

庞金凤,刘波,张波,等,2019.基于小波分解的沙尘天气发生日数预测组合模型研究——以 2008—2016 年策勒沙漠-绿洲过渡带沙尘天气发生时序为例[J].气象,45(5):651-658. Pang J F, Liu B, Zhang B, et al, 2019. Study on the combined model of forecasting the days of sand-dust weather based on wavelet decomposition—taking the time series of dust weather in the transitional zone of Qira desert-oasis during 2008—2016 as an example[J]. Meteor Mon, 45(5): 651-658(in Chinese).

# 基于小波分解的沙尘天气发生日数预测组合模型研究——以 2008—2016 年策勒沙漠-绿洲过渡带沙尘天气发生时序为例\*

庞金凤<sup>1,2,3,4,5</sup> 刘波<sup>6</sup> 张波<sup>1,2,3,4</sup> 张朋朋<sup>7</sup>  
王波<sup>1,2,3,4,5</sup> 曾凡江<sup>1,2,3,4</sup>

- 1 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011
- 2 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011
- 3 新疆策勒荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站, 策勒 848300
- 4 中国科学院干旱区地理与生物资源重点实验室, 乌鲁木齐 830011
- 5 中国科学院大学, 北京 100049
- 6 临沂大学, 山东临沂 276000
- 7 西安电子科技大学, 西安 710126

**提 要:** 新疆南疆地区是扬沙浮尘的主要高发区, 风沙对当地生产生活影响严重。为揭示当地风沙天气变化特征并预测未来变化趋势, 通过小波分解方法, 将塔克拉玛干沙漠南缘的策勒沙漠-绿洲过渡带 2008—2016 年沙尘天气发生时序分解为平稳性波动项和非线性趋势项, 根据两项数据的特性, 针对性选取自回归(AR)模型和最小二乘支持向量机(LSSVM)进行变化趋势预测, 最后利用加法原则重构实现沙尘天气发生日数时序预测。结果表明: 研究区沙尘天气发生属于典型的春夏型, 主要集中在 3—9 月, 峰值出现在 5 月。组合模型预测值与实测值基本吻合, 具有较高的预测精度(绝对误差为 4.00 d, 均方根误差为 3.76 d), 同时, 其结果与 AR 模型、LSSVM 模型预测结果相比较也显示出一定的优越性(组合模型相关系数相比 AR、LSSVM 分别提高了 0.12、0.31), 具有较好的应用前景, 可为研究区预防风沙灾害及指导实际生产生活提供科学依据。

**关键词:** 风沙天气, 小波分解, 组合模型, AR 模型, LSSVM 模型

**中图分类号:** P463, P427

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.05.006

## Study on the Combined Model of Forecasting the Days of Sand-Dust Weather Based on Wavelet Decomposition—Taking the Time Series of Dust Weather in the Transitional Zone of Qira Desert-Oasis During 2008—2016 as an Example

PANG Jinfeng<sup>1,2,3,4,5</sup> LIU Bo<sup>6</sup> ZHANG Bo<sup>1,2,3,4</sup> ZHANG Pengpeng<sup>7</sup>  
WANG Bo<sup>1,2,3,4,5</sup> ZENG Fanjiang<sup>1,2,3,4</sup>

\* 国家林业局荒漠化监测项目(014B031)、国家自然科学基金项目(31770638)、山东省自然科学基金项目(ZR2017MC029)共同资助

2018 年 4 月 20 日收稿; 2018 年 9 月 5 日收修定稿

第一作者: 庞金凤, 主要从事微生物生态等方面研究. Email: mengyangyx@126.com

通信作者: 曾凡江, 主要从事荒漠植物生态学研究. Email: zengfj@ms.xjb.ac.cn

- 1 Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011
- 2 State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011
- 3 Qira National Station of Observation and Research for Desert-Grassland Ecosystems, Xinjiang, Qira 848300
- 4 Key Laboratory of Biogeography and Bioresource in Arid Zone, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011
- 5 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049
- 6 Linyi University, Shandong, Linyi 276000
- 7 Xidian University, Xi'an 710126

**Abstract:** The area of southern Xinjiang is a high occurrence area of dust weather, which has a serious impact on local residents' life. To reveal the characteristics of local wind-sand weather variation and predict future trends, a wavelet decomposition method is used to decompose the time series of dust weather in the southern edge of the Taklimakan Desert from 2008 to 2016 into stationary fluctuation terms and nonlinear trend terms, according to the characteristics of the data. The autoregressive (AR) model and the least square support vector machine (LSSVM) are selected to predict the variation trend. Finally, the time series prediction of the number of dust weather days is achieved by the addition principle reconstruction. The results show that the dust weather is a typical spring and summer type, mainly concentrated in the period from March to September, and the peak value appears in May. The predicted value of the combined model is basically consistent with the measured value, and has a higher prediction accuracy (absolute error is 4 d, root mean square error is 3.764 d). Compared with the prediction results of AR model and LSSVM, the correlation coefficient of combined model increases 0.12 and 0.31 respectively, and has a better application prospect. Thus, it could provide scientific basis for preventing wind and sand disaster and guiding actual production and life in the research area.

**Key words:** dust weather, wavelet decomposition, combination model, autoregressive (AR) model, least square support vector machine (LSSVM) model

## 引 言

根据气象学的定义,浮尘、扬沙、沙尘暴这三种类型属于沙尘天气,主要发生在干旱半干旱地区(毛东雷等,2016a)。近年来,西北地区气候发生了较大的变化,尤其是新疆南部,沙尘天气发生频繁,强沙尘暴天气发生明显增加(廖要明等,2016),其中,沙尘天气发生频率的变化直接对当地生态环境、经济发展产生深远的影响(何毅等,2015;郑红莲等,2010)。为尽可能减少沙尘天气灾害对该地区的恶劣影响,迫切需要分析沙尘天气发生变化特征,进而较为精准地预测将来。

策勒沙漠-绿洲过渡带是沙漠外围绿洲生态系统的安全屏障(林永崇和徐立帅,2017;王翠等,2013)。过渡带天然植被类型单调,群落结构简单,风沙灾害十分严重(毛东雷等,2018),沙尘天气造成的破坏植被、掩埋农田、风蚀土壤等又加剧了沙尘天气的发生和发展(安林昌等,2018)。近年来,学

者们(周自江等,2002;刘海涛等,2009;毛东雷等,2016b;万的军等,2009)先后对南疆风沙天气进行研究,刘海涛等(2009)指出和田地区是沙尘暴的高发区,并且该区域之间沙尘暴发生分布不均匀。毛东雷等(2016a)对新疆南疆沙尘天气发生的变化趋势进行了探索,发现扬沙、浮尘、沙尘暴、大风天气在一定年限内符合函数关系且相关性较好。万的军等(2009)使用小波变换等方法,分析了近54年沙尘天气的变化特征,得出了沙尘天气发生的主周期变化规律,并预测沙尘天气有波动增多趋势。尽管在沙尘天气变化规律特征方面已做了相关探索,但对于沙尘天气发生的预测尚缺乏系统研究,预测精度方法也比较缺乏。

沙尘天气发生时间序列具有非线性和非平稳性等特点,影响因素众多且错综复杂(代刊等,2016),因此,大多针对线性、平稳序列的传统预测理论很难对其实现精确预测(朱玉祥等,2016;牛若芸等,2018)。然而,沙尘天气发生时序既具有周期性,又具有波动性,故可将其看作是多个不同频率分量的

层层叠加而成目标序列,且各高频分量和各低频分量之间具有相似的变化规律和周期,具有更强的可预测性(代刊等, 2016; 包红军等, 2016)。小波分解法的主要特点是将原始时间序列分解为多个高频率序列和低频率序列,然后针对各子序列的特点分别进行研究,从而实现原始时间序列的模拟,最终达到预测的目的(吴东杰等, 2004; 张自银等, 2018)。目前,小波分解已被广泛应用于各个领域,如地下水水位动态、大坝内部垂直位移、网络流量等(辛大鹏等, 2015; 况忠林和吴斌, 2010; Soltani, 2002),研究表明小波分解能降低预测误差,对非线性时间序列的预测精度较高(Soltani, 2002),因此,在利用小波分解对沙尘天气发生时序进行频域分解的基础上,根据各分量频率的特点构建模型,可显著提高模型的预测精度(庄潇然等, 2017; 谢品杰等, 2008; 吴捷等, 2017; Torres et al, 2005; More and Deo, 2003; 程正兴, 1998)。

本文通过小波分解法提取沙尘天气发生时序数据的细节特征,将沙尘天气发生时序数据划分为低频和高频分量,并结合最小二乘支持向量机理论(LSSVM)和自回归(AR)模型进行趋势预测,最后利用加法原则重构实现沙尘天气发生预测模型,可为研究区减少风沙灾害提供一定科学依据。

### 1 研究区概况

策勒沙漠-绿洲过渡带地处昆仑山北麓,位于中国最大的沙漠-塔克拉玛干沙漠南缘的中段(图 1, 35°17'55"~39°30'00"N, 80°03'24"~82°10'34"E),自然植被主要存在于过渡带东西两个方向,南部相连于流动沙丘和戈壁,属于典型的荒漠-绿洲型生态系统(曾凡江, 1999; 毛东雷等, 2013; 桂东伟等, 2011; 潘光耀等, 2014)。该地区干燥度为 20.8,其中,平均降水量仅 35.1 mm,平均蒸发量高达 2595.3 mm,昼夜温差较大,年均温日较差在 15℃以上(曾凡江, 1999; 毛东雷等, 2013; 桂东伟等, 2011),属于内陆暖温带荒漠气候,夏季炎热,干旱少雨(潘光耀等, 2014; 邢文娟等, 2008; 王翠等, 2014)。策勒沙漠-绿洲过渡带由于地处塔里木盆地南缘两大主导风向(西北、东北)的下风区域,风沙造成的灾害十分严重,多年平均沙尘日数 25.2 d,最多年份高达 59 d,每年 8 级以上大风 3~9 次,在历史上策勒县城曾因风沙灾害被迫迁移多达 3 次以上,

风沙灾害已经严重影响着当地居民的生活,且制约着社会经济的发展(桂东伟等, 2011)。揭示沙尘天气发生的变化规律,并预防风沙灾害对其生态环境和生产生活建设的影响,已显得极为重要(王翠等, 2014; 毛东雷等, 2016b; 白云岗等, 2005)。

### 2 研究方法

#### 2.1 时间序列组合预测模型

本文采用时间序列组合预测模型对策勒沙漠-绿洲过渡带 2008—2016 年共计 108 个月的沙尘天气发生时序进行建模统计分析,以 2008—2013 年共 72 个月的风沙数据作为模型训练数据,2014—2016 年共 36 个月的风沙数据作为模型验证数据,运用 MATLAB 软件对涉及数据进行建模分析。图 2 为

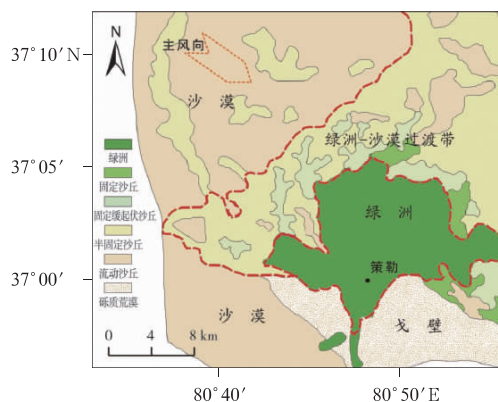


图 1 策勒绿洲-沙漠过渡带平面结构特征与空间格局(穆桂金等, 2013)  
Fig. 1 Structural characteristics and spatial pattern of the transitional zone from oasis to sandy desert at Qira, Xinjiang (Mu et al, 2013)

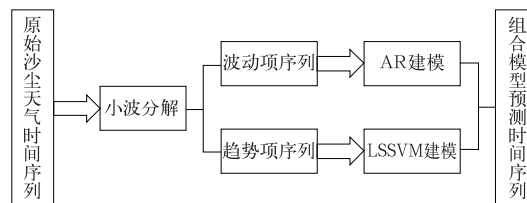


图 2 基于小波分解的研究区沙尘天气发生预测框架图  
Fig. 2 Framework diagram of dust weather prediction in study area based on wavelet decomposition

基于小波分解的研究区沙尘天气发生预测框架图。所用数据源于新疆策勒荒漠生态系统国家野外科学观测研究站。利用绝对误差 (absolute error, AE)、相关系数 (correlation coefficient, CC) 和均方根误差 (root mean square error, RMSE) 进行模型有效性评估。

## 2.2 小波分析

多分辨分析即多尺度分析, 是小波分解中非常重要的理论, 其原理是通过利用小波函数和尺度函数对数据进行合理分解, 然后在多尺度条件下逐级逼近目标信号, 最终得到所需的局部信号特征 (徐佩霞和孙功宪, 1996; 王晓兰等, 2008; 陈志忠, 2016)。

针对沙尘天气发生时序  $f(t)$ , 可利用 Mallat 算法 (徐佩霞和孙功宪, 1996) 对其进行分解和重构, 即将  $f(t)$  按照不同频率多层分解为低频的趋势项和高频的波动项。根据多分辨分析理论和小波分解方法, 设  $f(t) \in L^2(R)$ , 则可将数据展开为下式:

$$f(t) = \sum_{k \in Z} [f(t), \varphi_{j,k}] \varphi_{j,k}(t) + \sum_{j' \leq j \leq J} \sum_{k \in Z} [f(t), \Psi_{j',k}(t)] \Psi_{j',k}(t) \quad (1)$$

式中,  $c_{j,k} = [f(t), \varphi_{j,k}]$  为尺度系数,  $d_{j,k} = [f(t), \Psi_{j',k}(t)]$  为小波系数,  $t$  为序列的时间,  $j, k$  为小波分解层数,  $Z$  为整数集,  $\varphi$  为尺度函数,  $\Psi$  为小波函数。进一步用 Mallat 算法可计算出沙尘天气发生时序的尺度系数和小波系数如下式:

$$\begin{cases} c_{j,k} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{n \in Z} h_n c_{j+1, n+2k} \\ d_{j,k} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{n \in Z} g_n c_{j+1, n+2k} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $h_n$  为低通滤波器,  $g_n$  为高通滤波器,  $n$  为序列长度。

根据小波变换理论, 进行  $k$  层小波分解, 即可将原始序列分解为  $a_k, d_1, d_2, \dots, d_k$  共计  $k+1$  项, 其中  $a_k$  为低频分量,  $d_1, d_2, \dots, d_k$  为高频分量 (吴东杰等, 2004; 王晓兰等, 2008; 陈志忠, 2016)。沙尘天气发生时间序列在一定时间内呈现出持续增加、减少或稳定的变动趋势, 表现为非线性的趋势项, 可以将这种趋势项对应于小波分解后的低频分量  $a_k$ ; 沙尘天气发生时间序列又围绕长期趋势按固定周期表现出的一种波浪形或者振荡式变动, 表现为平稳性的波动项, 可以将这种平稳的波动项和小波分解

后高频分量  $d_1, d_2, \dots, d_k$  相对应 (李佰平等, 2016)。最终可得到的各子序列表达式为:

$$f(t) = a_k + d_1 + d_2 + \dots + d_k \quad (3)$$

式中,  $a_k$  为趋势项;  $d_i$  为波动项,  $i=1, 2, \dots, k$ ;  $k$  为小波分解层数。

小波分解过程中最重要的是选择小波基函数以及小波分层数, 本文经过综合考量和测试, 采用  $db$  小波基函数, 对策勒沙漠-绿洲过渡带沙尘天气发生时序分别做 3 层小波分解, 即小波分解将风沙数据序列分为  $a_3, d_1, d_2, d_3$  共计 4 项,  $d_1, d_2, d_3$  为近平稳的时间序列, 即波动项;  $a_3$  为非线性时间序列, 即趋势项。

## 2.3 波动项序列的模拟预测——AR 模型

AR 模型即自相关模型, 是一种针对具有线性相关特征数据的预测模型, 其中, 自相关性是基于判断时间序列的前提下, 依据自回归法对时间序列进行的预测, 然后建立适合该时间序列的自回归模型 (Torres et al, 2005)。本文采用 AR 模型中递推估计法中的 Yule-Walker 算法估计各阶模型参数, 以此得到各阶模型, 然后根据最终预测误差 (FPE) 准则, 计算各阶模型的 FPE 值, 最后取 FPE 第一个极小值对应的阶次来确定模型的最佳阶次, 以使最终预测误差最小, 同时确定 AR 模型。

将 2.2 节中小波分解后的近平稳沙尘天气发生时间序列的  $d_1, d_2, d_3$  三项分别进行 AR 建模, 并使用 Yule-Walker 算法估计各阶参数, 计算相应的 FPE 值。

根据 FPE 准则,  $d_1$  序列的 FPE 值在  $p=33$  时达到最小值, 故  $d_1$  序列的最佳模型阶次为 33; 对  $d_2$  序列, 选取阶次  $p=12$ ; 对  $d_3$  序列, 随模型阶次增加, 其 FPE 一直减小最终趋于平缓, 综合考虑模型的复杂性, 最终确定了其最佳模型阶次为 24 (图 3)。

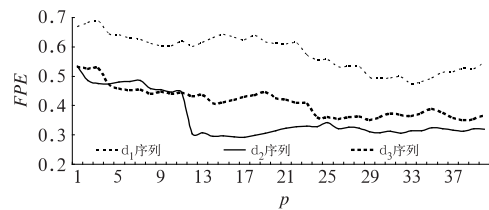


图 3 AR 模型各阶次 FPE 值

Fig. 3 The AR model of each order FPE value

对  $d_1$ 、 $d_2$  和  $d_3$  序列的三个 AR 模型进行预测性能评价,其均方根误差分别为 0.58、0.32 与 0.19 d,综上所述,AR 模型可以较好地对具有平稳性的波动项沙尘天气发生时序进行趋势预测。

### 2.4 非线性序列的模拟预测——LSSVM 建模

LSSVM 即最小二乘支持向量机,是由标准向量机演变而来的一种优化算法,相对于标准支持向量机,其最大的优势在于计算复杂性低(王晓兰等, 2008; 陈志忠, 2016; Bassom and Seddougui, 1995)。

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{X}_k \\ \vdots \\ \mathbf{X}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(1) & x(2) & \cdots & x[1+(m-1)\tau] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x(k) & x(k+1) & \cdots & x[k+(m-1)\tau] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x[n-(m-1)\tau] & x[n+1-(m-1)\tau] & \cdots & x(n) \end{bmatrix} \quad (4)$$

#### 2.4.2 模型参数的确定

包括对 LSSVM 的核函数进行选择并确定核函数的参数和调整参数(或称惩罚参数)(陈志忠, 2016; Bassom and Seddougui, 1995)。在确定模型参数前需要对输入向量进行归一化处理,降低复杂度,提高训练精度。选择径向基函数(RBF)作为 LSSVM 预测模型的核函数,通过交叉验证(cross validation)优化参数得到调整参数为 39.72,径向基的宽度参数为 9.60。

## 3 结果与分析

### 3.1 沙尘天气的变化特征

以策勒沙漠-绿洲过渡带 2008—2016 年沙尘天气发生类型及其平均日数的分布情况进行分析(图 4),由图可见,策勒沙漠-绿洲过渡带沙尘天气的发生具有一定规律性,主要集中在 3—9 月,属于典型的春夏型,具有明显的季节变化。3—9 月,浮尘、扬沙、沙尘暴日数分别占全年总日数的 84%、94%、93%,扬沙和沙尘暴的月分布表现得更为集中,扬沙主要分布在 3—8 月,沙尘暴主要集中在 4—7 月,5 月是全年沙尘天气发生最频繁时期,沙尘天气总数为 14.44 d,占全年总数的 47%,浮尘、扬沙和沙尘暴平均分别为 8.44、4.56、1.44 d。该地区 10 月至次年 2 月沙尘天气的发生日数较少,尤其是 1 月和 2 月沙尘天气发生最少。

将 2.2 节中经小波分解后的非线性时间序列  $a_3$  即趋势项进行 LSSVM 建模。

#### 2.4.1 构造输入向量

沙尘天气发生时序的  $a_3$  序列是一维数值,在 LSSVM 建模之前必须对其进行相空间重构,输入向量为相对应的相空间矩阵。

依次设三个指标  $a_3$  时间序列  $\{x(i), i=1, 2, \dots, n\}$ ,其延迟时间为  $\tau$ ,嵌入维数为  $m$ ,进行相空间重构得到以下形式的矩阵:

### 3.2 组合叠加建模

对沙尘天气发生序列的趋势项( $a_3$ )和波动项( $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$ )使用加法重构原则合并,并进行最终的风沙时间序列组合模型预测(图 5)。由图可见,组合模型预测值和实测值非常接近,2014—2016 年实际风沙天气发生日数与预测值 AE 为 4.00 d,CC 为 0.73, RMSE 为 3.76 d,因风沙时序中有 0,故不宜

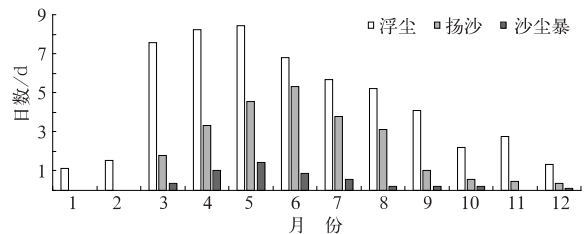


图 4 2008—2016 年策勒沙漠-绿洲过渡带沙尘天气平均日数的月变化  
Fig. 4 Monthly variation of average number of dust weather days in transitional zone of Qira desert-oasis from 2008 to 2016

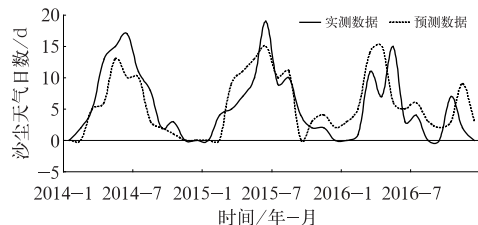


图 5 组合模型预测结果  
Fig. 5 Prediction results of combination model

采用相对误差来分析。针对沙尘天气发生为春夏型的特点,3—9月预测值与实际发生值 AE 为 6.00 d, CC 为 0.64, RMSE 为 4.93 d, 结果表明组合模型预测效果较好。

### 3.3 组合模型预测法与其他模型比较

为实现基于小波分解的组合模型预测法与其他方法的预测效果的比较,本文分别单独用 AR 模型以及 LSSVM 模型对策勒沙漠-绿洲过渡带 2008—2016 年风沙天气发生时序进行了模拟和预测,并选择 AE、CC 和 RMSE 作为评价指标。

AR 模型单独预测采用的训练数据和验证数据与组合模型相同。根据 FPE 准则,沙尘天气日数发生序列的 FPE 值在  $p=14$  时达到最小值,故 AR 模型单独最佳模型阶次为 14; LSSVM 模型预测采用的训练数据和验证数据也同组合模型相同。对输入的向量进行归一化处理,降低复杂度,确定模型参数。LSSVM 预测模型的核函数是 RBF,通过交叉验证优化参数得到调整参数为 3.29,径向基的宽度参数为 1.97。

基于已确定的模型参数值,对三种预测模型模拟的 2014—2016 年沙尘天气发生日数数值进行分析比较:

对以上三种模型预测的沙尘天气发生日数与实测值变化曲线(图 6)进行分析,由图可见,组合模型与实测值拟合程度较好,预测精度高,可更好地预测沙尘天气发生日数变化趋势。进一步对三种方法的预测精度进行评估。

三种模型的预测精度特征参数如表 1 所示。由表 1 可知,组合模型的 AE 为 4.00 d,比 AR 模型和 LSSVM 模型分别少 40.00、99.00 d,说明其模拟预测结果与实测值更接近;组合模型的 CC 为 0.73,比 AR 模型和 LSSVM 模型提高了 0.12、0.31,表明组合模型预测结果与实测值的相关程度更高;组合模型的 RMSE 为 3.76 d,比 AR 模型和 LSSVM 模型

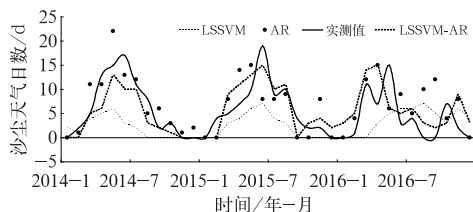


图 6 三种预测模型比较

Fig. 6 Comparison of three prediction models

表 1 三种预测模型特征参数比较

Table 1 Comparison of characteristic parameters of three forecasting models

预测方法	AE/d	CC	RMSE/d
AR	44.00	0.61	4.99
LSSVM	103.00	0.42	5.69
组合模型	4.00	0.73	3.76

分别降低 1.23、1.93 d,表明组合模型预测精度更高。综合以上三个指标的分析,组合模型相对于 AR 模型、LSSVM 模型在对策勒沙漠-绿洲过渡带沙尘天气发生日数的预测上更具有优越性。

## 4 结论与讨论

沙尘天气的发生频率对于策勒沙漠-绿洲过渡带的生态环境,人类生产生活以及社会经济发展等具有重要的影响。沙尘天气发生时间序列具有非线性和非平稳性等特点,传统的数理统计方法,比如 AR 模型研究的是平稳序列,差分自回归滑动平均模型 (ARIMA) 虽然研究的是非平稳序列,但其本质上是把非平稳序列经过差分处理使其转换成平稳序列,转换过程存在一定误差(段静鑫等, 2018; 况忠林和吴斌, 2010; 余君等, 2018),因此,此类方法很难对其实现准确的趋势预测(吴东杰等, 2004; 辛大鹏等, 2015)。然而,小波分解法可将原始的非线性和非平稳性的沙尘天气发生时序数据分解为低频、非线性的趋势项以及高频、平稳的波动项,通过运用 LSSVM 模型和 AR 模型分别对非线性趋势项和平稳波动项进行预测,最后利用加法原则重构实现沙尘天气发生预测。此组合模型结合沙尘天气发生时序数据的特点,对分解后的各高频分量和低频分量的特点分别建模,可显著提高模型的预测精度。

本文采用 AR-LSSVM 时间序列组合预测模型对沙尘天气发生日数时序进行模拟和预测,得到最终绝对误差为 4.00 d,相关系数为 0.73,均方根误差为 3.76 d,与实测值较为接近,预测精度较高。因此,组合预测模型对分析沙尘天气发生日数的预测比较准确,在一定程度上较好地反映出其未来变化趋势,对策勒沙漠-绿洲过渡带生态环境的改善以及实际生产生活具有理论指导意义。同时,组合模型存在一定的不足,其将原始序列分解为四个子序列  $a_3$ 、 $d_1$ 、 $d_2$  和  $d_3$  分别建模,模型的复杂度增加,小波分解的层数需要人为设定,一方面要考虑分解的精度,分解层数越多,对原始序列的重构效果越好,但分解层数越多得到的子序列越多,模型会变得更加

复杂。今后可以从降低模型的复杂度出发,一方面寻找更加易操作的序列分解模型,另一方面使用更加简单的模型对分解后的子序列进行建模。

## 参考文献

- 安林昌,张恒德,桂海林,等,2018.2015年春季华北黄淮等地一次沙尘天气过程分析[J].气象,44(1):180-188. An L C,Zhang H D, Gui H L, et al,2018. Analysis of a sand and dust weather process affecting North China and Huanghuai in spring 2015 [J]. Meteor Mon,44(1):180-188 (in Chinese).
- 白云岗,宋郁东,张建军,等,2005.近40a来塔里木盆地沙尘暴气候时空变化分析[J].干旱区资源与环境,19(5):42-45. Bai Y G, Song Y D,Zhang J J, et al,2005. Spatial-temporal distribution of sandstorm weather trend in Tarim Basin in recent 40 years[J]. J Arid Land Resour Environ,19(5):42-45 (in Chinese).
- 包红军,王莉莉,沈学顺,等,2016.气象水文耦合的洪水预报研究进展[J].气象,42(9):1045-1057. Bao H J,Wang L L,Shen X S, et al,2016. A review:advances of flood forecasting of hydro-meteorological forecast technology[J]. Meteor Mon,42(9):1045-1057 (in Chinese).
- 陈志忠,2016.基于时间序列组合模型的河川年径流预测[J].水利规划与设计,(11):60-62,83. Chen Z Z,2016. Prediction of river annual runoff based on time series combination model[J]. Water Resour Plann Des,(11):60-62,83 (in Chinese).
- 程正兴,1998.小波分析算法与应用[M].西安:西安交通大学出版社:1-10. Cheng Z X,1998. Wavelet Analysis Algorithm and its Application[M]. Xi'an:Xi'an Jiaotong University Press:1-10 (in Chinese).
- 代刊,曹勇,钱奇峰,等,2016.中短期数字化天气预报技术现状及趋势[J].气象,42(12):1445-1455. Dai K,Cao Y,Qian Q F, et al,2016. Situation and tendency of operational technologies in short- and medium-range weather forecast[J]. Meteor Mon,42(12):1445-1455 (in Chinese).
- 段静鑫,赵天良,徐祥德,等,2018.四川暴雨过程中盆地地形作用的数值模拟[J].应用气象学报,29(3):307-320. Duan J X,Zhao T L,Xu X D, et al,2018. Simulation of basin topography impacts on rainstorm in Sichuan[J]. J Appl Meteor Sci,29(3):307-320 (in Chinese).
- 桂东伟,雷加强,曾凡江,等,2011.绿洲农田土壤粒径分布特征及其影响因素分析——以策勒绿洲为例[J].土壤,43(3):411-417. Gui D W,Lei J Q,Zeng F J, et al,2011. Characterizing soil particle-size distribution and its variation in farmland of oasis—a case study of Cele Oasis[J]. Soils,43(3):411-417 (in Chinese).
- 何毅,杨太保,陈杰,等,2015.1955—2012年南北疆气温、降水及相对湿度趋势分析[J].水土保持研究,22(2):269-277. He Y, Yang T B,Chen J, et al,2015. Long-term trend of temperature, precipitation and relative humidity in the northern and southern regions of the Xinjiang from 1955 to 2012[J]. Res Soil Water Conserv,22(2):269-277 (in Chinese).
- 况忠林,吴斌,2010.基于Wavelet\_AR的网络异常检测[J].微计算机信息,26(6):73-75. Kuang Z L,Wu B,2010. Network traffic anomaly detection based on Wavelet\_AR[J]. Microcomput Inf, 26(6):73-75 (in Chinese).
- 李佰平,戴建华,张欣,等,2016.三类强对流天气临近预报的模糊检验试验与对比[J].气象,42(2):129-143. Li B P,Dai J H,Zhang X, et al,2016. Fuzzy verification test and comparison of three types of severe convective weather nowcasting[J]. Meteor Mon, 42(2):129-143 (in Chinese).
- 廖要明,王凌,王遵娅,等,2016.2015年中国气候主要特征及主要天气气候事件[J].气象,42(4):472-480. Liao Y M,Wang L,Wang Z Y, et al,2016. Climatic characteristics and major meteorological events over China in 2015[J]. Meteor Mon,42(4):472-480 (in Chinese).
- 林永崇,徐立帅,2017.策勒绿洲-沙漠过渡带风成沉积物粒度的空间变化[J].应用生态学报,28(4):1337-1343. Lin Y C,Xu L S,2017. Spatial change of the grain-size of aeolian sediments in Qira oasis-desert ecotone,Northwest China[J]. Chin J Appl Ecol, 28(4):1337-1343 (in Chinese).
- 刘海涛,张向军,李盈奎,等,2009.和田地区沙尘暴天气的时空分布特征[J].干旱区资源与环境,23(5):85-89. Liu H T,Zhang X J, Li Y K, et al,2009. The time-space distribution characteristics of sandstorm weather in Hotan Region[J]. J Arid Land Resour Environ,23(5):85-89 (in Chinese).
- 毛东雷,蔡富艳,方登先,等,2018.新疆策勒绿洲-沙漠过渡带风沙运动沙尘物质粒径分形特征[J].土壤学报,55(1):88-99. Mao D L,Cai F Y,Fang D X, et al,2018. Fractal characteristics of grain size of sand and dust in aeolian sand movement in Cele oasis-desert ecotone in Xinjiang,China[J]. Acta Pedol Sin,55(1):88-99 (in Chinese).
- 毛东雷,蔡富艳,雷加强,等,2016a.新疆策勒河下游塔克拉玛干沙漠南缘风沙活动特征[J].干旱区资源与环境,30(7):169-174. Mao D L,Cai F Y,Lei J Q, et al,2016a. The characteristics of aeolian activity on sand-blown frontier in lower reaches of Cele River,Xinjiang[J]. J Arid Land Resour Environ,30(7):169-174 (in Chinese).
- 毛东雷,蔡富艳,薛杰,等,2016b.新疆和田策勒1960—2013年沙尘天气变化趋势[J].干旱区资源与环境,30(2):164-169. Mao D L,Cai F Y,Xue J, et al,2016b. The changing trend for sand-blowing and floating dust weathers between 1960 and 2013 in Cele of Hotan Area,Xinjiang[J]. J Arid Land Resour Environ,30(2):164-169 (in Chinese).
- 毛东雷,雷加强,李生宇,等,2013.策勒绿洲-沙漠过渡带小气候的空间差异[J].中国沙漠,33(5):1501-1510. Mao D L,Lei J Q,Li S Y, et al,2013. Spatial difference of microclimate in the oasis-desert ecotone in Cele,Xinjiang,China[J]. J Des Res,33(5):1501-1510 (in Chinese).
- 穆桂金,贺俊霞,雷加强,等,2013.再议绿洲-沙漠过渡带——以策勒绿洲-沙漠过渡带为例[J].干旱区地理,36(2):195-202. Mu G J,He J X,Lei J Q, et al,2013. A discussion on the transitional zone from oasis to sandy desert;a case study at Cele Oasis[J]. Arid Land Geogr,36(2):195-202 (in Chinese).
- 牛若芸,刘凑华,刘为一,等,2018.1981—2015年中国95°E以东区域性暴雨过程时空分布特征[J].气象学报,76(2):182-195. Niu R Y,Liu C H,Liu W Y, et al,2018. Characteristics of temporal and spatial distribution of regional rainstorm processes to

- the east of 95°E in China during 1981—2015[J]. *Acta Meteor Sin*, 76(2):182-195 (in Chinese).
- 潘光耀, 穆桂金, 岳健, 等, 2014. 2001—2010 年策勒绿洲-沙漠过渡带的变化及其成因[J]. *干旱区研究*, 31(1):169-175. Pan G Y, Mu G J, Yue J, et al, 2014. Change of the oasis-desert ecotone and its causes in Qira County during the period of 2001—2010 [J]. *Arid Zone Res*, 31(1):169-175 (in Chinese).
- 万的军, 穆桂金, 雷加强, 等, 2009. 塔里木盆地南缘近 54 年沙尘天气的变化特征及其未来趋势预测[J]. *干旱区资源与环境*, 23(9):78-84. Wan D J, Mu G J, Lei J Q, et al, 2009. The changing characteristic of sand-dust weather in recent 54 years and future trend forecast in the southern margin of Tarim Basin[J]. *J Arid Land Resour Environ*, 23(9):78-84 (in Chinese).
- 王翠, 雷加强, 李生宇, 等, 2013. 新疆策勒绿洲-沙漠过渡带花花柴 (*Karelinia caspica*) 沙堆的形态特征[J]. *中国沙漠*, 33(4):981-989. Wang C, Lei J Q, Li S Y, et al, 2013. Morphological characteristics of *Karelinia Caspica* Nebkhas in the oasis-desert ecotone in Cele, Xinjiang, China[J]. *J Desert Res*, 33(4):981-989 (in Chinese).
- 王翠, 雷加强, 李生宇, 等, 2014. 策勒绿洲-沙漠过渡带风沙流挟沙粒度的垂直分异[J]. *干旱区地理*, 37(2):230-238. Wang C, Lei J Q, Li S Y, et al, 2014. Vertical distribution of grain size in aeolian flow in Cele oasis-desert ecotone[J]. *Arid Land Geogr*, 37(2):230-238 (in Chinese).
- 王晓兰, 张万宏, 王慧中, 2008. 基于小波变换和 AR-LSSVM 的非平稳时间序列预测[J]. *控制与决策*, 23(3):357-360. Wang X L, Zhang W H, Wang H Z, 2008. Non-stationary time series prediction based on wavelet analysis and AR-LSSVM[J]. *Control Decis*, 23(3):357-360 (in Chinese).
- 吴东杰, 王金生, 滕彦国, 2004. 小波分解与变换法预测地下水水位动态[J]. *水利学报*, 35(5):39-45. Wu D J, Wang J S, Teng Y G, 2004. Application of wavelet decomposition and wavelet transform method to forecasting of groundwater regime [J]. *J Hydraul Eng*, 35(5):39-45 (in Chinese).
- 吴捷, 任宏利, 张帅, 等, 2017. BCC 二代气候系统模式的季节预测评估和可预报性分析[J]. *大气科学*, 41(6):1300-1315. Wu J, Ren H L, Zhang S, et al, 2017. Evaluation and predictability analysis of seasonal prediction by BCC second-generation climate system model[J]. *Chin J Atmos Sci*, 41(6):1300-1315 (in Chinese).
- 谢品杰, 谭忠富, 尚金成, 等, 2008. 基于小波分析与广义自回归条件异方差模型的短期电价预测[J]. *电网技术*, 32(16):96-100. Xie P J, Tan Z F, Shang J C, et al, 2008. Short-term electricity price forecasting based on wavelet transform and generalized autoregressive conditional heteroskedasticity model [J]. *Power Syst Technol*, 32(16):96-100 (in Chinese).
- 辛大鹏, 田林亚, 沈哲辉, 2015. 小波分解 AR-BP 网络模型在大坝垂直位移预测中的应用[J]. *测绘工程*, 24(12):53-56. Xin D P, Tian L Y, Shen Z H, 2015. Application of AR-BP network model to the prediction of vertical displacement of dam[J]. *Eng Surv Mapp*, 24(12):53-56 (in Chinese).
- 邢文娟, 雷加强, 王海峰, 等, 2008. 荒漠-绿洲过渡带风况及输沙势分析——以策勒县为例[J]. *干旱区研究*, 25(6):894-898. Xing W J, Lei J Q, Wang H F, et al, 2008. Analysis on wind regime and wind borne sand potential in a desert-oasis ecotone—A case study in Qira County, Xinjiang[J]. *Arid Zone Res*, 25(6):894-898 (in Chinese).
- 徐佩霞, 孙功宪, 1996. 小波分析与应用实例[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社. Xu P X, Sun G X, 1996. *An Example of Wavelet Analysis and Application*[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press (in Chinese).
- 余君, 李庆祥, 张同文, 等, 2018. 基于贝叶斯模型的器测、古气候重建与气候模拟数据的融合试验[J]. *气象学报*, 76(2):304-314. Yu J, Li Q X, Zhang T W, et al, 2018. The merging test using measurements, paleoclimate reconstruction and climate model data based on Bayesian model[J]. *Acta Meteor Sin*, 76(2):304-314 (in Chinese).
- 曾凡江, 1999. 策勒绿洲生态系统的可持续发展对策[J]. *干旱区研究*, 16(1):29-34. Zeng F J, 1999. The countermeasures of sustainable development in Cele oasis ecosystem, Xinjiang[J]. *Arid Zone Res*, 16(1):29-34 (in Chinese).
- 张自银, 赵秀娟, 熊亚军, 等, 2018. 基于动态统计预报方法的京津冀雾霾中期预报试验[J]. *应用气象学报*, 29(1):57-69. Zhang Z Y, Zhao X J, Xiong Y J, et al, 2018. The fog/haze medium-range forecast experiments based on dynamic statistic method[J]. *J Appl Meteor Sci*, 29(1):57-69 (in Chinese).
- 郑红莲, 严军, 元慧慧, 2010. 南疆地区近 58 年气温、降水变化特征分析[J]. *干旱区资源与环境*, 24(7):103-109. Zheng H L, Yan J, Yuan H H, 2010. Analysis of temperature and precipitation of southern Xinjiang in last 58 years[J]. *J Arid Land Resour Environ*, 24(7):103-109 (in Chinese).
- 周自江, 王锡稳, 牛若芸, 2002. 近 47 年中国沙尘暴气候特征研究[J]. *应用气象学报*, 13(2):193-200. Zhou Z J, Wang X W, Niu R Y, 2002. Climate characteristics of sandstorm in China in recent 47 years[J]. *J Appl Meteor Sci*, 13(2):193-200 (in Chinese).
- 朱玉祥, 黄嘉佑, 丁一汇, 2016. 统计方法在数值模式中应用的若干新进展[J]. *气象*, 42(4):456-465. Zhu Y X, Huang J Y, Ding Y H, 2016. Some new advances in application of statistical methods to numerical models[J]. *Meteor Mon*, 42(4):456-465 (in Chinese).
- 庄潇然, 闵锦忠, 王世璋, 等, 2017. 风暴尺度集合预报中的混合初始扰动方法及其在北京 2012 年“7. 21”暴雨预报中的应用[J]. *大气科学*, 41(1):30-42. Zhuang X R, Min J Z, Wang S Z, et al, 2017. A blending method for storm-scale ensemble forecast and its application to Beijing extreme precipitation event on July 21, 2012[J]. *Chin J Atmos Sci*, 41(1):30-42 (in Chinese).
- Bassom A P, Seddougui S O, 1995. Receptivity mechanisms for Görtler vortex modes[J]. *Theoret Comput Fluid Dyn*, 7(5):317-339.
- More A, Deo M C, 2003. Forecasting wind with neural networks[J]. *Mar Struct*, 16(1):35-49.
- Soltani S, 2002. On the use of the wavelet decomposition for time series prediction[J]. *Neurocomputing*, 48(1-4):267-277.
- Torres J L, García A, De Blas M, et al, 2005. Forecast of hourly average wind speed with ARMA models in Navarre[J]. *Sol Energy*, 79(1):65-77.