

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkj.2019.0109

陈沪生,周玉良,周平,等.基于小波和ARIMA的黄山市年降水量分析及预测[J].南水北调与水利科技,2019,17(5):50-55.  
CHEN H S,ZHOU Y L,ZHOU P,et al. Analysis and prediction of annual precipitation in Huangshan City based on wavelet and ARIMA[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2019,17(5):50-55. (in Chinese)

# 基于小波和ARIMA的黄山市年降水量分析及预测

陈沪生<sup>1,2</sup>,周玉良<sup>1,2</sup>,周平<sup>1</sup>,金菊良<sup>1,2</sup>

(1.合肥工业大学土木与水利工程学院,合肥230009;2.合肥工业大学水资源与环境系统工程研究所,合肥230009)

**摘要:**为研究区域降水时间特征,提高年降水量预测精度,采用Morlet小波对黄山市1957—2016年的年降水量周期进行分析,并基于1957—2011年的年降水量构建了ARIMA模型和小波与ARIMA组合模型,分别对该市2012—2016年的年降水量进行了预测及对比分析。结果表明:黄山市近60a年降水量主要受28、13、5a的周期波动影响;采用ARIMA及组合模型预测2012—2016年年降水量的平均相对误差绝对值分别为19.8%和12.3%,组合模型的拟合和预测效果更优;两种方法对2012年、2015年和2016年的年降水量预测误差均较大,可能是这几年降水受ENSO事件影响,降水机制异于常年,致模型预测误差较大。结果可为区域中长期水文预报提供科学依据,对区域旱涝灾害预警管理具有一定应用价值。

**关键词:**降水特征分析;降水量预测;小波分析;ARIMA模型;黄山市

中图分类号:TV125 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Analysis and prediction of annual precipitation in Huangshan City based on wavelet and ARIMA

CHEN Husheng<sup>1,2</sup>, ZHOU Yuliang<sup>1,2</sup>, ZHOU Ping<sup>1</sup>, JIN Juliang<sup>1,2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Institute of Water Resources and Environmental Systems Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** In order to identify the temporal characteristics of regional rainfall and improve the prediction accuracy of annual precipitation, the periodic variation of annual precipitation in Huangshan City from 1957 to 2016 was analyzed based on Morlet wavelet. A series of annual precipitations of Huangshan City from 1957 to 2011 was adopted to establish the ARIMA model and the combined model of ARIMA with wavelet, and both models were applied to predict the annual precipitation of Huangshan City from 2012 to 2016. The results show that the annual precipitation in Huangshan City is mainly affected by the periodic fluctuations of 28 a, 13 a and 5 a. The mean absolute percentage error of the predicted annual precipitations for the period of 2012—2016 is 19.8% by applying the ARIMA model, while that for the same period is 12.3% by applying the combined model, indicating better accuracy in simulating and predicting the annual precipitation in Huangshan City by applying the combined model. Significant errors can be found in predicting the annual precipitations of Huangshan City in 2012, 2015 and 2016 as different mechanism of precipitation in these years with normal years, probably resulting from an impact of ENSO events on the precipitations. As providing the scientific foundation for the regional long- and mid-term hydrological forecasting, the achievement is of certain value in management of early warning of the regional flood/drought disasters.

**Key words:** analysis of precipitation characteristics; precipitation prediction; wavelet analysis; ARIMA model; Huangshan City

收稿日期:2019-01-31 修回日期:2019-05-28 网络出版时间:2019-06-06

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190605.1145.004.html>

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC1502405);国家自然科学基金(51579060;51509065;51779067)

作者简介:陈沪生(1993—),男,安徽安庆人,主要从事水文水资源研究。E-mail: chencusheng1993@163.com

通信作者:周玉良(1982—),男,安徽舒城人,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail: ZYL54600@163.com

降水是区域水资源的重要来源,降水量异常是区域水旱灾害的直接驱动。降水的周期波动等时间特征分析以及降水量预测,可为区域水资源合理利用和防汛抗旱工作提供数据支撑,对保障社会发展具有重要的指导意义<sup>[1]</sup>。黄山市地处安徽省南部,气候湿润,降水丰富,年降水量居安徽省前列<sup>[2]</sup>,多次发生洪涝灾害,是国家重要的防洪城市。因此对黄山市年降水量进行时间特征分析及预测,对黄山市防汛抗旱工作具有现实指导意义。目前小波分析法在时间序列的特征分析方面有着广泛应用,众多学者利用小波分析方法对各地降水量序列展开了年际变化规律分析<sup>[3-7]</sup>。小波分析结合其它时间序列模型还可对降水量进行预测<sup>[8-9]</sup>,其中,采用小波与差分自回归滑动平均模型 (autoregressive integrated moving average, ARIMA) 组合模型在降水量预测的研究较多<sup>[10-11]</sup>,但大多停留在分析层面,就预测误差的成因进一步深入分析的研究较少。

本文利用 Morlet 小波对黄山市 1957—2016 年的年降水量序列进行周期波动规律识别及分析;根据区域 1957—2011 年的年降水量,分别构建 ARIMA 模型和小波与 ARIMA 组合模型,并对黄山市 2012—2016 年的年降水量进行预测。对拟合和预测误差较大的年份,从可能影响该年降水的物理机制 (如 ENSO 事件<sup>[12]</sup>) 与其他年份的异同角度考虑,初步探索计算结果误差较大的原因。

## 1 研究方法

### 1.1 ARIMA 模型

ARIMA 模型原理是利用差分处理把某个随机过程产生的时间序列转变成平稳序列,并利用观测值建立适合该随机过程的差分自回归移动平均模型,继而筛选出最优模型进行预测。该模型有自回归阶数  $p$ 、差分次数  $d$  和滑动平均阶数  $q$  共 3 个参数,记为 ARIMA( $p, d, q$ ),其通用表达式<sup>[13]</sup>为

$$X_t = \varphi_1 X_{t-1} + \varphi_2 X_{t-2} + \dots + \varphi_p X_{t-p} + \varepsilon_t - (\theta_1 \varepsilon_{t-1} + \theta_2 \varepsilon_{t-2} + \dots + \theta_q \varepsilon_{t-q}) \quad (1)$$

式中:  $X_t$  是转化后的平稳序列;  $\varepsilon_t$  是白噪声序列。ARIMA 建模一般包括 4 个步骤<sup>[14]</sup>。

步骤 1: 序列平稳化。根据时间序列的散点图,利用单位根检验判断序列是否平稳。若序列平稳则按步骤 2 操作,否则利用若干次差分将其转化成平稳序列。

步骤 2: 模型识别。通过自相关和偏相关图估计出不同阶数  $p, q$  的可能取值,然后通过赤池准则、施瓦茨准则筛选出最优模型。

步骤 3: 模型检验。通过  $Q$  统计量判定,若残差序列数据分析为白噪声序列,则表明模型信息提取充分且拟合效果好,否则需重新筛选最优模型。

步骤 4: 模型预测。根据建立的最优 ARIMA 模型对平稳序列预测,对比预测结果与实测值,分析模型预测精度。

### 1.2 小波分析

小波分析是应用广泛的时频分析工具,其基本原理是通过小波基的伸缩变换,研究信号 (在此即降水等水文要素) 各尺度层次上的信息,由概貌序列研究信号的基本概貌,由细节序列研究信号的波动细节,其数学表达式<sup>[15]</sup>为

$$W_f(a, b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \varphi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (2)$$

式中:  $W_f(a, b)$  为小波系数;  $a$  为伸缩因子;  $b$  为平移因子;  $t$  是时间;  $f(t)$  为任意平方可积函数即降水过程;  $\varphi(t)$  为一个基本小波 (母小波);  $\varphi^*$  为  $\varphi$  的共轭函数。

Morlet 函数是一种复数小波,具有很好的时频局部性,其函数定义<sup>[16]</sup>为

$$\varphi(t) = \exp(i\omega_0 t - \frac{t^2}{2}) \quad (3)$$

式中:  $\omega_0$  是无量纲频率。本文选择该小波进行降水序列的离散小波分析。

### 1.3 小波与 ARIMA 组合模型

运用 db 小波分解技术<sup>[17]</sup>,将原始序列分解为概貌和细节序列。卢献健等<sup>[18]</sup>分析了小波分解层数对预测精度的影响,表明预测步长为 1~5 步时,对原始信号进行 4 层分解效果最好。因此,这里将年降水量序列分解为 4 层,原始序列通过单尺度分解后得到概貌序列  $a_1$  以及细节序列  $d_1, d_2, d_3, d_4$ ,分别对其建立时间序列模型,叠加各子序列值得序列原始值。

## 2 结果分析

数据资料来源于中国气象数据共享网 (data.cma.cn) 中黄山站 1957—2016 年的逐日降水资料,年降水量为每年 1 月 1 日至 12 月 31 日的逐日降水量总和。

### 2.1 黄山市年降水量特征分析

利用 Morlet 小波对黄山市 1957—2016 年的年降水量序列做小波变换。相关原理及应用<sup>[19]</sup>表明,当  $\omega_0 > 5.0$  时, Morlet 小波满足容许性条件 (表示该小波稳定)。本文采用  $\omega_0 = 6.2$ , 此时时间尺度  $a$  与周期  $T$  数值相等,得到小波实部等值线 (图 1) 和

小波方差(图 2)。如此,区域年降水小波实部的时间分布情况即表明了年降水的周期波动情况;而通过找寻小波方差过程线的极值就可识别区域年降水的主周期。

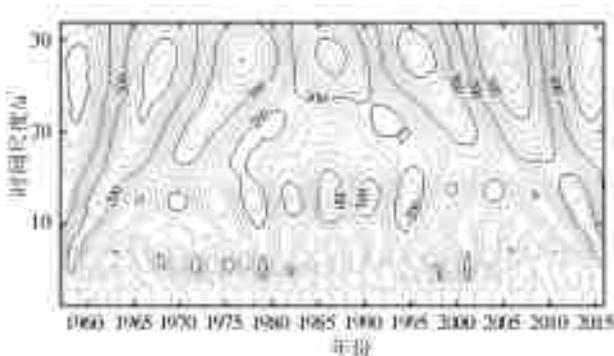


图 1 黄山市 1957—2016 年的年降水量小波变换实部等值线  
Fig. 1 Real-part contour of annual precipitation wavelet-coefficient in Huangshan city from 1957 to 2016

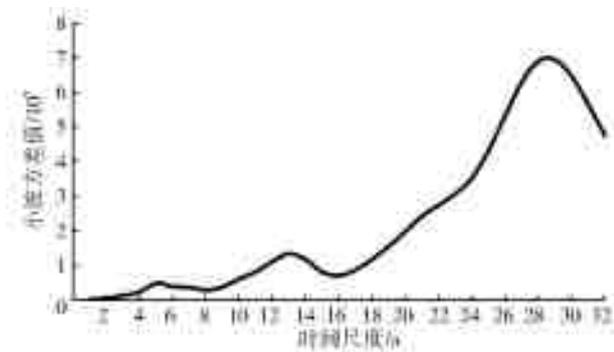


图 2 黄山市 1957—2016 年的年降水量  
Fig. 2 Wavelet variance process of annual precipitation in Huangshan city from 1957 to 2016

从图 1 可以看出,黄山市年降水量序列在 28、13 a 及 5 a 的尺度上存在较为明显的周期波动。其中,28 a 和 13 a 周期波动贯穿整个分析时域,并且 28 a 左右时间尺度上,出现了三次半的正负交替,表明了时域内降水的丰枯交替变化;在 13 a 左右时,年降水在整个时域上丰枯交替也较为明显;同时,在 1965—2005 年左右还存在 5 a 左右的短周期波动,该波动在 2005 年后较为弱化。因此,黄山市 60 a 降水量序列主要受 28、13 a 以及 5 a 左右 3 个尺度周期波动影响。由图 2 知,尺度  $a$  分别为 28、13 a 和 5 a 时,小波方差出现峰值,28 a 峰值最高,表明该序列第一主周期为 28 a,第二、三主周期分别为 13 a 和 5 a。

## 2.2 黄山市年降水量预测

以黄山市 1957—2011 年的年降水量为训练样本,建立 ARIMA 模型和小波与 ARIMA 组合模型,并利用建立的模型,对该市 2012—2016 年的年降水量进行预测。

### 2.2.1 基于 ARIMA 模型的黄山市年降水量拟合和预测

根据 1.1 中的 4 个步骤分析训练样本。

(1)序列平稳化。对训练样本进行单位根检验,统计量观察值为 $-6.7$ ,小于 1%置信水平下的单位根检验临界值 $-3.6$ ,故认为训练样本平稳,所以 $d=0$ ,直接利用 ARIMA 模型对训练样本进行拟合。

(2)模型识别。利用 Eviews8.0 软件得出训练样本序列自相关和偏相关系数,两个系数均有衰减趋势且都不为零,所以训练样本序列自相关和偏相关均拖尾, $p, q$  取值不确定,因此对  $p, q$  取不同数值对模型进行识别,通过赤池准则和施瓦茨准则,初步得到 ARIMA(4,0,5)是最合理的。

(3)模型检验。利用 Eviews8.0 软件得出 ARIMA(4,0,5)的残差序列不存在自相关,为白噪声序列,表明模型是合理的。

(4)模型预测。根据建立的模型,对训练样本进行拟合,得黄山市 1961—2011 年的年降水量计算值见图 3。

### 2.2.2 基于小波与 ARIMA 组合模型的黄山市降水量拟合和预测

根据黄山市 1957—2011 年降水资料,运用 db4 小波对黄山市年降水量序列进行 4 层小波分解,得到概貌序列  $a_4$  和 4 层细节序列  $d_4, d_3, d_2, d_1$ 。

采用 ARIMA 分别对  $a_4, d_1, d_2, d_3$  和  $d_4$  建模,得各子序列模型分别为 ARIMA(1,2,1)、ARIMA(6,0,1)、ARIMA(6,0,1)、ARIMA(5,2,1) 和 ARIMA(7,2,2),进而对各子序列分别进行预测,叠加各子序列得到黄山市 1966—2011 年的年降水量,见图 3。

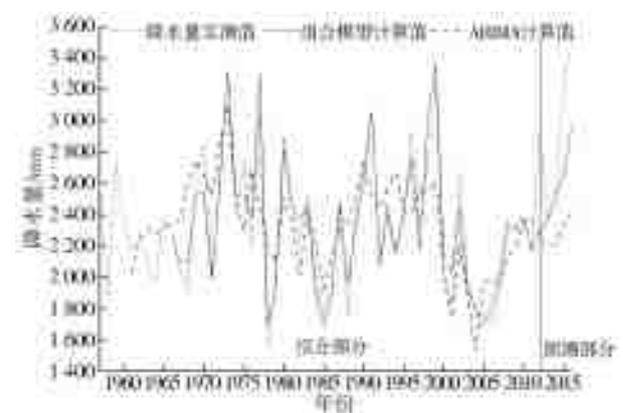


图 3 ARIMA 和小波与 ARIMA 组合模型计算降水量与实测值

Fig. 3 Calculated and observed annual precipitations in Huangshan City

由图 3 知, ARIMA 模型和小波与 ARIMA 组合模型对黄山市年降水量的拟合效果均较好, 平均相对误差绝对值分别为 11.5% 和 4.6%。其中, ARIMA 模型降水预测误差最大的 3 年分别是 1968 年、1978 年和 1988 年, 相对误差绝对值分别为 36.8%、41.4% 和 34.3%; 组合模型误差最大的 3 年分别是 1988 年、1998 年和 2001 年, 相对误差绝对值分别是 12.4%、10.8% 和 12.0%。两种模型预测黄山市 2012—2016 年的年降水量见表 1。

表 1 基于 ARIMA 和小波与 ARIMA 组合模型的黄山市 2012—2016 年的年降水量预测值

Tab.1 Predicted annual precipitations in Huangshan City from 2012 to 2016

年份	实测值/ mm	ARIMA 模型		小波和 ARIMA 组合模型	
		预测值/ mm	相对误差/ %	预测值/ mm	相对误差/ %
2012	2 961	2 258	-23.8	2 269	-23.4
2013	2 365	2 197	-7.1	2 376	0.5
2014	2 430	2 204	-9.3	2 538	4.4
2015	3 247	2 347	-27.7	2 645	-18.5
2016	3 493	2 409	-31.0	2 973	-14.9
平均值			19.8		12.3

从表 1 中可以看出, 组合模型对黄山市 2012—2016 年降水量预测的平均相对误差绝对值为 12.3%, 最大相对误差绝对值为 23.4%, 最小相对误差绝对值为 0.5%, ARIMA 模型预测的平均相对误差绝对值为 19.8%, 最大相对误差绝对值为 31.0%, 最小相对误差绝对值为 7.1%, 2012—2016 年期间, 小波与 ARIMA 组合模型的预测误差均低于 ARIMA 模型, 表明组合模型的预测效果好于 ARIMA 的预测效果。年降水量序列具有较高的非平稳性, ARIMA 模型在进行多步预测时, 难以取得高精度的预测结果<sup>[20]</sup>, 小波分解将随机性较强的黄山市年降水量序列分解为 1 个近似平稳的概貌序列和 4 个随机性较弱的细节序列, 既保留了年降水量序列的信息, 又降低了序列随机性导致的误差, 提高了模型的预测精度。

模型拟合中误差较大的 1968、1978、1988 和 2001 年均是由于当年降水量远低于黄山市多年平均降水量, 导致拟合误差较大。根据罗剑锋<sup>[21]</sup>统计的 1966—2015 年发生的 ENSO 事件及两类 ENSO 事件对长江中下游地区季节降水的影响, 1968 年发生了夏季厄尔尼诺事件, 导致黄山市当年降水量较少; 1977 年发生了中部型厄尔尼诺事件, 导致黄山市次年(1978 年)秋冬季节降水大幅度减少; 1988 年发

生东部型厄尔尼诺事件, 使黄山市秋冬季节降水减少; 2001 年是中部型拉尼娜事件发生的次年, 黄山市夏秋季节降水量偏少。1998 年既是东部型厄尔尼诺发生次年, 又是东部型拉尼娜发生当年, 黄山市降水量明显偏多, 导致模型分析误差较大。

2013 年和 2014 年降水量与多年平均降水量相差较小, 两种模型的预测误差均低于 10%, 预测效果较好。2012 年降水量受拉尼娜事件影响, 和多年平均降水量相差较大, 属于丰水年。张冲等<sup>[22]</sup>研究表明, 拉尼娜事件发生使 2012 年夏季风无法北上, 雨带滞留于长江流域, 全流域夏秋两季产生大暴雨, 致使黄山市该年降水量偏多, 两种模型得到的 2012 年降水量预测值均低于实测值, 相对误差绝对值均大于 20%。2015—2016 年受到超强厄尔尼诺事件影响, 黄山市年降水量远大于多年平均降水量, ARIMA 模型对黄山市年降水量预测的相对误差绝对值分别为 27.7% 和 31.0%, 组合模型的相对误差绝对值分别为 18.5% 和 14.9%。袁媛等<sup>[23]</sup>研究表明, 该厄尔尼诺事件使西太副高偏强偏西, 同时副高西侧水汽运输增强, 致使江南地区 2015 年秋季和 2016 年春季降水量明显增多, 黄山市 2015 年和 2016 年降水量较常年偏大, 预测值均低于实测值, 预测误差较大。

由于 ARIMA 模型以及小波与 ARIMA 组合模型为数据驱动, 未直接考虑降水的物理机制, 故对降水量异常年份的预测误差较大。降水量预测模型可在统计技术的基础上, 进一步结合降水的物理机制进行构建, 考虑 ENSO 事件的影响, 如将年降水量分解为台风降水量、梅雨降水量和其它降水量<sup>[24-25]</sup>等, 根据不同的降水机制进行预测, 可能会使降水量预测效果更好。

### 3 结 论

利用小波分析对黄山市 1957—2016 年的年降水量进行特征分析, 并运用 ARIMA 模型和小波与 ARIMA 组合模型对黄山市年降水量进行预测, 主要结论如下。

(1) 黄山市年降水量主要受 28、13、5 a 的尺度波动所影响。其中 28 a 和 13 a 周期波动贯穿整个计算时域, 5 a 的短周期震荡主要存在于 1965—2005 年左右。

(2) 小波与 ARIMA 组合模型对黄山市年降水量预测效果比 ARIMA 的预测效果更好。ARIMA 模型对黄山市 2012—2016 年降水量预测的平均相对误差绝对值为 19.8%, 最大相对误差绝对值为

31.0%,最小相对误差绝对值为 7.1%;小波与 ARIMA 组合模型对黄山市 2012—2016 年降水量预测的平均相对误差绝对值为 12.3%,最大相对误差绝对值为 23.4%,最小相对误差绝对值为 0.5%。

(3)ARIMA 模型和小波与 ARIMA 组合模型均为数据驱动方法,未直接考虑降水的物理机制,对降水量异常年份的预测误差较大。结合降水物理机制(如 ENSO 指数等)和数据驱动的降水量分析和预测模型可能具有更高的精度。

#### 参考文献(References):

- [1] 焦醒,刘广全,土小宁.黄土高原植被恢复水资源承载力核算[J].水利学报,2014,45(11):1344-1351. (JIAO X,LIU G Q,TU X N. Estimation of water resources carrying capacity for revegetation in the Loess Plateau [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2014,45(11):1344-1351. (in Chinese)) DOI:10.13243/j.cnki.slxb.2014.11.010.
- [2] 洪云华,张卫英.黄山市特种养殖业发展现状及展望[J].现代农业科技,2011(3):384-386. (HONG Y H,ZHANG W Y. Current situation and prospect of special aquaculture industry in Huangshan City [J]. Xiandai Nongye Keji,2011(3):384-386. (in Chinese))
- [3] 宋苏林,高晓曦,左德鹏,等.小清河流域汛期多年降水变化趋势[J].南水北调与水利科技,2018,16(6):46-52. (SONG S L,GAO X X,ZUO D P, et al. Trend of precipitation variation in flood season in Xiaoqing River basin [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(6): 46-52. (in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkq.2018.0152.
- [4] YUAN L F, YANG G S, LI H P, et al. Spatio-temporal variation analysis of precipitation during 1960-2008 in the Poyang Lake basin, China [J]. Open Journal of Modern Hydrology,2016,6(2):115-127.
- [5] KONG N N, LI H, LI N, et al. Analysis on change characteristics and periodicity of precipitation in Liaocheng City [J]. Modern Agricultural Science & Technology,2017(8):213-215.
- [6] 王景才,徐蛟,蒋陈娟,等.1960—2014 年淮河上中游流域年降水和主汛期降水的时空分布特征[J].南水北调与水利科技,2017,15(6):51-58. (WANG J C,XU J,JIANG C J, et al. Temporal and spatial characteristics of annual and main flood season precipitation in the upper and middle reaches of Huaihe River Basin between 1960 and 2014 [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2017,15(6):51-58. (in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkq.2017.06.008.
- [7] 王豪杰,左其亭,罗增良.沙颍河代表站径流演变特征及归因分析[J].南水北调与水利科技,2017,15(5):36-42. (WANG H J,ZUO Q T,LUO Z L. Runoff evolution characteristics of a typical station in Shayinghe River basin and attribution analysis [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017,15(5):36-42. (in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkq.2017.05.006.
- [8] 董海彪,卢文喜,欧阳琦,等.小波神经网络在降水量预测中的应用研究[J].节水灌溉,2014(12):33-36. (DONG H B,LU W X,OUYANG Q, et al. Application of WNN in precipitation forecast [J]. Water Saving Irrigation,2014(12):33-36. (in Chinese))
- [9] 王喜华,卢文喜,初海波,等.基于小波分析的 ARMA-GARCH 模型在降水预报中的应用[J].节水灌溉,2011(5):52-56. (WANG X H,LU W X,CHU H B, et al. Application of ARMA-GARCH model based on wavelet analysis in rainfall forecasting [J]. Water Saving Irrigation,2011(5):52-56. (in Chinese))
- [10] 彭高辉,韦保磊,马建琴.基于小波与游程耦合的时序模型在降水预测中的应用[J].长江科学院院报,2014,31(8):18-22,28. (PENG G H,WEI B L,MA J Q. Application of the coupling time series model based on wavelet and runs in precipitation forecast [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014,31(8):18-22,28. (in Chinese))
- [11] 刘德林.郑州市年降水量的 ARIMA 模型预测[J].水土保持研究,2011,18(6):249-251. (LIU D L. Annual precipitation forecasting of Zhengzhou City based on ARIMA Mode [J]. Research of Soil and Water Conservation,2011,18(6):249-251. (in Chinese))
- [12] 吴娟,林荷娟,吴志勇,等.厄尔尼诺事件对太湖流域降水的影响[J].水文,2017,37(5):60-65. (WU J, LIN H J,WU Z Y, et al. Influence of El Nino events on rainfall in Taihu Basin [J]. Journal of China Hydrology,2017,37(5):60-65. (in Chinese))
- [13] 张春露,白艳萍. ARIMA 时间序列模型和 BP 神经网络组合预测在铁路客座率中的应用[J].数学的实践与认识,2018,48(21):105-113. (ZHANG C L,BAI Y P. Application of ARIMA time series and BP neural network combination model in railway passenger rate [J]. Journal of Mathematics in Practice and Theory, 2018,48(21):105-113. (in Chinese))
- [14] 芮少权,匡安乐.高速公路月度交通量 ARIMA 预测模型[J].长安大学学报(自然科学版),2010,30(4):82-85,97. (RUI S Q,KUANG A L. ARIMA model of expressway traffic volume monthly forecasting [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition),2010,30(4):82-85,97. (in Chinese)) DOI:

- 10.19721/j.cnki.1671-8879.2010.04.016.
- [15] 徐鸣,王斌,吕爱华,等. 大气污染物多时间分辨率的小波分析[J]. 环境科学学报, 2008, 28(4): 786-790. (XU M, WANG B, LYU A H, et al. Multi-time scale resolution analysis of air pollutants with a wavelet transform[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(4): 786-790. (in Chinese)) DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2008.04.015.
- [16] 方宏阳,栾清华,赵志轩,等. 变化环境下白洋淀湿地演变驱动机制分析[J]. 水电能源科学, 2012, 30(8), 107-111. (FANG H Y, LUAN Q H, ZHAO Z X, et al. Analysis of driving mechanism of Baiyangdian wetland evolution under changing environment [J]. Water Resources and Power, 2012, 30(8): 107-111. (in Chinese))
- [17] 张费,宋万清. DB小波与RBP神经网络的短期电力负荷预测[J]. 上海工程技术大学学报, 2009, 23(3): 238-243. (ZHANG F, SONG W Q. Short-term load forecasting for electric power system based on DB wavelet and RBP neural networks [J]. Journal of Shanghai University of Engineering Science, 2009, 23(3): 238-243. (in Chinese))
- [18] 卢献健,晏红波,梁月吉. 小波分解层数及分量组合对滑坡预测的影响[J]. 桂林理工大学学报, 2016, 36(2): 304-309. (LU X J, YAN H B, LIANG Y J. Analysis of wavelet decomposition and wavelet component combination for landslide prediction [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2016, 36(2): 304-309. (in Chinese))
- [19] 王晓琳. 基于小波分析的邯郸山区水文特性分析与预测[D]. 邯郸:河北工程大学, 2012. (WANG X L. The analysis and prediction of hydrological characteristics based on wavelet analysis in Handan mountain area [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2012. (in Chinese))
- [20] 岳莉莉. 基于时间序列分析的风速短期预测方法研究[D]. 北京:华北电力大学, 2012. (YUE L L. Research on short-term wind speed forecasting method based on time series analysis [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012. (in Chinese))
- [21] 罗剑锋,陈敏,李煜,等. 两类 ENSO 事件对长江中下游地区季节降水的影响[J]. 南水北调和水利科技, 2018, 16(4): 82-89. (LUO J F, CHEN M, LI Y, et al. Influence of the two types of ENSO events on seasonal precipitation over middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(4): 82-89. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2018.0100.
- [22] 张冲,赵景波. 厄尔尼诺/拉尼娜事件对长江流域气候的影响研究[J]. 水土保持通报, 2011, 31(3): 1-6, 11-12. (ZHANG C, ZHAO J B. Effects of El Nino-Southern oscillation events on climate in Yangtze River Basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31(3): 1-6, 11-12. (in Chinese)) DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2011.03.014.
- [23] 袁媛,高辉,贾小龙,等. 2014—2016 年超强厄尔尼诺事件的气候影响[J]. 气象, 2016, 42(5): 532-539. (YUAN Y, GAO H, JIA X L, et al. Influences of the 2014-2016 super El Nino event on climate [J]. Meteorological Monthly, 2016, 42(5): 532-539. (in Chinese))
- [24] 刘继晨,钟玮,刘爽,等. 登陆台风内降水效率变化对降水增幅影响的分析[J]. 热带气象学报, 2016, 32(2): 193-206. (LIU J C, ZHONG W, LIU S, et al. The effect of precipitation efficiency on rainfall amplification during typhoon's landing process [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2016, 32(2): 193-206. DOI: 10.16032/j.issn.1004-4965.2016.02.006.
- [25] 王佳,周玉良,周平,等. 基于集对分析的安徽省梅雨期降水空间特征研究[J]. 水电能源科学, 2018, 36(11): 1-4. (WANG J, ZHOU Y L, ZHOU P, et al. Study on spatial characteristics of plum rains in Anhui Province based on set pair analysis [J]. Water Resources and Power, 2018, 36(11): 1-4. (in Chinese))