

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.021

基于 SARIMA 模型和条件植被温度指数的干旱预测*

田苗¹ 王鹏新¹ 韩萍² 张树誉³(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学理学院, 北京 100193;
3. 陕西省气象局, 西安 710015)

摘要: 基于时间序列遥感数据反演的条件植被温度指数(VTCI)干旱监测结果,应用季节性求和自回归移动平均模型(SARIMA)对关中平原进行了分区域干旱预测建模,得到了2009年4月上旬至5月下旬每旬1步、2步和3步共18旬的预测结果,并分析了预测精度。结果表明,SARIMA模型的预测精度随着预测步数的增加而降低,6旬1步预测结果的绝对误差频数分布基本是单峰分布,主要分布在-0.2到0.2之间;6旬2步预测结果的绝对误差频数分布出现双峰分布,3步预测结果绝对误差分布分散,且误差变大。通过分析干旱的时空分布规律,发现关中平原地区干旱具有较明显的区域特征,且1步预测和2步预测结果的干旱时空分布与监测结果较吻合,3步预测结果的不确定性较大,由此得出SARIMA模型适用于关中平原VTCI 1~2步预测研究的结论。

关键词: 关中平原 干旱预测 条件植被温度指数 季节性求和自回归移动平均模型

中图分类号: S165 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)02-0109-08

Drought Forecasts Based on SARIMA Models and Vegetation Temperature Condition Index

Tian Miao¹ Wang Pengxin¹ Han Ping² Zhang Shuyu³(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. College of Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China
3. Shaanxi Provincial Meteorological Bureau, Xi'an 710015, China)

Abstract: Based on the time series of drought monitoring results of vegetation temperature condition index (VTCI), the seasonal autoregressive integrated moving average (SARIMA) models were applied to forecast agricultural droughts in the Guanzhong plain of China. The droughts were forecasted from early April to late May, 2009, and there were six step-1 forecasting results, six step-2 forecasting results and six step-3 forecasting results. The results show that the forecasting accuracies of the SARIMA models are gradually decreased with the increase of the forecasting steps. The distributions of absolute errors of the six step-1 forecasting results were basically in unimodal distributions and the errors were mainly in the range from -0.2 to 0.2. The six step-2 absolute errors were in bimodal distributions, and the errors of the step-3 were more scattered and larger. After analysis of drought spatial and temporal distributions in the Guanzhong plain, the droughts have obvious regional characteristics, and the forecasting drought spatial of step-1 and step-2 and temporal distributions are consistently better to the monitoring ones. The step-3 forecasting results have more uncertainties. The SARIMA model can be used for drought forecasting of step-1 and step-2 in the Guanzhong plain.

Key words: Guanzhong plain Drought forecast Vegetation temperature condition index Seasonal autoregressive integrated moving average model

收稿日期: 2012-08-22 修回日期: 2012-09-01

* 国家自然科学基金资助项目(41071235, 40871159)、“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAH29B03)和高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20100008110031)

作者简介: 田苗, 博士生, 主要从事定量遥感及其在干旱预测中的应用研究, E-mail: tm1304207@126.com

通讯作者: 王鹏新, 教授, 博士生导师, 主要从事定量遥感及其在农业中的应用研究, E-mail: wangpx@cau.edu.cn

引言

干旱对农业的影响较大,每年各种自然灾害造成的粮食作物减产损失中,旱灾的影响占一半以上。提高农业干旱灾害风险评价和预测能力能够为农业旱灾的防灾减灾等提供科学依据和指导。

干旱指标是用来评估干旱程度的指标,包括干旱强度、持续时间和空间范围等^[1],是进行干旱预测和防灾减灾的基础,对干旱预测的精度和适用性产生很大的影响。基于气象和水文数据的干旱监测方法观测记录资料连续,但由于站点稀少,区域代表性不强。遥感技术的出现,尤其是与地理信息系统和全球定位系统相结合,能够实现一个区域实时的、动态的干旱监测。遥感反演的归一化植被指数(NDVI)和地表温度(LST)常用于监测与植物生长有关的农业干旱,并在此基础上发展了距平植被指数(AVI)和条件温度指数(TCI)等^[2~5]。由于单独使用地表温度和植被指数的干旱监测方法均有一定的局限性,因此综合应用地表温度和植被指数的方法应运而生^[6~8]。王鹏新等^[9~10]基于LST和NDVI的散点图呈三角形区域分布的假设,提出了条件植被温度指数(VTCI),并经过多年的研究证实VTCI是一种可行的、适合于关中平原的近实时的干旱监测指标^[11]。

用于预测的模型较多,包括指数平滑法、熵值组织法、自回归分析、隐马尔可夫模型(HMM)和求和自回归移动平均(ARIMA)模型等^[12]。其中,ARIMA模型是由Box和Jenkins提出的一个著名时间序列预测方法,又称为Box-Jenkins模型^[13],已在很多领域得到了广泛的应用^[14~18]。

本文在VTCI干旱监测结果的基础上,应用时间序列分析模型——季节性求和自回归移动平均模型(Seasonal autoregressive integrated moving average, SARIMA),对关中平原的干旱进行预测,并根据监测结果和预测结果分析模型的预测精度。

1 研究区域和数据预处理

1.1 研究区域

关中平原位于陕西省中部,为典型的大陆性季风气候区,属暖温带半湿润气候,降水量较少,年平均降水量为550~700 mm,年平均气温为12~13℃。冬小麦的最早时段为每年的4~6月,此间降水量少,蒸发大,土壤水分损失严重,1900~2000年,关中地区发生旱灾53次,以春旱和夏旱次数最多,关中地区中部和东部为旱灾的高发区,其中渭南地区干旱的发生次数远远高于其他地区^[19]。研究关中

地区干旱发生和发展的规律,并对当地未来旱情进行有效的预测,对当地粮食生产、社会稳定有着相当重要的作用。

1.2 数据预处理

采用关中平原地区的NOAA/AVHRR(2000~2009年)数据,应用ERDAS等商业软件和课题组开发的AVHRR几何粗校正模块,结合已有的数据处理系统和大气校正软件模块等,对NOAA/AVHRR数据进行定标、辐射校正、AVHRR亮度温度的临边变暗订正、大气校正和几何校正。应用课题组开发的AVHRR-LST反演算法以及已有的NDVI算法,计算了空间分辨率为1.1 km的NDVI和LST;利用多年的某一旬的NDVI和LST最大值合成产品,应用最大值合成技术分别生成多年的旬NDVI和LST最大值合成产品;对多年某一旬的LST最大值合成产品,逐像素取最小值,生成多年的旬LST最大-最小值合成产品。

VTCI的定义为^[9~10]

$$V = \frac{L_{N_{i,max}} - L_{N_i}}{L_{N_{i,max}} - L_{N_{i,min}}} \quad (1)$$

其中 $L_{N_{i,max}} = a + bN_i$ (2)

$$L_{N_{i,min}} = a' + b'N_i \quad (3)$$

式中 N ——归一化植被指数

L ——地表温度

L_{N_i} ——某一像素的NDVI值为 N_i 时的地表温度

a, b, a', b' ——待定系数,由研究区域的NDVI和LST散点图近似获得

VTCI的取值范围为 $[0, 1]$,VTCI值越小,干旱程度越严重;VTCI值越大,干旱程度越轻或没有旱情的发生。

VTCI的定义既考虑了区域内NDVI的变化,又考虑了在NDVI相同条件下LST的变化。确定冷边界和热边界是计算VTCI的关键。在王鹏新等^[8]的早期研究中,选择陕西关中平原地区天空晴朗时卫星过境时的6 d AVHRR数据,首先生成每天的NDVI和LST影像,然后用最大值合成法生成旬NDVI和LST的最大值合成影像,基于NDVI和LST的最大值合成影像生成散点图,确定冷、热边界。上述方法确定的热边界比较合理,但是冷边界通常会高于实际情况。孙威等^[11]对VTCI冷、热边界的确定方法进行了完善,提出应用多年的旬NDVI最大值合成产品和LST最大-最小值合成产品确定每旬多年共同冷边界的方法,并通过气象网站的降水量资料对多年VTCI干旱监测结果进行了验证。

根据VTCI计算方法生成了2000~2009年每年

3~5月以旬为单位的 VTCI 时间序列数据。由于云的影响,导致部分旬数据或某些旬部分像素数据缺失,采用三次样条插值法对全部缺失或部分缺失的数据进行插补,得到等时间间隔的 VTCI 时间序列数据。图1是2006年5月上旬部分像素缺失数据插补结果。

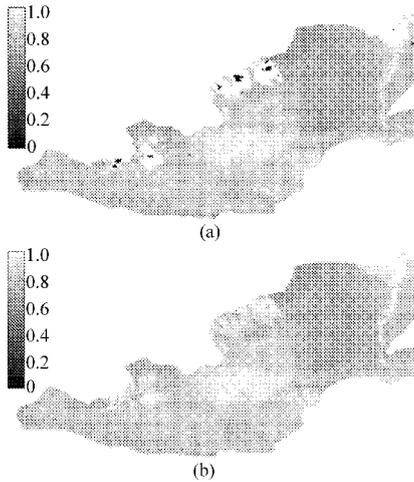


图1 2006年5月上旬插补结果

Fig.1 Interpolation results of the first ten days in May, 2006

(a) 插值前 (b) 插值后

2 SARIMA 模型原理

ARIMA 模型的基本思想是通过研究时间序列的有序性以及序列观测值之间的依存关系,建立较精确的反映时间序列中所包含的动态依存关系的数学模型,并利用该模型预测序列未来的变化^[13]。对于既含有趋势性又含有季节性变化的非平稳时间序列,可进行 d 阶逐期差分以消除趋势性,再进行 D 阶季节性差分以消除季节性变化特征,将序列转换为平稳时间序列进行建模。模型表示为 $ARIMA(p, d, q)(P, D, Q)_S$, 其中 p 和 q 为自回归移动平均的阶次, P 和 Q 为季节性因素的自回归移动平均的阶次, S 为季节性周期长度。模型形式为

$$\nabla^d \nabla_S^D X_t = \frac{\theta(B)\Theta_S(B)}{\phi(B)\Phi_S(B)} a_t \quad (4)$$

其中

$$\begin{aligned} \theta(B) &= 1 - \theta_1 B - \dots - \theta_q B^q \\ \phi(B) &= 1 - \phi_1 B - \dots - \phi_p B^p \\ \Theta_S(B) &= 1 - \Theta_1 B^S - \dots - \Theta_Q B^{QS} \\ \Phi_S(B) &= 1 - \Phi_1 B^S - \dots - \Phi_P B^{PS} \\ B^k X_t &= X_{t-k} \end{aligned} \quad (5)$$

式中 ∇^d 、 ∇_S^D ——序列经过 d 阶逐期差分 and 周期为 S 的 D 阶季节差分

a_t ——白噪声序列 B ——后移算子

ϕ_i 、 θ_i 、 Θ_i 、 Φ_i ——模型参数

模型的建模过程包括以下几个步骤:

(1) 模型识别:模型识别即确定 p, q, d 和 P, Q, D 的值,可以根据某一时间序列的自相关函数(ACF)和偏自相关函数图(PACF)确定。自相关图是由延迟时期数 k 和自相关函数构成的二维平面图。统计理论证明,ACF 和 PACF 的抽样分布,均值近似为零,标准差为 $1/\sqrt{n}$ 的正态分布,取显著水平 5%,则自相关函数和偏自相关函数的 95% 置信区间为 $(-2/\sqrt{n}, 2/\sqrt{n})$, 这里 n 是时间序列中所含数据的总数。在延迟时期数 $k > 3$ 后自相关函数都落入置信区间,并且逐渐趋于零,则该时间序列可判定为平稳序列;若有更多的自相关函数落入置信区间外,则可判定为非平稳序列。若序列为非平稳序列,则进行 d 阶差分,直到时间序列变为平稳序列为止。 p 和 q 的确定可以根据自相关函数和偏自相关函数图,如果时间序列的自相关函数拖尾,而偏自相关函数在 p 步截尾,则序列可建立 $AR(p)$ 模型;如果时间序列的偏自相关函数拖尾,而自相关函数在 q 步截尾,则序列可建立 $MA(q)$ 模型;如果时间序列的自相关函数拖尾,而偏自相关函数也拖尾,则序列可建立 $ARMA(p, q)$ 模型。 D, P 和 Q 确定的方法与 d, p 和 q 相同,只是在观察自相关函数和偏自相关函数时,仅分析季节变化的情况。

确定 p 和 q 的过程分两步,首先利用时间序列的自相关图和偏自相关图确定 p 和 q 的取值范围,再根据 AIC (Akaike's information criterion) 准则对 p 和 q 进行优选。AIC 准则是利用似然函数估计值最大的原则来确定适用的模型,与极大似然函数相对应的是最小信息,因此又称为最小信息准则。AIC 准则的定义为

$$R_{AIC} = -2\ln L(\hat{\beta}) + 2\omega \quad (6)$$

式中 ω ——模型参数个数

$L(\hat{\beta})$ ——极大似然函数值

R_{AIC} 值最小的模型被认为是最优模型。

(2) 参数估计:模型识别完成后,对选定的模型进行参数估计,极大似然估计的优点是充分应用了每一个观察值所提供的信息,具有估计的一致性、渐近正态性和渐近有效性等优点。因此采用极大似然法对式(4)中的模型参数进行估计。

(3) 模型的显著性检验:参数估计后,判断残差序列是否为白噪声序列。Box 等^[13]提出了 Q_{LB} 检验统计量,近似服从自由度为 m 的 χ^2 分布,即

$$Q_{LB} = n(n+2) \sum_{k=1}^m \frac{\rho^2(k)}{n-k} \sim \chi^2(m) \quad (7)$$

式中 n ——序列总数

m ——指定延迟时期数

$\rho(k)$ ——残差序列的自相关系数

选取显著水平 $\alpha = 5\%$,若当检验统计量大于 $\chi^2_{1-\alpha}(m)$ 分位点,则拒绝原假设,认为残差序列中还有大量的相关信息,需要重新拟合模型;否则认为拟合模型显著有效。

(4) 模型预测:经过步骤(1)~(3),就获得了一个适宜的预测模型。时间序列的 l 步预测是指:如果 X_t 已知,要求对 $t+l(l>0)$ 未来数值 X_{t+l} 进行预测,该预测值用 $X_t(l)$ 表示,并称为在起始时刻 t 向前 l 步的预测值。可以证明最佳预测值 $X_t(l)$ 就是 X_{t+l} 的条件期望。

3 建模过程与结果分析

3.1 参数确定

将 2000 年 3 月上旬到 2009 年 3 月下旬的 VTCI 数据作为分析建模数据,2009 年 4 月上旬至 5 月下旬的数据作为检验数据,对预测模型的有效性和预测精度进行检验。研究区域的 VTCI 数据是场时间序列。对 VTCI 序列进行预测,需要分析研究区域中各个像素的时间序列 VTCI 随时间的变化规律,并分别建立适合的预测模型。而 SARIMA 模型建模过程复杂,难以对每个像素进行建模,并且遥感面上数据相邻像素之间具有相关性,本文采用的方法是对研究区域进行分区处理,研究每个分区有代表性的时间序列 VTCI 的变化规律,再对整个区域所有像素的时间序列 VTCI 进行预测。

选用分布在整个关中平原的 17 个气象站点所在像素的时间序列 VTCI 作为代表,将整个研究区域分成 17 个部分(图 2),从而确定各部分的模型形式。选用气象站点的优点是可以参照这些像素的气象数据,更好地分析时间序列 VTCI 的变化规律,其次是这些站点具有一定的区域代表性,且较为均匀地分布在整个关中平原。图 2 中的文字为该分区的气象站点名称,实线为行政区划线,不同颜色代表不同分区。图 3 为 17 个气象站的 VTCI 时间序列。

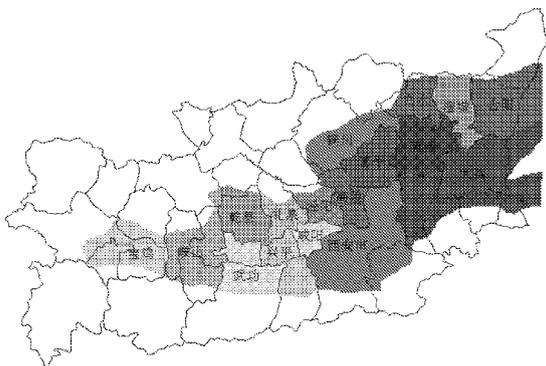


图 2 关中平原分区示意图

Fig. 2 Division scheme of Guanzhong plain

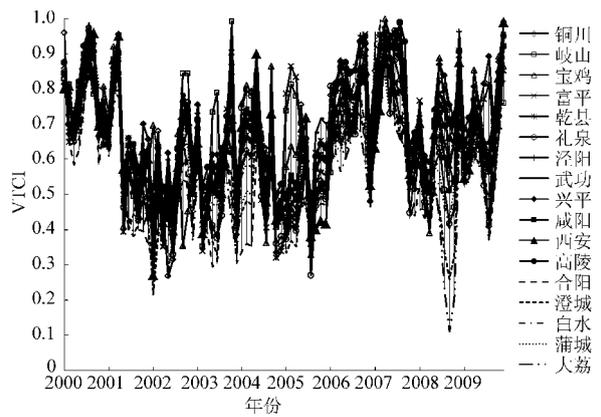


图 3 17 个气象站的 VTCI 时间序列

Fig. 3 Time series of VTCI in 17 weather stations

步建模与分析。通过时序图和 ACF 判断该 VTCI 时间序列是非平稳的(图 4),需要对其进行一阶差分,由时间序列的物理意义可知,它是由 10 年中每年 9 旬的 VTCI 数据组成的,每 9 个数据之间应该具有相关性,即具有季节性,且周期为 9,对一阶差分后的序列进行周期为 9 的季节性差分,并判断差分后的时间序列为平稳序列(图 5)。其中图 4~5 中的虚线为置信区间。

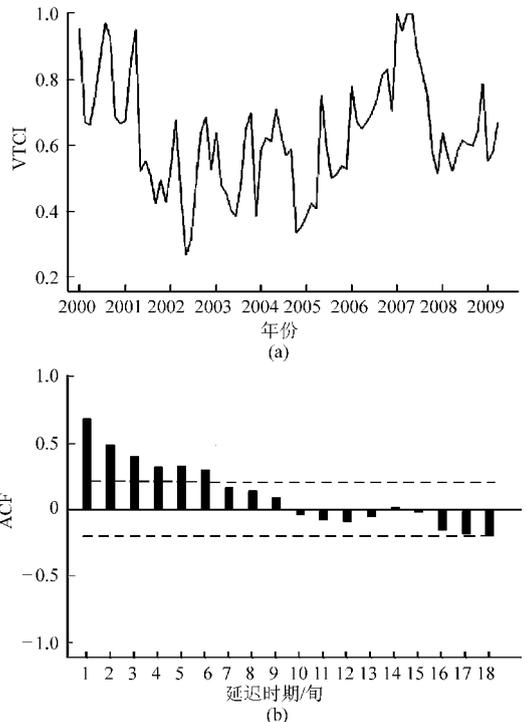


图 4 铜川气象站所在像素 VTCI 时间序列的时序图和自相关图

Fig. 4 Time series of VTCI in Tongchuan weather station and its autocorrelation function

(a) 时序图 (b) 自相关图

根据差分后序列的自相关和偏自相关图(图 5),确定 P 和 Q 的值均为零, p 和 q 的取值范围分别定为 $0 \sim 3$ 和 $0 \sim 2$,运用 AIC 准则进行模型优选。计

根据 ARIMA 的建模方法,以铜川为例,进行逐

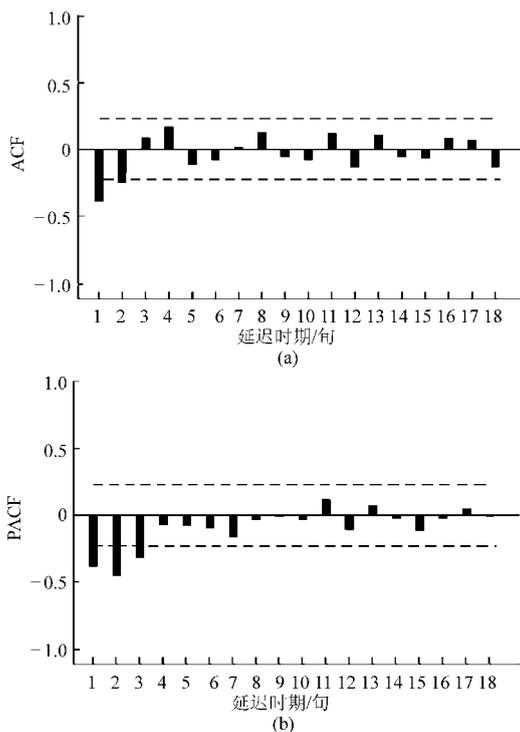


图 5 铜川气象站差分后序列的自相关图和偏自相关图
Fig.5 Autocorrelation and partial autocorrelation functions of differenced time series of VTCI in Tongchuan weather station
(a) 自相关图 (b) 偏自相关图

算各种组合的 R_{AIC} 值,并选取 R_{AIC} 值最小的 p 、 q 为最佳模型(表 1)。当 $p=1$ 和 $q=1$ 时, R_{AIC} 达到最小值,因此 ARMA(1, 1) 模型为差分后的序列最适合的模型。

根据上述建模方法,得到各个气象站适合的模型形式,其中澄城、乾县、合阳、蒲城、富平、大荔、岐山和铜川适合的模型为 ARIMA(1,1,1)(0,1,0)_s;白水、咸阳、高陵、武功、兴平、泾阳和西安适合的模型为 ARIMA(2,1,1)(0,1,0)_s;宝鸡适合的模型为 ARIMA(2,1,0)(0,1,0)_s;礼泉适合的模型为 ARIMA(0,1,1)(0,1,0)_s。

通过分析 17 个气象站的 VTCI 时间序列的模型形式可以发现,模型很好地将旱作区和灌溉区进行了区分,其中合阳、澄城、蒲城、富平、铜川和乾县等属于旱作区,且适合的模型形式均为 ARIMA(1,1,1)(0,1,0)_s;而高陵、泾阳、咸阳、兴平、武功和西安等均属于灌溉地区,且适合的模型形式均为 ARIMA(2,1,1)(0,1,0)_s。由于礼泉县属于暖温带半干旱大陆性季风气候,海拔在 402~1467 m 之间,分山、塬和川 3 种地貌,北部属于丘陵沟壑区,中部是黄土丘陵区,南部属于黄土台原区,地形复杂多样,因而通过模型识别得到的模型形式也不同于灌溉区和旱作区。因此通过不同分区对模型进行识别是相对合理的。

表 1 铜川气象站各个选定模型 AIC 值
Tab.1 AIC values of identified SARIMA models of Tongchuan weather station

p	q		
	0	1	2
0	-36.34	-34.37	-36.48
1	-34.37	-40.45	-39.39
2	-35.45	-35.23	-37.78
3	-34.69	-33.34	-38.64

3.2 结果分析

根据各个分区所确定的模型形式,通过极大似然法对模型参数进行估计,并对整个研究区域进行建模预测,从 2009 年 3 月下旬向前预测 1 步得到 2009 年 4 月上旬的 1 步预测结果,从 2009 年 4 月上旬向前预测 1 步得到 2009 年 4 月中旬的 1 步预测结果,依次类推分别得 2009 年 4 月上旬到 5 月下旬的 1 步预测结果。从 2009 年 3 月中旬向前预测 2 步得到 2009 年 4 月上旬的 2 步预测结果,从 2009 年 3 月下旬向前预测 2 步得到 2009 年 4 月中旬的 2 步预测结果,依次类推得到 2009 年 4 月上旬到 5 月下旬的 2 步预测结果;从 2009 年 3 月上旬向前 3 步预测得到 2009 年 4 月上旬的 3 步预测结果,从 2009 年 3 月中旬向前 3 步预测得到 2009 年 4 月中旬的 3 步预测结果,依次类推得到 2009 年 4 月上旬到 5 月下旬的 3 步预测结果。

图 6 从左至右依次为从 2009 年 3 月下旬向前预测 1、2 和 3 步得到的 2009 年 4 月上旬、中旬和下旬的预测结果与监测结果的对比分析图,并计算得到绝对误差(预测值与实际监测值之差)及绝对误差频率数分布图(图 7)。在 2 步和 3 步预测图中,虽然绝对误差较 1 步预测偏大,但是预测结果基本反映了监测图的干旱分布特征,如泾阳和高陵所在区域的 VTCI 偏高及黄河沿岸旱情的出现等在预测图中可以清楚地显示出来,整体特征与监测结果较吻合。

如同 ARIMA 模型在许多方面的应用,SARIMA 模型展现了较好的短期预测能力。1 步预测误差大多分布在 $[-0.1, 0.1]$ 之间,预测精度比 2 步和 3 步高,同时 2 步预测精度要好于 3 步预测精度(图 7)。SARIMA 模型不再适合更长期的预测,3 步预测的误差已经较大。

针对多旬预测结果,分别对 6 旬 1 步、6 旬 2 步和 6 旬 3 步预测结果的绝对误差进行分析(图 8),从整体看,1 步预测结果误差分布较集中,所得到的 6 旬预测结果的误差分布基本上处于同一峰值,且峰值约为零,误差范围主要集中在 -0.2 到

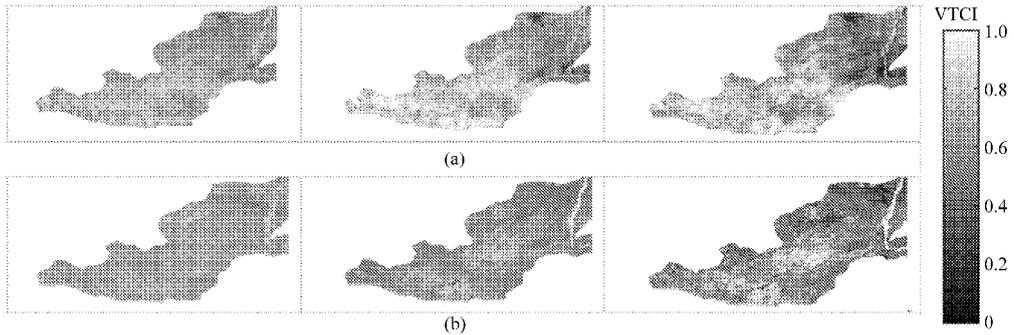


图6 2009年4月预测结果及实际监测结果

Fig. 6 Drought forecasting and monitoring results of April, 2009

(a) 预测结果 (b) 监测结果

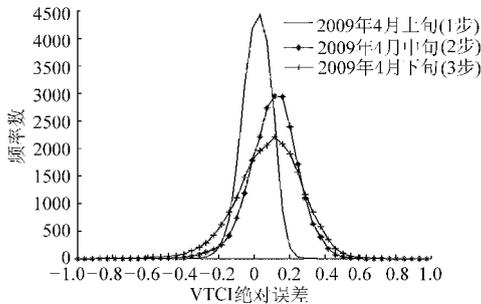


图7 SARIMA 向前3步预测结果绝对误差频率数分布

Fig.7 Frequency distributions of absolute errors of forecasting results of SARIMA models in three steps

0.2 之间,2步预测结果的误差分布相对分散,并出现2个峰值分布,误差范围也增大,说明2步预测精度较1步预测精度低,3步预测结果的误差分布更加分散,峰值分布差异变大,误差范围增大,结果不确定性增大。通过对18旬预测结果进行分析,进一步说明了SARIMA模型的预测能力,即SARIMA模型随着预测步数的增加预测精度降低,预测误差分布峰值出现差异,预测结果的不确定性增大。

3.3 关中平原干旱的时空分布规律

通过计算预测和监测结果关中平原5市(铜川市、渭南市、宝鸡市、西安市和咸阳市)VTCI的平均值分析关中平原干旱时空分布规律(表2),并分析模型对干旱时空分布规律的预测能力。通过各旬监测结果可以看出,关中平原5市的VTCI均存在一定差异,其中铜川市和渭南市的VTCI整体偏低,宝鸡市的VTCI偏高,西安市和咸阳市相当。由此看出,关中平原东部较西部地区干旱严重,由西向东越来越容易发生干旱。从时间上看2009年4~5月关中平原局部地区出现旱情,主要集中在东部的渭南和铜川市,如4月下旬渭南市VTCI均值为0.53,铜川市VTCI均值为0.52,均发生轻旱。通过与当地气象数据对比,预测结果符合研究区域的干旱发生

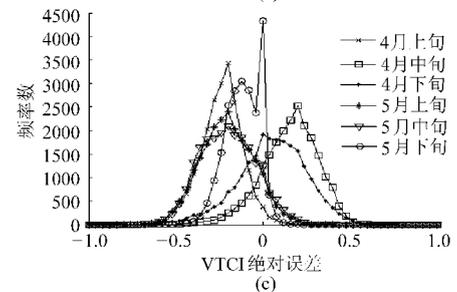
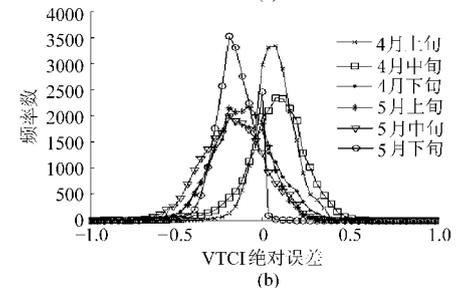
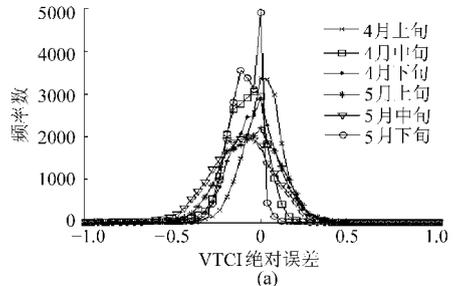


图8 SARIMA模型6旬3步预测结果绝对误差频率数分布

Fig.8 Frequency distributions of absolute errors of forecasting results of SARIMA models in three steps

(a) 6旬1步预测结果 (b) 6旬2步预测结果 (c) 6旬3步预测结果

规律。

单独分析预测结果与实际监测结果的符合程度,各旬1~2步时空分布规律与监测结果均较吻合,各旬3步预测结果与监测结果偏差都相对较大,不确定性较大。

综上所述,关中平原地区干旱具有较明显的区域特征,不同区域VTCI差异较大,以此为依据可以

表 2 关中 5 市预测结果与监测结果的 VTCI 平均值

Tab.2 VTCI average values of forecasting and monitoring in five cities of Guanzhong plain

时间	预测步数	铜川	西安	宝鸡	咸阳	渭南
2009 年 4 月上旬	1	0.62	0.76	0.82	0.72	0.63
	2	0.78	0.80	0.88	0.82	0.67
	3	0.35	0.53	0.52	0.47	0.40
	监测值	0.72	0.70	0.68	0.68	0.67
2009 年 4 月中旬	1	0.62	0.61	0.55	0.59	0.48
	2	0.62	0.83	0.87	0.76	0.61
	3	0.78	0.87	0.94	0.87	0.66
	监测值	0.63	0.67	0.62	0.64	0.60
2009 年 4 月下旬	1	0.49	0.70	0.69	0.64	0.42
	2	0.60	0.58	0.50	0.54	0.40
	3	0.60	0.79	0.82	0.70	0.52
	监测值	0.52	0.67	0.63	0.63	0.53
2009 年 5 月上旬	1	0.50	0.73	0.74	0.68	0.43
	2	0.51	0.65	0.60	0.60	0.38
	3	0.61	0.53	0.40	0.49	0.35
	监测值	0.65	0.69	0.69	0.67	0.57
2009 年 5 月中旬	1	0.76	0.74	0.72	0.72	0.57
	2	0.68	0.73	0.65	0.68	0.50
	3	0.58	0.69	0.64	0.66	0.46
	监测值	0.79	0.80	0.82	0.77	0.74
2009 年 5 月下旬	1	0.87	0.91	0.89	0.90	0.83
	2	0.82	0.87	0.79	0.86	0.75
	3	0.88	0.91	0.88	0.91	0.78
	监测值	0.97	0.99	0.99	0.98	0.93

参 考 文 献

- Mishra A K, Singh V P. A review of drought concepts [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 391(1~2): 202~216.
- Palmer W C. Meteorological drought[R]. Washington: U. S. Department of Commerce, Weather Bureau, 1965.
- Shafer B A, Dezman L E. Development of a surface water supply index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas[C]//Proceedings of the 50th Annual Western Snow Conference, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 1982:164~175.
- Kogan F N. Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, 11(8): 1405~1420.
- Kogan F N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection[J]. *Advances in Space Research*, 1995, 15(11): 91~100.
- 田苗,王鹏新,孙威. 基于地表温度与植被指数特征空间反演地表参数的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2010, 25(7): 698~705.
Tian Miao, Wang Pengxin, Sun Wei. A review of retrieving of land surface parameters using the land surface temperature-vegetation index feature space[J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(7): 698~705. (in Chinese)
- 刘英,马保东,吴立新,等. 基于 NDVI-ST 双抛物线特征空间的冬小麦旱情遥感监测[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(5): 55~63.
Liu Ying, Ma Baodong, Wu Lixin, et al. Drought remote sensing for winter wheat based on double parabola NDVI-ST space[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(5): 55~63. (in Chinese)
- Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of soil moisture status[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79(2): 213~224.
- 王鹏新,龚健雅,李小文. 条件植被温度指数及其在干旱监测中的应用[J]. *武汉大学学报:信息科学版*, 2001, 26(5): 412~418.
Wang Pengxin, Gong Jianya, Li Xiaowen. Vegetation temperature condition index and its application for drought monitoring[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2001, 26(5): 412~418. (in Chinese)
- 王鹏新, Wan Zhengming, 龚健雅, 等. 基于植被指数和土地表面温度的干旱监测模型[J]. *地球科学进展*, 2003, 18(4): 527~533.
Wang Pengxin, Wan Zhengming, Gong Jianya, et al. Advances in drought monitoring by using remotely sensed normalized difference vegetation index and land surface temperature products[J]. *Advances in Earth Science*, 2003, 18(4): 527~533. (in Chinese)
- 孙威,王鹏新,韩丽娟,等. 条件植被温度指数干旱监测方法的完善[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(2): 22~26.
Sun Wei, Wang Pengxin, Han Lijuan, et al. Further improvement of the approach to monitoring drought using vegetation and temperature condition indexes from multi-years' remotely sensed data[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(2): 22~26. (in

预测不同地区的干旱程度;无论从绝对误差频率数分布图还是从区域干旱时空分布规律分析,都可得出基于 SARIMA 模型适合于关中平原 1~2 步的短期干旱预测研究,但不适合更长时间的干旱预测。

4 结 论

(1) 采用 SARIMA 模型对关中平原 VTCI 场时间序列通过划分不同区域建模,区分了旱作区和灌溉区所适合的不同模型形式,并得到了较好的预测结果。

(2) 通过绝对误差频率数分布和区域干旱时空分布特征对干旱预测结果进行了分析,结果表明关中平原地区干旱具有较明显的区域特征,且预测结果较好地反映了这种区域特征。SARIMA 模型具有较好的短期预测能力,1 步预测精度较高,2 步预测精度有所下降,3 步预测结果不确定性较大。因此该模型适合关中平原的 1~2 步预测研究。

Chinese)

- 12 苏涛,王鹏新,刘翔舸,等. 基于熵值组合预测和多时相遥感的春玉米估产[J]. 农业机械学报,2011,42(1):186~192.
Su Tao, Wang Pengxin, Liu Xiangge, et al. Spring maize yield estimation based on combination of forecasting of entropy method and multi-temporal remotely sensed data[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(1):186~192. (in Chinese)
- 13 Box G E P, Jenkins G M. Time series analysis forecasting and control[M]. San Francisco: Holden Day, 1976.
- 14 Earnest A, Chen M I, Ng D, et al. Using autoregressive integrated moving average (ARIMA) models to predict and monitor the number of beds occupied during a SARS outbreak in a tertiary hospital in Singapore[J]. BMC Health Services Research, 2005, 5:36.
- 15 左志宇,毛罕平,张晓东,等. 基于时序分析法的温室温度预测模型[J]. 农业机械学报,2010,41(11):173~177,182.
Zuo Zhiyu, Mao Hanping, Zhang Xiaodong, et al. Forecast model of greenhouse temperature based on time series method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(11):173~177,182. (in Chinese)
- 16 Munoz-Tuduri M, Garcia-Moro C, Walker P L. Time series analysis of the epidemiological transition in Minorca, 1634~1997 [J]. Human Biology, 2006, 78(5): 619~634.
- 17 Han P, Wang P X, Zhang S Y, et al. Drought forecasting based on the remote sensing data using ARIMA models [J]. Mathematical and Computer Modelling, 2010,51(11~12):1398~1403.
- 18 Shumway R H, Stoffer D S. An approach to time series smoothing and forecasting using the EM algorithm[J]. Journal of Time Series Analysis, 1982, 3(4):253~264.
- 19 张允,赵景波. 近200年来关中地区干旱灾害时空变化研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(7): 94~98.
Zhang Yun, Zhao Jingbo. Spacial-temporal changes of drought disaster in Guanzhong area in recent 200 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(7): 94~98. (in Chinese)

(上接第96页)

- 5 王贞涛,闻建龙,王晓英,等. 高压静电液体雾化技术[J]. 高电压技术,2008, 34(5):1067~1072.
Wang Zhentao, Wen Jianlong, Wang Xiaoying, et al. High voltage electrostatic spray [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(5):1067~1072. (in Chinese)
- 6 王军锋,王泽,霍元平,等. 荷电电压、介质物性对静电雾化特征的影响[J]. 排灌机械工程学报,2012,30(4):469~472.
Wang Junfeng, Wang Ze, Huo Yuanping, et al. Effects of liquid properties on electrostatic spray characteristics[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(4): 469~472. (in Chinese)
- 7 汪朝晖,廖振方. 针板电极荷电液体射流不稳定性分析[J]. 农业机械学报,2009, 40(8):86~91.
Wang Zhaohui, Liao Zhenfang. Analysis of instability for charged liquid jets with the needle-plate electrode [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(8): 86~91. (in Chinese)
- 8 Li Fang, Yin Xieyuan, Yin Xiezheng. Temporal linear instability analysis of an electrified coaxial jet with inner driving liquid inside a coaxial electrode[J]. Journal of Electrostatics, 2006, 64(10): 690~698.
- 9 Bian Xiaoyan. Towards simulation of charging and breakup in electrostatic atomizers[D]. Chicago: University of Illinois, 2008.
- 10 王晓英. 荷电液体雾化的研究及应用[D]. 镇江:江苏大学,2008.
Wang Xiaoying. The research and application of charged atomization[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2008. (in Chinese)
- 11 Phan C M, Evans G M. Influence of jet velocity on jet breakup in immiscible liquid-liquid systems[C]//Chemeca 2008: Towards a Sustainable Australasia; Newcastle, N. S. W, 2008: 1087~1095.
- 12 李龙飞,池保华,杨伟东,等. 真空环境下液体射流雾化特性的实验研究[J]. 火箭推进,2010, 35(5): 27~30.
Li Longfei, Chi Baohua, Yang Weidong, et al. Experimental study on atomization characteristic of liquid jet in vacuum environment[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2010, 35(5): 27~30. (in Chinese)
- 13 于辉,何雄奎,仲崇山,等. 在喷雾中喷雾雾化特性对荷质比的影响[J]. 安徽农业科学,2007,35(15):4706~4707.
Yu Hui, He Xiongkui, Zhong Chongshan, et al. Effect of the liquid properties of electrostatic spraying on charge-mass ration[J]. Journal of Anhui Agriculture Science, 2007, 35(15):4706~4707. (in Chinese)
- 14 王晓英,王军锋. 荷电黏性液体射流线性不稳定性分析[J]. 排灌机械工程学报,2012, 30(2): 225~230.
Wang Xiaoying, Wang Junfeng. Linear stability analysis for charged viscid liquid jets[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(2): 225~230. (in Chinese)
- 15 康灿,杨敏官,张峰,等. 圆柱水射流中的能量分布与统计特征[J]. 排灌机械工程学报,2011,29(2):160~164.
Kang Can, Yang Minguan, Zhang Feng, et al. Energy distribution and statistic characteristics in round water jet[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011,29(2):160~164. (in Chinese)
- 16 王贞涛,罗愷乾,岑旗钢. 荷电喷雾两相流场的试验[J]. 排灌机械工程学报,2010,28(1):68~72.
Wang Zhentao, Luo Tiqian, Cen Qigang. Experiment on electrostatic spray two-phase flow[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010,28(1): 68~72. (in Chinese)