称为 Hurst 指数, $H$  值可根据序列  $\frac{R}{S}(\xi)$  和的  $\xi$  值,在双对数坐标系中用最小二乘法拟合回归方程得到。若  $0.5 < H < 1$ ,表明时间序列具有持续性,未来总体趋势与过去一致。 $H$  越接近 1,持续性越强;若  $H=0.5$ ,表明时间序列是相互独立,方差有限的随机序列;若  $0 < H < 0.5$ ,表明时间序列具有反持续性,未来总体趋势与过去相反。 $H$  值越接近于 0,反持续性越强,而其中的随机性成分越少。

1.3.4 双累积曲线 双累积曲线法的基本思想是两个变量按同一时间长度逐步累加,其拐点可作为分析变量阶段性变化的依据<sup>[17-18]</sup>。本研究运用降水—径流深度双累积曲线揭示降水和人类活动对白龙江上游径流变化的影响。

## 2 结果与分析

### 2.1 白龙江上游径流变化特征

由图 1 可以看出,1961—2010 年白龙江上游年径流量呈减少趋势,其变化率为  $-3.942 \times 10^8 \text{ m}^3 / 10 \text{ a}$  ( $R^2=0.362, p<0.001$ ),Mann—Kendall 秩序相关系数检验的统计值( $M$  值)为  $-4.057 < -2.57$ ,表明白龙江上游年径流量减少趋势极显著。采用  $R/S$  分析法预测未来白龙江上游年径流量可能的变化趋势,其 Hurst 指数为  $0.98 > 0.5$ ,表明未来径流量变化与现在保持相同的趋势,即持续减少。结合  $M$  值和 Hurst 指数分析,若白龙江上游的气候变化和人类活动依然保持现有趋势或变化更为剧烈时,其年径流量将继续呈显著减少趋势。从白龙江上游年径流量累积距平曲线的变化情况看(图 1),近 50 a 来,白龙江上游年径流量大致经历了“增加—减少—增加—减少”4 个阶段:1961—1968 年,年径流量呈增加趋势;1969—1972 年,年径流量呈减少趋势;1973—1990 年,年径流量再次呈增加趋势;1991 年以后,年径流量再次呈减少趋势。

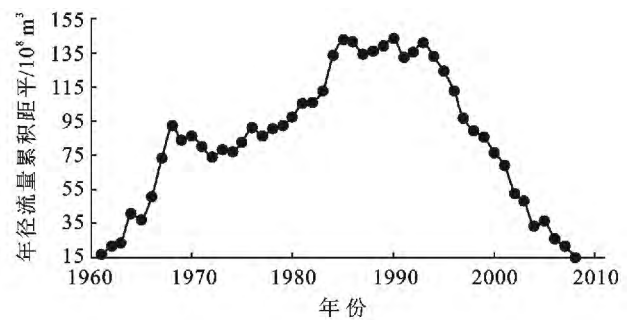
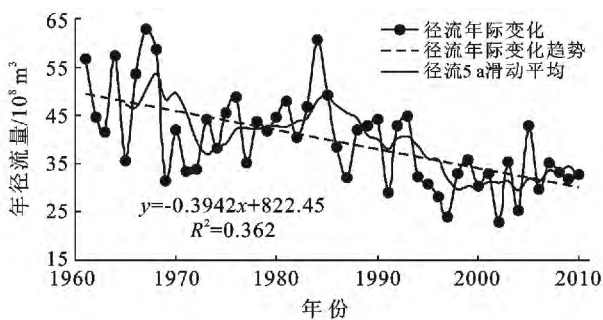


图 1 近 50 a 来白龙江上游年径流量的年际变化特征

白龙江上游四季径流量均呈递减趋势(图 2),春季、夏季、秋季、冬季径流量变化率依次为  $-0.422 \times 10^8 \text{ m}^3/10 \text{ a}$  ( $R^2=0.473, p<0.001$ ),  $-0.741 \times 10^8 \text{ m}^3/10 \text{ a}$  ( $R^2=0.338, p<0.001$ ),  $-1.291 \times 10^8 \text{ m}^3/10 \text{ a}$  ( $R^2=0.196, p<0.01$ ),  $-1.498 \times 10^8 \text{ m}^3/10 \text{ a}$  ( $R^2=0.214, p<0.001$ ), 冬季径流减少速率最快,其次是秋季、夏季和春季。由表 1 可以看出, Mann—Kendall 秩序相关系数检验的四季径流  $M$  值分别为  $-4.927, -4.077, -3.522$  和  $-2.886$ , 均小于  $-2.57$ , 表明白龙江上游四季径流量均呈极显著减少趋势, 且春季径流减少最为明显, 其次为夏季、秋季和冬季。采用  $R/S$  分析法对四季径流未来可能的变化趋势进行预测, 其 Hurst 指数分别为  $0.984, 0.964, 0.661$  和  $0.94$ , 均大于  $0.5$ , 表明白龙江上游四季径流变化趋势与现状保持一致。结合  $M$  值和 Hurst 指数分析, 若白龙江上游的气候变化和人类活动依然保持

现有趋势或变化更为剧烈时, 在未来一段时间内白龙江上游四季径流量将继续呈显著减少趋势。

采用 Mann—Kendall 秩相关分析法对近 50 a 来白龙江上游月径流量序列进行分析(图 3), 结果表明, 除 6, 8, 10 月径流量呈显著减少趋势外, 其余月份均呈极显著减少趋势。

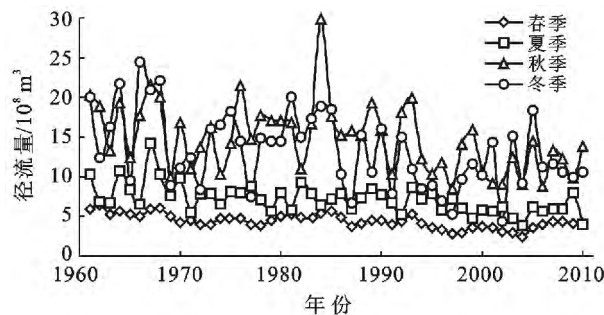


图 2 近 50 a 来白龙江上游径流量季节变化特征

表 1 白龙江上游四季径流变化趋势定量检验

季节	Mann—Kendall 秩次相关系数				显著性	Hurst 指数	未来趋势
	$M$ 值	趋势	$M_{\alpha}=0.05$	$M_{\alpha}=0.01$			
春	-4.926 9	递减	$\pm 1.96$	$\pm 2.57$	极显著	0.983 5	递减
夏	-4.076 9	递减	$\pm 1.96$	$\pm 2.57$	极显著	0.964 4	递减
秋	-3.521 6	递减	$\pm 1.96$	$\pm 2.57$	极显著	0.660 6	递减
冬	-2.885 9	递减	$\pm 1.96$	$\pm 2.57$	极显著	0.939 9	递减

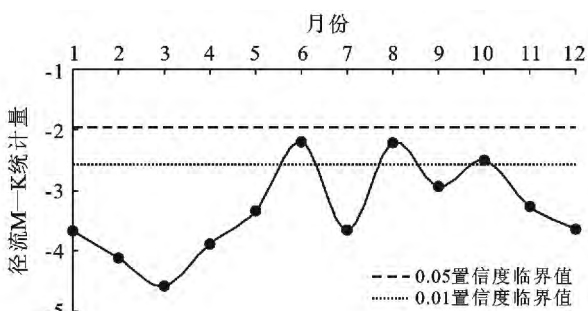


图 3 近 50 a 来白龙江上游月径流量趋势演化

### 2.2 白龙江上游降水与径流的相互关系

白龙江上游径流集中度的年际变化呈波动性(图 4), 50 a 中有 40 a 径流集中度在  $30\% \sim 50\%$  之间, 占  $80\%$ , 最小值为  $20.19\%$ , 最大值为  $48.43\%$ , 表明白龙江上游径流相对集中在某几个月内。近 50 a 来白龙江上游径流集中度有微弱下降趋势, 其变化率为  $0.14\% / 10 \text{ a}$  ( $R^2=0.001, p=0.827$ ), 表明径流年内分配有趋于均匀化的趋势。白龙江上游径流集中期亦呈波动性, 且随着时间推移, 集中期有提前趋势, 其变化率为  $-0.794 \text{ d} / 10 \text{ a}$  ( $R^2=0.004, p=0.644$ )。从径流集中期的时间分布范围来看, 主要集中在 8 月 15 日至 9 月 15 日, 50 a 中有 34 a 落在这一时间段

内, 占总年份的  $68\%$ 。白龙江上游降水集中度分布在  $41.98\% \sim 64.73\%$  之间, 大部分集中在  $50\% \sim 60\%$  之间, 且近 50 a 来降水集中度略有下降趋势(图 4), 其年际变化率为  $-0.127\% / 10 \text{ a}$  ( $R^2=0.001, p=0.796$ )。降水集中期分布在 7 月 15 日至 8 月 15 日, 有 42 a 的集中期在 7 月 20 日至 8 月 10 日, 占总年份的  $84\%$ , 且近 50 a 来降水集中期有提前趋势, 其年际变化率为  $-0.988 \text{ d} / 10 \text{ a}$  ( $R^2=0.034, p=0.199$ )。白龙江上游径流主要以降水补给为主。对研究区年径流深度和降水量进行相关分析, 得到年降水量和年径流深呈极显著正相关性, 相关系数为  $0.6363$  ( $p<0.001$ ), 表明降水对径流变化有很强的控制作用。

径流系数表示流域降水量转化为径流量的比率。分析可知, 近 50 a 来, 白龙江上游径流系数呈显著减小趋势 ( $p<0.001$ ), 表明降水量转化为径流的部分在逐年减少。采用 Mann—Kendall 突变检测法对白龙江上游年径流量进行突变检测得到(图 5), 径流量在 1990 年发生了由多到少的突变, 突变前(1961—1990 年)平均径流系数为  $0.52$ , 突变后(1991—2010 年)为  $0.38$ , 表明突变后降水转化为径流的比率减少。

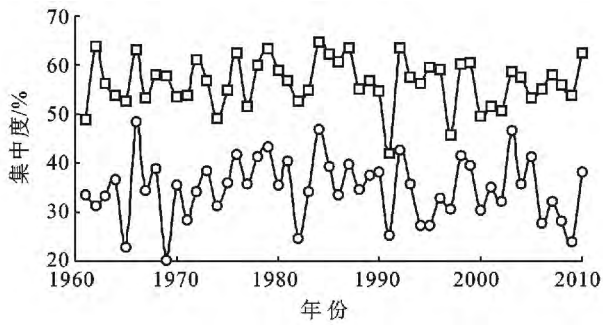


图 4 近 50 a 来白龙江上游径流、降水集中度 and 集中期的年际变化

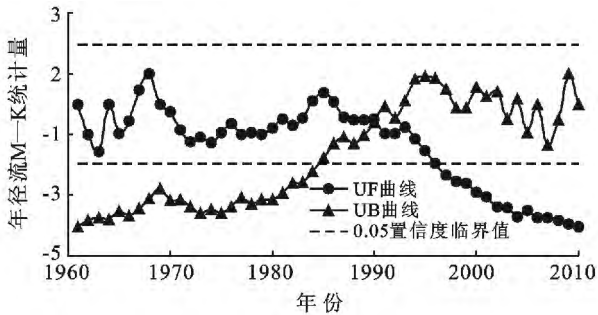
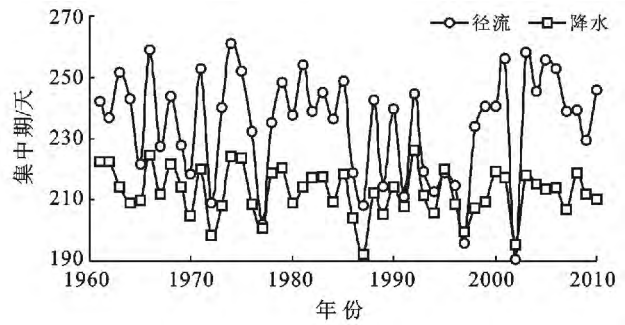


图 5 白龙江上游年径流量 Mann-Kendall 突变检测

径流的形成受流域内气候和下垫面等各种自然地理因素的综合影响。

降水转化为径流需经历停蓄阶段、漫流阶段和河槽集流 3 个阶段。由于每次降水的强度和持续性不同,加之流域下垫面的影响,径流的形成需要时间,因此流域内每次降水汇流至河道内需要一定的时间<sup>[19]</sup>,本研究运用降水和径流的集中期来探讨径流对降水的滞后效应。

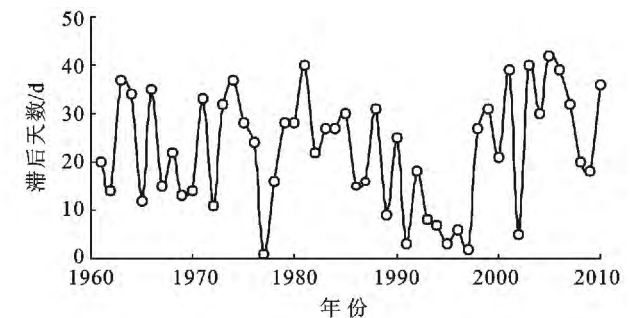
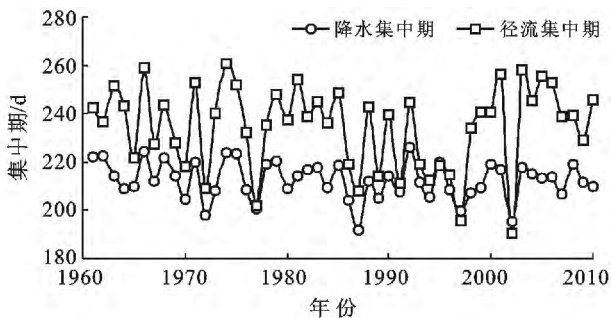


图 6 白龙江上游降水—径流集中期对比及滞后时间的年际变化

### 2.3 白龙江上游降水和人类活动对径流变化的影响

白龙江上游降水—径流深度双累积曲线在 1968 年以后发生显著偏移(图 7),且此年份位于径流突变点之前,因此,可将 1968 年以前的时段定为径流量未受人类活动干扰的基准期,并对降水—径流深度双累积曲线进行分段。

为了表明基准期选取的可行性,建立基准期内的累积降水  $\sum P$  与累积径流深度  $\sum R_D$  的相关方程,其

白龙江上游径流集中期晚于降水集中期,且两者波动形式基本一致,径流对降水存在滞后效应(图 6)。径流集中期相对降水集中期滞后的天数大致集中在 15~40 d 内,50 a 中有 34 a 滞后时间在这一区间,占 68%。径流对降水平均每年滞后天数为 22.6 d,表明从流域降水开始经过停蓄、漫流、河槽集流,然后汇流至河道大概需要 20 d 左右的时间。此外,近 50 a 来白龙江上游径流滞后于降水的天数有微弱上升趋势,其变化率为  $-0.442 \text{ d}/10 \text{ a}$  ( $R^2 = 0.003, p = 0.704$ ),各年代平均滞后天数为 21.6, 23.8, 24.3, 12.6 和 30.1 d,除 20 世纪 90 年代外,径流对降水滞后天数均呈增加趋势。

结合径流系数年际变化特征和径流—降水滞后性分析结果可知,随径流系数逐渐减小,径流对降水的滞后时间逐渐增加,表明降水转化为径流的部分在减少,大部分降水被植物截留、填洼、入渗和蒸发,导致径流对降水的滞后时间延长。

方程为:  $\sum R_D = 0.544 \sum P + 12.565$ 。依据基准期年降水和径流深度资料,分析径流深度与降水的相关关系,建立基准期内的径流深度  $R_D$  和降水量  $P$  的相关方程,其方程为:  $R_D = 0.63P - 50.86, R^2 = 0.884$ 。根据年降水量与年径流深度的相关方程可得到不同时段理论径流深度,并将其作为天然径流深度的近似值。各时段降水变化对径流变化的影响值为基准期实测值与各个时段计算值的差值;人类活动对径流变

化的影响值为基准期实测值与各时段实测值的差值减去降水变化的影响值。由表2可知,20世纪90年代以前,降水的影响率大于50%,表明降水是影响径流变化的主要因素。20世纪90年代以后,降水的影响率降到了20%左右,而人类活动的影响率达到80%左右,表明人类活动已代替降水成为影响径流变化的主要因素,降水—径流深度双累积曲线的分段结果与径流的突变时间相对应。1989年,我国正式批准开展长江中上游防护林体系建设。2000年10月,国务院正式批准了《长江上游黄河上中游地区天然林资源保护工程实施方案》。防护林工程与天保工程的实施改变了白龙江上游下垫面条件,植被条件的改善

可使得更多的降水被截留和入渗,径流对降水的滞后时间有所延长,降水转化为径流的比率有所下降,因此降水对径流的影响程度有所降低。

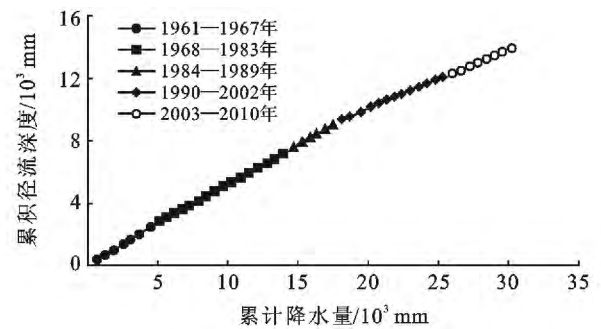


图7 白龙江上游降水—径流深度双累积曲线

表2 降水和人类活动对白龙江上游径流变化的影响

起止年份	降水/ mm	径流深度/mm		差值(计算值— 实测值)/mm	降水因子		人类活动因子	
		实测	计算		影响值/mm	影响率/%	影响值/mm	影响率/%
1961—1967	640.00	352.23	352.21	—	—	—	—	—
1968—1983	600.34	303.39	327.24	48.84	25.00	51.18	23.85	48.82
1984—1989	578.14	290.17	313.25	62.06	38.98	62.81	23.08	37.19
1990—2002	605.35	227.28	330.39	124.96	21.84	17.48	103.12	82.52
2003—2010	600.40	230.85	327.27	121.38	24.96	20.57	96.42	79.43
1968—2010	596.06	262.92	324.54	89.13	27.70	31.01	61.61	68.99

### 3 结论与讨论

(1) 近50 a来,白龙江上游年径流量呈极显著递减趋势,且未来的一段时间内径流的递减趋势还将持续。四季和1—12月径流量均呈显著减少趋势。

(2) 白龙江上游径流对降水的响应存在滞后效应,50 a平均滞后天数为22.6 d,且滞后天数随时间推移呈微弱增加趋势。

(3) 受气候变化和人类活动影响,白龙江上游年径流在1990年发生由多到少突变。近50 a来,流域径流系数逐渐减小,表明降水转变为径流的部分减少,更多的降水被植物截留、填洼、入渗和蒸发。

(4) 20世纪90年代以前,白龙江上游径流变化主要受降水影响,其次为人类活动;20世纪90年代以后,人类活动对径流的影响率超过降水,成为影响径流变化的主要因素。

(5) 在分析气候要素对径流变化的影响时,本文仅考虑降水对径流变化的影响,实际上径流变化也会受到温度、蒸发量、土地利用覆盖变化等<sup>[20-22]</sup>的影响,因此在径流变化原因分析上可能会存在一定误差。白龙江上游径流对降水滞后时间的延长以及径流系数的减少可能与该区土地利用方式的转变有关(例如长江中上游防护林体系建设、白龙江上游源区天然林

保护工程等),但流域土地利用方式的变化对白龙江上游径流影响的过程和机制目前尚不清楚,这些都需要在未来的研究中进一步分析和说明。

#### [参考文献]

- [1] 陈志恺. 中国水资源的可持续利用问题[J]. 水文, 2003, 23(1): 1-5.
- [2] 赵雪花, 黄强. 黄河上游径流变化的影响因素分析研究[J]. 自然科学进展, 2004, 14(6): 700-704.
- [3] 杨明金, 张勃. 黑河莺落峡站径流变化的影响因素分析[J]. 地理科学进展, 2010, 29(2): 166-172.
- [4] 杨丽英, 孙素艳, 郗建强, 等. 水资源可持续利用与水资源管理[J]. 中国水利, 2011(23): 92-96.
- [5] 夏军, 朱一中. 水资源安全的度量: 水资源承载力的研究与挑战[J]. 自然资源学报, 2002, 17(3): 262-269.
- [6] 杨建平, 丁永建, 陈仁升. 长江黄河源区水文和气象序列周期变化分析[J]. 中国沙漠, 2005, 25(3): 351-355.
- [7] 聂中青, 贾冰, 丁贞玉, 等. 近50 a葫芦河流域气候变化特征[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2009, 45(2): 7-11.
- [8] 田黎明, 齐石, 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.
- [9] 赵艳萍, 宁娜, 马金珠. 白龙江流域近40 a气候变化及径流的响应[J]. 节水灌溉, 2012(5): 6-10.

(下转第26页)

- of microbial biomass phosphorus in soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1982, 14(4): 319-329.
- [22] 李红, 杨宁. 湖南省绥宁县黄桑坪自然保护区珍稀濒危植物长苞铁杉自然种群年龄结构及生态对策[J]. *湖南生态科学学报*, 2014, 1(3): 12-16.
- [23] 杨宁, 邹冬生, 杨满元, 等. 衡阳紫色土丘陵坡地恢复过程中土壤微生物生物量与土壤养分演变[J]. *林业科学*, 2014, 50(12): 144-150.
- [24] 章永松, 林咸永, 罗安成. 有机肥对土壤中磷活化作用及机理研究(II): 有机肥(物)分解产生的有机酸对不同形态磷的活化作用[J]. *植物营养与肥料学报*, 1998, 4(2): 151-155.
- [25] Kmada K, Sato O, Ohsumi Y, et al. Humus composition of mountain soil in central Japan with special reference to the distribution of P type humic acid[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1967, 13(5): 151-158.
- [26] Sparling G P, Gupta V V S R, Zhu G Y. Release of ninhydrin-reactive compounds during fumigation of soil to estimate microbial C and N[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1993, 25(12): 1903-1805.
- [27] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D C. An extraction method for measuring soil microbial biomass[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19(6): 703-707.
- [28] 杨宁, 付美云, 杨满元, 等. 衡阳紫色土丘陵坡地不同土地利用模式下土壤种子库特征[J]. *西北植物学报*, 2014, 34(11): 2324-2330.
- [29] 付美云, 杨宁, 杨满元, 等. 衡阳紫色土丘陵坡地不同恢复阶段土壤微生物与养分的耦合关系[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(1): 41-48.
- [30] 陈璟, 杨宁. 亚热带红壤丘陵区 5 种人工林对土壤性质的影响[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2013, 41(12): 167-173, 178.
- [31] 陈璟, 杨宁. 衡阳紫色土丘陵坡地不同恢复阶段土壤基础呼吸及代谢熵的变化[J]. *热带亚热带植物学报*, 2013, 21(6): 514-520.
- [32] 刘作云, 杨宁. 衡阳紫色土丘陵坡地退化植被和恢复植被土壤微生物生物量的研究[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(11): 1739-1743.
- [33] 杨宁, 邹冬生, 杨满元, 等. 衡阳紫色土丘陵坡地植被不同恢复阶段土壤理化特征分析[J]. *农业现代化研究*, 2012, 33(6): 757-761.
- [34] 杨昌华, 杨宁. 衡阳紫色土丘陵坡地微地形对土壤水分及生物量的影响[J]. *湖南生态科学学报*, 2014, 1(4): 16-21.

(上接第 19 页)

- [10] 马正耀, 胡兴林, 蓝永超, 等. 1965—2010 年白龙江上游径流变化特征研究[J]. *冰川冻土*, 2011, 33(3): 612-618.
- [11] 张秀云, 姚玉璧, 王润元. 白龙江流域气候变化及其对水资源的影响[J]. *资源科学*, 2009, 31(8): 1315-1320.
- [12] 徐浩杰, 杨太保, 曾彪. 2000—2010 年祁连山植被 MODIS NDVI 的时空变化及影响因素[J]. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(11): 87-91.
- [13] 郭小芹, 刘明春, 钱莉, 等. 从 Mann—Kendall 特征看石羊河流域降水量的演变规律[J]. *干旱区地理*, 2010, 33(4): 593-599.
- [14] 汤奇成, 程天文, 李秀云. 中国河川月径流的集中度和集中期的初步研究[J]. *地理学报*, 1982, 37(4): 383-393.
- [15] 刘贤赵, 李嘉竹, 宿庆, 等. 基于集中度与集中期的径流年内分配研究[J]. *地理科学*, 2007, 27(6): 791-795.
- [16] 江田汉, 邓莲堂. Hurst 指数估计中存在的若干问题: 以在气候变化研究中的应用为例[J]. *地理科学*, 2004, 24(2): 177-182.
- [17] 侯钦磊, 白红英, 任园园, 等. 50 a 来渭河干流径流变化及其驱动力分析[J]. *资源科学*, 2011, 33(8): 1505-1512.
- [18] 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.
- [19] 白红英, 侯钦磊, 马新萍, 等. 50a 来秦岭金钱河流域水文特征及其对降水变化的响应[J]. *地理科学*, 2012, 32(10): 1229-1235.
- [20] 马新萍, 白红英, 侯钦磊, 等. 1959—2010 年秦岭灞河流域径流量变化及其影响因素分析[J]. *资源科学*, 2012, 34(7): 1298-1305.
- [21] 朱丽, 秦富仓, 姚云峰, 等. 北京市红门川流域森林植被/土地覆被变化的水文响应[J]. *生态学报*, 2010, 30(16): 4287-4294.
- [22] 石培礼, 李文华. 森林植被变化对水文过程和径流的影响效应[J]. *自然资源学报*, 2001, 16(5): 481-487.