

# 基于时间序列的海流兔河流域降水量模拟预测分析

周生辉<sup>1</sup>, 刘廷玺<sup>1,2</sup>, 段利民<sup>1,2</sup>, 张文瑞<sup>1</sup>, 冀如<sup>1</sup>, 孙龙<sup>1</sup>

(1.内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018;

2.内蒙古自治区水资源保护与利用重点实验室, 呼和浩特 010018)

**摘 要:**基于 1959—2019 年海流兔河流域周边的鄂托克旗站、横山站和榆林站的降水量资料,采用小波分析、DEM 分析, holt-winters 模型讨论了该区域的降水量周期变化特征及未来趋势预测,并通过泰森多边形法加权,对海流兔河流域的降水量进行了模拟预测分析,明晰了以流域为单位的降水量变化规律及未来降水量演变趋势。结果表明:夏秋季降水集中的海流兔河流域在 1959—2019 年的 61 年期间内,干湿周期变化以 6 年和 12 年为主,其中未来 2~3 a 的短期降水量展望呈下降趋势,未来 6~12 a 以上的长期降水量趋势呈显著增加态势;通过 holt-winters 模型预测了未来 12 a 的降水量变化趋势,其预测值的平均相对误差为 22.28%,预测多年平均降水量为 491.6mm,流域整体降水量预测值呈波动上升态势。该研究可为以流域为单位的水土保持及煤水协调水文模拟提供降水方面的指导。

**关键词:**降水量分析;小波分析;DEM 分析;holt-winters 模型;海流兔河流域

**中图分类号:**P426.61<sup>+</sup>4

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2021)05-0088-07

## Simulation and Prediction of Precipitation in Hailiutu River Basin Based on Time Series

ZHOU Shenghui<sup>1</sup>, LIU Tingxi<sup>1,2</sup>, DUAN Limin<sup>1,2</sup>, ZHANG Wenrui<sup>1</sup>, JI Ru<sup>1</sup>, SUN Long<sup>1</sup>

(1. Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Inner Mongolia Key Laboratory of Water Resource Protection and Utilization, Hohhot 010018, China)

**Abstract:** Based on the precipitation data of Etuoke Banner Station, Hengshan Station and Yulin Station around Hailiutu River Basin from 1959 to 2019, wavelet analysis, DEM analysis, and Holt-Winters model were used to discuss the periodic changes of precipitation in this region and the future trend of prediction. The precipitation in the Hailiutu River Basin was simulated and predicted by using Thiessen polygon weight method. The variation law of precipitation and the trend of precipitation evolution in the future were clarified. The results show that the wet and dry cycles were mainly 6 years and 12 years during the 61 years period from 1959 to 2019 in the Hailiutu River Basin where summer and autumn precipitation were concentrated; the short-term precipitation in the next 2~3 years shows a downward trend, while the long-term precipitation in the next 6~12 years or more shows the significant increase trend. The Holt-Winters model was used to predict the change trend of precipitation in the next 12 years. The average relative error of the predicted value is 22.28%, and the average annual precipitation is 491.6 mm. The overall predicted value of precipitation in the basin shows a fluctuating upward trend. This study can provide guidance for soil and water conservation and hydrological simulation of coal-water coordination on a watershed basis.

**Keywords:** precipitation analysis; wavelet analysis; DEM analysis; Holt-Winters model; Hailiutu River Basin

大气降水是水文循环的重要组成部分,是流域水资源的主要来源,近年来,随着全球气候变暖日趋明显、极端气候事件频发,探究区域的降水循环规律成

为了国内外研究的热点<sup>[1-8]</sup>。降水量作为水文循环的重要驱动因子,直观地反映了区域水资源的丰富程度,对区域水资源的量化及生态政策的制定至关重

收稿日期:2020-09-14

修回日期:2020-10-26

资助项目:国家重点研发计划(2018YFC0406400);教育部创新团队发展计划(IRT-17R60);科技部重点领域科技创新团队(2015RA4013);内蒙古自治区草原英才产业创新创业人才团队;内蒙古农业大学寒旱区水资源利用创新团队(NDTD2010-6)

第一作者:周生辉(1996—),男,甘肃武威人,硕士研究生,主要从事水文地质及水文循环方面的研究。E-mail:3035452884@qq.com

通信作者:刘廷玺(1966—),男,内蒙古赤峰人,教授,博导,博士,主要从事干旱区生态水文方面的研究。E-mail:txliu1966@163.com

要,因此研究区域降水量的变化规律和未来趋势具有现实意义。近年来,黄生志等<sup>[9-10]</sup>利用降水量与径流的演变规律对渭河流域和哥伦比亚河流域未来干旱趋势进行了预测分析,得到了具有数理统计意义的流域干湿特征规律。吴昊等<sup>[11]</sup>研究了陕西省14个气象站的年、季降水量变化趋势,结果发现渭河流域和黄土高原北部地区年降水量呈明显下降趋势。袁定波等<sup>[12]</sup>在泰森多边形雨量法的基础上研究了地理空间要素对降雨空间分布的影响,得到了雅砻江流域不同时间尺度的降雨量变化趋势。韩知明等<sup>[13]</sup>利用小波分析对呼伦湖流域的降水序列进行了变化特征分析,揭示了该流域的降水变化主周期并对未来降水量的枯丰趋势进行了预测。总之,众多学者利用各种方法对大尺度区域降水量的规律进行了分析预测,而对于降水数据较少且需要重点关注的中小流域,相关研究却并不常见。因此本文以毛乌素沙地中人类活动较为剧烈的海流兔河流域为研究对象,通过气象站资料进行降水变化的周期分析和趋势预测,为该区域以流域为单元的煤水协调开发提供气候指导。

毛乌素沙地是中国四大沙地之一,经过多年的风沙治理及水土保持工作,其生态环境有了大幅改善,但近年来随着域内农田开垦和煤炭资源开发,水资源平衡被重新调配,生态环境问题仍旧十分突出<sup>[14-19]</sup>。作为毛乌素沙地环境敏感区和未来蒙陕能源开发中心区的海流兔河流域受到了多方学者的关注,但基于该流域的降水量变化研究尚不多见<sup>[20-22]</sup>。本文收集流域周边气象站点的降水量资料,采用 Morlet 小波分析、集合经验态分解(EMD)、holt-winters 模型对数据进行时间序列分析,最后利用泰森多边形法加权以流域为整体单元,系统研究其多年降水的周期特征、变化规律以及未来降水趋势的模拟预测,丰富海流兔河流域的降水研究成果。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区概况及数据来源

海流兔河流域位于陕蒙交界地区,地跨陕西省榆林市榆阳区、内蒙古自治区鄂尔多斯市乌审旗两个县市,处于毛乌素沙地边缘与黄土高原接壤区。流域北起乌审旗乌兰乌都,南至榆阳区王圪堵水库,西起乌审旗木胡滩,东至榆阳区大海则,流域面积约 2 600 km<sup>2</sup>,属于典型的干旱、半干旱沙地和滩地相间分布的草原气候环境,为温带大陆性季风气候,大气降水是域内主要的水资源补给项。区内多年降水量为 370 mm,多年平均蒸发量为 2 000 mm,降水多集中在 7—9 月份,风向以西北风为主。

本文所用的降水气象资料来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),根据数据的完整性及可靠性,选取了海流兔河流域周边最近的鄂托克旗站、榆林站、横山站为研究对象,截取 1959—2019 年的逐月降水量同期数据,然后通过中国气象数据网 1961—2019 年的 0.5×0.5 降水格点月数据集对 3 个站点的数据进行了对比检验。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 泰森多边形法** 各气象站测得的降水量值只能代表点雨量,流域上的降水量值估算需要大量的气象站通过面积加权进行计算。泰森多边形法是将流域的所有雨量站之间连接直线,尽可能组成锐角三角形,对每个三角形求重心,利用得到的重心和三角形的边垂直平分线将流域划分成若干子区域,用每个子区域的雨量站代表降水量,加权面积后得到流域的平均降水量值<sup>[23]</sup>。具体计算过程如下:

$$\bar{P} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n P_i A_i = \sum_{i=1}^n P_i \frac{A_i}{A} = \sum_{i=1}^n P_i \alpha_i$$

式中: $A_i$ 为第*i*个子区域的面积; $\alpha_i$ 为第*i*个雨量站的面积权重; $P_i$ 为第*i*个子雨量站的降水量; $n$ 为雨量站数目。

**1.2.2 Morlet 小波分析** 小波分析在时域和频域两个方面都具有良好的局部化功能,能揭示时间序列的多尺度变化特征,识别不同时间尺度的主要变化周期<sup>[24]</sup>。小波分析不仅能够反映降水序列的局部变化特征,而且小波变换的结果可以显示出气候序列变化的尺度,以及显示出序列变化的时间位置,能清晰地揭示出隐藏在时间序列中的多种变化周期,反映系统在不同时间尺度中的变化趋势以估计未来的系统趋势<sup>[25-26]</sup>。Morlet 小波定义如下:

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{\mathbb{R}} f(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$$

$$\Psi(t') = \frac{1}{\sqrt{a}} e^{i c t' - \frac{t'^2}{2}}$$

式中: $W_f(a, b)$ 为小波系数; $a > 0$ 为尺度参数; $b$ 为时间位置参数; $\Psi(t')$ 为 Morlet 小波函数; $t = \frac{t-b}{a}$ ;  $i$ 为虚部; $c$ 为常数。

小波方差的计算公式为:

$$\text{var}(a) = \sum [W_f(a, b)]^2$$

**1.2.3 EMD 经验模态分解** EMD 经验模态分解可对一个时间信号将其不同尺度即频率的波动或趋势逐级分解开来,产生一系列具有不同特征尺度的数据序列,称为本征模函数(Intrinsic Mode Function,

IMF),它是目前处理非平稳、非线性信号,特别是分析时间序列趋势的最好方法<sup>[27-28]</sup>,IMF 分量可以反映出降水量序列中不同特征尺度的振荡。其主要的计算原理如下:

(1) 提取原始时间序列  $X(t)$  中的极大值与极小值点,使用三次样条插值函数对序列的上包络线序列值  $X_{\max(t)}$  及下包络线序列值  $X_{\min(t)}$  进行拟合,

(2) 计算上、下包络线的均值  $m(t)$ :

$$m(t)=\frac{X_{\max(t)}+X_{\min(t)}}{2}$$

(3) 使用原始数据序列  $X(t)$  减去(1) 中包络线的均值得到一个新的序列  $I_1(t)$ :

$$I_1(t)=X(t)-m(t)$$

(4) 若所得新序列  $I_1(t)$  满足两个条件:极值点与过零点数目相等或相差一个,包络线的均值为 0,则  $I_1(t)$  为固有模态函数(IMF)。

(5) 用原始序列减去第一个固有模态函数  $I_1(t)$ ,得到剩余序列  $r_1(t)$ : $r_1(t)=X(t)-I_1(t)$ ,将  $r_1(t)$  作为新的原始序列,按照以上步骤,依次提取  $I_2(t)$ ,  $I_3(t)$ ,  $I_4(t)$ ,  $\cdots$ ,  $I_n(t)$ ,直到  $r_n(t)$  为一个单调序列。把分解后的各分量叠加,就得到原序列  $X(t)$ :

$$X(t)=\sum_{i=1}^n I_i(t)+r_n(t)$$

EMD 方法在筛分过程中体现出了强大的直接性及自适应性,可根据实际序列的数理特征自主形成特殊的基函数,每一个分离出来的 IMF 都具有一定的物理意义,都是对原始序列物理信息的真实反映<sup>[29]</sup>。

1.2.4 Holt-Winters 模型 对于未来发生的事情,最新观察值较早期观察值包含更多的信息,因而在预测时,最新观测值较早期观察值具有更大的权重,Holt-Winters 模型具有周期性特征,可对时间序列进

行短期模拟预测<sup>[30]</sup>。Holt-Winters 模型本质上是一种高级指数平滑形式模型,具有周期调整与长期趋势调整特性,能对兼有长期趋势和季节模式的数据进行预测<sup>[31-33]</sup>。本文利用的 Holt-Winters 乘性模型的基本原理方程如下:

$$S_t=\alpha \frac{X_t}{I_{t-L}}+(1-\alpha)(S_{t-1}+b_{t-1})$$

$$I_t=\beta \frac{X_t}{S_t}+(1-\beta)I_{t-L}$$

$$b_t=\gamma(S_t-S_{t-1})+(1-\gamma)b_{t-1}$$

Holt-Winters 模型预测值计算为:

$$y_{t+s}=(S_t+b_tk)I_{t+k-L}。$$

式中: $S_t$  为平滑值即水平分量; $\alpha$  为水平权重; $b_t$  为长期趋势值; $\gamma$  为趋势权重; $I_t$  为季节分量; $\beta$  为季节权重; $L$  为季节长度(每年的月数或季数); $t$  为当前时间; $X_t$  为实际观测值; $y_{t+s}$  为预测值; $k$  为预测超前期数;其中的  $\gamma, \alpha, \beta$  范围为  $0 \sim 1$ 。

Holt-Winters 乘性模型中的  $\gamma, \alpha, \beta$  取值依赖于已知时间序列的性质,通常为  $0.1 \sim 0.3$  的数值并产生一个依赖于大量过去观测资料的预测<sup>[34]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 降水量年内特征分析

海流兔河流域北侧的鄂托克旗站距流域约 65 km,1959—2019 年平均降水量为 274 mm;流域南侧的横山站距流域约 12 km,1959—2019 年平均降水量为 383 mm;流域东侧的榆林站距流域约 38 km,1959—2019 年平均降水量为 420 mm,流域从北向南,从西向东降水量逐渐增大。三站 61 a 线性降水量趋势均呈上升状态,气象站记录的降水量越大,则线性上升趋势越明显(图 1)。

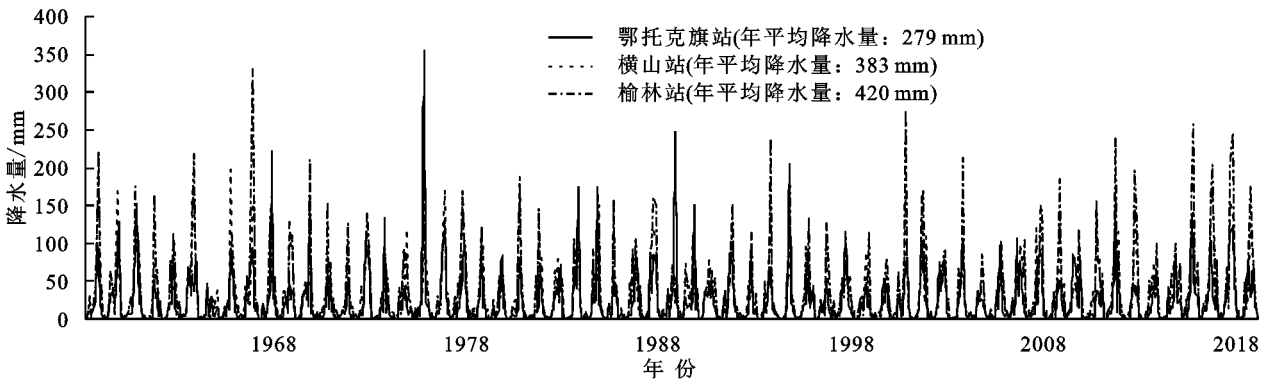


图 1 气象站 1959—2019 年逐月降水量变化

通过分析三站 61 a 的月平均降水量可以发现(图 2),海流兔河流域多年平均月降水量呈明显的单峰型,年内降水主要集中在 7—9 月份,分别占年均降水量的 64.16%(鄂托克旗站),61.19%(横山站)和

64.21%(榆林站),基本占全年一半以上,具体表现为春冬枯,夏秋丰的降水时间分布格局。三站年内降水分布基本类似,降水峰值都集中在 8 月份,其中鄂托克旗站 5 月份降水趋势明显增大,其他站点 5 月降水



趋势相对稳定,直到进入 7 月份,三站降水趋势显著增大,流域进入汛期。海流兔河流域降水在年内分布

集中,使年际间降水特征区分明显,将有助于年际降水规律的分析。

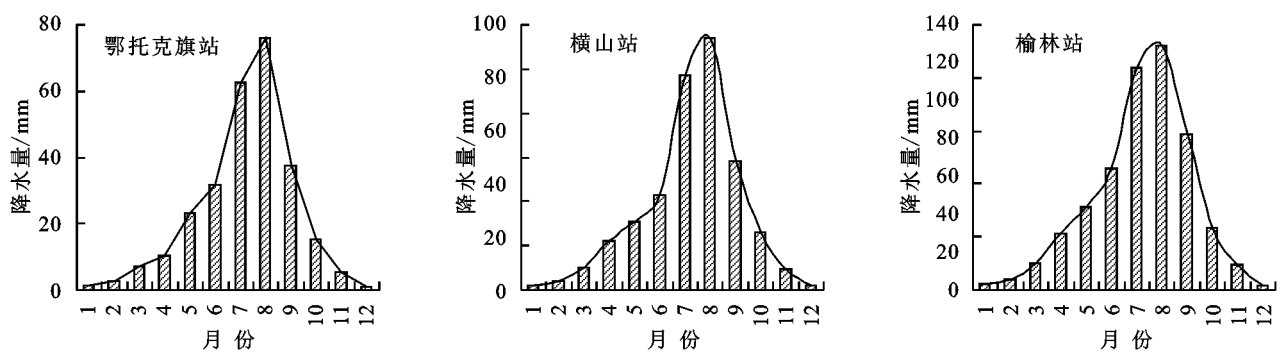


图 2 气象站 1959—2019 年月平均降水量

## 2.2 降水量年际特征分析

本文利用 Morlet 小波分析以 16 a 为时间尺度对 3 个气象站 1959—2019 年的年降水量进行了周期分析(图 3)。鄂托克旗站的显著性周期比横山站和榆林站明显,而横山站与榆林站的差异性比较一致。鄂托克旗站在 5~6 a 的时间尺度和 11~12 a 的时间尺度信号能量变化较为强烈,干湿变化明显;在 5~6 a 的尺度下共有 8 次干湿交替,2019 年后的交替循环还未结束,表明该站未来的降水量是呈增加状态的;在 11~12 a 的尺度下共有 4 次干湿交替,2019 年后的交替循环还未闭合,大时间尺度上显示该站还处于降水量少的区间内。榆林站和横山站的小波实部和小波方差图基本类似,干湿尺度在 16 a 以下的时间尺度上不甚明显,在 6~7 a 的尺度下,主要发生在 1959—1983 年和 1998—2019 年度,其余信号能量变化较弱;在 16 a 以上的尺度下,横山站和榆林站的干湿交替循环还未闭合,大时间尺度下这两站未来还处在降水量少的时期内。

通过经验模态分解法(EMD),对 3 个气象站 61 a 的年降水量序列进行了分解,为了保证降水量信息的信号强度,均得到了方差贡献率最大的 3 个 IMF 分量和 1 个趋势分量(RES),各分量表示的是不同时间尺度下的震荡周期(表 1)。鄂托克旗站 IMF1 分量的波动周期为 3~6 a,1977 年前的波动幅度较大,1978—1982 年波动幅度较小,1983—2019 年波动幅度总体稳定,2019 年之后未来 2 a 的降水趋势是短幅下降后上升;IMF2 分量的波动周期为 7~12 a,1988 年前的波动幅度较为明显,1989—2015 年波动幅度衰弱,2016—2019 年波动幅度略有增大,2019 年之后几年的降水趋势呈明显下降状态;IMF3 分量的波动周期为 30 a 左右,2019 年后的波动幅度大于前期水平,未来多年的降水量值将维持在 2019 年水平左右;RSE 趋势分量从 20 世纪 60 年代,降水量幅度处于

历史高位,未来该站降水整体仍将处于同位水平。横山站 IMF1 分量的波动周期为 3~7 a,1968 年前的波动幅度较大,1969—2000 年波动幅度逐渐衰弱,波动周期较短,2010—2019 年振幅增大,波动周期较长,2019 年之后的 2~3 a 的降水趋势将会是短幅下降后上升;IMF2 分量的波动周期为 4~15 a,1988 年前波动幅度明显,1989—2000 年波动幅度衰弱,2001 年后波动周期增大,2019 年之后的几年将在高降水量持续一段时间后开始下降;IMF3 分量的波动周期为 35 a 左右,1978—1988 年处于波峰,1998—2008 年处于波谷,2018 年后期开始进入波峰时期,预计未来多年的降水量呈增长状态;RSE 趋势分量在 1988 年处于波谷最低点,预计 2019 年之后该站的降水整体将处于高位。榆林站 IMF1 分量的波动周期为 3~6 a,1968 年前的波动幅度较大,1969—2001 年波动幅度减弱,波动周期较短,2002 年后波动幅度平稳,波动周期增加 2 a 左右,2019 年后的 2~3 a 的降水趋势也将是在短幅度下降后上升;IMF2 分量的波动周期为 5~10 a,1975 年前的波动幅度具有一致性,1978—1988 年波动幅度明显,1989—1998 年和 2006—2014 年期间波动幅度衰弱,2015 年后的波动幅度明显增强,2019 年之后几年间的降水趋势将在短幅下降后上升;IMF3 分量的波动周期为 15~20 a,1988 年之前的波动幅度具有一致性,1989 年之后波动衰弱,一直下降至 2008 年、2009 年后振幅明显增大,2016 年达到波峰后开始下降,预计未来多年的降水量将处于下降状态;RSE 趋势分量同横山站类似,预计 2019 年之后该站的降水整体也是处于高位。

以上 3 个气象站的降水序列震荡周期表明,各站方差贡献率最高的 IMF1 分量波动周期类似,短期预测其降水趋势均为短幅下降后上升,中长周期下 IMF2 和 IMF3 的波动周期和未来趋势性具有差异性,三站趋势分量 RES 对未来的降水展望均呈增加态势。

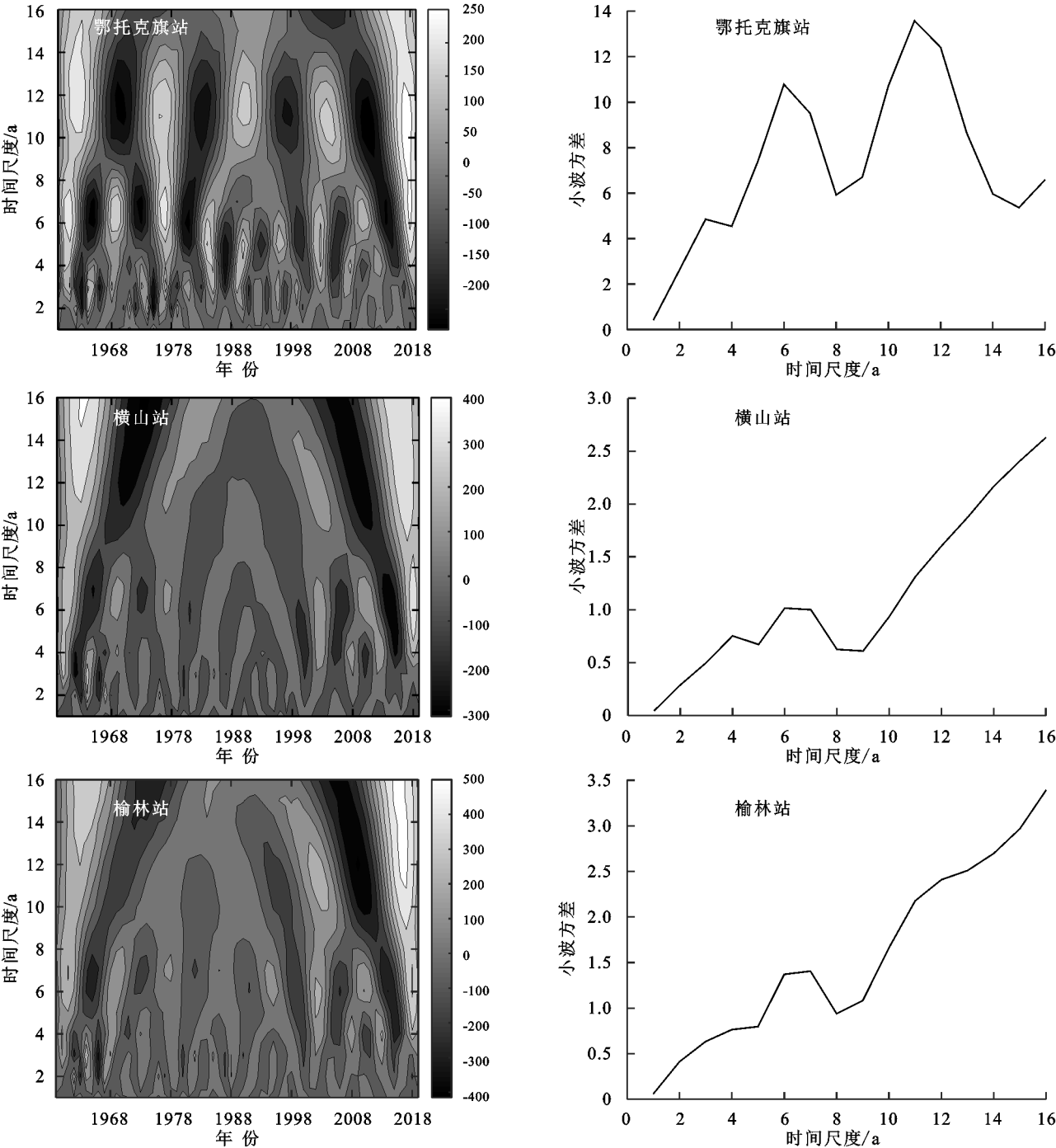


图 3 降水量小波实部图及小波方差

表 1 气象站各模态分量的方差贡献率 %

气象站点	方差贡献率			
	IMF1	IMF2	IMF3	RES
鄂托克旗站	49.45	25.22	16.55	8.78
横山站	46.06	10.88	16.27	26.79
榆林站	43.92	16.32	13.69	26.07

2.3 降水量预测

根据以上 3 个气象站降水量数据的周期性分析可以看到,鄂托克旗站的小波分析显著性周期分别为 12 a 和 6 a,横山站和榆林站的小波分析显著性周期为 6 a;EMD 分析表明在中长周期下,三站的波动周

期均为 12 a 左右,基于此本文利用乘性 Holt-Winters 模型以 12 a 为周期对历史降水量数据提取信息模拟后,进行了未来 12 a 的降水量预测分析(表 2)。在预测之前本文将 61 a 历史数据划分为 49 a 的识别期和 12 a 的验证期,对该模型进行了适用性评估,结果表明鄂托克旗站 12 a 的验证模拟值相对误差为 4.2%,横山站为 16.45%,榆林站为 8.73%,震荡周期类似,模拟效果较为理想。最终对 61 a 的数据进行模拟后得到鄂托克旗站 Holt-Winters 模型历史降水数据估计下的参数  $\alpha, \gamma, \beta$  分别为 0, 0.52, 0.22,模拟值的平均相对误差为 28.61%,模拟值比实际值的震

荡强度较为剧烈,表明基于现有的人类活动及全球气候变化下,未来几年的预测趋势为轻微下降后上升。横山站的 $\alpha,\gamma,\beta$ 分别为0.12,0.08,0.2,平均相对误差为22.62%,预测值在1985—1998年的震荡强度普遍较大,未来几年的趋势预测为上升。榆林站的 $\alpha,$

$\gamma,\beta$ 分别为0.05,0.38,0.24,平均相对误差为22.27%,预测值的极端低值明显,未来降水量的预测趋势为显著上升。整体上3个气象站的模拟值多集中在平均值附近,极值明显程度高于实际值,模拟情况系统性偏低,预测精度还有很大的提升空间。

表 2 Holt-Winters 模型多年平均模拟结果

年份	鄂托克旗站			横山站			榆林站		
	实际值/	模拟值/	相对	实际值/	模拟值/	相对	实际值/	模拟值/	相对
	mm	mm	误差/%	mm	mm	误差/%	mm	mm	误差/%
1959—1970	282.7	282.3	22.01	426.0	416.2	17.64	456.8	445.0	19.78
1971—1982	263.0	281.2	35.14	356.8	353.1	23.06	368.2	373.9	22.90
1983—1994	285.8	276.0	17.25	365.5	360.6	19.11	384.9	360.6	17.86
1995—2006	251.8	277.1	44.02	328.1	348.1	30.29	370.5	401.0	32.44
2007—2018	287.5	270.3	26.94	436.6	379.1	24.41	510.8	442.7	20.17
2019	290.1	288.1	0.69	429.3	454.1	5.78	525.5	527.9	0.46

2.4 流域降水特征分析

海流兔河流域是鄂尔多斯剥蚀高原向陕北黄土高原过渡的洼地小流域,整个流域处在毛乌素沙地之上,为蒙陕煤炭开采区水土流失严重的典型小流域,为更好地描述及预测该流域的降水量情况,本文利用泰森多边形法对气象站点数据进行加权分配,分割得到鄂托克旗站对该流域的控制面积为10.41%,横山站为89.58%,榆林站为0.01%,其中横山站的降水数据为主要流域控制项。通过数据加权后的小波及

EMD分析得到海流兔河流域的基础干湿交替周期尺度为6 a,震荡以1988—1998年最为不明显,16 a以上的尺度均显示流域处在降水量上升期,未来流域整体降水趋势预测呈显著上升状态。乘性Holt-Winters模型模拟预测值与横山站类似, $\alpha,\gamma,\beta$ 分别为0.12,0.09,0.21,平均相对误差为22.28%,模拟精度不太理想,但结合小波及DEM可预测基于现有人类活动及全球气候变化的影响下未来12 a流域降水量整体趋势呈增加态势(表3)。

表 3 Holt-Winters 模型未来 12 a 预测值

年份	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
预测降水值/mm	481.6	509.7	375.2	443.2	581.5	432.1	551.5	505.1	483.3	529	503.7	504.2

3 结论

1961—2019年的降水量数据表明在现有人类活动强度及全球气候趋势下,鄂托克旗站、横山站和榆林站的降水特征呈上升趋势,线性上升倾向率为:榆林站(1.192 2)>横山站(0.073 1)>鄂托克旗站(0.003),流域整体的上升倾向率为0.065 6,未来降水展望为增长态势。根据小波分析、EMD分析和乘性Holt-Winters模型分析得到3个气象站具有明显的周期性和趋势性,干湿周期以6 a和12 a为主;通过降水量变化的主周期外推得到,3个气象站的短期降水预测均呈上升趋势,但在中长期的时间尺度下略有不同,其中榆林站的波动程度显著于鄂托克旗站和横山站;综合加权分析得到,目前海流兔河流域整体处于降水增长期,预计在现有人类活动及全球气候变化的影响下未来12 a的降水量将继续呈波动增长趋势。

本文首次基于周期分析后利用Holt-Winters模型对多年降水量进行了模拟预测,得到鄂托克旗站的预测值呈波动平稳态势,横山站和榆林站的预测值呈

波动增长态势,流域整体降水量呈波动增长态势,这与小波分析和EMD分析的结论相同;尽管Holt-Winters模型在该流域的模拟预测效果不太理想,但对于气候周期性明显和气象资料缺乏地区的降水量统计预测提供了新思路。

参考文献:

[1] Piao Shilong, Ciais Philippe, Huang Yao, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China [J]. Nature, 2010,467(7311):43-51.

[2] 赵俊虎,封国林,王启光,等.2010年我国夏季降水异常气候成因分析及预测[J].大气科学,2011,35(6):1069-1078.

[3] 李峰平,章光新,董李勤.气候变化对水循环与水资源的影响研究综述[J].地理科学,2013,33(4):457-464.

[4] 任国玉,袁玉江,柳艳菊,等.我国西北干燥区降水变化规律[J].干旱区研究,2016,33(1):1-19.

[5] Marengo J A, Espinoza J C. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia:causes, trends and impacts[J]. International Journal of Climatology, 2016,36(3):1033-1050.

[6] Swain Daniel L, Langenbrunner Baird, Neelin J. David,

- et al. Increasing precipitation volatility in twenty-first-century California[J]. *Natural Climate Change*, 2018, 8(5):427-433.
- [7] 郑景云, 方修琦, 吴绍洪. 中国自然地理学中的气候变化研究前沿进展[J]. *地理科学进展*, 2018, 37(1):16-27.
- [8] Giorgi Filippo, Raffaele Francesca, Coppola Erika. The response of precipitation characteristics to global warming from climate projections [J]. *Earth System Dynamics*, 2019, 10(1):73-89.
- [9] Huang Shengzhi, Huang Qiang, Chang Jianxia, et al. Linkages between hydrological drought, climate indices and human activities: a case study in the Columbia River basin[J]. *International Journal of Climatology*, 2016, 36(1):280-290.
- [10] Huang S, Li P, Huang Q, et al. The propagation from meteorological to hydrological drought and its potential influence factors[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 547: 184-195.
- [11] Wu Hao, Qian Hui. Innovative trend analysis of annual and seasonal rainfall and extreme values in Shaanxi, China, since the 1950s [J]. *International Journal of Climatology*, 2017, 37(5):2582-2592.
- [12] 袁定波, 艾萍, 洪敏, 等. 基于地理空间要素的雅砻江流域面雨量估算[J]. *水科学进展*, 2018, 29(6):779-787.
- [13] 韩知明, 贾克力, 杨芳, 等. 基于 Morlet 小波的呼伦湖流域降水多时间尺度分析[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(1):160-166.
- [14] 鲁瑞洁, 王亚军, 张登山. 毛乌素沙地 15 ka 以来气候变化及沙漠演化研究[J]. *中国沙漠*, 2010, 30(2):273-277.
- [15] Li Y, Cao Z, Long H, et al. Dynamic analysis of ecological environment combined with land cover and NDVI changes and implications for sustainable urban-rural development: The case of Mu Us Sandy Land, China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142:697-715.
- [16] 赵国平, 史社强, 李军保, 等. 毛乌素沙地采煤塌陷区土壤水分空间变异研究[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(6): 90-93, 219.
- [12] Li Yangyang, Chen Weiye, Chen Jiacun, et al. Vulnerability to drought-induced cavitation in shoots of two typical shrubs in the southern Mu Us Sandy Land, China[J]. *Journal of Arid Land*, 2016, 8(1):125-137.
- [18] 韩雪莹, 杨光, 秦富仓, 等. 毛乌素沙地近 30 年沙漠化土地时空动态演变格局[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(5):144-150, 157.
- [19] 马雄德, 范立民. 榆神矿区地下水与生态环境演化特征[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(10):245-252.
- [20] Yang Zhi, Zhou Yangxiao, Wenninger Jochen, et al. Groundwater and surface-water interactions and impacts of human activities in the Hailu catchment, northwest China[J]. *Hydrogeology Journal*, 2017, 25(5):1341-1355.
- [21] 潘桂行, 申涛, 马雄德, 等. 人类活动和自然因素对海流兔河流域生态环境影响分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(4):67-72.
- [22] Zhong Y, Lei L, Liu Y, et al. The influence of large-scale climate phenomena on precipitation in the Ordos Basin, China[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2017, 130(3):791-805.
- [23] 朱求安, 张万昌. 流域水文模型中面雨量的空间插值[J]. *水土保持研究*, 2005, 12(2):11-14.
- [24] 刘濛濛, 隆永兰. 巴音布鲁克近 58 a 气候变化特征分析[J]. *干旱区地理*, 2019, 42(4):715-723.
- [25] 周念清, 杨硕, 沈新平, 等. 洞庭湖流域降雨序列突变性和多尺度特征分析[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2014, 42(6):867-872.
- [26] Zhang Q, Lu W, Chen S, et al. Using multifractal and wavelet analyses to determine drought characteristics: a case study of Jilin province, China[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2016, 125(3):829-840.
- [27] 于文金, 黄亦露, 邵明阳. 澜沧江流域极端天气灾害特征及波动趋势[J]. *生态学报*, 2015, 35(5):1378-1387.
- [28] 罗那那, 巴特尔·巴克, 吴燕锋. 基于集合经验模态分解北疆降水多尺度变化特征[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(4):362-367.
- [29] Adarsh Sankaran, Reddy Manne Janga. Evaluation of trends and predictability of short-term droughts in three meteorological subdivisions of India using multivariate EMD-based hybrid modelling[J]. *Hydrological Processes*, 2019, 33(1):130-143.
- [30] Puah Yan Jun, Huang Yuk Feng, Chua Kuan Chin, et al. River catchment rainfall series analysis using additive Holt-Winters method[J]. *Journal of Earth System Science*, 2016, 125(2):269-283.
- [31] 崔哲伟, 毕华兴, 云雷, 等. 指数平滑法在林地水分动态模拟和预测中的应用[J]. *水土保持通报*, 2011, 31(2): 128-132.
- [32] 席广永, 岳建平, 周保兴. 基于 Holt-Winter 的电离层延迟预报模型[J]. *测绘通报*, 2012(9):7-10.
- [33] 彭帅英, 李广杰, 彭文, 等. 基于改进遗传算法的 Holt-Winters 模型在采空沉陷预测中的应用[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2013, 43(2):515-520.
- [34] 师彪, 李郁侠, 于新花, 等. 动态调整粒子群—霍尔特模型在径流预测中的应用[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(7):8-13.