

四川凉山州孙水河流域近60年来径流趋势特征分析

李琬欣^{1,2,3}, 熊东红^{1,2}, 张素⁴, 刘琳^{1,2,3},
袁勇^{1,2,3}, 张宝军^{1,2}, 张闻多^{1,2,3}

(1.中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室,成都 610041;2.中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所,成都 610041;3.中国科学院大学,北京 100049;4.内江师范学院,四川 内江 641100)

摘要: 基于流域出口孙水水文站流量资料,采用统计分析、趋势分析和突变分析等方法,分析了孙水河流域近60年来的径流分布特征和变化趋势;定量研究了降水和人类活动对径流变化的影响。结果表明:(1)流域年均流量年际变化较小,整体上呈现明显但不显著的下降趋势,以每年 $0.116\ 3\ \text{m}^3/\text{s}$ 的速率递减,其中流量于1997年发生了增加突变。(2)流域径流年内分布较为不均,主要集中在夏秋两季;四季流量变化中春冬两季下降趋势显著,分别以每年 $0.028\ 8, 0.070\ 9\ \text{m}^3/\text{s}$ 的速率递减;而夏秋两季下降趋势较平缓。其中流量在1995年夏天发生了增加突变。(3)人类活动和降水变化是影响孙水河流域流量减少的主要原因,不同阶段二者对流量影响程度不同。其中1975年后流域流量减少主要由人类活动引起,影响率最高达89.16%。研究成果可为研究流域产流规律服务,并为西南山区防洪防旱、水资源利用开发等提供可靠依据。

关键词: 流量; 趋势分析; 突变分析; 孙水河流域; 四川凉山州

中图分类号: TV121⁺.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)02-0130-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.02.019

Trends Analysis of Sunshuihe River Basin for the Last Six Decades in Liangshan Prefecture, Sichuan Province

LI Wanxin^{1,2,3}, XIONG Donghong^{1,2}, ZHANG Su⁴, LIU Lin^{1,2,3},

YUAN Yong^{1,2,3}, ZHANG Baojun^{1,2}, ZHANG Wenduo^{1,2,3}

(1.Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Chinese

Academy of Sciences, Chengdu 610041; 2.Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese

Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Chengdu 610041; 3.Graduate University of

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 4.Neijiang Normal University, Neijiang, Sichuan 641100)

Abstract: The runoff data was collected from Sunshuiguan hydrological station located in Sunshuihe river basin, Liangshan Prefecture, Sichuan Province, China. The runoff distribution and its tendency as well as the effects of precipitation and human activities on runoff since the last six decades were analyzed by application of the methods of Mann-Kendall trend method, cumulative departure curve inspection method, and double mass curve method. The results showed that: (1) The annual average flow had an obvious but insignificant decrease with a rate of $0.116\ 3\ \text{m}^3/\text{s}$ per year and a mutational point was observed in 1997. (2) The distribution of runoff was relatively uneven in each year, and the runoff was mainly contributed by the summer and autumn. The runoff significantly decreased in the spring and winter with a rate of $0.028\ 8, 0.070\ 9\ \text{m}^3/\text{s}$ per year, while the decrease was not significant in the summer and autumn. The flow mutation occurred in the summer of 1995. (3) The decrease of flow in the Sunshuihe river basin was mainly caused by precipitation and human activities, and the effects of the two factors on the flow varied in different periods. The decrease after 1975 was largely caused by human activities, with the highest impact rate reaching 89.16%. The research results could provide a theoretical basis for the runoff rule study, flood control and drought prevention, and water resources utilization in the mountainous areas of southwest China.

收稿日期: 2019-09-23

资助项目: 四川省科技计划项目(2018JY0545); 中国科学院先导专项 A(XDA20020401)

第一作者: 李琬欣(1995—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀、生态水文研究。E-mail: liwanxin18@mails.ucas.ac.cn

通信作者: 熊东红(1974—), 男, 博士, 研究员, 主要从事土壤侵蚀与水土保持、山地地理研究。E-mail: dxiong@imde.ac.cn

Keywords: flow; trends analysis; abrupton analysis; Sunshuihe river basin; Liangshan Prefecture of Sichuan

河川径流的变化与流域地貌特征、河道演变、洪涝灾害的发生等密切相关,是流域系统中最为活跃的部分^[1-2]。气候变化和人类活动是影响流域径流变化的 2 大重要因素^[3-4]。近年来,河川流域水文变化的研究引起了国内外研究学者的高度重视,许全喜等^[1]探讨了长江流域 50 年来不同河段、不同时段的水沙变化情况;赵广举等^[3]研究了黄河中游近 60 年来径流量和输沙量的时空演变特征。也有学者对我国西南山区流域的径流特征展开了研究,李荣波^[5]研究了雅砻江近 60 年来径流趋势特征;徐长江等^[6]分析了金沙江上游、下游近 60 年的径流变化情况。然而,国内以往研究尺度多集中于大江大河,对中小流域的研究相对较少。

孙水河位于我国西南山区四川凉山州境内,是安宁河(属金沙江二级支流)上游左岸最大支流。流域内地质构造活跃,松散堆积物多而广,水土流失极为严重,是安宁河泥沙的主要来源。径流是运移泥沙的主要动力,其变化一定程度上决定了河流输沙量的变化^[7],然而在该区域开展的径流研究报道较为鲜见。因此查明孙水河流域径流特征对于掌握流域泥沙运移规律、开展生态治理具有重要意义。本文基于孙水河流域孙水关水文站的实测系列数据,采用累积距平分析方法、非参数 Mann-Kendall 检验法、双累积曲线法等方法,将流量数据转化为逐月、四季和逐年尺度的统计数据,研究了孙水河流域近 60 年来径流趋势特征以及人类活动与降水对其变化的影响,旨在为山区水土保持规划、水资源管理、工农业发展规划等工作提供科学依据。

1 研究区概况

孙水河位于四川省凉山州境内(27°54′—28°29′N, 102°11′—102°42′E),属雅砻江二级支流,也是安宁河最大的支流,流域面积 1 617.5 km²,海拔 1 528~4 392 m,山地多,地形起伏大^[8](图 1)。孙水河发源于昭觉县尼地乡境内的洛马阿木拖山,流经向荣、两河口、米市 3 个行政区 18 个乡(镇),于冕宁县泸沽镇汇入安宁河。孙水河流域属于亚热带季风气候,具有气温日差小、风多、夜雨多、干湿季分明的特点。全年气温较高,年均气温 17~19℃。流域多年平均降水量 1 069.7 mm,有明显的雨季和旱季之分,雨季降水(6—10 月)占年降水量的 90%以上。流域土地利用类型主要有灌木林地、中覆盖度草地、旱地和高覆盖度草地等,分别占整个流域面积的 35.14%,22.26%,21.63%,10.31%。流域内植被属于中亚热带湿润山

地植被类型,主要乔木有马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)、云南松(*Pinus yunnanensis* Franch.)、冷杉(*Picea asperata* Mast.)等。主要土壤类型包括水稻土、红壤、山地草甸土等。流域径流以地表径流为主,主要由降水产生,属大气降水补给型河流。

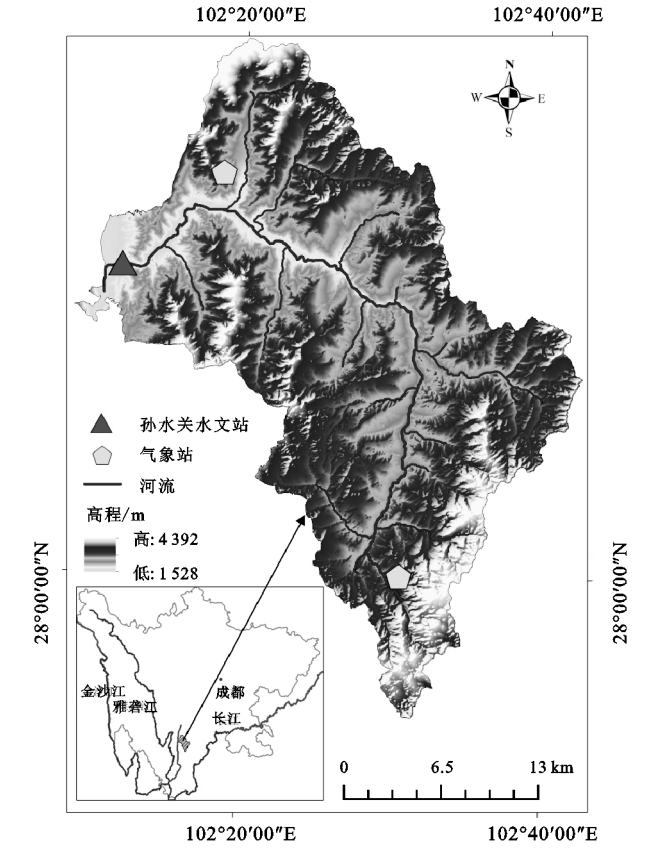


图 1 孙水河流域位置示意

2 材料与方法

2.1 数据来源

本研究数据为位于孙水河流域出口的孙水关水文站 1954—2014 年长时间序列实测逐月流量数据。该水文站位于冕宁县境内(28°18′N,102°12′E),海拔 1 640 m,集雨面积 1 596 km²,与流域面积基本一致。采用累积求和、算术平均方法,对流量数据按照四季和逐年尺度进行了统计分析。

进一步选取流域内国家气象中心越西和昭觉气象站 1954—2012 年时段内的逐月长时间序列降水数据,取其平均值代表整个流域降水量,与上述流量数据进行对比分析。为研究气候变化和人类活动对孙水河流域径流变化的影响,对流域降水数据和流量数据进行了相关性分析和双累积曲线法分析。

2.2 分析方法

2.2.1 趋势分析方法 采用累积距平分析方法研究流量的年际、年内变化阶段并判断流量变化拐点。累

积距平值指在研究时序内研究要素距平值的累加,将多个时刻的累积距平值绘成累积距平曲线,用来表示研究要素的变化阶段^[9-10]。

$$S_i = \sum_{i=1}^n X_i \tag{1}$$

其中,

$$X_i = (x_i - \bar{x}) / \bar{x} \tag{2}$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \tag{3}$$

式中: n 为研究时序长度; x_i 为第 i 年的流量值(m^3/s); $\bar{x}$ 为多年平均流量(m^3/s); X_i 为第 i 年的流量距平值; S_i 为第 i 年的流量累积距平值。

运用非参数 Mann—Kendall 检验法检验孙水河流域不同时间尺度下径流的上升或下降趋势,并利用 Kendall 倾斜率量化径流的变化程度^[11-14]。

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(y_j - y_i) \tag{4}$$

$$\text{其中,sgn}(y_j - y_i) = \begin{cases} 1 & y_j > y_i \\ 0 & y_j = y_i \\ -1 & y_j < y_i \end{cases} \tag{5}$$

式中: n 为研究时序长度; S 为统计量; y_i 、 y_j 分别为第 i 、 j 年的流量值,且 $1 < i < j < n$ 。

同时,计算检验值 Z ,

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{V(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{V(S)}} & S < 0 \end{cases} \tag{6}$$

$$\text{其中,} V(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \tag{7}$$

计算结果中,若 $Z > 0$,则研究时序内径流呈上升趋势;若 $Z < 0$,则径流呈下降趋势; $|Z|$ 越大,趋势越明显,当 $|Z|$ 大于置信区间的临界值时,说明上升或下降趋势显著。

当显著性水平 $p = 0.05$ 时,取 $Z_{1-\frac{p}{2}} = \pm 1.96$ 进行变化趋势的显著性检验;当显著性水平 $p = 0.01$ 时,取 $Z_{1-\frac{p}{2}} = \pm 2.58$ 进行变化趋势的显著性检验。

最后,运用 Kendall 倾斜率计算研究区径流的变化速率。

$$\text{slope} = \text{median}\left(\frac{y_j - y_i}{j - i}\right) \tag{8}$$

式中:slope 为 Kendall 倾斜率; y_i 、 y_j 分别为第 i 、 j 年的流量值, $1 < i < j < n$;当 slope 为正时,表示径流呈上升趋势,反之则呈下降趋势。

2.2.2 突变分析方法 结合累积距平法判断的流量变化拐点,采用 Mann-Kendall 突变检验法对孙水河流域不

同时间尺度下的流量数据进行突变点检验分析^[5,15]。

首先,假定时间序列径流数据 $Y = \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_n\}$, n 为研究时序长度,定义其统计量 S_k ,

$$S_k = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n r_i \tag{9}$$

$$\text{其中,} r_i = \begin{cases} 1 & y_j > y_i \\ 0 & y_j \leq y_i \end{cases}, 1 < i < j < n \tag{10}$$

接下来,利用数学期望 $E(S_k)$ 和方差 $V(S_k)$ 计算统计变量 UF_k ,

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{V(S_k)}} \tag{11}$$

$$\text{其中,} \begin{cases} E(S_k) = \frac{k(k+1)}{4} \\ V(S_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \end{cases} \tag{12}$$

进一步计算 UB_k , UB_k 为时间序列 Y 逆序排列的统计变量。

$$UB_k = -UF_k \tag{13}$$

当显著性水平 $p = 0.01$,取 $Z_{1-\frac{p}{2}} = \pm 2.58$ 进行突变点分析的显著性检验。绘制以上计算所得的 UF_k 、 UB_k 曲线得其交点,交点若处在置信区间,则为径流研究时序内的突变点。当 $|UF| > 2.58$ 时,径流处于显著上升或下降趋势。

2.2.3 成因分析方法 运用双累积曲线法分析降水、人类活动对流量影响的阶段性变化^[16-17]。累积曲线的拐点即为变量阶段性变化的时间点。当流量只受降水变化影响时,累积曲线应为一 条直线;当流量受到人类活动因素影响时,直线将会发生偏移。

3 结果与分析

3.1 径流分布特征

3.1.1 径流年际分布特征 孙水河流域径流年际分布特征见图 2。流域年均流量呈现逐年波动趋势,其中多年平均流量为 $35.35 \text{ m}^3/\text{s}$,最大年均流量于 1974 年测得,为 $52.39 \text{ m}^3/\text{s}$ (较多年平均流量增长 48.2%),最小年均流量为 2011 年测得,仅为 $15.09 \text{ m}^3/\text{s}$ (较多年平均流量减少 57.31%)。流域年均流量变异系数为 0.22,表明研究区流量的变异离散程度较低,年际变化较小。

3.1.2 径流年内分布特征 孙水河流域年内不同季节径流的描述统计见图 3。四季流量年内分布不均,大多集中在夏秋季。其中,秋季(8—10 月)多年平均流量最大,为 $65.86 \text{ m}^3/\text{s}$,变异系数为 0.29,占全年流量的 46.76%;夏季(5—7 月)流量多年平均值为 $50.79 \text{ m}^3/\text{s}$,变异系数为 0.34,占全年流量的 36.06%;冬季和春季流量较小,变异系数也小,其中春季多年平均

流量最小,为 $7.94 \text{ m}^3/\text{s}$, 变异系数为 0.20, 占全年流量的 5.64%; 冬季平均流量和变异系数分别为 $16.24 \text{ m}^3/\text{s}$, 0.19, 占全年流量的 11.53%。径流集中在夏秋季的原因可能为: 孙水河流域为大气降水补给型河流, 且降水量常年集中在夏秋季, 占全年降水量的 90% 以上。而夏秋季流量变异系数大, 可能是由于 2 个季节流域降雨强度大, 时空分布不均, 常发生暴雨、夜雨等原因所致^[8]。

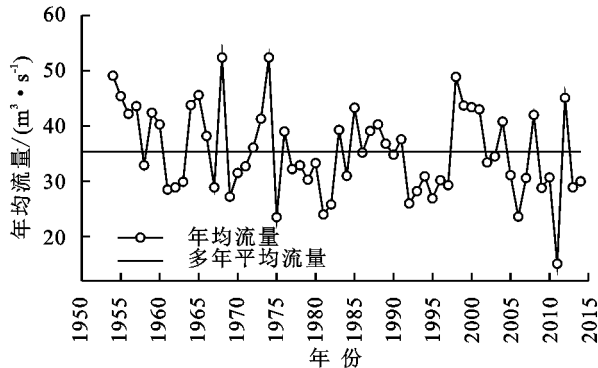


图2 流域流量年际分布特征

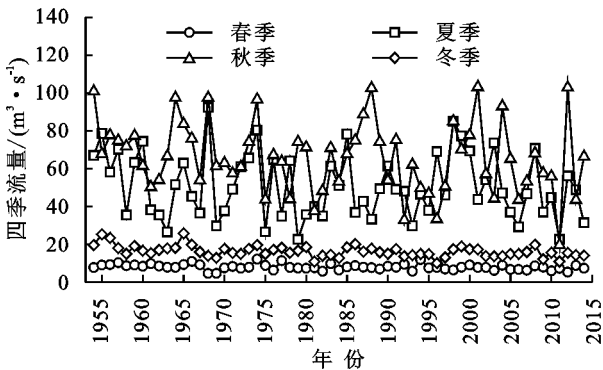


图3 孙水河流域不同季节流量分布特征

3.2 径流变化趋势分析

从图4可以看出,孙水河流域径流变化大致分为3个阶段:1954—1974年为流量累积距平值逐年波动上升阶段,并于1974年达到峰值($S=2.002$),表明流域处于相对的丰水期;其中,1959—1962年这一时段累积距平值出现回落现象,可能是由于四川西南部从1959年11月至1960年7月长达200余天的连旱灾情,导致流域流量持续递减^[18]。1975—1997年,累积距平值呈现逐年波动减小趋势,并于1997年达到相对谷值($S=0.212$),说明流域在这一阶段处于相对的少水期,这一判断与王渺林等^[19]在金沙江流域下游屏山站得出的结论一致。此外,造成这一现象的原因可能是由于降水在上世纪70年代至80年代处于大幅度的下降趋势^[8]。1998—2014年,累积距平值呈现先增大后减小的变化趋势。其中,1998年开始累积距平值持续增加,并于2004年达到相对峰值($S=1.351$)后开始明显减少,最终于2010年达到相对谷

值($S=0.061$)。第3阶段的变化趋势可能与90年代末长江流域特大洪水以及2010年发生的“百年一遇”的西南大旱有关。此外,年均流量累积距平于1998—2004年呈明显增加趋势,这一结论与徐长江等^[6]在金沙江下游流域得出的1998—2005年为持续的长丰期研究结果相符。

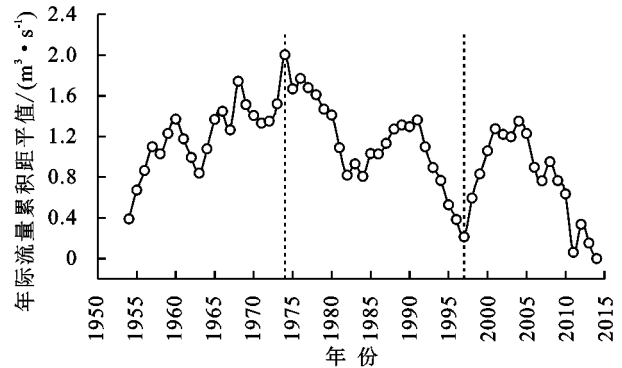


图4 流域流量年际累积距平值

从图5可以看出,夏季流量累积距平值大致呈现逐年波动下降趋势,但下降不明显,分别于1974年和1995年达到峰值和谷值($S=1.832, -0.482$);秋季的流量累积距平值也大致呈现不明显的逐年波动下降趋势,于1974年达到峰值($S=2.151$),于2011年达到谷值($S=-0.231$);春冬季流量累积距平值分别于1967年($S=1.780$)和1966年($S=2.414$)后呈现明显的波动下降趋势。值得注意的是,流域秋季累积距平值于2011年、2012年呈现出较大的差异性,这可能是由于2012年8月30—31日当地遭遇的特大洪涝灾害所致。

根据上述累积距平法所判断的径流变化阶段,运用“M—K”分析法对不同变化阶段进行趋势检验(表1),可知多年平均流量呈现明显的下降趋势,但趋势不显著($|Z|=1.935 < 1.96$),变化率为 $-0.116 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{a})$ 。这一结论可与孙甲岚^[20]在长江上游得出径流量呈下降趋势的结论相互验证。从3个不同变化阶段来看,1954—1974年、1974—1997年这2个时间段流量呈现下降趋势,但趋势不显著($|Z|=0.695, 0.317 < 1.96$);1998—2014年呈现出极显著的下降趋势($|Z|=2.842 > 2.58$),超过99%置信水平,变化率为 $-0.987 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{a})$ 。

对于四季尺度而言,春季和冬季多年平均流量呈现极显著的下降趋势($|Z|=2.813, 3.603 > 2.58$),变化率分别为 $-0.028 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{a})$, $-0.070 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{a})$;夏季和秋季多年平均流量呈现不显著的下降趋势($|Z|=0.927, 1.886 < 1.96$),变化率分别为 $-0.120 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{a})$, $-0.243 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{a})$ 。孙水河流域降水量的减少及降水量年内分配不均,可能是导致春冬季流量显著减少的原

因;同时,流域多年流量的减少也与降水量减少、人类活动增多密切相关^[21-22]。趋势检验结果同样也验证了李荣波^[5]研究的雅砻江流域径流量于 1954—1967 年、1968—2013 年处于不显著下降趋势的结论。

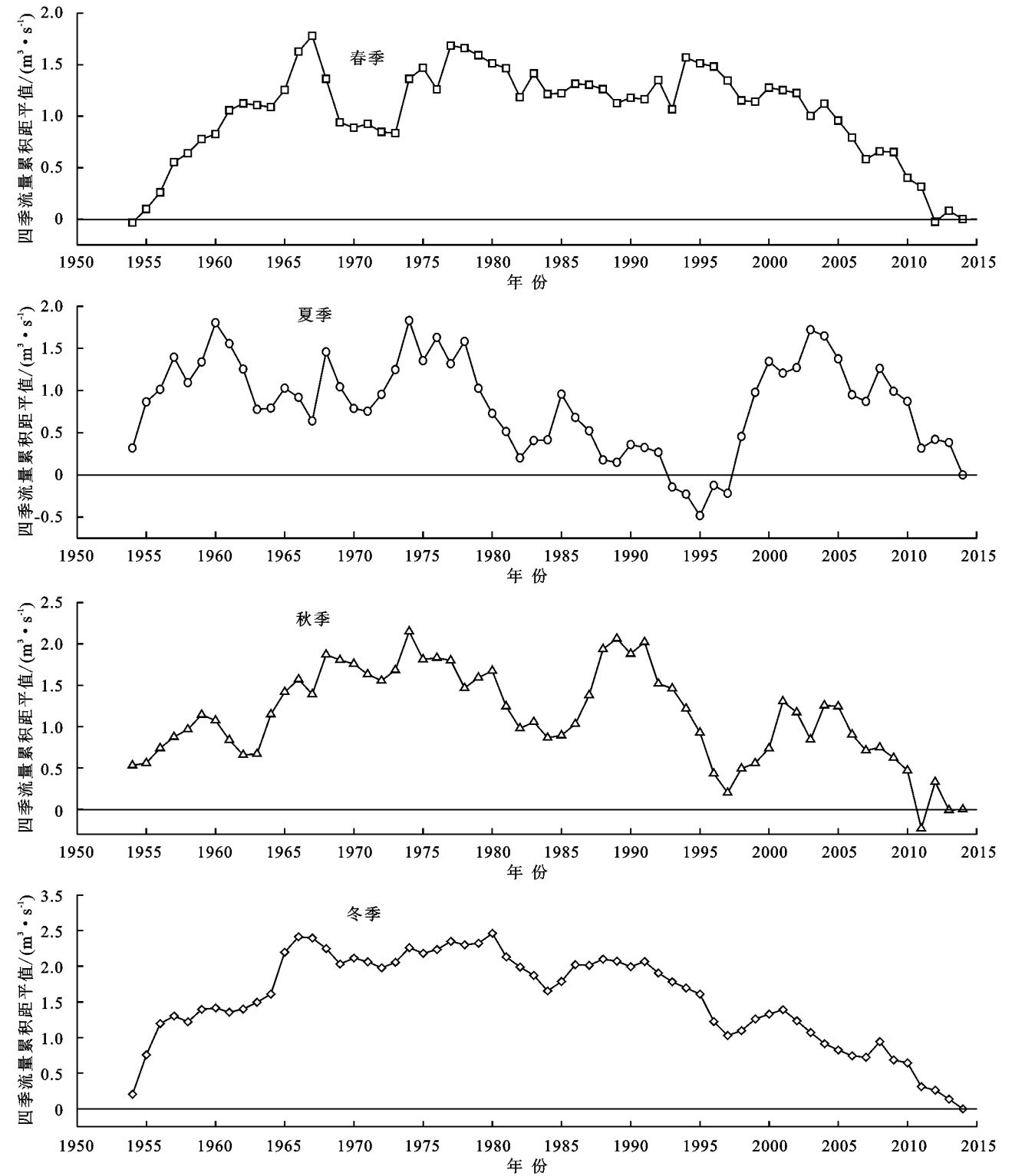


图 5 四季流量累积距平值

3.3 径流变化突变点分析

根据上文累积距平法初步判断,孙水河流域径流突变点可能发生在 1974 年、1997 年和 2004 年。基于此运用“M-K”突变检验法对上述 3 点进行检验。从图 6 可以看出,在 $p=0.01$, $Z_{1-\frac{\alpha}{p}}=\pm 2.58$ 置信区间内存在 3 个相交点,即 1955 年、1997 年和

2002 年。由于研究资料长度无法对 1955 年做出精确判断,再结合累积距平法判断结果,排除 1955 年、1974 年、2002 年和 2004 年。因此,孙水河流域径流在 1997 年发生了突变。进一步结合图 6 突变检验结果,1997 年以后流量 UF 曲线上升明显,但未通过 99% 信度水平。综合说明,1997 年为上升趋势的流

量突变点,但上升趋势不明显。

根据上文四季流量累积距平法初步判断,四季流量的突变点可能为 1967 年春季、1974 年和 1995 年夏季、1974 年和 2011 年秋季以及 1966 年冬季。进一步运用“M—K”突变检验法对上述 6 点进行分析,结果见图 7。在 $p=0.01$, $Z_{1-\frac{p}{2}}=\pm 2.58$ 置信区间内,UF 值、UB 值的交点仅有 1995 年夏季与累积距平法判断结果一致。结合图 7,夏季 UF 值于 1995 年后上升明显,且上升趋势达到 99% 的信度水平。综合表明,孙水河流域四季径流在 1995 年夏季发生了上升趋势的突变。

表 1 Mann-Kendall 非参数检验法结果

时段	Z 值	p 值	显著性	变化趋势	斜率值
1954—2014 年	-1.935	0.0530	—	↘	-0.1163
1954—1974 年	-0.695	0.4874	—	↘	-0.2639
1975—1997 年	-0.317	0.7513	—	↘	-0.0765
1998—2014 年	-2.842	0.0045	* *	↘	-0.9875
春季	-2.813	0.0049	* *	↘	-0.0288
夏季	-0.927	0.3538	—	↘	-0.1206
秋季	-1.886	0.0594	—	↘	-0.2434
冬季	-3.603	0.0003	* *	↘	-0.0709

注:↘表示径流呈现下降的变化趋势;* * 表示变化趋势达极显著水平($p<0.01$)。

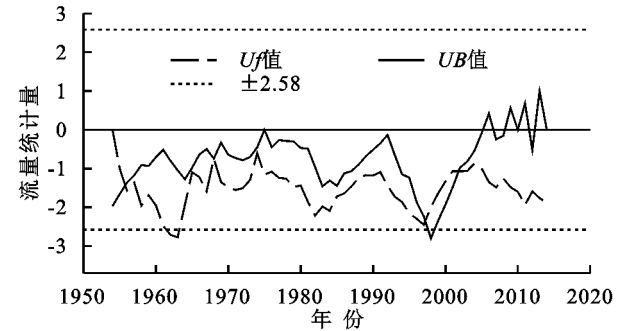


图 6 年际流量突变检验结果

3.4 成因分析

影响河流径流变化的主要因素分为自然因素和人类活动因素,其中自然因素包括降雨和流域下垫面条件,人类活动则影响流域下垫面变化^[23]。考虑到流域地貌长期稳定,对近年来径流变化影响程度较小,所以本研究重点分析了降水和人类活动对孙水河流域径流变化的影响。首先,对流域降水和流量相关关系进行了分析^[24]。结果显示,降水是影响孙水河流域径流变化的主要原因。这一结论与李荣波^[5]关于雅砻江径流影响因素的研究结果类似。由图 8 可知,降水量与流量之间呈极显著相关关系($p<0.01$)。结合年际降雨量“M—K”法趋势分析结果($|Z|=0.071\ 7<1.96$,Z 取负值),表明降水呈现不显著的逐年波动减

小趋势,与流量变化趋势基本一致。此外,降水量年内分配主要集中在夏秋季,与流量年内分配特征一致。夏秋季的降水量占全年降水量的 88.09%,流量占全年流量的 82.82%(图 9)。

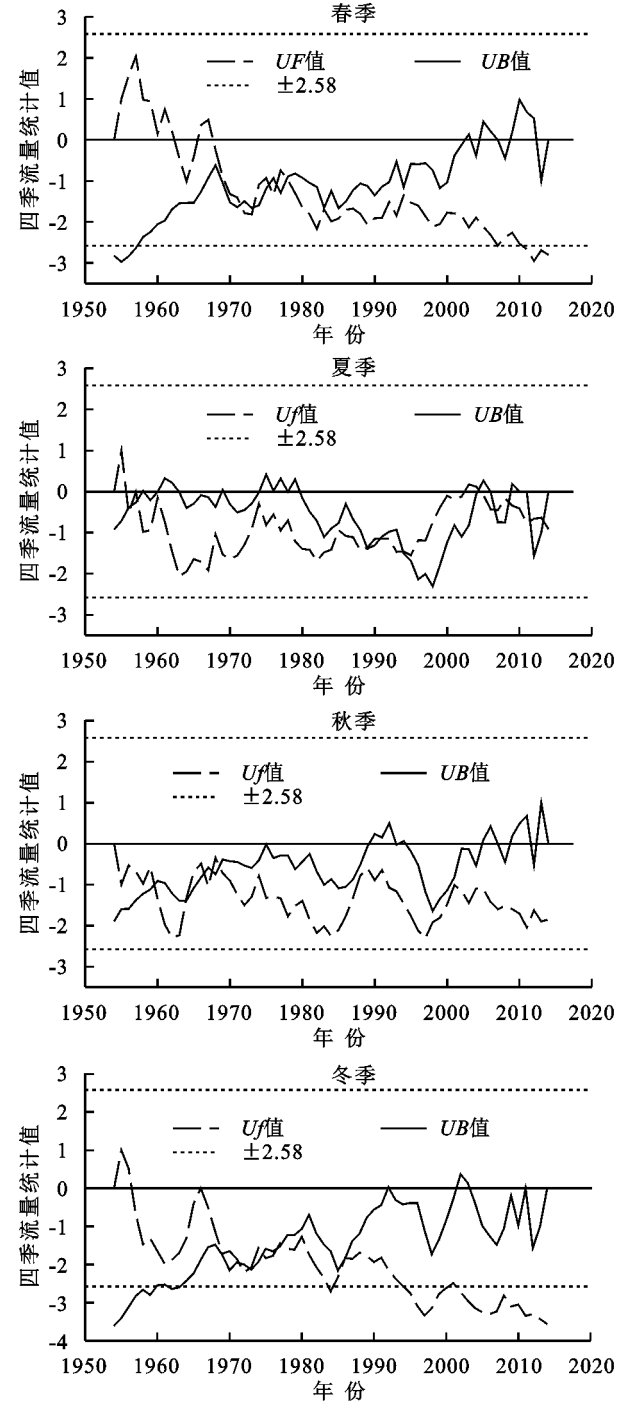


图 7 四季流量突变检验结果

进一步综合研究人类活动和降水对径流变化的影响,从图 10 可以看出,孙水河流域降水径流双累积曲线变动开始于流量 813.3 m³/s(1974 年),并同时于流量 1 612.1 m³/s(1998 年)处发生偏转,说明 1974 年之前、1975—1997 年、1998 年之后的降水—径流关系呈现不同,这与前文由累积距平法判断的不同流量变化阶段结果一致。基于此,建立 3 个不同阶段年平

均降水量(x)—年平均流量(y)相关方程,其方程为:

1954—1974 年: $y=0.03849x-2.899$

1975—1997 年: $y=0.03721x-6.992$

1998—2012 年: $y=0.05277x-20.379$

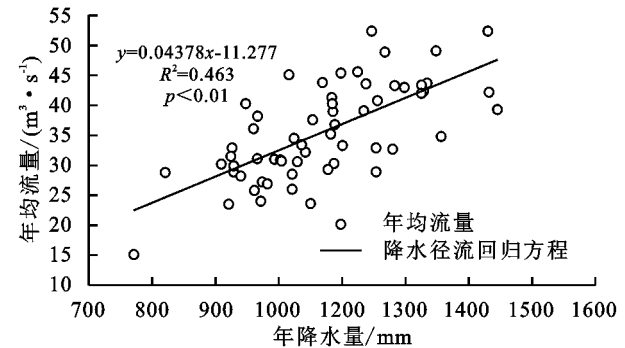


图 8 年均流量与年均降水量相关性

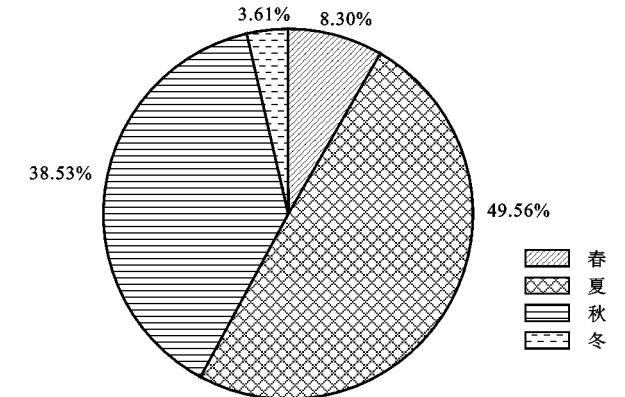


图 9 四季降水量占比

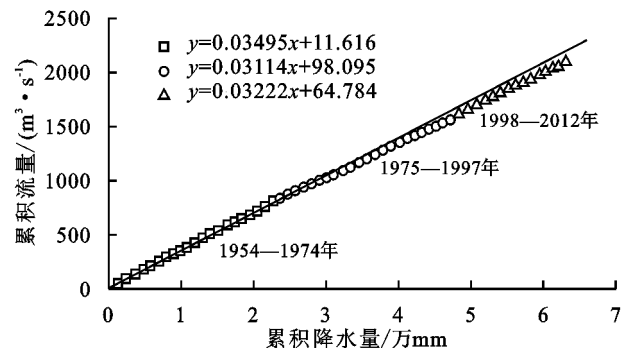


图 10 降水径流双累积曲线

表 2 不同时段降水量、人类活动对流量影响程度

变化 阶段	平均 降水/mm	流量计算值/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	流量实际值/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	总变化/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	降水影响/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	降水 贡献率/%	人类活动影响/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	人类活动 贡献率/%
1954—1974 年	1081.44	38.73	38.73					
1975—1997 年	1064.21	38.06	32.61	-6.12	-0.66	10.84	-5.46	89.16
1998—2012 年	1061.65	37.96	35.64	-3.08	-0.76	24.72	-2.32	75.28

4 结论

(1)孙水河流域径流年际变化较小,最大、最小年均流量分别于 1974,2011 年测得;年内分配主要集中于夏秋季,占全年流量总量的 82.82%。

(2)从年尺度来看,孙水河流域流量于 1997—2014 年整体上呈极显著下降趋势,下降速率为 0.987 5

通过划分出 3 个阶段中的基准期和变化期,再根据各个时期的相关方程分别得到不同时期降水、人类活动对流量变化的影响程度^[25]。各时期流量实际值与基准期流量实际值的差值即为降水和人类活动对流量的综合影响值;各时期流量计算值与基准期流量实际值的差值即为降水对流量的影响值。3 个阶段降水量、人类活动对径流的影响见表 2。

1954—1974 年期间,人类活动较少^[26],孙水河流域径流变化主要受降水影响,平均降水量为 1 081.44 mm,平均流量 38.73 m^3/s ,可以作为基准期。

1975—1997 年期间,人类活动例如工农业生产等开始频繁,双累积曲线向降雨轴偏转,表明流域流量出现了减少的趋势。时段平均降水量为 1 064.21 mm,相比基准期减少 17.23 mm;平均流量为 32.61 m^3/s ,相对于基准期减少 6.12 m^3/s 。其中,降水影响导致流量减少 0.66 m^3/s ;人类活动影响导致流量减少 5.46 m^3/s 。这一结果说明此阶段降水量的减少引起了流量的减耗,但影响率不大,为 10.84%;同时,人类活动的频繁导致流量的减少,且影响幅度大,达到 89.16%。结合降水流量回归方程可知,人类活动是这一阶段导致流量减少的主要因素。

1998—2012 年期间,双累积曲线向流量轴偏移但不明显,说明流量相较于上一阶段小幅增加。此时段平均降水量为 1 061.65 mm,相比基准期减少 19.79 mm;平均流量为 35.64 m^3/s ,相对基准期减少 3.08 m^3/s 。其中,降水影响导致流量减少 0.76 m^3/s ,人类活动导致流量减少 2.32 m^3/s ,贡献率分别为 24.72%,75.28%。由此表明,近年来孙水河流域径流的持续减少是由人类活动和降水减少这 2 个因素共同导致的,其中人类活动是引起径流减少的主要原因,其次为降水。这一结论与 Liu 等^[27]得出的人类活动导致中国境内河流流量减少观点一致。

m^3/s ;其中,流域于 1997 年发生了增加突变,但上升趋势不明显。从四季尺度来看,流域于春夏季呈现出极显著的下降趋势,分别以每年 0.028 8, -0.070 9 m^3/s 的速率递减;夏秋季表现出下降趋势但不显著,分别以每年 0.120 6, -0.243 4 m^3/s 的速率减少。其中 1995 年夏季为显著上升趋势的突变点。整体而

言,孙水河流域流量呈明显但不显著的下降趋势。

(3)孙水河流域流量变化由降水和人类活动 2 大因素共同影响。近年来,流域流量的减少主要受人类活动的影响,其次是降水影响。1974 年前流域径流变化主要受降水影响;1975—1997 年期间,人类活动的频繁引起流量较大幅度地下降;1997 年后,人类活动和降水共同影响导致流域径流持续减少。

参考文献:

[1] 许全喜,童辉.近 50 年来长江水沙变化规律研究[J].水文,2012,32(5):38-47,76.

[2] 郭巧玲,陈新华,窦春锋,等.近 60 年来窟野河全流域年径流变化及其影响因素分析研究[J].水土保持学报,2016,30(3):90-95.

[3] 赵广举,穆兴民,田鹏,等.近 60 年黄河中游水沙变化趋势及其影响因素分析[J].资源科学,2012,34(6):1070-1078.

[4] 王彦君,王随继,苏腾.降水和人类活动对松花江径流量变化的贡献率[J].自然资源学报,2015,30(2):304-314.

[5] 李荣波.雅砻江流域近 60 a 径流趋势特征分析[J].人民长江,2017,48(5):38-42.

[6] 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.

[7] 代稳,吕殿青,李景保,等.1951—2014 年洞庭湖水沙阶段性演变特征及驱动因素分析[J].水土保持学报,2017,31(2):142-150.

[8] 谭万沛,陈英燕,王成华,等.孙水河流域降水量对泥石流灾害的影响[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1998(1):82-88.

[9] 王秀芬,杨艳昭,尤飞.近 30 年来黑龙江省气候变化特征分析[J].中国农业气象,2011,32(增刊 1):28-32.

[10] 王威娜,高瑞忠,王喜喜,等.锡林河流域径流变化规律及气候波动和人类活动影响的定量分析[J].水土保持研究,2018,25(2):347-353.

[11] 刘兆飞,王翊晨,姚治君,等.太湖流域降水、气温与径流变化趋势及周期分析[J].自然资源学报,2011,26(9):1575-1584.

[12] 帅红,李景保,何霞,等.环境变化下长江荆南三口径流变化特征检测与归因分析[J].水土保持学报,2016,

30(1):83-88.

[13] 罗蔚,张翔,邹大胜,等.鄱阳湖流域抚河径流特征及变化趋势分析[J].水文,2012,32(3):75-82.

[14] 邱临静,郑粉莉,尹润生.1952—2008 年延河流域降水与径流的变化趋势分析[J].水土保持学报,2011,25(3):49-53

[15] 周丹,张勃,李小亚,等.1961—2010 年中国大陆地面气候要素变化特征分析[J].长江流域资源与环境,2014,23(4):549-558.

[16] 侯钦磊,白红英,任园园,等.50 年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.

[17] 张信宝,文安邦,Walling D E,等.大型水库对长江上游主要干支流河流输沙量的影响[J].泥沙研究,2011(4):59-66.

[18] 中华人民共和国国家统计局,中华人民共和国民政部.中国灾情报告:1949—1995[M].中国统计出版社,1995.

[19] 王渺林,夏成阳,卢春生,等.金沙江流域水沙变化趋势分析[J].人民长江,2008(19):15-16,22.

[20] 孙甲岚,雷晓辉,蒋云钟,等.长江流域上游气温、降水及径流变化趋势分析[J].水电能源科学,2012,30(5):1-4.

[21] 张晓娅,杨世伦.流域气候变化和人类活动对长江径流量影响的辨识(1956—2011)[J].长江流域资源与环境,2014,23(12):1729-1739.

[22] 宋晓猛,张建云,占车生,等.气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J].水利学报,2013,44(7):779-790.

[23] 胡春宏,王延贵,张燕菁等.中国江河水沙变化趋势与主要影响因素[J].水科学进展,2010,21(4):524-532.

[24] 吕乐婷,彭秋志,廖剑宇,等.近 50 年东江流域降雨径流变化趋势研究[J].资源科学,2013,35(3):514-520.

[25] 师忱,袁士保,史常青,等.滦河流域气候变化与人类活动对径流的影响[J].水土保持学报,2018,32(2):264-269.

[26] 彭涛,田慧,秦振雄,等.气候变化和人类活动对长江径流泥沙的影响研究[J].泥沙研究,2018,43(6):54-60.

[27] Liu J Y, Zhang Q, Vijay P S, et al. Contribution of multiple climatic variables and human activities to streamflow changes across China[J]. Journal of Hydrology, 2017, 545: 145-162.