

# 嘉陵江年径流量时间序列趋势分析\*

张跃华<sup>1</sup>, 徐刚<sup>1,2</sup>, 张忠训<sup>1</sup>, 杨海燕<sup>3</sup>

(1. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715; 2. 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715;  
3. 重庆大学机械工程学院, 重庆 400044)

**摘要:**以嘉陵江流域作为研究范围, 以其控制性水文站北碚站实测数据为研究依据。采用肯德尔(Kendall)秩次相关法、累积距平法、Mann-Kendall 统计检验方法及相关性分析法对径流量、降水量进行分析。分析得出嘉陵江流域 Kendall 标准化变量  $M = -2.52$ , 径流量呈显著下降趋势, 且在 1992 年发生突变。累积距平法分析表明: 流域有二个显著的丰水段、一个平水段、二个显著的枯水段。降水量同径流量的变化存在明显的相关性, 相关系数为 0.75, 呈显著相关关系。降水和人类活动是嘉陵江径流量发生变化最主要的原因。

**关键词:** 径流量 降水量 趋势性 嘉陵江

中图分类号: P343.1; P336

文献标志码: A

文章编号: 1672-6693(2011)05-0033-04

河川径流作为水资源最主要的来源, 是支撑社会、经济、生态环境和人类社会可持续发展的基础。自 20 世纪以来, 由于全球气候变化和人类活动, 特别是经济发展、认识能力、科技水平等诸多因素的影响, 河川径流已经发生了很大的变化, 目前包括河川径流在内的水资源安全受到了极大的威胁<sup>[1]</sup>。因此, 研究嘉陵江流域径流特征, 认识其演化规律和趋势, 不仅有助于深入了解本流域水循环与水平衡, 以及流域的结构和功能, 而且对流域内水资源合理开发与利用都具有重要意义。

本文所采用的 1951—2007 年径流量数据来源于嘉陵江流域水文控制站北碚站。降水数据来源于中国气象局国家气象中心气象资料室提供的气象站资料, 筛选出嘉陵江流域的所有气象站数据。数据经过了完整性、一致性和极值检验, 质量良好, 并利用太森多边形法求得流域面年降水量。最后通过其他方法对流域径流量进行定性、定量评估。

## 1 嘉陵江流域概况

嘉陵江有东、西两源, 东源出自秦岭南麓的陕西省凤县西北部, 经平阳关入四川境; 西源为白龙江, 发源于四川省松潘高原若尔盖县的郎木寺, 向东南流经武都、碧口入四川境。东西两源在四川省广元市昭化汇合。习惯上称东源为嘉陵江的正源, 以东源

计算嘉陵江全长 1 119 km, 流域面积 159 812 km<sup>2</sup>。嘉陵江昭化以上为上游, 昭化至合川为中游, 合川以下为下游, 嘉陵江在重庆朝天门汇入长江。嘉陵江上游穿行于秦岭、米仓山之间, 河流深切, 峡谷众多, 水流湍急。中游流经四川盆地北部低山丘陵区 and 中部丘陵区, 河谷宽度由上而下逐渐开阔, 水流平缓, 河曲发育, 有“九曲回肠”之称。下游流经四川盆地东部平行岭谷区, 河谷宽窄相间, 河流流经背斜低山时形成峡谷, 河谷宽 100 ~ 200 m; 流经向斜谷地时形成宽谷, 河谷宽 200 ~ 400 m<sup>[2]</sup>。

北碚水文站位于 29°51'N、106°25'E, 地处嘉陵江下游, 是嘉陵江的控制性水文站。嘉陵江北碚水文站以上河长 1 062 km, 下距嘉陵江河口 57 km。北碚水文站以上流域面积 156 142 km<sup>2</sup>, 占嘉陵江流域总面积的 97.70%。北碚水文站始建于 1939 年 4 月 1 日, 多年平均流量 2 100 m<sup>3</sup>/s, 年径流深度 414.2 mm, 年均径流量 662 亿 m<sup>3</sup>, 年均含沙量 3.66 kg/m<sup>3</sup>, 年均输沙量 1.63 亿 t。

## 2 径流演变规律分析

### 2.1 径流演变的趋势性

径流演变的规律一般由河流的趋势性来反映。目前常用的趋势分析方法有线性倾向估计、二次平滑、三次平滑、三次样条函数以及肯德尔(Kendall)

\* 收稿日期 2011-05-08 修回日期 2011-07-05 网络出版时间 2011-09-17 13:59:00

作者简介: 张跃华, 女, 硕士研究生, 研究方向为山地灾害与可持续发展, 通讯作者: 徐刚, E-mail: 297550617@qq.com

网络出版地址: [http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20110917.1359.201105.37\\_008.html](http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20110917.1359.201105.37_008.html)

秩次相关法<sup>[3]</sup>等。本文借助于肯德尔(Kendall)秩次相关法来进行检验<sup>[4]</sup>。

$$\tau = \frac{4P}{N(N-1)} - 1 \quad (1)$$

$$\sigma_\tau^2 = \frac{2(2N+5)}{9N(N-1)} \quad (2)$$

$$M = \frac{\tau}{\sigma_\tau} \quad (3)$$

(1)~(3)式中:  $P$ 为径流序列所有对偶观测值( $W_i, W_j, j > i$ )中的  $W_i < W_j$  出现的个数;  $N$ 为序列个数。若  $M > 0$ , 说明序列增加; 若  $M < 0$ , 则序列减小。取信度  $\alpha = 0.05$ , 相应的临界值  $M_\alpha = 1.96$ 。如果  $|M| > M_\alpha$ , 则序列发生显著变化。

根据嘉陵江北碛站近 60 年的实测数据, 分析得出 Kendall 标准化变量  $M = -2.52$ , 由于  $|M| > M_\alpha$ , 所以嘉陵江径流量存在非常明显的下降趋势。

### 2.2 径流演变的阶段性

“累积距平法”是一种较常用的判断变化趋势的方法, 同时通过对累积距平曲线的分析, 也可以划分变化的阶段性<sup>[5]</sup>。对于序列  $x$ , 某一时刻  $t$  的累积距平表示为

$$\hat{x}_t = \sum_{i=1}^t (x_i - \bar{x}) \quad t = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

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

用“累积距平法”对北碛站径流量进行分析。结果表明, 嘉陵江流域径流量的年际变化具有明显的阶段性特征。如图 1 所示, 径流序列可分为如下几个时段(持续期 5 年以上): 1) 二个显著的丰水段即 1950—1968 年、1980—1985 年, 距平为正, 累积距平曲线持续上升; 2) 一个显著的平水段即 1986—1992 年; 3) 二个显著的枯水段即 1969—1979 年、1993—2007 年, 距平为负, 累积距平曲线持续下降, 径流量呈减少趋势。

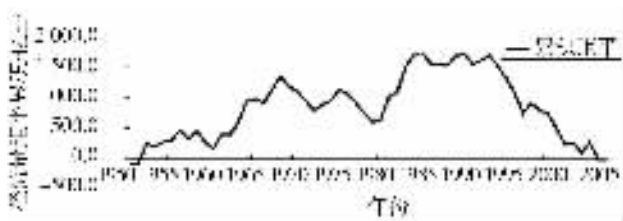


图 1 北碛站年径流量累积距平曲线

Fig. 1 Cumulative annual flow at the Beibei station

### 2.3 径流演变的突变性

水文现象是非线性现象, 在非线性系统中, 常常表现为系统输入或输出的某个(某些)变量不可控

制或突然发生变化<sup>[6]</sup>。水文突变现象不但可以揭示系统的本质, 而且对系统的调控起着非常关键的作用。研究径流的演变规律, 除分析其总体趋势外, 还必须判断并检验突变发生的时间、次数以及变化幅度。

Mann-Kendall 统计检验方法是一种非参数统计检验方法。非参数检验方法亦称无分布检验, 其优点是不需要样本遵从一定的分布规律, 也不受少数异常值的干扰, 适用于类型变量和顺序变量<sup>[5,7]</sup>。

设某一要素  $x_i$  大于前面要素  $x_{i-1}, \dots, x_1$  的累积数为  $m_i$ , 总累积数计为

$$d_k = \sum_{i=1}^k m_i \quad 2 \leq k \leq N \quad (5)$$

新建序列  $d_2, \dots, d_n$  的均值和方差可记为

$$E(d_k) = \frac{k(k-1)}{4} \quad (6)$$

$$\text{Var}(d_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \quad 2 \leq k \leq N \quad (7)$$

将新建序列  $d_k$  标准化得

$$UF_k = \frac{(d_k - E(d_k))}{\sqrt{\text{Var}(d_k)}} \quad (8)$$

利用 Mann-Kendall 统计检验方法对北碛站的年径流量进行分析, 给定显著性水平  $\alpha = 0.05$ ,  $U_{0.05} = \pm 1.96$ 。分析结果如图 2 所示, 嘉陵江径流呈减少趋势, 且超过临界直线, 所以为显著减少趋势。  $UF_k$  与  $UB_k$  曲线相交于 1992 年, 说明发生径流突变的年份在 1992 年。

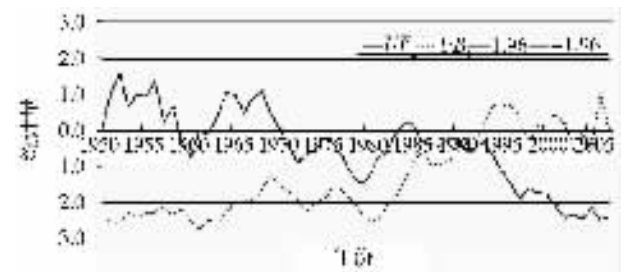


图 2 北碛站径流量 M-K 法突变分析

Fig. 2 Flow change point analysis using M-K method at the Beibei station

## 3 径流演变驱动力分析

自然和人类活动是影响河川径流变化的主要因素。从自然因素来说, 以气候的影响最为显著, 包括降水、气温及水面蒸发量等几个方面。嘉陵江流域位于西南地区, 河流的主要补给来源以降水为主, 所以降水直接影响河川径流<sup>[8]</sup>。人类活动对河川径流的影响主要表现为改变流域下垫面的特征以及大型

水利工程建设。

### 3.1 降水因子的影响

以降水量来表示气候因子。降水资料来自中国气象局的全国基本气象站资料, 采用嘉陵江流域的所有气象站数据, 利用太森多边形法<sup>[9]</sup>求得流域面年降水量。

#### 3.1.1 降水量与径流量的相关性分析

要对降水量和径流量两种不同的数据进行相关性分析, 需要对数据做标准化处理。为了使单位不一样, 平均值及标准差也不同的各个要素能够在同一水平上进行比较, 常使用标准化的方法, 使它们变成同一水平的无单位的变量, 这种变量称为标准化变量。常用的数据标准化方法有最大值法、最小值法、标准差法等。本文采用的标准化公式为

$$Z_t = \frac{X_t - \bar{X}}{S}, t = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

式中  $Z_t$  表示标准化后的要素值的时间序列,  $X_t$  是未经标准化的时间序列,  $\bar{X}$  是要素序列的均值,  $S$  为标准差<sup>[10]</sup>。将嘉陵江流域降水量和径流量进行标准化变换, 绘出流域径流量与降水量标准化数据序列变化趋势图, 如图 3 所示。

从上图可以明显地看出, 流域降水量和径流量趋势基本一致。降水量多的年份, 径流量也呈增加趋势。降水量少的年份, 径流量也相应地减少。

相关系数  $r$  的计算公式为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_0)(y_i - y_0)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2 \sum_{i=1}^n (y_i - y_0)^2}} \quad (10)$$

上式中  $r$  为相关系数,  $x_i, y_i$  为两个数组,  $x_0, y_0$  分别为它们的平均值。计算得出降水量同径流量的相关系数为 0.75, 根据相关系数显著性检验 ( $t$  检验), 降水量与径流量的相关系数通过了  $\alpha = 0.05$  置信检验, 两者呈正相关关系, 且相关程度较为密切, 说明降水是影响径流量非常关键的因素。

3.1.2 降水的突变分析 用 Mann-Kendall 统计检验方法对嘉陵江流域面降水量进行趋势分析, 结果如图 4 所示。

在显著性水平  $\alpha = 0.05$  下, 嘉陵江流域 1951—2007 年降水呈下降趋势, 但下降趋势不显著;  $UF_k$  与  $UB_k$  曲线相交于 1993 年, 说明降水在 1993 年发生突变, 天然入库径流减小。由径流 M-K 曲线同降

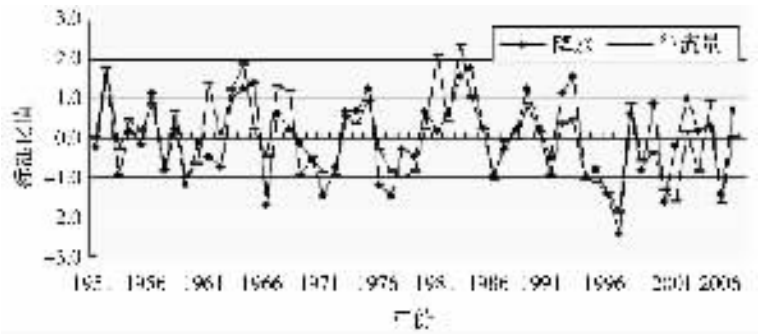


图 3 降水量与径流量标准化数据序列变化趋势  
Fig. 3 Standardization data trend of runoff and precipitation series

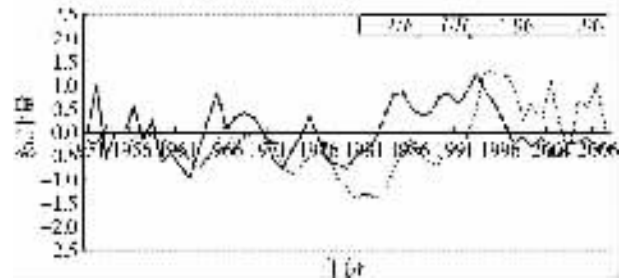


图 4 嘉陵江流域降水量 M-K 法突变分析  
Fig. 4 Precipitation change point analysis using M-K method for the Jialing River Basin

水 M-K 曲线比较分析, 可以看出, 降水和径流的变化趋势存在明显相关性, 降水的减少直接导致径流量的减少。

### 3.2 人类活动的影响

随着社会和经济的发展, 人类活动对径流过程的影响逐渐加强。人类活动不仅直接利用径流或导致径流时空分布的变化, 而且可以通过改变流域下垫面的状况影响径流量。

随着嘉陵江流域城市化进程的加大, 城镇人口增加, 生活用水、工矿企业用水量迅速上升。同时, 嘉陵江流域大型水利工程也呈大规模发展趋势。20 世纪末碧口、升钟、宝珠寺几个大型水库电站的建成使用, 对流域内洪水起着削峰和滞洪的作用<sup>[11]</sup>。20 世纪 90 年代开始嘉陵江流域降水量、径流量呈显著下降趋势, 加上 21 世纪初利泽、草街等水电站的建设, 天然径流量被分流出很大的比重, 是导致嘉陵江流域径流量大幅减少又一重要因素。

人类活动同时会造成流域内植被覆盖率发生变化。从 1989 年起, 嘉陵江中下游地区被列为长江上游水土保持重点防治区之一, 流域内各县(市、区)开展了水土保持重点治理工作, 植树、造林以及种草得到前所未有的重视。嘉陵江流域在 1982—2006 年植被覆盖呈微弱上升趋势, 且存在明显的空间差

异。以北川-剑阁-通江一线为界,以南地区为增加趋势,以北地区呈减少趋势<sup>[12]</sup>。流域内植被覆盖率提高,改善了流域下垫面条件,减小了流域的蒸发和蒸腾量,成为流域径流量减少又一重要原因。

#### 4 结语

以嘉陵江实测资料为基础,采用肯德尔(Kendall)秩次相关法、累积距平法、Mann-Kendall 统计检验方法对径流量、降水量分析结果如下。

1)嘉陵江径流量下降的趋势是相当明显。

2)从1950—2007年,嘉陵江流域有二个显著的丰水段、一个平水段、二个显著的枯水段。

3)嘉陵江流域径流量呈显著减少趋势,且突变年份发生在1992年。

4)径流变化的原因有自然和人为两个方面。降水量同径流量呈显著相关关系,径流M-K曲线同降水M-K曲线突变近似,说明降水因素是嘉陵江径流量减少最主要的因素。

#### 参考文献:

[1] 黄强,赵雪花. 河川径流时间序列分析预测理论与方法

[M]. 郑州:黄河水利出版社,2008.

[2] 汪荣春. 嘉陵江志[M]. 成都:四川水利水电厅,1991.

[3] 丁晶,邓育仁. 随机水文学[M]. 成都:成都科技大学出版社,1988.

[4] Kottegoda N T. Stochastic water resources technology[M]. London: The MacMillan Press LTD, 1980.

[5] 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.

[6] 邓育仁,丁晶,杨荣富. 中国主要河流年径流序列随机变化基本规律的初步研究[J]. 水科学进展,1990,1(1): 13-20.

[7] 任国玉. 气候变化与中国水资源[M]. 北京:气象出版社,2007.

[8] 李丽娟,郑红星. 华北典型河流年径流演变规律及其驱动力分析—以潮白河为例[J]. 地理学报,2000,55(3): 309-316.

[9] 黄锡荃. 水文学[M]. 北京:高等教育出版社,1985.

[10] 李雯. 泾河流域气候变化对径流量的影响研究[D]. 陕西:长安大学,2008.

[11] 杨忠英. 嘉陵江20世纪90年代以来径流量锐减现象分析[J]. 四川水利,2004(5): 20-22.

[12] 刘洪鹤,张平仓,刘宪春,等. 嘉陵江流域植被覆盖时空变化特征[J]. 长江流域资源与环境,2011(1): 111-115.

## Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area

### The Trend Analysis of Annual Runoff Time Series in the Jialing River

ZHANG Yue-hua<sup>1</sup>, XU Gang<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhong-xun<sup>1</sup>, YANG Hai-yan<sup>3</sup>

(1. College of Geographical Sciences, Southwest China University;

2. Key laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Chongqing 400715;

3. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** To study the hydrologic cycle, water balance, the use and management of water resources, it is often important to have a better understanding of the variations and the change trend of discharges for the system. This paper presents the statistical analysis of the discharge and precipitation data for the Jialing River at the Beibei Hydrologic Gaging Station. 60 years of data have been used in this study for the Kendall correlation analysis, the cumulative mass analysis, and the Mann-Kendall statistical analysis for the change points and change trend in precipitation and flows. The Kendall correlation analysis and the Mann-Kendall statistical analysis showed that the discharges in the Jialing River had a decreasing trend with the change point in 1992. The cumulative discharge analysis showed that there were two clear high flow periods, one average flow period, and two dry periods. The Mann-Kendall analysis showed that precipitation had a significant reduction since 1993. Discharges correlate well with the precipitation within the river basin, which indicated that precipitation is the primary cause of flow reduction in the river. Other factors contributed to the reduction of flow include urbanization, dam constructions on the river, and usage of water in the upper regions.

**Key words:** runoff; precipitation; trend analysis; the Jialing River