

# 石头河流域降雨径流变化特性研究

王建莹<sup>1</sup>, 王双银<sup>1\*</sup>, 杨会龙<sup>1</sup>, 朱小林<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 咸阳市秦都区水利局, 陕西 咸阳 712000)

**摘要:** 采用 Mann-Kendall 检验和谱分析方法分析了石头河流域 1954~2007 年降水系列和 1950~2008 年的径流系列年际变化特性, 采用不均匀系数和集中期等特征参数对降雨径流系列的年内分配特征进行了研究。结果表明: 1950 年以来石头河流域年降水和年径流系列均有显著下降趋势; 年降水系列在 1979 年和 1990 年左右发生突变, 而年径流系列则在 1969 年左右和 1995 年左右发生突变; 年降水和年径流系列均有 3 a 的主周期, 对不均匀系数系列和集中期系列的研究也得到了同样的结论。

**关键词:** 降雨; 径流; Mann-Kendall 检验; 谱分析; 不均匀系数; 集中期; 石头河流域

**中图分类号:** P333.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2011)06-0179-05

研究河川径流的变化特性, 可以为水资源开发利用工程的运行调度和管理提供决策依据, 对区域经济社会的发展具有非常重要的作用。然而, 河川径流受到气候(主要是降水)和下垫面两方面因素的影响, 通常可以用时间序列的分析方法, 从序列的趋势、突变和周期三个方面进行分析研究<sup>[1~3]</sup>。水文分析中常用的趋势分析方法有滑动平均法、Mann-Kendall(M-K)秩次相关检验和 Spearman 相关检验等方法<sup>[4~6]</sup>。滑动平均法简单直观, 但缺乏客观; M-K 秩次相关检验法要求序列服从正态分布, Spearman 相关检验法对序列分布不作要求, 适用范围更广。突变(变异点)研究中常采用的方法有 M-K 秩次相关检验、序聚类分析法、和里海和哈林法、贝叶斯变点法等<sup>[7~11]</sup>。其中 M-K 秩次相关检验法计算简便, 可以明确突变开始的时间, 被广泛使用。周期研究常采用周期图法、方差谱密度图法、最大熵谱分析法、小波分析等方法<sup>[12~14]</sup>。近年来小波分析时间序列周期应用非常广泛, 但是结果并不尽如人意, 其主要原因是由于时间序列较短造成的。

石头河发源于秦岭北麓太白山区, 是渭河南岸较大的一级支流。河流自南向北流, 于眉县斜峪关出峪口, 再向北 15 km 注入渭河。石头河全长 51.5 km, 流域面积 778.7 km<sup>2</sup>。石头河水库位于斜峪关以上 1.5 km 处, 控制流域面积 673 km<sup>2</sup>, 总库容 1.47 亿 m<sup>3</sup>, 是一座具有灌溉、发电、防洪和供水等功能的综合利用水利工程。石头河水库原设计灌溉农田 8.53 万 hm<sup>2</sup>, 由于气候和下垫面的影响, 石头河径流发生了明显变化, 对石头河水库的利用特别是对灌区的

农业生产产生了较大影响; 随着流域内社会经济发展, 各部门用水量不断增加, 如何协调“三生”用水成为急需解决的问题。

本文采用时间序列分析法对陕西省石头河流域降水和径流的年际年内变化特性进行分析, 旨在为石头河水库的运行调度提供决策依据。

## 1 资料分析

石头河干流于 1936 年设立了斜峪关水文站, 控制流域面积 686 km<sup>2</sup>, 有 1950 年至 1983 年的逐日平均流量整编资料。1974 年在石头河水库坝址以上 13 km 处设立了鹦鸽水文站, 控制流域面积 507 km<sup>2</sup>, 有建站以来的逐日平均流量整编资料。

本文采用的径流资料为石头河流域鹦鸽站和斜峪关站 1950~2008 年径流资料, 其中 1950~1974 为斜峪关实测资料, 1974~2008 年的资料为考虑“上大下小”问题后对鹦鸽站径流资料按面积折算到斜峪关站后的径流资料。

石头河流域先后设立了斜峪关、桃川、鹦鸽、杜家庄、高码头五个雨量站, 本文采用泰森多边形法计算并组成了 1954~2007 年流域平均降水量系列。

## 2 年际特性变化

### 2.1 趋势分析

2.1.1 M-K 秩次相关检验法 对水文时间序列  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ , 统计序列中所有对偶值  $(x_i, x_j)$  ( $i < j$ ) 中  $x_i < x_j$  出现的个数  $P$ , 统计量  $U: U =$

收稿日期: 2011-07-09

基金项目: 西北农林科技大学基本科研业务费专项资金(QN2009088)

作者简介: 王建莹(1986-), 男, 山东单县人, 在读硕士, 主要从事水文分析方面研究。E-mail: jianyingmoon@yahoo.cn。

\* 通讯作者: 王双银(1969-), 男, 甘肃镇原人, 副教授, 主要从事水文分析和水库调度方面研究。E-mail: wshy6986@yahoo.com.cn。

$\frac{\tau}{[\text{VAR}(\tau)]^{1/2}}$ , 其中  $\tau = \frac{4P}{n(n-1)} - 1$ ,  $\text{VAR}(\tau) = \frac{2(2N+5)}{9n(n-1)}$ 。

当  $n \rightarrow \infty$  时, 则有  $U \sim N(0, 1)$  即  $U$  服从标准正态分布, 给出显著性水平为  $\alpha$ , 就可以进行检验: 若  $|U| > U_{\alpha/2}$ , 则序列趋势显著, 否则趋势不显著。

利用滑动平均法初步分析, 降水径流系列均有下降趋势; 流域平均年降水量系列的  $U = -3.11$ , 年径流系列的  $U = -3.24$ , 取  $\alpha = 0.05$ , 则  $U_{\alpha/2} = 1.96$ , 即年降水和年径流系列下降趋势显著。

2.1.2 Spearman 相关检验 Spearman 相关检验秩次相关系数为:

$$r = \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n^3 - n}$$

式中,  $n$  为序列长度,  $d_i = R_i - t$ ,  $R_i$  为把序列  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  从大到小排列时  $x_i$  所对应的序号, 若秩次  $R_i$  与时序  $t$  相近, 则秩次相关系数大, 趋势显著。通常采用  $t$  检验法进行趋势检验, 构造统计量:  $T = r \left[ \frac{n-4}{1-r^2} \right]^{1/2}$   $T$  服从自由度为  $n-2$  的  $t$  分布。若  $|T| > T_{\alpha/2}$ , 则序列趋势显著, 否则趋势不显著。

经计算, 流域平均年降水量系列的  $T = -2.22$ , 年径流系列的  $T = -2.37$ , 取  $\alpha = 0.05$ , 则  $T_{\alpha/2} = 2.01$ , 即年降水和年径流系列均亦存在显著下降趋势。计算分析表明, 年降水、年径流系列均有显著下降趋势。

2.2 突变分析

利用 M-K 秩次相关检验法进行突变分析时, 统计水文时间序列  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  的秩序列  $d_i$ ,  $d_i$  表示对偶值  $x_i > x_j (1 \leq j < i)$  的累积数,  $S_k = \sum_{i=1}^k d_i$ , ( $k = 2, 3, \dots, n$ ),  $S_k$  的均值  $E(S_k)$  及方差  $V_{ar}(S_k)$  分别为:

$$E(S_k) = \frac{k(k+1)}{4}$$

$$V_{ar}(S_k) = \frac{k(k+1)(2k+5)}{72}, (k = 2, 3, \dots, n)$$

构造统计量  $UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{V_{ar}(S_k)}}$ , 按时间序列逆序重复计算  $UB_k$ 。如果  $UF$  和  $UB$  两条曲线出现交点, 则交点对应的时刻便是突变的开始时间<sup>[16, 17]</sup>。

对年降雨系列进行突变检验(图 1), 在时段初出现交点, 可以认为是系列杂点造成的, 其后两线在 1979 年和 1990 年左右出现交点, 可认为这两点发生

突变。1954~1978 年平均降水量为 753.29 mm, 1979~1989 年平均降水量为 728.71 mm, 1990~2007 年平均降水量为 604.46 mm。

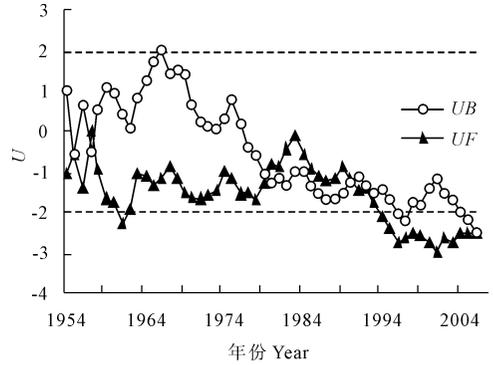


图 1 年降水量系列 M-K 检验

Fig. 1 M-K test of annul precipitation

利用 M-K 检验法对年均径流量系列进行分析(图 2), 除初始阶段的杂点外, 两线在 1968 年和 1996 年左右相交, 表明突变点在 1968 年和 1996 年左右。1954~1968 年平均径流为  $13.76 \text{ m}^3/\text{s}$ , 1969~1996 年平均径流为  $14.26 \text{ m}^3/\text{s}$ , 1997~2007 年平均径流为  $10.11 \text{ m}^3/\text{s}$ 。为进一步验证径流的突变特征, 利用降雨-径流双累积曲线验证了斜峪关站 1954~2007 年的径流变化的突变特征。降雨-径流双累积曲线通常情况下是一直线; 如果流域下垫面或气候发生改变, 则降雨-径流双累积曲线会发生偏移。因此, 可根据双累积曲线发生偏移的点, 确定径流发生变化的年代。由降雨径流双累积曲线(图 3)结果可知, 径流在 1970 年左右和 1989 年左右发生了明显的变化。在 1970 年突变以后径流呈现出略微增加的趋势, 在 1989 年突变以后呈现出减少的趋势。

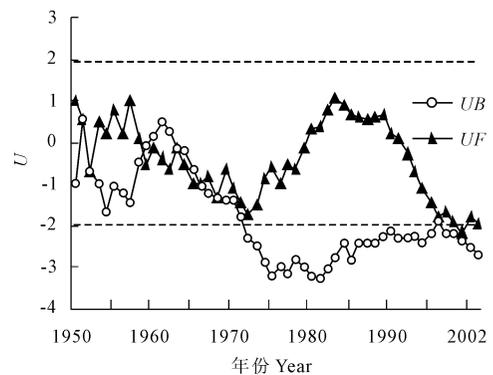


图 2 年均径流系列 M-K 检验

Fig. 2 M-K test of annul runoff

陕西省林学会考察组于 1997 对石头河流域进行调查研究发现: 石头河流域内由于社会经济的发展

展和人口数量的增加,木材用量急剧上升,再加上毁林开荒、乱砍滥伐的现象屡禁不止,石头河流域的森林植被在 20 世纪 50 年代至 60 年代遭到了几次较大的破坏,与 50 年代初期相比,森林面积减少了 1/3,针叶树种由 40% 下降为 17%,使得石头河流域蓄水功能减弱。秦岭林区的林冠截留,地表枯落物层的蓄水和保护作用,以及林地土壤良好的渗透性,使得地表径流较少发生,另外还有“以丰补欠”的作用,即在丰水年把水蓄起来,在枯水年补给河川径流。由于森林的砍伐,使得蓄水作用明显下降,在 1970 年以后甚至出现降水量下降,径流反而出现略微增加的现象。

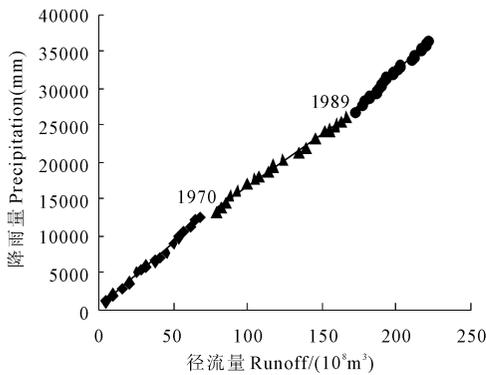


图 3 年降雨量一年径流量双累积曲线  
Fig. 3 Double cumulative curves of annual precipitation and annual runoff

计算表明,年降水系列在 1979 年和 1990 年发生两次突变,年径流系列在 1968 年和 1996 年发生两次突变,而利用降雨径流双累积曲线分析表明,径流在 1970 年和 1989 年左右发生突变。

### 2.3 周期分析

方差谱密度图法是研究水文时间序列周期性的简单有效的方法。水文时间序列可以利用傅里叶级数表示,即由不同频率的谐波叠加而成,显著谐波即为周期成分,对应频率的倒数即为周期<sup>[18]</sup>。

方差谱密度函数为:  $S(\omega) = \frac{1}{\pi}(1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \rho_k \cos \omega k)$ ,  $\rho_k$  由水文序列  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  自相关函数  $r_k$  估计,当  $\infty$  取有限值  $m$  时,  $S(\omega)$  的估计值为  $S_\omega = \frac{1}{\pi}(1 + 2 \sum_{k=1}^m r_k \cos \omega k)$ 。为得到较优的估计量,对  $S_\omega$  要进行平滑处理。常用的有 Hanning 窗:  $D_k = 0.50 + 0.50 \cos\left(\frac{\pi k}{m}\right)$ , 式中  $m$  的取值原则为:当序列长度  $n > 50$  时,可取  $m < n/4$ ,常取  $m$  在  $n/10$  左右;当  $n < 50$  时,取  $m$  在  $n/4$  左右;有时取  $m < n -$

10。经平滑处理后  $S_\omega = \frac{1}{\pi}(1 + 2 \sum_{k=1}^m D_k r_k \cos \omega k)$ , 或者  $S_\omega = 2(1 + 2 \sum_{k=1}^m D_k r_k \cos 2\pi f k)$ , 式中  $f_i = \frac{j}{2m}$ ,  $\omega = \frac{\pi j}{m}$ ,  $j = 0, 1, 2, \dots, m$ ,  $T = \frac{1}{f_i}$ 。在方差谱密度图上,显著峰值对应的为周期  $T$ 。

利用方差谱密度图法(图 4)分析年降水和年径流系列周期,发现年降水量系列有 8 a、5 a 和 3 a 三个主周期,年均径流量系列有 9 a 和 3 a 两个主周期。结果表明,降水和径流系列有 8~9 a 和 3 a 两个共同的主周期。

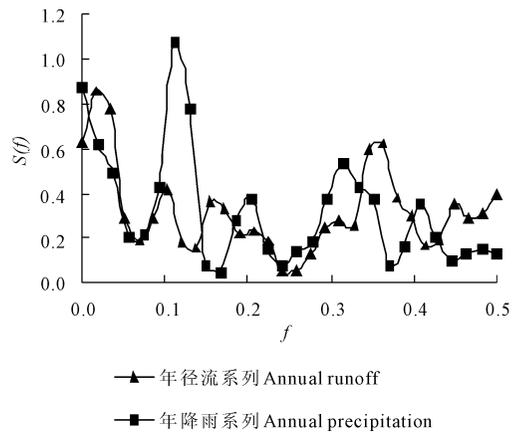


图 4 年降雨径流方差谱密度图  
Fig. 4 Variance spectral density figure of annual precipitation and runoff

## 3 年内特性分析

年内特性分析主要利用年内分配不均匀系数、集中度和集中期等特性参数,其中年内分配不均匀系数和集中度是一致的,本文利用年内分配不均匀系数和集中期进行年内特性分析。

### 3.1 年内分配不均匀系数

河川径流年内分配的均匀状况可以用径流年内分配的不均匀系数  $C_{vy}$  来表示,其计算方法如下<sup>[19]</sup>:

$$C_{vy} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i - nQ_0}{12Q_0}$$

式中,  $C_{vy}$  为径流年内分配不均匀系数;  $Q_i$  为大于年平均流量的月平均流量 ( $m^3/s$ );  $Q_0$  为年平均流量 ( $m^3/s$ )。  $C_{vy}$  值越大,表明各月径流量相差悬殊,即径流年内分配越不均匀。

年降水量系列年内分配不均匀系数范围在 0.28 ~ 0.51, 最大值出现在 2005 年, 最小值出现在 2007 年。利用 Kendall 趋势分析方法对其进行趋势检验,  $\alpha$

$= 0.05$ ,  $|U| = 0.63 < 1.96$ , 表明没有显著的上升或下降趋势。利用 M-K 检验对年内分配不均匀系数系列进行突变分析, 发现系列在 1963 年出现了突变。

年径流系列年内分配不均匀系数范围在 0.25 ~ 0.56, 最大值出现在 1975 年, 最小值出现在 1960 年。利用 Kendall 趋势分析方法对其进行趋势检验,  $\alpha = 0.05$ ,  $|U| = 0.99 < 1.96$ , 表明系列没有显著的上升或下降趋势。利用 M-K 检验对年内分配不均匀系数系列进行突变分析, 发现系列在 1969 年、1995 年出现了突变。

### 3.2 集中期

集中度和集中期的计算是将各月降雨或径流量作为向量, 月降雨或径流量的大小为该月降雨或径流矢量的模, 所处的月份为降雨或径流矢量的方向, 用圆周  $360^\circ$  来表示, 1 月到 12 月的方位角分别为  $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, \dots, 330^\circ$ 。月降雨或径流量可以分解为  $x$  和  $y$  两个方向上的分量, 合成量为  $R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}$ ,  $R_x = \sum_{i=1}^{12} R_i \sin \theta_i$ ,  $R_y = \sum_{i=1}^{12} R_i \cos \theta_i$ ,  $R_x$  和  $R_y$  分别为 12 个月的分量之和所构成的水平、垂直分量,  $R_i$  为第  $i$  月的降雨或径流量,  $\theta_i$  为第  $i$  月降雨或径流的矢量角度,  $i = 1, 2, 3, \dots, 12$ 。集中度和集中期可分别表示为:  $RCD = R/R_a$ ,  $RCP = \arctan(R_x/R_y)$ ,  $R_a$  为年降雨或径流量。集中期  $RCP$  则能够客观地反映一年中降雨或径流的集中出现时间<sup>[19~21]</sup>。

年降雨系列集中期多年平均为  $189.9^\circ$ , 对系列进行趋势分析,  $\alpha = 0.05$ ,  $|U| = 0.59 < 1.96$ , 下降趋势不显著, 对年降雨集中期系列进行 M-K 检验 (图 5), 发现系列除去初始阶段几个交点外, 在 1963 年有交点, 出现突变, 之后无其他交点。

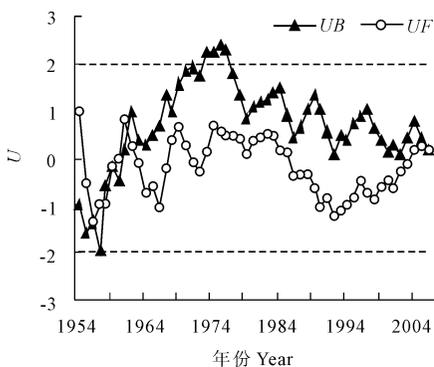


图 5 年降水系列集中期 M-K 检验

Fig. 5 M-K test of annual precipitation's concentration period

进行趋势分析,  $\alpha = 0.05$ ,  $|U| = 3.03 > 1.96$ , 有显著的下趋势, 即径流集中期不断提前, 对年径流集中期系列进行 M-K 检验 (图 6), 发现系列在长期演变中未出现交点。

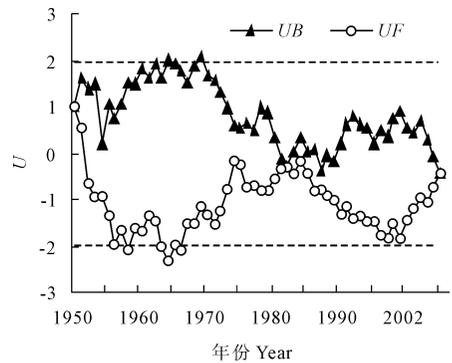


图 6 年径流系列集中期 M-K 检验

Fig. 6 M-K test of runoff's concentration period

石头河流域内洪水主要是由暴雨形成的, 洪峰多为暴涨暴落型, 降雨洪水多集中在 7~9 月, 年径流的变化主要是汛期 7~9 月的降雨径流的变化, 因此对年内分配不均匀系数、集中度和集中期的分析结果客观地反映了石头河流域降雨径流的变化特征。

## 4 结果分析

不少学者对西北旱区与季风的关系进行了深入的研究, 研究发现在全球气候变暖状况下, 该区夏季风减弱, 并存在夏季变干的趋势, 20 世纪 80 年代以后, 西北地区东部降水明显减少, 并且西北地区降水普遍存在 3 a 左右的周期<sup>[22~24]</sup>, 这与本文的分析结果是一致的。

石头河水库 1969 年开始筹建, 1974 年正式开工建设, 1989 年建成。斜峪关站径流系列虽然经过折算处理, 但是由于水库建成后向周围灌区提供水源, 以及水库在 1996 年开始向西安供水的影响, 年径流系列的自然状况也受到这些活动的影响, 其突变点也发生了变化, 因此与降水系列突变不一致。

## 5 结论

年降水径流系列均有显著的下趋势; 年降水系列在 1979 年和 1990 年发生两次突变, 双累积曲线分析表明径流在 1970 年和 1989 年左右发生突变; 年降水和年径流系列有 8~9 a 和 3 a 两个共同的主周期。

年降水系列年内分配不均匀系数, 集中度和集

年径流系列集中期多年平均为  $201.2^\circ$ , 对系列

中期系列均没有显著的上升或下降趋势;年内分配不均匀系数和集中期系列在1962~1963年有突变,与年降雨系列突变点不一致。

年径流系列年内分配不均匀系数没有显著的上升或下降趋势,但集中期系列有显著的下降趋势;突变分析发现年内分配不均匀系数在1969年左右和1995年左右有突变,与年径流系列突变点比较一致,集中期分析无突变现象。

在西北干旱半干旱地区,由于气候因素和下垫面等因素的影响,水资源严重缺乏,因此合理利用水资源发展旱地农业显得非常重要。本文探讨了降雨径流特性变化,以期对石头河流域水资源的合理利用提供决策依据。

### 参考文献:

[1] 任国玉,姜彤,李维京,等.气候变化对中国水资源情势影响综合分析[J].水科学进展,2008,19(6):772-779.

[2] 张国胜,李林,时兴合,等.黄河上游地区气候变化及其对黄河水资源的影响[J].水科学进展,2000,11(3):277-283.

[3] 王国庆,王云璋,史君海.黄河流域水资源与未来变化趋势分析[J].地理科学,2005,25(1):369-400.

[4] 张建云,章四龙,王金星,等.近50年来中国六大流域年际径流变化趋势研究[J].水科学进展,2007,18(2):230-234.

[5] 刘兆飞,徐宗学.塔里木河流域水文气象要素时空变化特征及其影响因素分析水文[J].2007,27(5):69-73.

[6] 张蔚,严以新,郑金海,等.珠江三角洲年际潮差长期变化趋势[J].水科学进展,2010,21(1):77-83.

[7] 谢平,陈广才,李德,等.水文变异综合诊断方法及其应用研究[J].水电能源科学,2005,23(2):11-14.

[8] 樊辉,杨晓阳.黄河干、支流径流量与输沙量年际变化特征[J].泥沙研究,2010,(4):11-15.

[9] 刘敏,沈彦俊.海河流域近50年水文要素变化分析[J].水

文,2010,30(6):74-77.

[10] 褚健婷,夏军,许崇育,等.海河流域气象和水文降水资料对比分析及时空变异[J].地理学报,2009,64(9):1083-1092.

[11] 胡安焱,刘秀花,姜凌.汉江流域水文序列变点分析[J].灌溉排水学报,2009,28(6):128-135.

[12] 汤成友,缈初.基于小波变换的水文时间序列分解及周期识别[J].人民长江,2006,37(12):32-34.

[13] 陈亚宁,郝兴明,徐长春.新疆塔里木河流域径流变化趋势分析[J].自然科学进展,2007,7(2):205-210.

[14] 刘同宦,蔺秋生,姚仕明.三峡工程蓄水前后进出库水沙特性及径流量时间序列变化周期分析[J].四川大学学报(工程科学版),2011,43(1):58-63.

[15] 王双银,朱晓群,宋松柏.石头河水库防洪调度研究[J].水资源与水工程学报,2004,15(1):42-45.

[16] Yue S, Pilon P, Cavadias G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series [J]. Journal of Hydrology, 2002, 259(1-4):254-271.

[17] Hirsch R M, Slack J R. Non-parametric trend test for seasonal data with serial dependence[J]. Water Resource Research, 1984,20(6):727-732.

[18] 王文圣,丁晶,金菊良.随机水文学[M].北京:中国水利水电出版社,2008.

[19] 王双银,朱晓群,曹红霞.关中西部四灌区河源来水时序变化特征分析[J].节水灌溉,2010,(12):4-8.

[20] 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.

[21] 赵春子,黄微,朱卫红.基于集中度与集中期的图们江流域径流年内分配研究[J].延边大学学报(自然科学版),2010,36(3):275-278.

[22] 张广周,马镜娴,谢金南.季风边缘区域气候变化与预测研究[M].北京:气象出版社,2000.

[23] 宋连春,张存杰.20世纪西北地区降水量变化特征[J].冰川冻土,2003,25(2):143-148.

[24] 王澄海,崔洋.西北地区近50年降水周期的稳定性分析[J].地球科学进展,2006,21(6):576-583.

## Study on characteristics of precipitation and runoff changes in the Shitouhe watershed

WANG Jian-ying<sup>1</sup>, WANG Shuang-yin<sup>1\*</sup>, YANG Hui-long<sup>1</sup>, ZHU Xiao-lin<sup>2</sup>

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Water Resource Bureau of Qindu District, Xianyang City, Xianyang, Shaanxi 712000, China)

**Abstract:** Studying characteristics of precipitation and runoff changes could offer a scientific support for planning and using water resources more reasonable. Mann-Kendall test and analysis of spectrum are used to study the characteristics of precipitation from 1954~2007 and runoff series from 1950~2008 in Shitouhe watershed. The annual distribution of precipitation and runoff is analyzed with non-uniformity coefficient and concentration period. The results show that: the annual precipitation and runoff declines significantly; the aberrance points of precipitation appear in 1979 and 1990, while the annual runoff aberrance points in 1969 and 1995; the precipitation and runoff have the main cycle of about 3 years, and the study on non-uniformity coefficient and concentration period got the same conclusion.

**Keywords:** precipitation; runoff; Mann-Kendall test; analysis of spectrum; non-uniformity coefficient; concentration period; Shitouhe watershed