

# 山西省孝义市近40年气候变化特征分析

李环环, 卢玉东, 张天宇, 郑策

(长安大学旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西西安710054)

**摘要:** 为了深入研究山西省孝义市气候变化特征, 采用 Mann-Kendall 检验、滑动 T 检验及 Morlet 小波变换等方法对孝义市 1975-2015 年气候要素进行趋势估计、突变检验、周期分析及发展趋势预测。结果表明: 近 40 年来, 孝义市年平均气温呈显著上升趋势, 突变年份为 1996 年, 存在 32.9 a 长周期; 年降雨量呈不显著下降趋势, 突变年份为 1990 年, 存在 32.6 a 长周期; 年蒸发量呈显著性上升趋势, 突变年份为 1997 年, 存在 32.10 a 长周期; 年平均相对湿度呈显著下降趋势, 突变年份为 1982、2003 年, 存在 15.32 a 长周期。孝义市 1975-2015 年年代际气候经历了“冷湿-暖湿-暖干”的变化过程, 预测全境 2017-2030 年年代际气候将经历“冷湿-暖干”的变化过程。

**关键词:** 气候变化; 趋势估计; 突变检验; 周期分析; 趋势预测; 孝义市

中图分类号: P467 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2017)04-0035-05

## Analysis of characteristics of climate change in Xiaoyi City of Shanxi Province for recent 40 years

LI Huanhuan, LU Yudong, ZHANG Tianyu, ZHENG Ce

(Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** In order to study the characteristics and trend of climate change in Xiaoyi city of Shanxi province, this paper uses the Mann-Kendall test, the sliding T test and the Morlet wavelet transform to forecast the trend of climate elements in Xiaoyi city from 1975 to 2015, using the mutation test, cycle analysis and development trend prediction. Results are as follows: In the past 40 years, the average temperature had significantly upward trend and long period of 32 and 9 years while the mutation occurred in 1996. The precipitation had non-significant downward trend and long period of 32 and 6 years while the mutation occurred in 1990. The annual evaporation had significantly upward trend and long period of 32 and 10 years while the mutation occurred in 1997. The annual average relative humidity had significant downward and long period of 15 and 32 years while mutation occurred in 1982 and 2003. Climate changed from cool-humid to warm-humid to warm-dry from 1975 to 2015 and it is predicted that the climate would change from cool-humid to warm-dry from 2017 to 2030 in Xiaoyi city.

**Key words:** climate change; tendency estimation; mutation test; periodicity analysis; trend prediction; Xiaoyi city

## 1 研究背景

气候是指某一区域大气在较长时期内的一般物理特征,体现了该地区的冷暖干湿状况,其任何变化均会对自然生态系统、社会经济系统和人类生产生活产生深远的影响<sup>[1]</sup>。分析一个地区的气候变化特征及未来

发展趋势对当地社会经济发展具有重要指导意义。在全球气候变暖大背景下,我国气候变化具有明显的区域差异性,各地区气候响应各不相同。山西省地处黄河中游、黄土高原东部,属于大陆性季风气候,是全球气候敏感带之一。近年来,众多国内研究学者对山西省气候变化进行了分析,取得了重要的研究成果。王

收稿日期:2017-04-23; 修回日期:2017-05-18

基金项目:国家自然科学基金项目(41302253)

作者简介:李环环(1990-),女,河北沧州人,硕士研究生,研究方向为水文与水资源。

通讯作者:卢玉东(1969-),男,河北唐山人,博士,教授,博士生导师,研究方向为流域水资源信息系统。

孟本等<sup>[2]</sup>利用线性回归检验(LR)和 Mann-Kendall 检验对山西省 108 个地面气象观测站近 50 年的平均气温和降雨资料进行分析,得出山西地区气温和降雨在整体上分别呈显著升高和显著减少趋势。赵桂香等<sup>[3]</sup>通过对山西省近 46 年降雨和气温资料的 Morlet 小波分析得出 1957-2003 年山西地区气候经历了“冷湿-暖干”的变化过程。张丽花等<sup>[4]</sup>运用 Mann-Kendall 检验、EOF 等方法对近 52 年山西省气温变化特征进行了分析,结果表明,气温呈波动上升趋势且在 1994 年发生暖性气温突变。李芬等<sup>[5]</sup>运用线性倾向估计、均值分布等方法研究山西省降雨的变化特征得出了降雨呈下降趋势。冯志亮等<sup>[6]</sup>提出山西省吕梁市平均气温增温幅度高于全国,20 世纪 90 年代增温迅速。郝振荣等<sup>[7]</sup>采用蒸发量和降雨量的比值计算干燥度指数,提出山西地区气候存在暖干化趋势,应引起相关部门的足够重视。高文华等<sup>[8]</sup>利用 Mann-Kendall 检验法及小波分析对晋南地区气候变化特征进行了周期特征分析,分析表明气温和降雨量存在多尺度的周期变化。范晓辉<sup>[9]</sup>通过分析山西省 1959-2008 年的气候要素资料得出气温呈显著上升趋势,降雨量呈显著下降趋势。杨丁等<sup>[10]</sup>通过对山西省近 50 年的气候变化特征研究得出气候有向干暖化转化的趋势。张春林等<sup>[11]</sup>根据山西省 4 个气象站 50 年资料得出气候总体上具有暖干化特征,气温呈波动上升趋势,降雨量呈波动减少趋势。

孝义市位于山西省腹地偏西,吕梁山脉中段东麓,晋中盆地西南隅,是煤炭工业聚集地。对于孝义市气候变化特征的研究,以往侧重点都是对当地气候要素的线性趋势变化进行分析,很少研究其周期演变规律及未来发展趋势。因此,在对孝义市气候要素线性趋势分析的基础上,利用 Mann-Kendall 检验、小波分析等方法对气候要素进行突变检验、周期性分析并进一步预测未来发展趋势。这不仅为孝义市长期气候预测提供科学依据,还对采取有效措施应对气候变化具有重要意义。

## 2 研究区概况与分析方法

孝义市人口分布密集,总人口数达 46.88 万,面积约 948 km<sup>2</sup>。孝义市属暖温带大陆性半干旱半湿润气候,四季分明,春季受季风交替影响,风大雨少;夏季受太平洋副热带高压影响,多雨炎热;秋季受冷高压侵入,温湿多雨;冬季受西伯利亚冷高压控制,寒冷少雪。

选用山西省孝义市 1975-2015 年气温、降雨、蒸发、相对湿度数据为基础资料,所选数据连续且完

整。利用线性趋势分析方法<sup>[12]</sup>求得气候要素线性倾向率并检验变化趋势是否显著,进一步利用 10a 滑动平均法辅助分析气候长期变化趋势,再通过累积距平法和 Mann-Kendall 检验法<sup>[13]</sup>对气候要素进行突变检验并结合滑动 T 检验<sup>[14]</sup>来验证突变点真伪,最后采用 Morlet 小波变换<sup>[15]</sup>分析气候要素的周期演变过程及未来发展趋势。

## 3 气候要素趋势分析

孝义市气候要素变化曲线如图 1 所示,各要素变化趋势显著性检验如表 1 所示。气温月际变化较大,1 月最低,平均气温为 -5.6℃,极端低温达到 -22.9℃;7 月最高,平均气温为 23.7℃,极端高温达到 39.5℃。该市气温年际变化较大,多年平均气温为 10.83℃,最低平均气温为 1984 年的 9.45℃,最高平均气温为 1999 年的 12.26℃。统计分析 1975-2010 年逐年气温资料,结果如图 1(a)所示。由气温距平曲线可知,平均气温线性倾向率为 +0.055℃/10a 且通过 0.01 显著性水平检验(见表 1),所以 1975-2010 年平均气温呈显著上升趋势。由 10a 滑动平均曲线进一步发现,平均气温在整个阶段内持续波动上升,由 1975 年的 10.4℃ 升温到 2010 年的 11.6℃,与全球气候变暖趋势一致。

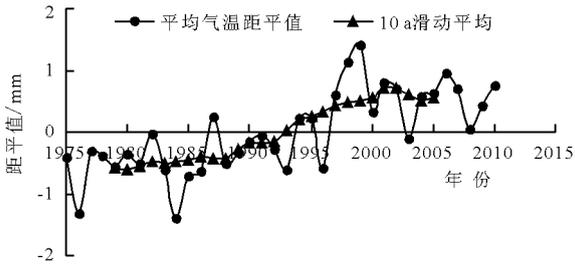
统计分析 1975-2010 年逐年降雨量资料,结果如图 1(b)所示。孝义市多年平均降雨量为 460.7 mm,最小年降雨量为 278.6 mm(1977 年),最大年降雨量为 718.0 mm(1988 年)。由降雨量距平曲线可知,年降雨量线性倾向率为 -1.720 mm/10a,但未通过 0.05 显著性水平检验(见表 1),所以 1975-2010 年年降雨量线性变化趋势不显著。由 10a 滑动平均曲线进一步发现,年降雨量变化可以划分为短暂减少-短暂增加-长期减少-长期增加 4 个阶段:(1)1975-1980 年为短暂减少阶段,年降雨量由 1975 年的 564.0 mm 减少到 1980 年的 331.0 mm;(2)1980-1985 年为短暂增加阶段,由 1980 年的 331.0 mm 增加到 1985 年的 671.8 mm;(3)1985-1999 年为持续减少阶段,由 1985 年的 671.8 mm 减少到 1999 年的 291.9 mm;(4)1999-2015 年为持续增加阶段,由 1999 年的 291.9 mm 增加到 2015 年的 407.9 mm。

统计分析 1975-2013 年逐年蒸发量资料,结果如图 1(c)所示。孝义市多年平均蒸发量为 1866.9 mm,最小年蒸发量为 1486.7 mm(2003 年),最大年蒸发量为 2191.7 mm(2008 年)。由蒸发量距平曲

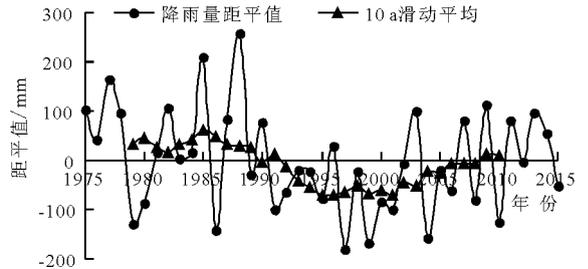
线可知,年蒸发量线性倾向率为 $+5.866 \text{ mm}/10\text{a}$ 且通过 $0.05$ 显著性水平检验(见表1),所以1975–2013年年蒸发量呈显著上升趋势。由 $10\text{a}$ 滑动平均曲线进一步发现,1984年蒸发量短暂下降至波谷,由 $1691.3 \text{ mm}$ (1975年)下降至 $1543.4 \text{ mm}$ (1984年),此后长期波动上升,由 $1543.4 \text{ mm}$ (1984年)上升至 $1858.5 \text{ mm}$ (2013年)。

统计分析1975–2015年逐年相对湿度资料,结果如图1(d)所示。孝义市多年平均相对湿度为

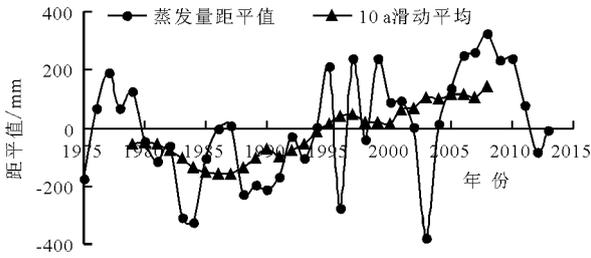
$56.3\%$ ,最低年平均相对湿度为 $51.2\%$ (2003年),最高年平均相对湿度为 $64.4\%$ (2013年)。由平均相对湿度距平曲线可知,年平均相对湿度线性倾向率为 $-0.120\%/10\text{a}$ 且通过 $0.01$ 显著性水平检验(见表1),所以1975–2015年平均相对湿度呈显著下降趋势。由 $10\text{a}$ 滑动平均曲线进一步发现,年平均相对湿度波动较大。1980年平均相对湿度短暂降至波谷,此后短暂回升至1985年,1985–1990年基本保持稳定不变,1990年后持续波动下降。



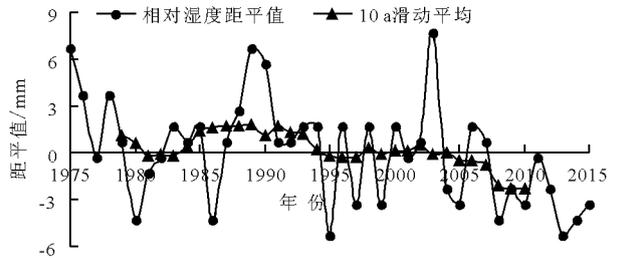
(a) 1975–2010年年平均气温曲线



(b) 1975–2015年年降雨曲线



(c) 1975–2013年年蒸发曲线



(d) 1975–2015年年平均相对湿度曲线

图1 孝义市1975–2015年气候要素变化曲线

表1 气候要素线性趋势显著性检验

气候要素	倾向率/ ( $\text{mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ )	R 值	P 值
平均气温	0.055	0.731**	0
降雨量	-1.720	-0.198	0.215
蒸发量	5.866	0.365*	0.022
平均相对湿度	-0.120	-0.430**	0.005

注: \*、\*\*、\*\*\* 分别表示通过 $0.05$ 、 $0.01$ 、 $0.001$ 显著性水平检验。

综合分析图1中各气候要素 $10\text{a}$ 滑动平均曲线得出,20世纪70年代后期到80年代末孝义市气温偏低,降雨偏多,蒸发偏少,相对湿度偏高,为“冷湿”气候型;90年代气温偏高,降雨偏少,蒸发偏少,降雨偏少幅度大于蒸发偏少幅度,相对湿度偏高,为“暖湿”气候型;21世纪10年代中期气温偏高,降雨偏少,蒸发偏多,相对湿度偏低,为“暖干”气候型。综合分析得出孝义市1975–2015年年代际气候经历了“冷湿–暖湿–暖干”的变化过程。

## 4 气候要素突变分析

运用累积距平法、Mann–Kendall检验和滑动T检验法对孝义市1975–2010年年平均气温进行突变性检验,采用 $0.05$ 显著性检验值,结果如图2所示。由图2(a)年平均气温累积距平曲线可知,1975–1996年曲线呈下降趋势,负距平占优势,1996年降至最低 $-8.9^\circ\text{C}$ ;1996年后曲线呈上升趋势,正距平占主导地位,2010年升至最高 $0.1^\circ\text{C}$ 。1996年绝对值最大,经累积距平曲线检验,1996年为年平均气温暖性突变年份。由图2(b)Mann–Kendall检验曲线可知, $UF$ 与 $UB$ 曲线在1996年存在交点, $UF$ 曲线大于0且超过 $0.05$ 显著性水平,经Mann–Kendall检验1996年为年平均气温暖性突变年份。由图2(c)滑动T检验曲线可知,1983、1996年为年平均气温突变年份。3种突变诊断方法交叉验证有利于提高检测结果的精度,综合3种突变检验结果得出1996年为孝义市1975–2010年年平均气温暖性

突变年份。

利用以上3种检验方法分析孝义市其他气候要素突变年份,检验结果如表2所示。1990年为年降

雨量的减少突变年份,1997年为蒸发量的增加突变年份,1982年和2003年分别为平均相对湿度的上升及下降突变年份。

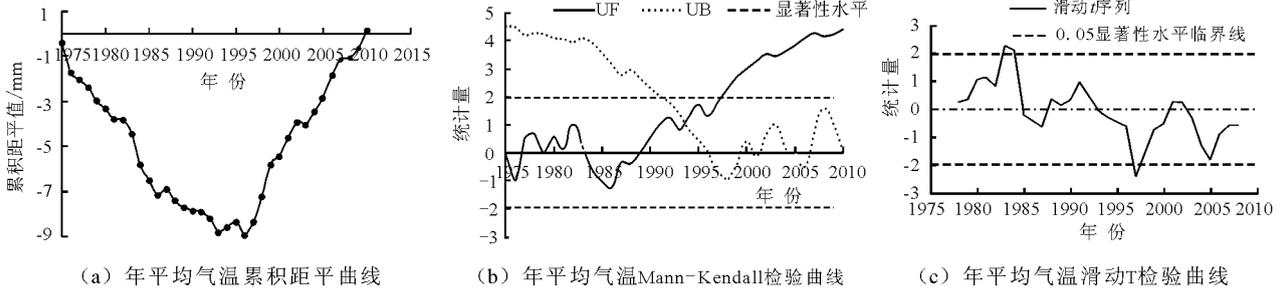


图2 孝义市1975-2010年年平均气温突变检验曲线

表2 3种检验方法突变年份汇总

检验方法	年降雨量突变年份	年蒸发量突变年份	年平均相对湿度突变年份
累积距平曲线	1990年	1997年	2003年
Mann-Kendall曲线	1976、1978、2012年	1997年	1977、1982、2003年
滑动T检验	1990年	1980、1989、1992年	1982年

## 5 气候要素周期演变过程

小波分析法对处理非平稳水文时间序列具有独特的优点,能从时、频域上准确揭示序列细微的变化特征<sup>[16]</sup>。本文选用 Morlet 小波变换来分析气候要素的周期演变过程,结果如图3所示。由图3(a)年平均气温小波系数等值线可知,年平均气温周期演变过程存在2~4、5~12及20~40 a的3个时间尺度。其中,20~40 a时间尺度出现了1次全域性丰枯交替变化,1975-1993年为平均气温下降期,震荡中心为1985年。1993-2010年为平均气温上升期,震荡中心为2001年。在2010年正相位等值线完全闭合,未来可能会出现平均气温持续下降的状况;5~12 a时间尺度出现了4次全域性丰枯交替变化;2~4 a时间尺度虽然有丰枯交替变化,但表现较零乱。由图3(b)平均气温小波方差图可知,32 a为平均气温的第一主周期,第二、三主周期对应着

9、3 a,但第三主周期交替变化零乱,周期变化规律不明显。所以第一、二主周期控制着孝义市1975-2010年平均气温周期演变过程。

利用小波方差检验绘制年平均气温的第一、二主周期趋势图如图3(c)。由图3(c)可知,根据32 a主周期曲线可以预测出孝义市2017-2024年将处于平均气温下降期,2025-2030年将处于平均气温上升期;根据9 a主周期曲线预测孝义市2017-2020、2026-2030年将处于平均气温上升期,2021-2025年将处于平均气温下降期。第一、二主周期预测趋势基本一致且第一主周期的震荡强度远远高于第二主周期,所以孝义市2017-2024年将处于平均气温下降期,2025-2030年将处于平均气温上升期。

其他气候要素周期演变过程分析结果如表3所示。根据气候要素的趋势预测可以大致推测出孝义市2017-2030年气候类型变化趋势。分析得出,21世纪10年代中期到20年代中期气温偏低,降雨偏多,蒸发

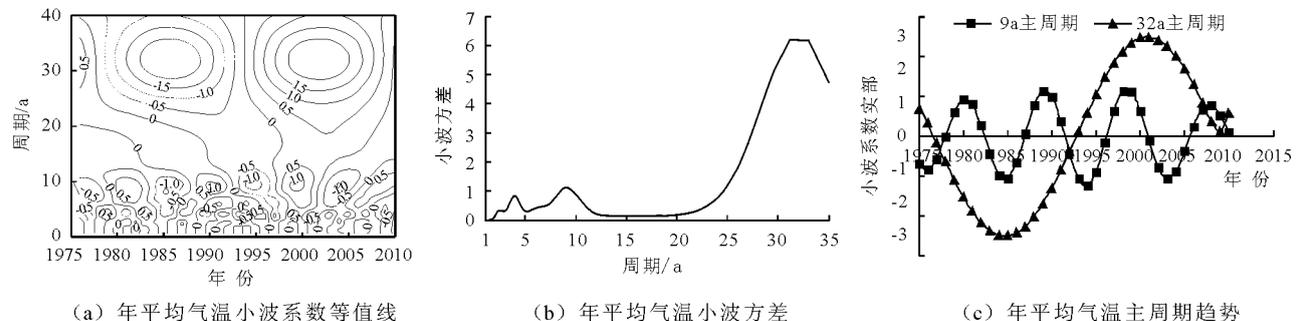


图3 气候要素小波分析曲线

表3 气候要素演变时间尺度、主周期及趋势预测表

	降雨量	蒸发量	平均相对湿度
不同时间尺度演变过程	25~40 a, 1次丰枯交替变化; 4~8 a, 6次丰枯交替变化; 2~6 a, 丰枯交替变化表现零乱	25~40 a, 1次丰枯交替变化; 6~12 a, 4次丰枯交替变化; 2~5 a, 丰枯交替变化表现零乱	25~40 a, 1次丰枯交替变化; 10~20 a, 3次丰枯交替变化; 2~8 a, 丰枯交替变化表现零乱
主周期	主周期为32、6, 32 a主周期震荡强度远远大于6 a主周期	主周期为32、10, 32 a主周期震荡强度远远大于10 a主周期	主周期为15、32, 15 a主周期震荡强度远远大于32 a主周期
趋势预测	2017-2022年增加、2023-2030年减少	2017-2028年减少、2029-2030年增加	2017-2023年增加、2024-2030年降低

偏少,相对湿度偏高,为“冷湿”气候型;20年代末期,气温偏高,降雨偏少,蒸发偏多,相对湿度偏低,为“暖干”气候型。综合预测孝义市全境2017-2030年年代际气候将经历“冷湿-暖干”的变化过程。

## 6 结论

(1)孝义市近40年年平均气温线性倾向率为 $+0.055^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 且上升趋势显著;年降雨量线性倾向率为 $-1.720\text{mm}/10\text{a}$ ,但未通过0.05显著性水平检验;年蒸发量线性倾向率为 $+5.866\text{mm}/10\text{a}$ 且上升趋势显著;年平均相对湿度线性倾向率为 $-0.120\%/10\text{a}$ 且下降趋势显著。

(2)1996年为孝义市年平均气温的暖性突变年份;1990年为年降雨量的减少突变年份;1997年为年蒸发量的增加突变年份;平均相对湿度的上升及下降突变年份分别为1982、2003年。

(3)年平均气温存在32、9 a长周期,预测孝义市2017-2024年将处于气温下降期,2025-2030年将处于气温上升期。年降雨量存在32、6 a长周期,预测2017-2022年降雨增加、2023-2030年降雨减少;年蒸发量存在32、10 a长周期,预测2017-2028年蒸发减少、2029-2030年蒸发增加;年平均相对湿度存在15、32 a长周期,预测2017-2023年平均相对湿度增加、2024-2030年平均相对湿度降低。

(4)孝义市1975-2015年年代际气候经历了“冷湿-暖湿-暖干”的变化过程,预测全境2017-2030年年代际气候将经历“冷湿-暖干”的变化过程。

### 参考文献:

[1] 张强,王润元,邓振镛,等.中国西北干旱气候变化对农业与生态影响及对策[M].北京:气象出版社,2012:1-28.  
 [2] 王孟本,范晓辉.山西省近50年气温和降水变化基本特征研究[J].山西大学学报(自然科学版),2009,32(4):640-648.

[3] 赵桂香,赵彩萍,李新生,等.山西省气候变化的多尺度诊断[J].干旱区研究,2007,24(2):240-246.  
 [4] 张丽花,延军平,陈利民.近52a山西气温变化特征[J].干旱区研究,2014,31(6):1068-1072.  
 [5] 李芬,张建新,张荣.1958-2013年山西降水时空分布[J].中国沙漠,2015,35(5):1301-1311.  
 [6] 冯志亮,何发旺,李成旺,等.气候变暖对吕梁农业的影响[J].科技情报开发与经济,2007,17(14):174-175.  
 [7] 郝振荣,郭伟,贺洁颖,等.山西省近50年地表干燥度变化趋势分析[J].干旱地区农业研究,2014,32(6):244-249.  
 [8] 高文华,李忠勤,张明军,等.山西晋南地区近56a的气候变化特征、突变与周期分析[J].干旱区资源与环境,2011,25(7):124-127.  
 [9] 范晓辉.山西省近50年气候变化特征研究[D].太原:山西大学,2012.  
 [10] 杨丁,方风满,任健美.山西省近50年气候变化特征分析[J].资源开发与市场,2008,24(1):60-62.  
 [11] 张春林,赵景波,牛俊杰.山西黄土高原近50年来气候暖干化研究[J].干旱区资源与环境,2008,22(2):70-74.  
 [12] 宋小园,朱仲元,张圣微,等.锡林河流域气候变化特征诊断分析[J].干旱区资源与环境,2016,30(4):151-158.  
 [13] 杨金艳,赵超,刘光生,等.基于Mann-Kendall和R/S法的水文序列变化趋势分析——以苏州市为例[J].水利水电技术,2017,48(2):27-30+137.  
 [14] 范琳琳,王红瑞,宋乃琦,等.基于T检验的水文时间序列HHT分析方法及应用[J].系统工程理论与实践,2015,36(5):1324-1331.  
 [15] 姬志怀,严胜刚.改进的Morlet小波及其变换[J].计算机工程与应用,2016,52(14):12-18+49.  
 [16] 王文圣,丁晶,李跃清.水文小波分析[M].北京:化学工业出版社,2005:115-141.  
 [17] 牛建龙,彭杰,王家强,等.新疆阿拉尔地区近53年气候变化特征分析[J].干旱区资源与环境,2016,30(1):72-77.  
 [18] 梁晓燕,王乃昂,李卓仑,等.腾格里沙漠周边地区1960-2012年气候变化特征[J].中国沙漠,2016,36(2):474-482.