

渭河流域气象及水文旱涝演变规律分析

白桦¹, 穆兴民^{1,2}, 王飞^{1,2}, 高鹏^{1,2}

(1. 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100; 2 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 降水是径流的基本来源, 分析极端旱涝条件下降水与径流之间演变规律的异步性, 可有效表征径流丰枯变化对人类活动的响应。基于渭河流域降水、径流资料, 采用泰森多边形法计算渭河流域面降水量及 12 个月标准化降水指数(SPI₁₂), 对比典型频率下 SPI₁₂的空间分布特征及其对径流系数的影响; 采用经验正交函数和时间序列分析法挖掘 SPI₁₂和年径流量的演变规律, 对比演变规律的同步及异步变化特征。结果表明: 在 25%、50%、75% 频率下, 流域面降水量分别为 582.5 mm、518.6 mm、467.5 mm。SPI₁₂第一主成分减少趋势显著, 自 1991 年 7 月开始突变, 于 1962-09(1962 年 9 月, 下同)-1969-07-1983-02-1985-08-1991-07-1999-12 呈现湿润~正常~湿润~正常~干旱状态。渭河年径流量呈显著减少趋势, 自 1989 年开始突变, 且分别于 1950-1968 和 1982-1993 年经历湿润和正常阶段, 于 1970-1974、1976-1980、1994-2007 年经历干旱阶段。以流域内大规模水利、水土保持措施及城市化等为代表的人类活动使流域年径流量较 SPI₁₂第一主成分突变年份提前, 使二者于 1970-1996 年间旱涝类型不匹配, 年径流量相对 SPI₁₂第一主成分呈现早化趋势。

关键词: 渭河; 旱涝; 气象; 水文; 演变规律; 人类活动

中图分类号: S161.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-7601(2012)02-0237-05

河川径流是保障人类社会发 展、生态环境健康的重要水资源。自 20 世纪 90 年代以来, 受气象干旱和人类活动的影响, 渭河流入黄河的径流量显著减少^[1], 水文干旱频发, 同时, 由于渭河流域降水集中于汛期^[2], 径流调蓄能力有限, 导致洪灾。气象旱涝是由降水和蒸发的不平衡造成的, 水文旱涝是河川径流高于或低于其正常值或含水层水位上升、降落的现象^[3], 二者均是大尺度大气环流不正常的结果^[4]。气象旱涝是水文旱涝的先导^[3]和重要影响因素, 然而在人类活动和下垫面的共同作用下, 气象与水文旱涝却不一定表现出同步规律。渭河流域已有研究多侧重单独的气象或水文极端现象的分析^[5-6], 对二者演变规律的同步及异步特征分析较少, 不能有效表征人类活动与气象、水文极端事件之间的相互作用。因此, 本文在分析流域不同频率年降水量及其对应年份、标准化降水指数(SPI₁₂)空间分布及其对径流系数的影响基础上, 结合经验正交函数和时间序列分析方法, 挖掘气象和水文旱涝的趋势、突变及阶段性特征, 对比分析二者演变特性的异同, 揭示人类活动对于水文、气象旱涝异步变化的影响。

1 资料与方法

渭河流域处于 104°~110°E 和 34°~38°N 之

间^[7], 属黄河一级支流。本文采用渭河流域 13 个国家气象站(见图 1) 1969—1999 年月、年降水量和华县及状头站 1950—2007 年年径流量资料。面降水量计算采用泰森多边形法, 选取 12 月份对应标准化降水指数(SPI₁₂)作为气象旱涝指标^[8-9], 采用经验正交函数提取 SPI₁₂主成分^[10]; 流域年径流量以华县和状头水文站年径流量之和表征, 以多年平均年径流量作为阈值划分丰、枯水集团^[5,11]。利用 Mann-Kendall(简称 MK, 显著性水平取 0.05)趋势^[12-13]及突变点分析^[14]、累积距平曲线^[15]挖掘 SPI₁₂主成分与流域年径流量趋势、突变及阶段性特征。

标准化降水指数是降水量经 Gamma 分布模拟得出的累积概率对应的标准正态分布分位数。由于 Gamma 方程不包含降水量为 0 的情况, 而实际降水量可能为 0, 因此降水量对应的累积概率如下^[9]:

$$H(x) = q + (1 - q)G(x)$$

式中, $H(x)$ 为实测降水量累积概率; q 为降水量为 0 的概率; $G(x)$ 为 Γ 分布累积概率。

2 气象旱涝演变特征

2.1 各气象站 SPI₁₂主成分及其阶段性特征

基于 1959~1999 年各气象站逐月降水量, 计算逐月 SPI₁₂。采用经验正交函数方法提取各站 12 月

收稿日期: 2011-07-05

基金项目: 中国科学院国际合作项目“渭河流域水环境问题综合治理对策研究”; 国家基础研究“973”项目中“区域水土流失过程与趋势分析(2007CB407203)”课题

作者简介: 白桦(1986—), 男, 河北任丘人, 硕士研究生, 研究方向为水文学及水资源。E-mail: baihua1985@nwsuaf.edu.cn

通讯作者: 穆兴民(1961—), 男, 陕西华阴人, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为生态水文学。E-mail: xmmu@ms.swu.ac.cn

对应 SPI_{12} 主成分, 计算各模态方差及累积方差解释率, 结果见图 2。分析表明: 第一主成分的方差解释率 0.59, 前三个模态累积方差解释率 0.81, 因此, 选取前 3 个模态用于分析旱涝演变特征。流域 SPI_{12} 的 1~3 主成分过程线见图 3, 计算其累积距平, 以表征 SPI_{12} 的阶段性变化特征(见图 4), 表明: 第一主成分于 1962-09(指 1962 年 9 月, 下同)-1969-07-1983-02-1985-08-1991-07-1999-12 呈现湿润~正常~湿润~正常~干旱状态; 第二主成分于 1960-01-1969-07-1977-06-1980-07-1990-02-1996-06 呈现干旱~湿润~干旱~湿润~干旱状态; 第三主成分于 1960-01-1975-03-1982-09-1994-03-1999-04 呈现正常~干旱~湿润~干旱状态。基于 1969-1999 年年降水量, 计算流域年降水量累积距平, 以度量流域年降水量的阶段性变化特征, 结果表明: 年降水量于 1969-1982-1985-1991-1999 年呈现正常~湿润~正常~干旱状态, 与 SPI_{12} 第一主成分的阶段性变化特征一致。

SPI_{12} 主成分序列(见图 5)。计算得出流域 SPI_{12} 的 1~3 主成分 MK 检验值分别为 -5.57、1.75、-1.69, 结果表明仅 SPI_{12} 第一主成分呈现显著减少趋势。考虑第一主成分方差解释率为 0.59, 可知流域年降水量呈现干旱化趋势; 仅第一主成分具有明显突变点, 突变开始年份为 1991 年 7 月。因此, 流域 SPI_{12} 第一主成分自 1991 年 7 月显著减少。



图 1 渭河流域气象站泰森多边形

Fig. 1 Thiessen Polygon of meteorological station in Wei River Watershed

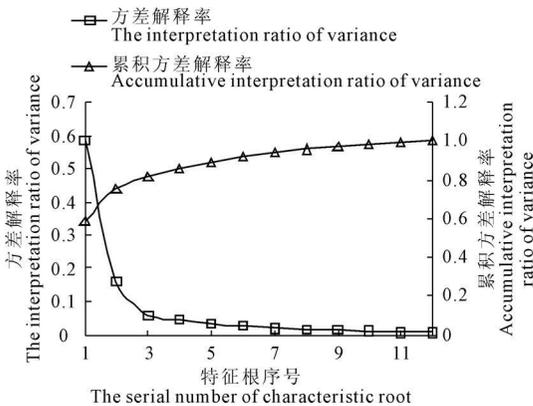


图 2 SPI_{12} 主成分各模态(累积)方差解释率

Fig. 2 Each SPI_{12} main opponent mode's (accumulative) interpretation ratio of variance

2.2 渭河流域 SPI_{12} 主成分变化的趋势性、突变性特征

采用 Mann-Kendall (简称 MK) 方法检验流域

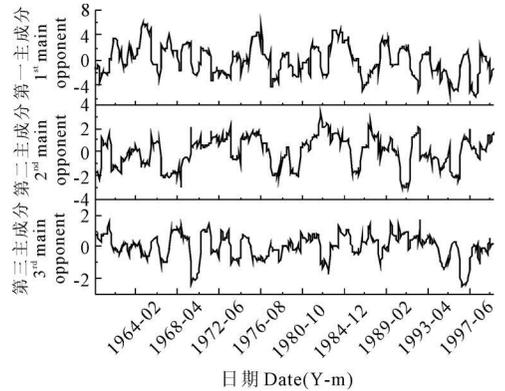


图 3 渭河流域 SPI_{12} 主成分过程线

Fig. 3 Hydrograph of SPI_{12} main opponent in Wei River

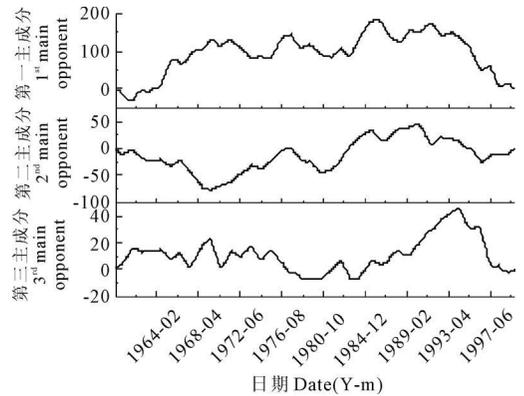


图 4 渭河流域 SPI_{12} 主成分累积距平曲线

Fig. 4 Accumulative anomaly curve of SPI_{12} main opponent in Wei River

3 水文旱涝演变特征

3.1 径流量变化趋势和水文旱涝特征

基于华县站和状头站的年径流量之和, 表征渭河流域年径流量, 并绘制过程线(见图 6), 分析表明: 渭河流域年径流量极大值出现在 1964、1994 年, 于 1964 年出现最大值(212.64 亿 m^3); 年径流量极小值出现在 1995、1997 年, 于 1995 年出现最小值(21.50 亿 m^3)。较长连续丰、枯时段分别出现在 1961-1968 年和 1995-2002 年。年径流量经线性拟合, 趋势线斜率为负, 表明年径流量呈现下降趋势。经 MK 方法检验其趋势性变化, 得出检验值为

- 4.56, 表明年径流量减少趋势显著。

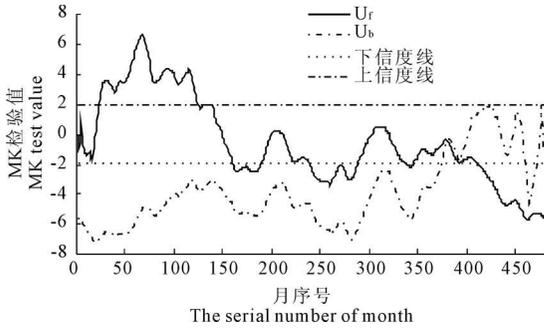


图 5 渭河流域 SPI₁₂主成分突变点分析(MK 方法)

Fig. 5 Change point of SPI₁₂ main opponent in Wei River(MK method)

注: U_f 和 U_b 分别为正序和逆序 MK 检验值, 下同。

Note: U_f and U_b respectively stand for the sequential and inverted MK test value series, the same as below.

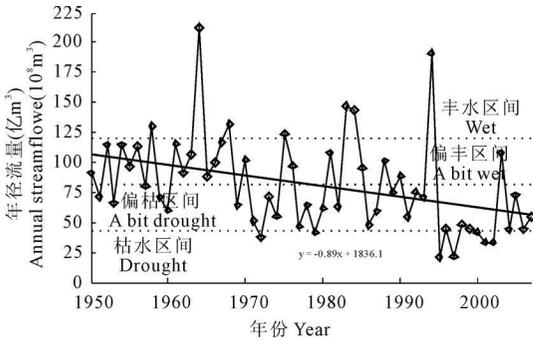


图 6 渭河流域 1950—2007 年年径流量过程线

Fig. 6 Hydrograph of annual streamflow during 1950 to 2007 at Wei River Watershed

3.2 径流量突变性和阶段性特征

采用 MK 方法检验流域年径流量突变点, 见图 7。结果表明: 渭河流域年径流量自 1989 年起显著减少。

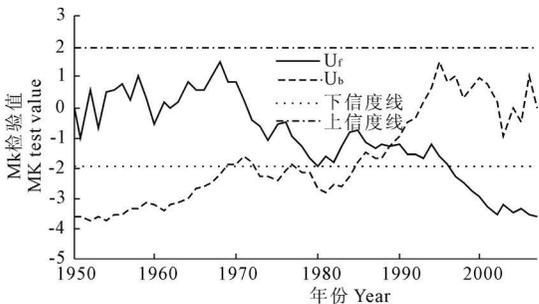


图 7 渭河年径流量突变点分析(MK 方法)

Fig. 7 Change point of annual runoff in Wei River(MK method)

根据年径流量累积距平曲线分析流域年径流量阶段性, 见图 8。表明: 渭河流域年径流量分别于

1950—1968 年和 1982—1993 年经历湿润和正常阶段, 于 1970—1974 年、1976—1980 年、1994—2007 年经历干旱阶段。

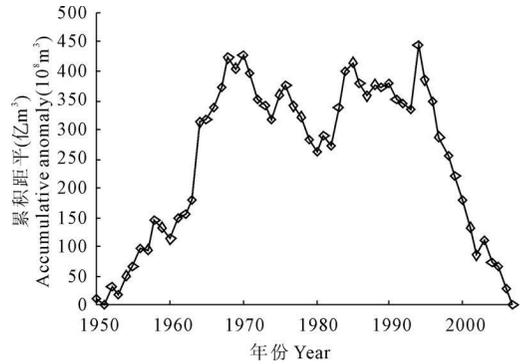


图 8 渭河年径流量累积距平曲线

Fig. 8 Accumulative anomaly curve of annual streamflow in Wei River

4 SPI₁₂的空间分布特征及其对径流系数的影响

通过频率分析, 频率为 25%、50%、75% 时的面降水量分别为 582.5mm、518.6mm 和 467.5mm。选取空间分布相异的典型丰水年 1984 年 ($P = 8.8\%$) 和 1985 年 ($P = 25.4\%$) 以及典型枯水年 1977 年 ($P = 79.4\%$) 和 1972 年 ($P = 79.3\%$), 计算不同典型年各站 SPI₁₂, 经 Kolmogorov-Smirnov 方法验证服从正态分布^[16], 利用普通克里格(英文 Ordinary Kriging)方法进行空间插值, 并绘制各年份的 SPI₁₂ 等值线(见图 9), 从图可以看出, 面平均年降水量频率为 8.8% 和 79.4% 时, 标准化降水指数自流域北部向南部增加, 对应的流域径流系数分别为 0.16 和 0.08; 频率为 23.4% 和 79.3% 时, 标准化降水指数自流域北部向南部减少, 对应的流域径流系数分别为 0.12 和 0.06。

5 气象与水文旱涝演变规律异同比较及原因分析

降水是渭河径流的主要来源, SPI₁₂ 和年径流量在流域内呈现显著减少趋势, 说明渭河流域气象干旱化趋势下径流减少的必然性。但是, 年径流量较 SPI₁₂ 第一主成分突变年份提前, 二者于 1970—1996 年间旱涝类型不匹配, 年径流量相对 SPI₁₂ 第一主成分呈现旱化趋势。究其原因, 该时期内, 水利工程大量建设, 库区水深较建库前增大, 导致库区水头增加, 从而增大了渗漏损失^[17], 水面面积增大, 导致蒸发量增加; 大型灌区集中新建, 灌溉面积增大, 灌溉

保证率提高,均导致灌溉用水的增加。特别是始建于 1958 年,于 20 世纪 70 年代完工并发挥作用的宝鸡峡及羊毛湾水库及灌区;始建于 1970 年前后,分

别于 1974 年和 1981 年建成的冯家山水库和灌区;始建于 1968 年和 1971 年的桃曲坡和石头河水库及其灌区。

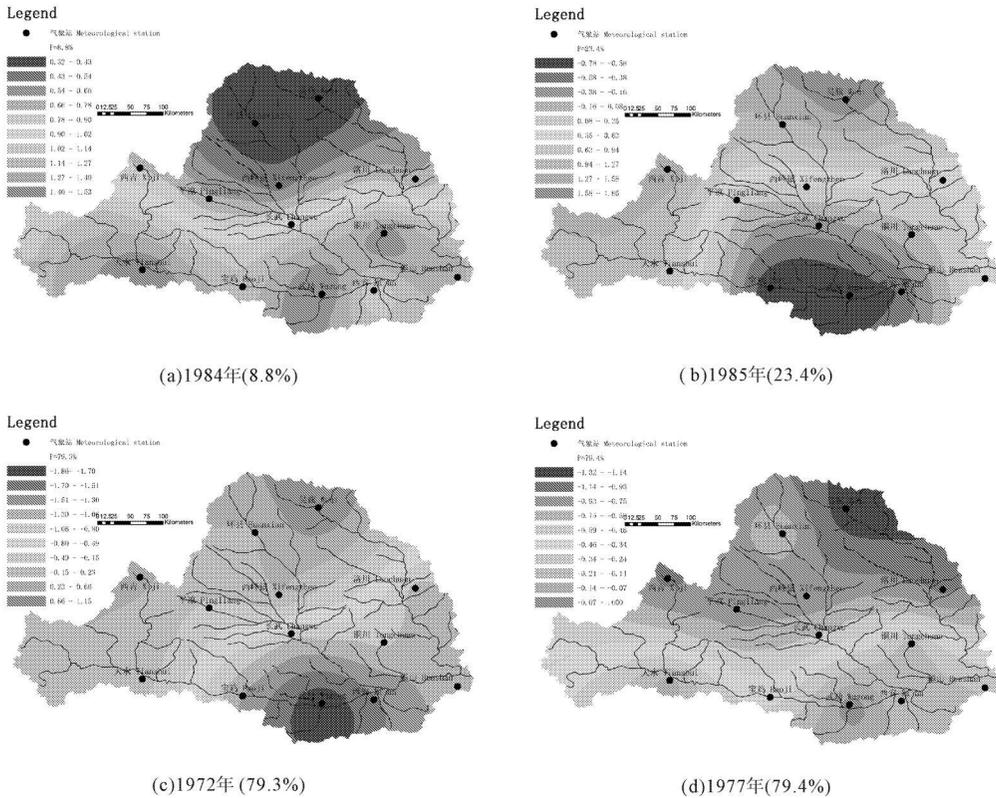


图 9 渭河流域不同频率典型年 12 月份对应 SPI₁₂ 等值线

Fig. 9 Counter map of SPI₁₂ during different typical year in Wei River Watershed

流域水土保持措施增加。林草措施截留降水,减小坡面地表径流流速,增加降水下渗时间,含蓄水源^[18];梯田将地表径流转化为地下径流^[19]。入渗强度、地下径流的增加、水源的涵养,增大了流域的供水能力,也会使水分更多地在流域内被耗散或利用。包含渭河在内的黄河中游梯田、林草、坝地保留面积 1980s 相对于 1970s 以及 1990s(1990—1996 年)相对于 1980s 均增加,但是后者增速相对缓慢^[20]。

自改革开放以来,渭河流域经济高速发展,人口膨胀,水资源利用量增大;城市化进程加快,不透水面积增加,城市热岛效应增加地表温度^[21],减少了城市地下水入渗量^[22],增大了流域的蒸发能力。水资源利用量的增加、回归水量的减少、蒸发能力的增强造成流域出口断面径流的减少。

因此,该时期内较大人类活动强度,导致流域内水文、气象旱涝不匹配,径流相对于降水呈现旱化趋势。

6 结论

1) 采用泰森多边形法计算得出 25%、50%

75% 对应渭河流域面降水量分别为 582.5 mm、518.6 mm、467.5 mm。不同频率各站 SPI₁₂ 经 Kolmogorov-Smirnov 方法验证服从正态分布。

2) 选取经验正交函数方法提取流域各站 12 月对应 SPI₁₂ 主成分,前三个模态和第一主成分累积方差和方差解释率分别为 0.81 和 0.59。SPI₁₂ 第一主成分于 1962-09-1969-07-1983-02-1985-08-1991-07-1999-12 呈现湿润~正常~湿润~正常~干旱状态。SPI₁₂ 第一主成分自 1991 年 7 月显著较少。以华山和状头站年径流量表征渭河年径流量,其最大与最小值分别为 212.64 亿 m³ (1964 年) 和 21.50 亿 m³ (1995 年),自 1989 年显著减少。流域出口断面年径流量较长连续丰、枯时段分别出现在 1961—1968 年、1995—2002 年,且分别于 1950—1968 年和 1982—1993 年经历湿润和正常阶段,于 1970—1974 年、1976—1980 年、1994—2007 年经历干旱阶段。

3) 渭河流域干旱化趋势下,其径流必然减少,然而以流域内大规模水利、水保措施、城市化等为代

表的人类活动使年径流量较 SPI₁₂第一主成份突变年份提前,使二者于 1970—1996 年间旱涝类型不匹配,年径流量相对 SPI₁₂第一主成份呈现旱化趋势。

参考文献:

- [1] 王生雄,魏红义,郑晓梅.渭河流域径流序列趋势及突变点分析[J].水资源研究,2008,29(3):1-3.
- [2] 刘燕,胡安焱.渭河流域近 50 年降水特征变化及其对水资源的影响[J].干旱区资源与环境,2006,20(1):85-87.
- [3] 袁文平,周广胜.干旱指标的理论分析与研究展望[J].地球科学进展,2004,19(6):982-991.
- [4] Sabina Stefan, Monica Ghioca, Norel Rambu, et al. Study of meteorological and hydrological drought in southern Romania from observational data[J]. International journal of climatology, 2004, 24(7): 871-881.
- [5] 韩凤霞,邢大韦.陕西省渭河流域干旱水文研究[J].水文,1995,(6):26-30.
- [6] 张育生.渭河流域洪水分析[J].甘肃水利水电,2005,41(4):345-346.
- [7] 王国庆,王云璋.渭河流域产流产沙模型及径流泥沙变化原因分析[J].水土保持学报,2000,14(4):22-25.
- [8] Hong Wu, Michael J Hayes, Albert Weiss, et al. An evaluation of the Standardized Precipitation Index, the China-Z index and the statistical Z-score[J]. International Journal of Climatology, 2001, 21(6): 745-758.
- [9] 袁文平,周广胜.标准化降水指标与 Z 指数在我国应用的对比分析[J].植物生态学报,2004,28(4):523-529.
- [10] 钱维宏,刘大庆.中国北方百年四季降水趋势与海平面气压形

式[J].地理学报,2003,58(S):49-60.

- [11] 邢大韦.陕西渭河流域水文干旱分析[J].西北水资源与水工程,1996,7(1):1-9,15.
- [12] 徐利岗,周宏飞,李彦,等.中国北方荒漠区降水稳定性与趋势分析[J].水科学进展,2008,19(6):792-799.
- [13] Xingmin Mu, Lu Zhang, Tim R McVicar, et al. Estimating the impact of conservation measures on stream-flow regime in catchments of the Loess Plateau, China[J]. Hydrological Progress, 2007, 21(16): 2124-2134.
- [14] Sheng Yue, ChunYuan Wang. The Mann-Kendall test modified by effective sample size to detect trend in serially correlated hydrological series[J]. Water Resources Management, 2004, 18:201-218.
- [15] 穆兴民,李靖.黄河天然径流量年际变化过程分析[J].干旱区资源与环境,2003,17(2):1-5.
- [16] 王景雷,孙景生,刘祖贵,等.作物需水量观测站点的优化设计[J].水利学报,2005,(2):1-9.
- [17] 贾绍凤,张士锋.黄河流域可供水量究竟有多少[J].自然资源学报,2001,16(6):547-551.
- [18] 赵鸿雁,吴钦孝,刘国彬.黄土高原森林植被水土保持机理研究[J].林业科学,2001,37(5):140-144.
- [19] 张翠云,王昭.黑河流域人类活动强度的定量评价[J].地球科学进展,2004,19(S):386-390.
- [20] 冉大川.黄河中游水土保持措施的减水减沙作用研究[J].资源科学,2006,28(1):93-100.
- [21] 肖荣波,欧阳志云,李伟峰,等.城市热岛的生态环境效应[J].生态学报,2005,25(8):2055-2060.
- [22] 陈宝冲.城市化可能引起的地貌灾害及其防治[J].灾害学,1990,(2):23-28.

Analysis on evolution law of meteorological and hydrological drought and wetting

BAI Hua¹, MU Xing-min^{1,2}, WANG Fei^{1,2}, GAO Peng^{1,2}

(1. Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Runoff basically origins from precipitation. The differences of the evolution law between them could effectively reveal the effect of human activities on drought and wetting. This paper based on hydrological and meteorological data, the watershed precipitation is calculated by Thiessen Polygon method and the 12 month standardized precipitation index (SPI₁₂) is also acquired. Furthermore, the spatial distribution of SPI₁₂ is presented by different typical frequencies and its effects on runoff coefficient have also been detected. Moreover, the evolution law of SPI₁₂ and runoff is analyzed by EOF and time series analysis method, the synchronization and induction of which is also detected. The results shows that the watershed precipitation corresponding to 25%, 50% and 75% frequencies are respectively 582.5 mm, 518.6 mm and 467.5mm. And the 1st principal component of SPI₁₂ decrease significantly and appears wet-normal-wet-normal-drought during 1962.9~1969.7~1983.2~1985.8~1991.7~1999.12, the change point of which is 1991.7. The runoff in Wei River decreases significantly and abruptly changes in 1989a. And the runoff presents wet in 1950—1968a, normal in 1995—2002a and drought in 1970—1974, 1976—1980, 1994—2007a. The human activities, including water conservancy project, water and soil conservation measurement and urbanization, make the change point of runoff earlier than that of SPI₁₂, the runoff more dry than the 1st principal component of SPI₁₂, and lead to the mismatch of wet, normal and drought types between runoff and SPI₁₂ during 1970—1996a.

Keywords: Wei River; wet and drought; meteorology; hydrology; evolution law; human activity