网络出版时间:2019-07-10 10:35 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2020.01.018
网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20190710.1033.036.html

基于 EOF 的渭河流域干旱时空分布特征研究

周 凯,王义民
(西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室,陕西 西安 710048)

[摘 要] 【目的】探究渭河流域气象干旱的时空分布特征及演变规律,为该流域社会经济的可持续发展提供支持。【方法】以渭河流域 1960-2016 年 20 个气象站逐月降水量和月平均气温数据为基础,基于标准化降水蒸散指数定量描述干旱,并运用经验函数正交分析法(EOF)对渭河流域各站点组成的历史干旱指数矩阵进行分解,分离干旱场的时空分布结构;采用具有一定物理意义的互不相关的典型分布模态代替原干旱场研究流域干旱空间分布规律,采用典型分布模态对应的时间系数研究流域干旱的时间分布规律。【结果】渭河流域气象干旱场干旱指数矩阵分解得到的前 5 个特征值的累积方差贡献率达到 86.44%,但仅前 2 个特征值通过了 North 显著性检验,累积方差贡献率接近 75%;模态一时间系数的线性趋势斜率小于 0,且通过了 0.01 显著性水平检验;模态一时间系数于 1984 年、1986 年、1989 年发生 3 次突变,到 1996 年达到 0.05 显著性水平。【结论】渭河流域气象干旱场存在全流域一致型和东南-西北反位相型两种空间分布模态,两种空间分布模态对应全流域干旱少雨、湿润多雨、东南湿润西北干旱、东南干旱西北湿润 4 种干旱表现形式;模态一时间系数有显著减小趋势,反映流域干旱化趋势日益显著,而模态二时间系数无显著变化。

[关键词] 气象干旱;干旱时空分布;经验正交函数分解法;标准化降水蒸散指数;渭河流域
[中图分类号] TV211.2 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2020)01-0146-09

Temporal and spatial distribution of drought in the Weihe River Basin based on EOF

ZHOU Kai, WANG Yimin
(*State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi* 710048, *China*)

Abstract: 【Objective】 The temporal and spatial distribution characteristics and evolution of meteorological drought in the Weihe River Basin were explored to support sustainable socio-economic development in the basin. 【Method】 Based on the monthly precipitation and mean temperature at 20 meteorological stations in the Weihe River Basin from 1960 to 2016, the drought was quantitatively described based on the standardized precipitation evapotranspiration index. The empirical function orthogonal analysis (EOF) was used for decomposition of historical drought index matrix and the spatial and temporal distribution structures of the dry field were separated. The typical spatial distribution pattern with certain physical meaning was used to replace the original dry field to study the spatial distribution of the arid basin. The time coefficient corresponding to the typical distribution mode was also used to study the temporal distribution of drought. 【Result】 The cumulative variance contribution rate of the first five eigenvalues obtained from the drought index matrix decomposition of meteorological drought field in the Weihe River Basin reached

[收稿日期] 2018-11-23
[基金项目] 国家自然科学基金项目(51679189);国家重点研发计划项目(2017YFC04044-04)
[作者简介] 周 凯(1997-),男,陕西咸阳人,硕士,主要从事水文学及水资源研究。E-mail:2330895753@qq.com
[通信作者] 王义民(1972-),男,山西新绛人,教授,博士,主要从事水文学及水资源研究。E-mail:wangyimin@xaut.edu.cn

86.44%，but only the first two eigenvalues passed the North significance test with cumulative variance contribution rate of close to 75%. The linear trend slope of the time coefficient was less than 0 and passed the 0.01 significance level test. The first modal time coefficient had three mutations in 1984，1986，and 1989，and reached the 0.05 significance level in 1996.【Conclusion】There were two spatial distribution modes，the whole basin consistent type and the southeast-northwest anti-phase type，in the meteorological drought field in the Weihe River Basin. The two spatial distribution modes corresponded to four draught forms of drought and less rain in the whole basin，wet and rainy in the whole basin，southeast humid northwest drought，and southeast dry northwest humid. The modal-time coefficient had a significant decreasing trend，reflecting the significantly increasing trend of aridification in the basin，while the modal two-time coefficient had no significant change.

Key words：meteorological drought；time and space distribution of drought；empirical orthogonal function (EOF)；standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI)；Weihe River Basin

IPCC 第五次评估报告显示，1901－2013 年全球表面平均气温升高了 0.89 ℃，降水模式也发生了改变[1]。这些变化会引起地表径流变化，导致更多的干旱或洪涝事件，从而影响地区生态系统和社会经济的健康发展[2-4]。了解流域干旱的时空分布特征，对预测旱涝灾害发生规律和保障社会可持续发展具有重要意义。

经验正交函数分解法(empirical orthogonal function，EOF)作为一种多元统计分析方法，已被广泛应用于干旱研究领域，许多学者采用该方法提取时间与空间变化信息，用于区域干旱的时空分布研究。石崇等[5]利用 1947－2006 年逐月全球陆地高分辨率标准化降水蒸散指数资料，运用 EOF 法分析了过去 60 年东半球陆地的干旱化趋势和时空分布规律以及可能的变化成因等；孙智辉等[6]利用陕西黄土高原地区共 68 个气象站点的降水资料，选择标准化降水指数(standardized precipitation index，SPI)为干旱指标，利用 EOF 进行了干旱分区，并分析了该地区全年及各季节干旱站次比和干旱强度的年际变化；刘晓云等[7]利用 1961－2009 年中国 589 个气象站月降水和月平均气温资料，采用 EOF 等方法对干旱指数的时空分布规律进行了研究。EOF 可以提取气象变量场中的主要信号特征，将多维度变量降为低维度变量，从而更加准确识别气象变量场的特征，另外根据 EOF 分解出的前几个方差贡献较大特征值对应的包含时空域信息的互相正交的特征向量，可以将复杂的气象变量场分解为几个主要的模态，且分解结果具有一定的物理意义[8-12]。因此 EOF 已经成为气候分析的主要工具，反映出许多有价值的气候变化事实[13-17]。

目前渭河流域干旱时空分布的研究大多从各观测站点资料出发，通过基于泰森多边形计算的面雨量推求干旱特征量描述流域干旱的时间演变特征，或通过对各站干旱特征值的空间插值来描述流域干旱的空间变化特征，如田甜等[18]采用渭河流域地面气象观测资料，计算基于面雨量的流域干旱指数序列，再结合统计方法研究渭河流域干旱的时间分布特征，通过对各站干旱发生频率的克里金插值来描述渭河流域干旱的空间变化特点。综观现有研究成果，尚缺乏从流域整体气象变量场的角度研究渭河流域的内在干旱时空演变规律的报道。为此，本研究选取标准化降水蒸散指数作为干旱分析指标，采用 EOF 法研究渭河流域气象干旱的时空分布特征，以期为当地的防汛抗旱工作提供参考。

1　研究区域及数据来源

渭河为黄河最大的支流，发源于甘肃省定西市渭源县鸟鼠山，主要流经甘肃省天水市和陕西省的宝鸡、咸阳、西安等市县，于潼关汇入黄河，全长 818 km，流域面积 134 766 km^2。渭河流域位于 104°00 －111°20 E，33°50 －37°18 N，海拔为 322～3 919 m。本研究气象数据来源于中国气象数据共享网，选取渭河流域资料齐全的 20 个气象站点(其中甘肃省 7 个，宁夏回族自治区 2 个，陕西省 11 个，具体见图 1)，获取其 1960－2016 年逐月降水量与月平均气温数据，根据降水与气温数据计算各站逐月标准化降水蒸散指数。

2　研究方法

2.1　标准化降水蒸散指数(SPEI)

标准化降水蒸散指数(SPEI)[19]从水分亏缺和累积的角度描述干旱，具有适用多时间尺度、输入资

料少、计算简便的优点。计算时采用三参数 log-logistic概率分布函数拟合降水量与潜在蒸发量的差值序列,再对数据序列进行标准正态转换,得到相应的 SPEI 值。潜在蒸发量采用 Thornthwaite 方法[20]计算得出,采用 1 个月时间尺度的标准化降水蒸散指数来表征流域干旱,再将各月份累加形成各年的干旱数值。

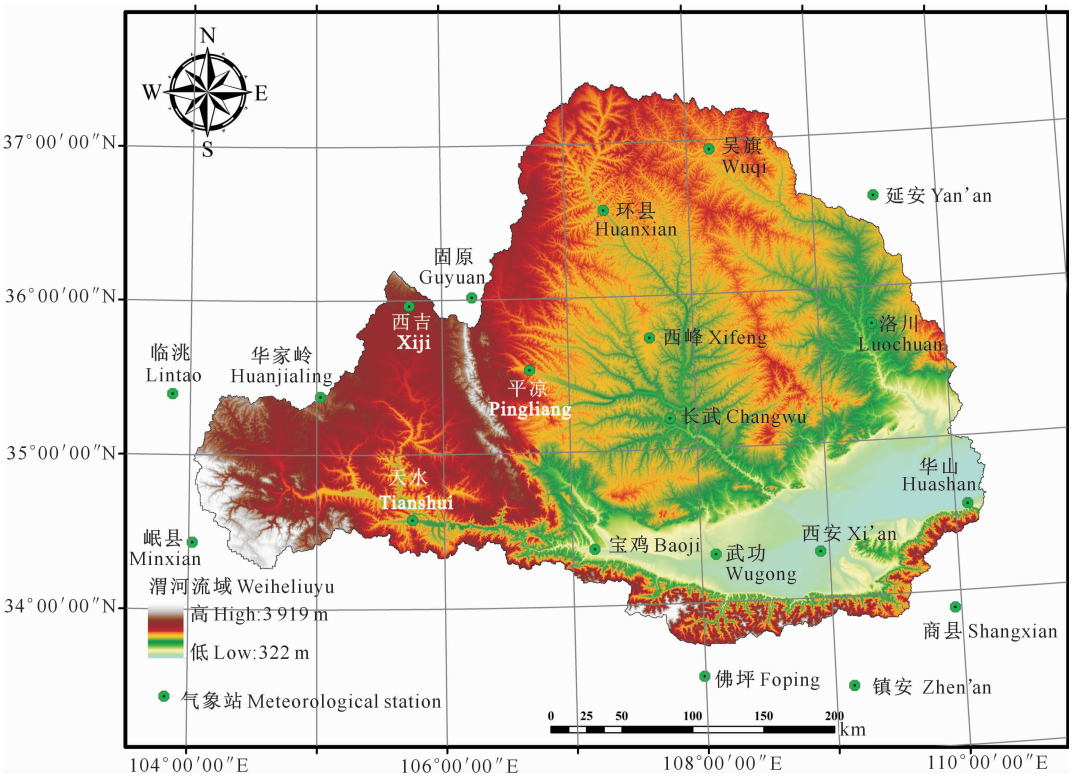

图 1 渭河流域气象站点及其空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of meteorological stations in the Weihe River Basin

2.2 经验正交函数分解法

1) 选定要分析的数据,进行数据预处理。一般将原始资料矩阵 $\boldsymbol{X}$ 进行距平处理,得到数据矩阵 $\boldsymbol{X}_{m\times n}$,计算矩阵 $\boldsymbol{X}_{m\times n}$ 与其转置矩阵的乘积,得到:

$$\boldsymbol{C}_{m\times m}=\frac{1}{n}(\boldsymbol{X}_{m\times n}\boldsymbol{X}_{m\times n}{}^{\mathrm{T}})。\tag{1}$$

式中:$\boldsymbol{C}_{m\times m}$ 为协方差矩阵[21],$\boldsymbol{X}_{m\times n}$ 为数据矩阵,m 为气象站,n 为年份。

2) 计算矩阵 $\boldsymbol{C}_{m\times m}$ 的特征值和特征向量。需满足:

$$\boldsymbol{C}_{m\times m}\times V_{m\times m}=V_{m\times m}\times \boldsymbol{E}_{m\times m}。\tag{2}$$

式中:$V_{m\times m}$ 为矩阵 $\boldsymbol{C}_{m\times m}$ 的特征向量,$\boldsymbol{E}_{m\times m}$ 为 $m\times m$ 的对角阵,即为:

$$\boldsymbol{E}_{m\times m}=\begin{bmatrix}\lambda_1 & 0 & \cdots & 0\\ 0 & \lambda_2 & \cdots & 0\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_m\end{bmatrix}。\tag{3}$$

式中:λ_1、$\lambda_2\cdots\lambda_m$ 为矩阵 $\boldsymbol{C}_{m\times m}$ 的特征值。特征值从大到小排列,将每个非 0 特征值对应的一列特征向量,作为 EOF 对应的一个空间分布模态[22]。

3) 计算时间系数矩阵。时间系数矩阵可以由矩阵 $C_{m\times m}$ 中的特征向量求出,$V_{m\times m}$ 得出后,即可得到时间系数[23]矩阵为:

$$\boldsymbol{T}_{m\times n}=V_{m\times m}{}^{\mathrm{T}}\times X_{m\times n}。\tag{4}$$

式中:$\boldsymbol{T}_{m\times n}$ 为时间系数矩阵。

4) 计算每个特征向量的方差贡献率。矩阵特征值 λ 越大,说明对应的特征向量或空间模态越重要,对总方差的贡献率也就越大。即:

$$R_k=\frac{\lambda_k}{\sum_{i=1}^{m}\lambda_i}。\tag{5}$$

式中:R_k 表示第 k 个模态的方差贡献率,λ_i、λ_k 分别表示第 i 个和第 k 个特征值,$k=1,2,\cdots,i,\cdots,p(i<p<m)$。前 p 个特征向量的累积方差贡献率可由下式计算:

$$G=\frac{\sum_{i=1}^{p}\lambda_i}{\sum_{i=1}^{m}\lambda_i}。\tag{6}$$

式中：G 表示前 p 个特征向量的累积方差贡献率。

5）显著性检验。经验正交函数分解出的结果是无意义的噪声还是有物理意义的信号，需要经过显著性检验才能分辨。常用于分解结果显著性检验的方法有 2 种，即 North 法和蒙特卡罗法[23]。本文选择 North 法对特征值的误差范围进行显著性检验。其表达式为：

$$e_i=\lambda_i\left(\frac{2}{N}\right)^{1/2}。\tag{7}$$

$$\lambda_i-\lambda_{i+1}\geqslant e_i。\tag{8}$$

式中：e_i 为特征值 i 的误差范围，N 为样本总数。

一般认为，相邻的特征值 λ_i 和 λ_{i+1} 满足式（8）时，特征值所对应的经验正交函数的分解结果具有物理意义。

3　结果与分析

采用渭河流域 1960－2016 年各站月尺度降水与平均气温数据计算逐月标准化降水蒸散指数数据集，各月累加形成年尺度数据。对年尺度数据进行距平处理，处理后的数据按气象站×年份的形式组成 20×57 数据矩阵，并对该矩阵进行 EOF 分解。根据分解结果，得到 20 个特征值与 20 个特征值对应的特征向量。

互相正交的特征向量在空间上的分布，称为渭河流域互相独立的气象干旱场的空间分布模态。特征值的方差贡献率与累积方差贡献率按数值大小排列，可以了解对应的特征向量的方差占总方差的比例和前几项特征向量共计占总方差的比例，进而表征特征向量所对应的空间模态的分布形式是否典型。如果特征向量所包含的各分量为同一符号（同时为正或同时为负），则特征向量反映的是流域内干湿变化的一致性；若各分量呈现正负相间的空间分布，则反映流域内干湿变化相反；每一种模态的极值点代表该模态下干湿变化的敏感中心。特征向量所对应的时间系数反映了流域由特征向量所表征的空间分布模态的时间变化特征，系数符号反映模态的方向，正值表示与模态同方向，负值则相反，且系数数值的绝对值越大，表明年尺度下这类模态越典型[24]。

3.1　渭河流域气象干旱的空间分布特征

渭河流域气象干旱场 EOF 分解的结果如表 1 所示。由表 1 可知，前 5 个特征值的累积方差贡献率达到 86.44%，但只有前 2 个特征值的误差范围不重叠，通过了 North 显著性检验，累积方差贡献率接近 75%，因此这 2 个特征值所对应的特征向量可以很好地解释 1960－2016 年渭河流域气象干旱的空间分布。将第一个特征值对应的特征向量在空间上的分布称作模态一，第二个特征值对应的特征向量在空间上的分布称为模态二。

表 1　渭河流域气象干旱场 EOF 分解的部分结果

Table 1　Partial results of EOF decomposition in meteorological drought field in the Weihe River Basin

模态 Mode	特征值 Eigenvalue	方差贡献率/% Variance contribution rate	累积方差贡献率/% Cumulative variance contribution rate	误差范围* Tolerance scope	
				下限 Upper limit	上限 Lower limit
1	196.95	63.81	63.81	134.67	259.24
2	32.17	10.42	74.23	25.72	42.34
3	19.54	6.33	80.56	12.36	22.00
4	9.82	3.18	83.75	6.72	13.93
5	8.33	2.70	86.44	5.70	10.97

注：* 表示在 95%置信度水平下。

Note: * Indicated at 95% confidence level.

由表 1 可知，模态一中特征向量的方差贡献率达 63.81%，远大于其他模态，因此认为模态一中特征向量各分量的空间分布是渭河流域气象干旱场主要的空间分布类型。模态二中特征向量的方差贡献率为 10.42%，也是渭河流域较为典型的气象干旱场的空间分布类型。根据以上分析，明确渭河流域气象干旱场主要有 2 种类型，即全流域一致型和东南-西北反位相型，这与文献[25]的研究结果类似。模态一和模态二 2 种空间分布类型具体体现为流域的 4 种空间分布表现形式，分别为模态一反映的全流域湿润多雨或者干旱少雨，模态二反映的流域西北湿润东南干旱或者西北干旱而东南湿润。

基于 Arcgis 进行克里金插值[26]，并绘制模态一和模态二的空间分布图（图 2 和图 3）。根据图 2 结果，模态一中特征向量的分量值均为正值，说明 1960－2016 年渭河流域的干湿变化一致，也就是说 57 年间全流域都呈现全年湿润多雨或者干旱少雨。高值中心位于流域西南部地区，次高值区位于西峰、

环县一带,反映这些地区为干湿变化的敏感中心,具有年际干湿交替频繁、变化幅度较大的特点,低值中心位于流域西北部地区。整个流域西部地区的年际干湿变化幅度大于中东部地区,中部地区为过渡地区,东部地区年际干湿变化幅度较小。

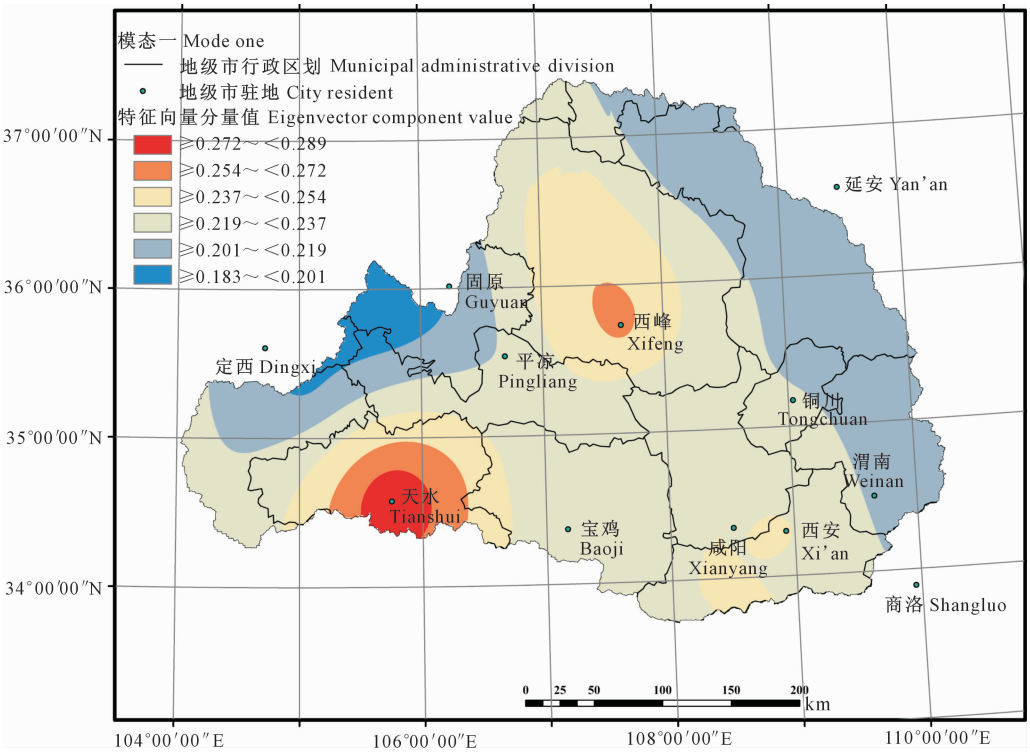

图 2 基于 SPEI 距平的渭河流域 EOF 分析的模态一空间分布

Fig. 2 The mode one spatial distribution of the EOF analysis of the Weihe River basin based on SPEI anomalies

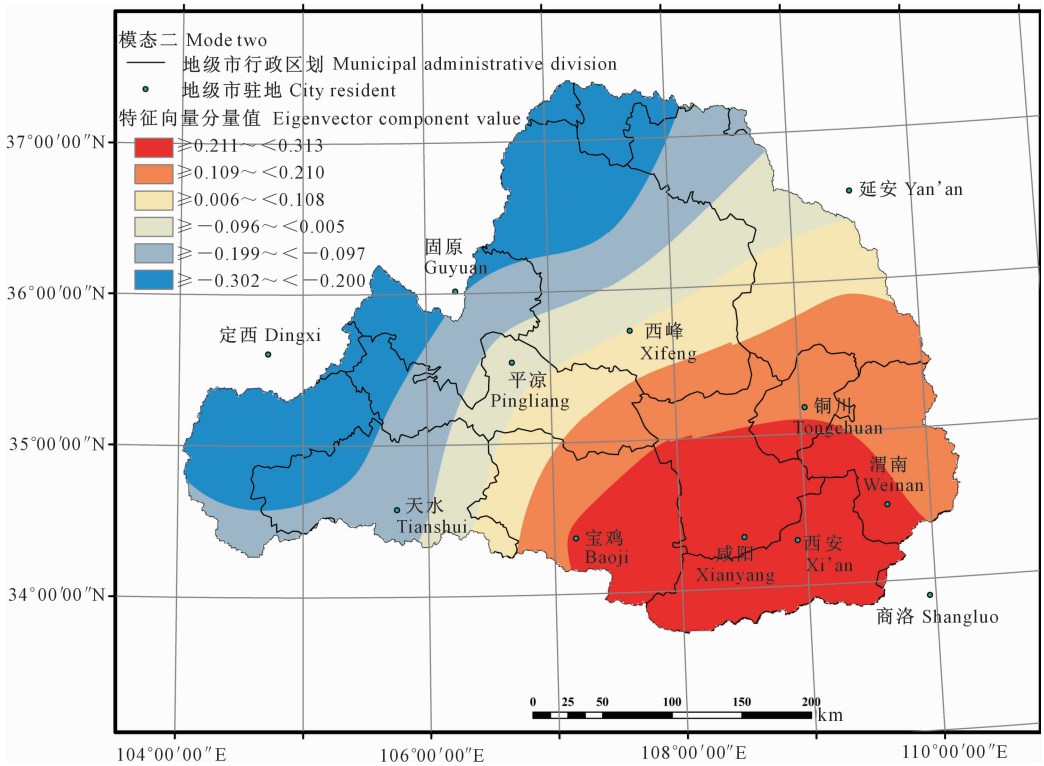

图 3 基于 SPEI 距平的渭河流域 EOF 分析的模态二空间分布

Fig. 3 The mode two spatial distribution of the EOF analysis of the Weihe River basin based on SPEI anomalies

图 3 显示，模态二中特征向量的分量值一半为正值，一半为负值，空间分布大致以延安、西峰一带为界，向西北为负值区，向东南为正值区，正值中心位于流域东南部地区，负值中心为流域西部及西北部地区，呈现出东南-西北反位相型分布的特点。也就是说，如果流域东南部地区湿润多雨，则西北部地区干旱少雨；如果东南部地区干旱少雨，则西北部地区湿润多雨。这反映了渭河流域属于季风气候的特点。

3.2　流域气象干旱的时间分布特征

将每年绝对值最大的时间系数所对应的特征向量作为当年典型的气候干旱空间分布特征，对 57 年来渭河流域的 4 种气象干旱场空间分布表现形式进行统计分析，结果见表 2。由表 2 可知，57 年中有 19 年全年全流域干旱少雨，18 年全年全流域湿润多雨，属于模态一的有 37 年，占比 64.91%；流域东南部地区干旱西北部湿润的年份有 5 年，有 5 年属于流域东南部地区湿润而西北部干旱，模态二共出现 10 年，占比17.54%。由此可知，57 年来渭河流域气象干旱场空间分布类型以模态一为主，模态二为流域较为典型的气象干旱场的空间分布类型。

表 2　渭河流域气象干旱场模态一和模态二对应的 4 种干湿变化特征所对应的年份

Table 2　Years corresponding to the four types of wet and dry changing characteristics corresponding to the mode one and mode two of the meteorological dry field in the Weihe River Basin

模态 Mode	干湿状态 Wet and dry state	时期 Period					
		1960－1969	1970－1979	1980－1989	1990－1999	2000－2009	2010－2016
模态一 Mode one	湿润多雨 Wet and rainy	1960，1962，1963，1966，1967，1969	1971，1973，1974，1975	1980，1982，1983，1987，1988，1989	1992	2002	
	干旱少雨 Drought and less rain	1968		1981，1985	1991，1994，1996，1997，1998，1999	2000，2001，2003，2004，2005，2006，2007，2009	2012，2015
模态二 Mode two	东南干旱西北湿润 Southeastern drought，northwest humid		1970，1979	1986		2008	2012
	东南湿润西北干旱 Southeastern humid，northwestern drought	1965	1976，1977	1984			2011

渭河流域气象干旱场模态一和模态二逐年时间系数的变化如图 4 和图 5 所示。由图 4 可知，模态一时间系数的线性趋势斜率小于 0，采用 Kendall 秩次检验方法对该序列趋势进行显著性检验，得出统计量 $U=-3.66$，通过了0.01显著性水平检验，说明时间系数序列有逐年显著减小的趋势，即模态一有从“全流域湿润多雨”的空间分布形式转变为“全流域干旱少雨”形式的显著趋势。

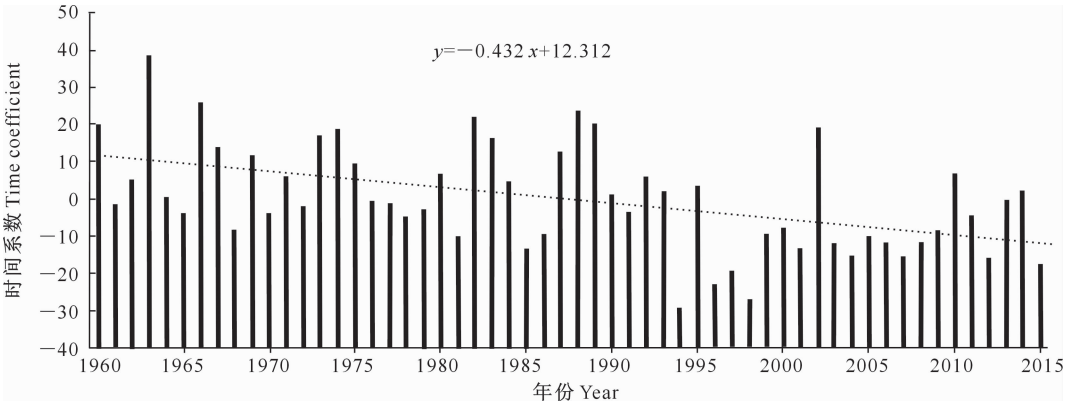

图 4　渭河流域气象干旱场模态一逐年时间系数的变化

Fig. 4　Variation of the mode one time coefficient of the meteorological drought field in the Weihe River Basin

根据图 5 及相关计算结果发现，模态二时间系数的线性趋势斜率几乎为 0，Kendall 秩次检验的统计量 $U=0.19$，未通过显著性检验，说明模态二的空间分布类型变动不明显，2 种空间分布类型基本保持均衡。

根据上文得到的 2 个模态的逐年时间系数序列，借助 Mann-Kendall 法[27]进行突变分析，结果如图 6 所示。由图 6 可知，模态一时间系数的 UF 曲线在 1966 年之前为正负波动变化，从 1966 年以后持续负值，1984 年、1986 年和 1989 年发生 3 次突变，到 1996 年超出 0.05 显著性水平。说明渭河流域气象干旱场模态一从 1966 年开始由“全流域湿润

多雨"的空间分布类型转变为"全流域干旱少雨"形式,之后流域空间分布形式变动趋势日益明显,到1996年这种变动趋势已达0.05的显著性水平,表明渭河流域干旱化趋势日益显著。

模态二时间系数的UF曲线在1975年前多为正值,从1975年开始持续正负值波动变化,并发生多次突变,但一直未达到0.05的显著性水平。这表明渭河流域气象干旱场模态二在1975年前多为"东南干旱西北湿润"的空间分布形式,从1975年后开始部分发生转变,有变为"东南湿润西北干旱"形式的趋势,但这种趋势并不显著。

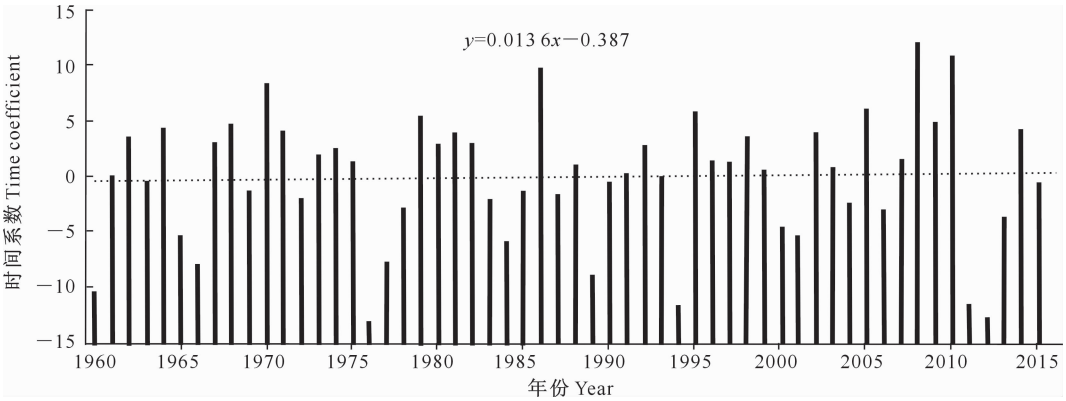

图5 渭河流域气象干旱场模态二逐年时间系数的变化

Fig. 5 Variation of the mode two time coefficient of meteorological drought field in the Weihe River Basin

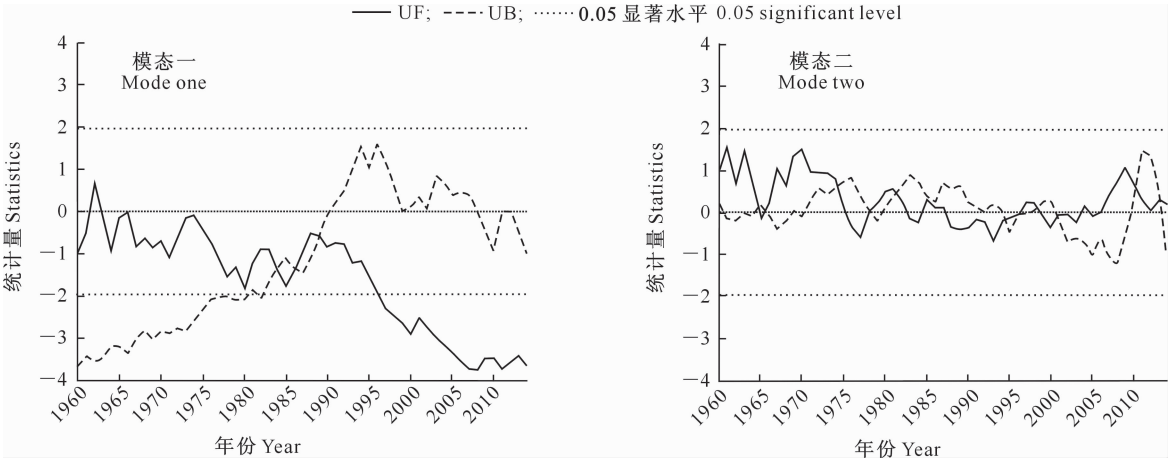

图6 渭河流域气象干旱场模态一和模态二逐年时间系数的Mann-Kendall法趋势与突变检测

Fig. 6 Mann-Kendall method trend and mutation detection of mode one and mode two yearly time coefficients of meteorological drought field in the Weihe River Basin

4 结 论

采用EOF分解、线性回归、Mann-Kendall法,结合Arcgis的克里金插值功能,对渭河流域及其周边20个气象站1960—2016年间年尺度的气象干旱时空分布特征进行分析,得出以下结论:

1)渭河流域气象干旱场主要有2种空间分布类型,即全流域一致型和东南-西北反位相型。

2)渭河流域气象干旱场有4种空间分布表现形式,分别为模态一反映的全流域湿润多雨或者干旱少雨,模态二反映的流域西北地区湿润东南地区干旱少雨,或西北地区干旱东南地区湿润多雨。

3)渭河流域气象干旱场模态一从1966年开始出现干旱化趋势,在1984—1989年发生突变之后流域干旱化趋势日益显著;模态二1975年前多为东南干旱西北湿润,1975年后有变动为东南湿润西北干旱的趋势,但变动趋势不显著。

[参考文献]

[1] Allen S K, Plattner G K, Nauels A, et al. Climate change 2013: the physical science basis. an overview of the working group 1 contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change (IPCC) [J]. Computational Geometry, 2007, 18(2): 95-123.

[2] Ye L, Grimm N B. Modelling potential impacts of climate change

on water and nitrate export from a mid-sized, semiarid watershed in the US Southwest [J]. Climate Change, 2013, 120(1/2): 419-431.

[3] Zhang A, Fu G, Wang B, et al. Assessments of impacts of climate change and human activities on runoff with SWAT for the Huifa River Basin, Northeast China [J]. Water Resources Management, 2012, 26(8): 2199-2217.

[4] Tang J, Yin X A, Yang P, et al. Assessment of contributions of climatic variation and human activities to stream flow changes in the Lancang River, China [J]. Water Resources Management, 2014, 28(10): 2953-2966.

[5] 石　崇，刘晓东. 1947－2006 年东半球陆地干旱化特征：基于 SPEI 数据的分析 [J]. 中国沙漠，2012，32(6)：1691-1701.
Shi C, Liu X D. Characteristics of terrestrial aridification in eastern hemisphere from 1947 to 2006: based on SPEI data analysis [J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(6): 1691-1701.

[6] 孙智辉，王治亮，曹雪梅，等. 基于标准化降水指数的陕西黄土高原地区 1971－2010 年干旱变化特征 [J]. 中国沙漠，2013，33(5)：1560-1567.
Sun Z H, Wang Z L, Cao X M, et al. Characteristics of drought change in the loess plateau region of Shaanxi province from 1971 to 2010 based on standardized precipitation index [J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(5): 1560-1567.

[7] 刘晓云，李栋梁，王劲松. 1961－2009 年中国区域干旱状况的时空变化特征 [J]. 中国沙漠，2012，32(2)：473-483.
Liu X Y, Li D L, Wang J S. Temporal and spatial variation characteristics of regional drought conditions in China from 1961 to 2009 [J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(2): 473-483.

[8] 丁裕国，吴　息. 经验正交函数展开气象场收敛性的研究 [J]. 热带气象学报，1988，4(4)：316-326.
Ding Y G, Wu X. Research on the convergence of meteorological field by empirical orthogonal function [J]. Journal of Tropical Meteorology, 1988, 4(4): 316-326.

[9] 丁裕国. EOF 在大气科学研究中的新进展 [J]. 气象科技，1993(3)：10-19.
Ding Y G. New progress of EOF in atmospheric science research [J]. Meteorological Science and Technology, 1993(3): 10-19.

[10] 丁裕国. 气象场经验正交函数不同展开方案收敛性问题的探讨 [J]. 大气科学，1992，16(4)：436-443.
Ding Y G. Discussion on the convergence problem of different expansion schemes of orthogonal function of meteorological field [J]. Journal of Atmospheric Sciences, 1992, 16(4): 436-443.

[11] 徐瑞珍，张先恭. 经验正交函数在两个气象场相关分析中的应用 [J]. 气象学报，1982，40(1)：119-124.
Xu R Z, Zhang X G. Application of empirical orthogonal function in correlation analysis of two meteorological fields [J]. Acta Meteorologica Sinica, 1982, 40(1): 119-124.

[12] 刘婷婷，张　华. 主成分分析与经验正交函数分解的比较 [J]. 统计与决策，2011(16)：159-162.
Liu T T, Zhang H. Comparison of principal component analysis and empirical orthogonal function decomposition [J]. Statistics and Decision, 2011(16): 159-162.

[13] 万智巍，贾玉连，洪祎君，等. 基于 EEMD 和 EOF 的鄱阳湖流域近 550 a 来旱涝时空变化 [J]. 长江流域资源与环境，2018，27(4)：919-928.
Wan Z W, Jia Y L, Hong Y J, et al. Temporal and spatial variation of droughts and floods in the Poyang lake basin based on EEMD and EOF in the past 550 years [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(4): 919-928.

[14] 沈国强，郑海峰，雷振锋. 基于 SPEI 指数的 1961－2014 年东北地区气象干旱时空特征研究 [J]. 生态学报，2017，37(17)：5882-5893.
Shen G Q, Zheng H F, Lei Z F. Temporal and spatial characteristics of meteorological drought in Northeast China from 1961 to 2014 based on SPEI index [J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 37(17): 5882-5893.

[15] 王丹云，吕世华，韩　博，等. 近 30 年黄土高原春季降水特征与春旱变化的关系 [J]. 高原气象，2017，36(2)：395-406.
Wang D Y, Lü S H, Han B, et al. Relationship between spring precipitation characteristics and spring drought in the loess plateau in recent 30 years [J]. Plateau Meteorology, 2017, 36(2): 395-406.

[16] 张煦庭，潘学标，徐　琳，等. 基于降水蒸发指数的 1960－2015 年内蒙古干旱时空特征 [J]. 农业工程学报，2017，33(15)：190-199.
Zhang X T, Pan X B, Xu L, et al. Temporal and spatial characteristics of drought in Inner Mongolia from 1960 to 2015 based on precipitation evaporation index [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(15): 190-199.

[17] 王绍武，赵宗慈. 近五百年我国旱涝史料的分析 [J]. 地理学报，1979，34(4)：329-341.
Wang S W, Zhao Z C. Analysis of historical data of drought and flood in China in the past five hundred years [J]. Acta Geographica Sinica, 1979, 34(4): 329-341.

[18] 田　甜，黄　强，郭爱军，等. 基于标准化降水蒸散指数的渭河流域干旱演变特征分析 [J]. 水力发电学报，2016，35(2)：16-27.
Tian T, Huang Q, Guo A J, et al. Analysis of drought evolution characteristics of Weihe River Basin based on standardized precipitation evapotranspiration index [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(2): 16-27.

[19] Vicenteserrano S M, Beguería S, López moreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index [J]. Journal of Climate, 2010, 23(7): 1696-1718.

[20] 张玉静，王春乙，张继权. 基于 SPEI 指数的华北冬麦区干旱时空分布特征分析 [J]. 生态学报，2015，35(21)：7097-7107.
Zhang Y J, Wang C Y, Zhang J Q. Analysis of the spatial and temporal distribution characteristics of drought in winter

wheat area of North China based on SPEI index [J]. Chinese Journal of Ecology,2015,35(21):7097-7107.

[21] 高西宁,徐庆喆,丛俊霞,等. 基于标准化降水指数的辽宁省近54年干旱时空规律分析 [J]. 生态环境学报,2015,24(11):1851-1857.
Gao X N,Xu Q Z,Cong J X,et al. Analysis of drought time and space law in Liaoning province in recent 54 years based on standardized precipitation index [J]. Chinese Journal of Eco-Environment,2015,24(11):1851-1857.

[22] 赵嘉阳,王文辉,靳全锋,等. 基于EOF的福建省降水量时空变化特征分析 [J]. 重庆理工大学学报,2017,31(2):73-79.
Zhao J Y,Wang W H,Jin Q F,et al. Analysis of temporal and spatial variation characteristics of precipitation in Fujian province based on EOF [J]. Journal of Chongqing University of Technology,2017,31(2):73-79.

[23] 魏义长,王纪军,张 芳,等. 经验正交函数与地统计相结合分析降水时空变异 [J]. 灌溉排水学报,2010,29(4):105-109.
Wei Y C,Wang J J,Zhang F,et al. Analysis of spatiotemporal variation of precipitation by combining empirical orthogonal function with geostatistics [J]. Journal of Irrigation and Drainage,2010,29(4):105-109.

[24] 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.
Wei F Y. Modern climate statistical diagnosis and prediction technology [M]. Beijing:Meteorological Press,1999.

[25] 赵安周,朱秀芳,刘宪锋,等. 1965-2013年渭河流域降水时空变化分析 [J]. 自然资源学报,2015,30(11):1896-1909.
Zhao A Z,Zhu X F,Liu X F,et al. Analysis of temporal and spatial changes of precipitation in the Weihe River Basin from 1965 to 2013 [J]. Journal of Natural Resources,2015,30(11):1896-1909.

[26] 刘世伟,吴锦奎,张文春,等. 基于克里金插值估算区域降水量的抽样方法对比分析:以甘肃省为例 [J]. 冰川冻土,2015,37(3):650-657.
Liu S W,Wu J K,Zhang W C,et al. Comparative analysis of sampling methods for estimating regional precipitation based on Kriging interpolation:a case study of Gansu province [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2015,37(3):650-657.

[27] 王 英,曹明奎,陶 波,等. 全球气候变化背景下中国降水量空间格局的变化特征 [J]. 地理研究,2006,25(6):1031-1040.
Wang Y,Cao M K,Tao B,et al. Variation characteristics of spatial pattern of precipitation in China under the background of global climate change [J]. Geographical Research,2006,25(6):1031-1040.

(上接第145页)

[25] 王金武,唐 汉,王 奇,等. 基于EDEM软件的指夹式精量排种器排种性能数值模拟与试验 [J]. 农业工程学报,2015,31(21):43-50.
Wang J W,Tang H,Wang Q,et al. Numerical simulation and experiment on seeding performance of pickup finger precision seed-metering device based on EDEM [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2015,31(21):43-50.

[26] 王云霞,梁志杰,张东兴,等. 基于离散元的玉米种子颗粒模型种间接触参数标定 [J]. 农业工程学报,2016,32(22):36-42.
Wang Y X,Liang Z J,Zhang D X,et al. Calibration method of contact characteristic parameters for corn seeds based on EDEM [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2016,32(22):36-42.

[27] 汪博涛,白 璐,丁尚鹏,等. 外槽轮排肥器关键工作参数对排肥量影响的仿真与试验研究 [J]. 中国农机化学报,2017,38(10):1-6.
Wang B T,Bai L,Ding S P,et al. Simulation and experimental study on impact of fluted-roller fertilizer key parameters on fertilizer amount [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2017,38(10):1-6.