



多尺度 ARMA 残差修正模型震前电离层 TEC 异常探测

汤俊^{1,3} 毛文飞²

1 华东交通大学土木建筑学院,江西 南昌,330013

2 东华理工大学测绘工程学院,江西 南昌,330013

3 中国科学院测量与地球物理研究所大地测量与地球动力学国家重点实验室,湖北 武汉,430077

摘要:为提高电离层总电子含量(total electronic content, TEC)扰动探测参考背景值的预测精度,提出了多尺度自回归移动平均(autoressive moving average, ARMA)残差修正模型。通过对比该方法、ARMA 模型、四分位距法(inter quartile range, IQR)及滑动时窗法对 TEC 背景值的预测精度,结果显示修正模型预测的 TEC 背景值平均相对精度为 89.78%,分别比 ARMA 模型、IQR 及滑动时窗法高 5.18%、1.41% 和 1.42%,且预测值的残差绝对值小于等于 3.0 TECU 的百分比为 91.67%,明显优于其他 3 种方法,说明修正模型探测震前 TEC 异常是可行的。利用该方法探测 2013-04-20 芦山县 Mw7.0 级地震震前电离层 TEC 扰动情况,验证了该方法的有效性。实验结果表明,震前第 9 天和第 13 天电离层明显的正异常和震前第 1~4 天明显的负异常极可能是孕育地震引起的,且正异常主要出现在 08:00—10:00 UT,而负异常主要集中在 0:00—14:00 UT。

关键词:多尺度;ARMA;残差修正;地震;电离层 TEC 异常

中图分类号:P228

文献标志码:A

地震给人类带来巨大灾害,是危害最严重的突发性自然灾害之一。地震一旦发生,将可能伴随着人员伤亡、不可逆转的建筑坍塌或严重毁坏等。学者们致力于各种地震预报方法的研究,而震前电离层扰动与地震电离层耦合机制是目前地震预兆研究的热点^[1-13]。Shah 等^[4]对 1998—2014 年间震级 $M_w \geq 5.0$ 的地震进行分析,表明震前 5 d 内电离层会出现异常;Tang 等^[5]从时空角度分析了雅安地震震前电离层总电子含量(total electronic content, TEC)扰动,时间上说明震前 12~15 d 的 TEC 异常可能是地震引起的,而空间上说明异常点通常出现于震中和震中共轭点;姚宜斌等^[6]分析了日本本州东海岸附近海域发生的 Mw9.0 级地震前后的电离层异常,确认 3 月 8 日的电离层异常可看作是日本“311”地震的前兆;Liu 等^[7]对 1999—2002 年中国台湾地区 20 次 Mw6.0 级以上地震震前 TEC 进行统计分析,结果表明震前 5 d 电离层 TEC 扰动主要出现在 10:00

—14:00 UT,且有 80% 的大地震震前会出现 TEC 扰动;Ulukavak 和 Yalcinkaya^[8]对 2010 年加利福尼亚州 Mw7.2 级地震震前 TEC 变化进行分析,说明震前电离层 TEC 正负异常均会出现,且与地震有关的电离层扰动出现在震前 1~5 d。

震前电离层 TEC 异常探测的传统方法主要有平均值法、中位数法、四分位距法(inter quartile range, IQR)、滑动时窗法等,其中平均值法和中位数法属于静态探测法,不能剔除样本中的异常数据,使背景值与实际值偏差很大,探测结果不准确^[9],IQR 和滑动时窗法是传统方法中相对合理的两种方法,但背景值预测精度仍不高,有一定的系统偏差;鉴于此,张小红等^[1]利用时间序列差分自回归移动平均(autoressive integrated moving average, ARIMA)模型进行探测,提高了背景值预测精度,并用该方法对苏门答腊岛 Mw7.2 级地震电离层异常进行探测,但 ARIMA 模型极值点附近的预测精度并不高;李磊^[9]运用

收稿日期:2018-06-24

项目资助:国家自然科学基金(41504025, 41761089);江西省自然科学基金(20181BAB203027);中国博士后基金(2015M582312);江西省教育厅基金(GJJ170362)

第一作者:汤俊,博士,副教授,主要从事 GNSS 数据处理和电离层建模研究。tj928@163.com

自回归移动平均 (autoregressive moving average, ARMA) 残差修正模型对扰动探测背景值进行递推预测, 提高了极点附近背景值预测精度, 并用其对汶川地震震前 TEC 扰动进行探测; Akhoondzadeh^[10] 利用 LSSVM (least squares support vector machine) 方法预测尼泊尔 Mw7.5 级地震发生前周边 TEC 的参考背景值, 并与两种经典方法进行对比, 说明震前 2 d 的电离层 TEC 异常扰动主要由地震引起, 并验证了该方法对震前电离层 TEC 扰动探测是可行的。

文献[1]、文献[9-10]虽在一定程度上提高了背景值预测精度, 但均未考虑电离层 TEC 受各种因素影响, 且在时空上的分布存在差异, 运用单一模型对 TEC 进行预测, 精度不高, 影响探测结果, 因此, 本文提出一种将 TEC 数据分成多个频率尺度, 并综合了文献[1]、文献[9]中模型优点的多尺度 ARMA 残差修正模型 (multi-scale ARMA residual correction model, MARCM)。对比分析了 MARCM、ARMA 模型、IQR 和滑动时窗法对电离层 TEC 参考背景值的预测精度, 并探测了 2013-04-20 四川省雅安市芦山县 Mw7.0 级地震震前 15 d 以及地震当天的电离层 TEC 异常扰动情况。

1 探测原理及方法

1.1 四分位距法和滑动时窗法

四分位距法就是选取探测时段为 D 天 (能被 4 整除) 的电离层 TEC 数据, 分别将 D 天中对应时刻的 TEC 数据放一起, 然后从小到大排序, 得到 $X_1 \leq X_2 \leq \dots \leq X_D$, 并将其分成 4 份, 分界点分别为 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 , 其表达式如式 (1) 所示, 而上下界限 u 、 l 表示如式 (2) 所示^[1, 9]。

$$\begin{cases} Q_1 = \frac{1}{2}(X_{D/4} + X_{D/4+1}) \\ Q_2 = \frac{1}{2}(X_{D/2} + X_{D/2+1}) \\ Q_3 = \frac{1}{2}(X_{3D/4} + X_{3D/4+1}) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} u = Q_2 + 1.5(Q_3 - Q_2) \\ l = Q_2 - 1.5(Q_2 - Q_1) \end{cases} \quad (2)$$

滑动时窗法通过选取适当的滑动窗口长度 N , 计算选定窗口的均值 $\bar{X}_K$ 和标准差 σ_K , 以 $\bar{X}_K$ 为参考值, 以两倍 σ_K (相应检测置信度水平为 95.5%) 为参考值的上下限值, $\bar{X}_K$ 和 σ_K 的表达式如式 (3) 所示, 异常值 Δ_{TEC} 检测表达式如式 (4) 所示。

$$\begin{cases} \bar{X}_K = \frac{1}{N} \sum_{L=K+1}^{K+N} X_L, K = 0, 1, 2, \dots \\ \sigma_K = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (X_n - \bar{X}_K)^2}, K = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad (3)$$

$$\Delta_{\text{TEC}} = \begin{cases} 0, \bar{X}_K - 2\sigma_K \leq \Delta_{\text{TEC}} \leq \bar{X}_K + 2\sigma_K \\ Y - (\bar{X}_K + 2\sigma_K), \Delta_{\text{TEC}} > \bar{X}_K + 2\sigma_K \\ Y - (\bar{X}_K - 2\sigma_K), \Delta_{\text{TEC}} < \bar{X}_K - 2\sigma_K \end{cases} \quad (4)$$

式中, Y 为 IGS 提供的 TEC 值。

1.2 多尺度 ARMA 残差修正模型

1.2.1 模型原理

多尺度 ARMA 残差修正模型主要由改进集总经验模态分解 (modified ensemble empirical model decomposition, MEEMD)^[14] 及时间序列 ARMA 模型^[15-16] 组合而成。MEEMD 模型能有效地抑制模态混叠, 减小 EEMD 方法中不必要的集成平均, 提高计算速度, 减少无物理意义的 IMF (intrinsic mode function) 分量, 减小由添加白噪声引起的重构误差, 保证分解的完备性^[14], 对非平稳数据的处理效果较好, 但端点效应仍未得到抑制; ARMA 模型简单, 短期预测效果较好, 但主要针对平稳数据, 且在极值点附近的预测精度不高。为了抑制端点效应, 提高极值点附近的预测精度, 本文引入 SVM (support vector machine) 对数据两端进行延拓^[17], 并借鉴文献[9]中的残差修正方法。具体步骤如下:

1) 提取原始数据 $\mathbf{X}(t)$ 的线性趋势项, 得到趋势项 $\mathbf{X}_q(t)$ 和非趋势项 $\mathbf{X}_d(t)$;

2) 利用 SVM 对 $\mathbf{X}_d(t)$ 进行两端延拓得到 $\mathbf{X}_e(t)$;

3) 对 $\mathbf{X}_e(t)$ 进行 MEEMD 分解^[14];

4) 将 3) 中分解得到的分量延拓部分去掉, 得:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_t = \{\bar{\mathbf{I}}_j, j = 1, 2, \dots, k\} \\ \bar{\mathbf{I}}_j = \{x_t, t = 0, 1, 2, \dots\} \end{cases}$$

$$x_t - \varphi_1 x_{t-1} - \varphi_2 x_{t-2} - \dots - \varphi_p x_{t-p} = \epsilon_t - \theta_1 \epsilon_{t-1} - \theta_2 \epsilon_{t-2} - \dots - \theta_q \epsilon_{t-q} \quad (5)$$

式中, k 为分量个数; $\mathbf{X}_t$ 为去延拓分量矩阵; $\bar{\mathbf{I}}_j$ 为去延拓分量; x_t 为分量中 t 时刻对应的元素; p 、 q 为 ARMA 模型阶数; $\epsilon = \{\epsilon_t, t = 0, \pm 1, \dots\}$ 是方差为 σ^2 的白噪声序列; θ 、 φ 为待定系数^[15]。

采用 AIC (Akaike information criterion) 准则作为 ARMA 模型定阶准则, AIC 数学式如下:

$$\text{AIC}(p, q) = \min_{0 \leq m, n \leq L} (m, n) = \min_{0 \leq m, n \leq L} \left\{ \ln \hat{\sigma}^2 + \frac{2(m+n)}{N} \right\} \quad (6)$$

式中, $\hat{\sigma}^2$ 是对噪声项方差的估计; L 为预先给定的最高阶数; N 为已知观测数据样本数。利用 AIC 准则定阶是指在 p, q 一定变化范围内寻求使得统计量 $AIC(p, q)$ 达到最小的点 (p, q) , 用作 (p, q) 的估计^[15]。理论上 L 取值越大, 得到的预测精度越高, 但考虑到计算时间以及 L 增大时预测精度提高不太明显, 所以一般情况下 L 取值为 $N/10, \ln(N)$ 或 $\sqrt{N}$ 。

5) 利用线性趋势项 $\mathbf{X}_q(t)$ 作为回归模型建模数据, 预测趋势项, 得到预测值 $\tilde{\mathbf{X}}_q(t)$;

6) 计算最终预测值 $\tilde{\mathbf{X}}(t)$:

$$\tilde{\mathbf{X}}(t) = \tilde{\mathbf{X}}_q(t) + \sum_{j=1}^k \tilde{\mathbf{I}} \quad (7)$$

1.2.2 探测界限的确定以及探测实现

震前电离层 TEC 异常扰动, 不仅要计算参考背景值, 而且要确定比较合适的界限值。通常称 2 或 3 倍中误差为极限误差, 因此, 本文以 2 倍预测值残差标准差作为异常判断限值。首先, 选取震中或者震中位置附近震前第 15~90 天中不受太阳和地磁活动影响的 28 d TEC 数据, 利用前 20 d 数据, 用 MARCM 预测后 8 d, 并计算预测值与真实值的残差, 统计百分比在 95.5% 以上的残差值, 作为剔除条件 Δ ; 其次, 由于 ARMA 模型预测长度越, 长精度越低, 因此预测过程分两次进行; 提取震前 35 d 以及地震当天的 TEC 数据, 选择震前第 16~35 天这 20 d 的电离层 TEC 数据为建模数据, 用 MARCM 预测震前第 8~15 天的 TEC 背景值, 计算预测值与真实值的残差, 判断残差绝对值是否大于剔除条件 $|\Delta|$, 将残差绝对值大于 $|\Delta|$ 的预测值剔除, 并利用插值方法补齐数据, 将震前第 16~35 天这 20 d 的电离层 TEC 数据与补齐数据合并成一个新的序列, 利用新序列作为建模数据, 用 MARCM 预测震前第 1~7 天以及地震当天这 8 d 的 TEC 值; 最后, 以这 16 d 的预测值作为震前电离层 TEC 扰动探测的参考背景值, 并计算预测值与真实值的残差标准差 σ , 以 2σ 为参考背景值的上下界限, 表达式为:

$$\begin{cases} u = Y_{\text{multi}} + 2\sigma \\ l = Y_{\text{multi}} - 2\sigma \end{cases} \quad (8)$$

式中, Y_{multi} 为 MARCM 预测的 TEC 参考背景值; u, l 分别为背景值范围的上下界限, 若观测值超过界限, 则视为存在异常扰动; 异常值 Δ_{TEC} 计算如式(9)所示:

$$\Delta_{\text{TEC}} = \begin{cases} 0, l \leq Y_{\text{real}} \leq u \\ Y_{\text{real}} - u, Y_{\text{real}} > u \\ Y_{\text{real}} - l, Y_{\text{real}} < l \end{cases} \quad (9)$$

式中, Y_{real} 为 TEC 观测值。

2 MARCM 探测与传统方法探测精度对比

本文提取由 IGS 中心^[18]提供的 2013-02-01—2013-02-28(30.0°N, 105.0°E) 的 TEC 数据进行分析, 分别采用 MARCM、ARMA 模型、IQR 和滑动时窗法对本时间段电离层 TEC 背景值进行预测, 并利用平均残差 Δ 、残差标准差 σ 以及平均相对精度 P 作为精度衡量指标, 表达式如下:

$$\begin{cases} \Delta = \sum_{i=1}^n (I_{\text{pre}[i]} - I_{\text{IGS}[i]}) / n \\ \sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (I_{\text{pre}[i]} - I_{\text{IGS}[i]} - \Delta)^2 / n} \\ P = \frac{\sum_{i=1}^n (1 - |I_{\text{pre}[i]} - I_{\text{IGS}[i]}| / I_{\text{IGS}[i]})}{n} \end{cases} \quad (10)$$

式中, I_{pre} 为预报值; I_{IGS} 为 IGS 中心发布的 TEC 值; n 为数据个数。

图 1 给出了上述 4 种方法对 2013-02-21—2013-02-28 电离层 TEC 背景值的预测结果, 可以看出, IQR 与滑动时窗法预测的背景值基本一致, 且随着时间变化, 这两种方法每天同一时刻的预测值并未发生较大变化, 系统偏差较大, 不能较好地体现不同时间段电离层 TEC 的变化特点, 而导致电离层 TEC 异常扰动探测不准确; 而 MARCM 和 ARMA 模型的预测值虽然在一些时刻与真实值残差较大, 但总体上均能较好地体现不同时间段电离层 TEC 的变化特点; 就 MARCM 和 ARMA 模型而言, 在极大值附近的预测精度相当, 而在极小值附近, MARCM 预测精度明显比 ARMA 模型高。

图 2 给出了 2013-02-01—2013-02-28 地磁和太阳活动平静状态下 3 种方法的探测结果, 可以看出, 本文提出的探测方法未发现明显的异常探测结果, 该方法总体要优于其他两种方法, 进一步说明了新模型与方法探测的有效性。

表 1 为 4 种探测方法每天的平均残差、残差标准差以及相对精度统计。总体上, MARCM、ARMA 模型、IQR 及滑动时窗法的平均相对精度分别为 89.78%、84.60%、88.37% 及 88.36%, MARCM 明显优于其他 3 种方法; 从标准差来看, MARCM 比 IQR 和滑动时窗法略大, 而 ARMA 模型最大, 但 4 者相差不大; 由平均残差可以

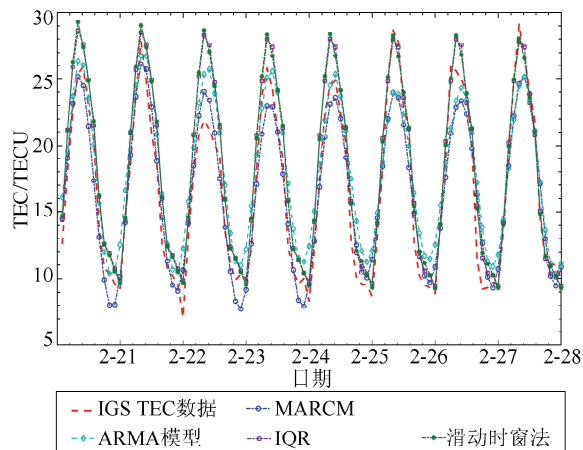


图1 4种方法背景值预测结果对比
Fig.1 Comparison of Background Value Prediction Results of the Four Methods

看出, MARCM 每天平均残差绝对值均在 1 TECU 以内, 明显优于其他 3 种方法。

为进一步说明 MARCM 对参考背景值的预测精度, 表 2 给出了 4 种方法残差绝对值范围分布百分比。由表 2 可知, MARCM、ARMA 模型、

IQR 以及滑动时窗法预报的残差绝对值小于 3.0 TECU 的分别占 91.67%、72.92%、84.38% 和 85.42%, 绝对残差小于 5.0 TECU 的分别占 98.96%、97.92%、97.92% 和 97.92%, 而 MARCM 和 ARMA 模型的绝对残差均在 6.0 TECU 以内, 说明本文模型预测精度明显高于其他 3 种方法。

因此, 利用 MARCM 预测电离层 TEC 参考背景值来探测震前电离层扰动是可行的。

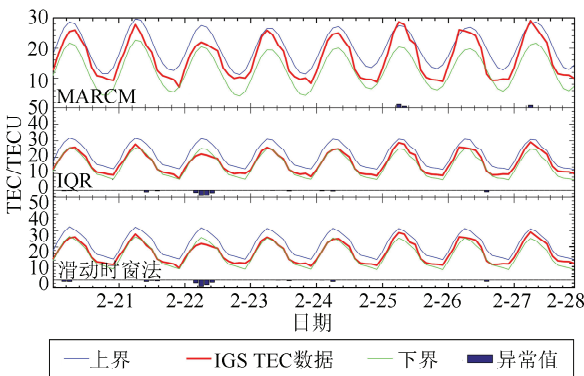


图2 平静状态下 3 种方法探测结果
Fig.2 Detection Results of Three Methods Under Quiescent Conditions

表 1 4 种方法背景值预测精度统计

Tab.1 Prediction Accuracy Statistics of Background Values of Four Methods

日期	MARCM			ARMA 模型			IQR			滑动窗口法		
	Δ/TECU	σ/TECU	$P/\%$	Δ/TECU	σ/TECU	$P/\%$	Δ/TECU	σ/TECU	$P/\%$	Δ/TECU	σ/TECU	$P/\%$
2013-02-21	-0.61	1.47	90.55	1.25	1.18	89.96	1.99	0.87	87.70	2.06	1.05	87.55
2013-02-22	0.54	1.43	90.86	2.05	1.69	82.73	2.09	1.22	84.87	2.13	1.14	85.13
2013-02-23	0.12	1.56	90.85	2.57	1.09	83.48	2.82	2.21	83.91	2.79	2.24	83.77
2013-02-24	-0.77	1.48	90.95	2.02	1.73	81.68	2.13	0.87	85.77	2.11	0.81	86.01
2013-02-25	0.29	1.65	89.48	1.89	1.63	82.90	2.04	0.92	86.81	2.05	0.94	86.65
2013-02-26	-0.61	2.51	88.04	0.31	3.00	82.01	0.82	1.08	92.17	0.87	1.11	91.44
2013-02-27	-0.28	2.67	86.59	0.81	2.83	82.91	1.11	1.54	89.86	1.19	1.44	89.41
2013-02-28	-0.59	1.92	90.92	-0.41	2.07	91.10	-0.21	0.80	95.86	-0.18	0.58	96.95
平均值	-0.24	1.84	89.78	1.31	1.90	84.60	1.60	1.19	88.37	1.63	1.16	88.36

表 2 4 种方法预报残差分类百分比统计/%

Tab.2 Percentage Statistics of Forecast Residual Classification of Four Methods/%

方法	绝对残差分布 / TECU				
	$ \Delta \leq 3.0$	$3.0 < \Delta \leq 4.0$	$4.0 < \Delta \leq 5.0$	$5.0 < \Delta \leq 6.0$	$ \Delta > 6.0$
MARCM	91.67	3.13	4.16	1.04	0
ARMA 模型	72.92	14.58	10.42	2.08	0
IQR	84.37	10.42	3.13	0	2.08
滑动窗口法	85.42	10.42	2.08	1.04	1.04

3 四川雅安市芦山县 Mw7.0 级地震电离层异常探测

选取北京时间 2013-04-20 T 08:02:46 中国四川省雅安市芦山县 Mw7.0 级地震(震中 30.3°N, 103.0°E, 震深 13 km)为研究对象, 提取 2013-

03-16—2013-04-20 IGS 中心提供的电离层网格数据, 并通过双线性插值取得震中位置的 TEC 值, 利用 § 1.2.2 中提到的探测方法分析 2013-04-05—2013-04-20 这 16 d 电离层 TEC 的异常情况。为了方便分析, 文中将地方时转换成世界时 (UT=LT-8)。

图 3 给出了芦山地震前 15 d 及地震当天表

征地磁活动的 Kp 指数和 DST 指数以及表征太阳活动的太阳辐射流量 $F_{10.7}$ 。一般认为 $Kp < 3$ 时,无磁暴现象; $|DST| > 50$ nT 时,可能发生了中大磁暴; $F_{10.7}$ 指数根据大小分为 3 个等级,即 $F_{10.7} > 150$ SFU, $100 \text{ SFU} < F_{10.7} \leq 150$ SFU, $F_{10.7} \leq 100$ SFU, 对应强中弱 3 个等级的太阳活动^[1, 19]。由图 3 可知,4 月 5 日—20 日 $F_{10.7}$ 指数除 4 月 19 日为 99 SFU 外,其他 15 d 均超过 100 SFU,其中 4 月 9 日和 10 日接近 150 SFU,其他 13 d 的 $F_{10.7}$ 指数变化相对稳定,这说明 9 日和 10 日的电离层扰动可能与太阳活动有关;而 4 月 5 日—20 日电流强度 DST 的绝对值均在 30 nT 以内,但 14 日 6:00 UT 和 9:00 UT 的 Kp 指数超过 3,表明该日有一定的地磁干扰,因此,该日电离层 TEC 扰动可能是地磁扰动引起的;除上述 4 月 9 日、10 日及 14 日之外,其他 13 d 内 Kp 指数和 DST 指数均处于较低水平,且 $F_{10.7}$ 指数变化相对稳定,表明这 13 d 内如果存在电离层 TEC 异常,则极有可能是芦山地震导致的。

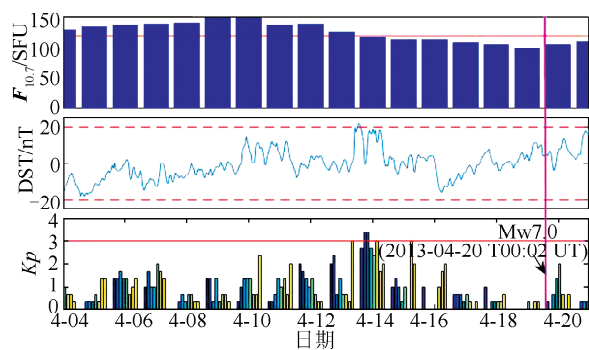


图 3 2013-04-05—2013-04-20 的 $F_{10.7}$ 、DST 指数和 Kp 指数

Fig. 3 The $F_{10.7}$ Index, DST Index and Kp Index in April 5 to April 20, 2013

图 4 给出了 MARCM、IQR 以及滑动时窗法对震中位置的探测结果。由图 4 可看出,在 4 月 5 日—14 日 IQR 和滑动时窗法探测到的正异常明显多于 MARCM,且异常一旦出现,则随后数天都会出现异常现象,而滑动时窗法尤为明显,与文献[1]、文献[11]中相关论述相符,这主要是由于传统探测方法参考背景值预测精度较低及算法系统偏差导致的;4 月 15 日—20 日内,3 种探测方法均探测到了明显的负异常。

由于传统探测方法存在一定缺陷,探测不准,因此,本文主要分析 MARCM 的探测结果。从图 4 可以看出,MARCM 除了探测到 4 月 9 日、10 日及 14 日的 TEC 正异常外,还探测到 4 月 7 日和 11 日的 TEC 正异常以及 4 月 16 日—20 日明

显的负异常,结合图 3 分析结果,说明 4 月 7 日、11 日的正异常以及 4 月 16 日—19 日的负异常极可能是孕育 2013-04-20 芦山 Mw7.0 级地震而引起的。

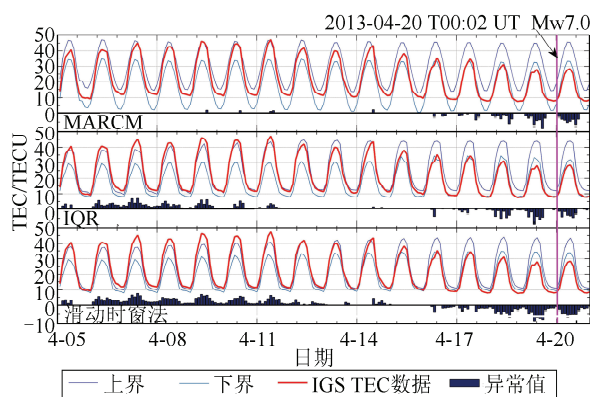


图 4 3 种方法探测结果

Fig. 4 Detection Results of Three Methods

为进一步分析芦山地震震前电离层 TEC 异常情况,分别用 MARCM 和 IQR 探测 $(32.5^{\circ}\text{N}, 105.0^{\circ}\text{E})$ 、 $(30.0^{\circ}\text{N}, 105.0^{\circ}\text{E})$ 、 $(32.5^{\circ}\text{N}, 100.0^{\circ}\text{E})$ 和 $(30.0^{\circ}\text{N}, 100.0^{\circ}\text{E})$ 4 个位置震前 15 d 及地震当天电离层 TEC 的异常情况。图 5 给出了探测结果,由图中 MARCM 探测结果可知,4 个位置探测的结果与震中位置基本一致,但震中往南 $((30.0^{\circ}\text{N}, 105.0^{\circ}\text{E})$ 、 $(30.0^{\circ}\text{N}, 100.0^{\circ}\text{E}))$ 震前 5 d TEC 负异常在时间范围上的分布比其他两位置略大,且与震中位置异常分布更加接近;而震中往东 $((32.5^{\circ}\text{N}, 105.0^{\circ}\text{E})$ 、 $(30.0^{\circ}\text{N}, 105.0^{\circ}\text{E}))$ 的正异常在数值上略小于其他两位置,且与震中位置正异常在数值上接近;说明芦山地震震中往南的 TEC 负异常分布更能表征震中位置,而东面的正异常在数值上更能表征震中位置正异常值。

为进一步分析芦山地震震前 15 d 电离层 TEC 异常在时间上的分布情况。图 6 给出了震中以及震中附近 4 个方向震前 15 d 的电离层 TEC 异常。由图 6 可知,震前第 6~15 天有明显的 TEC 正异常,主要出现在 08:00 UT 和 10:00 UT,且在 10:00 UT 时刻,正异常达到最大;而震前第 1~4 天出现明显的负异常,异常主要出现在 00:00—14:00 UT 之间,且在 12:00 UT 时刻,负异常值相对较大;震中往南方向 $((30.0^{\circ}\text{N}, 105.0^{\circ}\text{E})$ 、 $(30.0^{\circ}\text{N}, 100.0^{\circ}\text{E}))$ 负异常分布与震中位置相似,一定程度上验证了图 5 分析的相关结论。

4 结 语

本文提出多尺度 ARMA 残差修正模型,对比

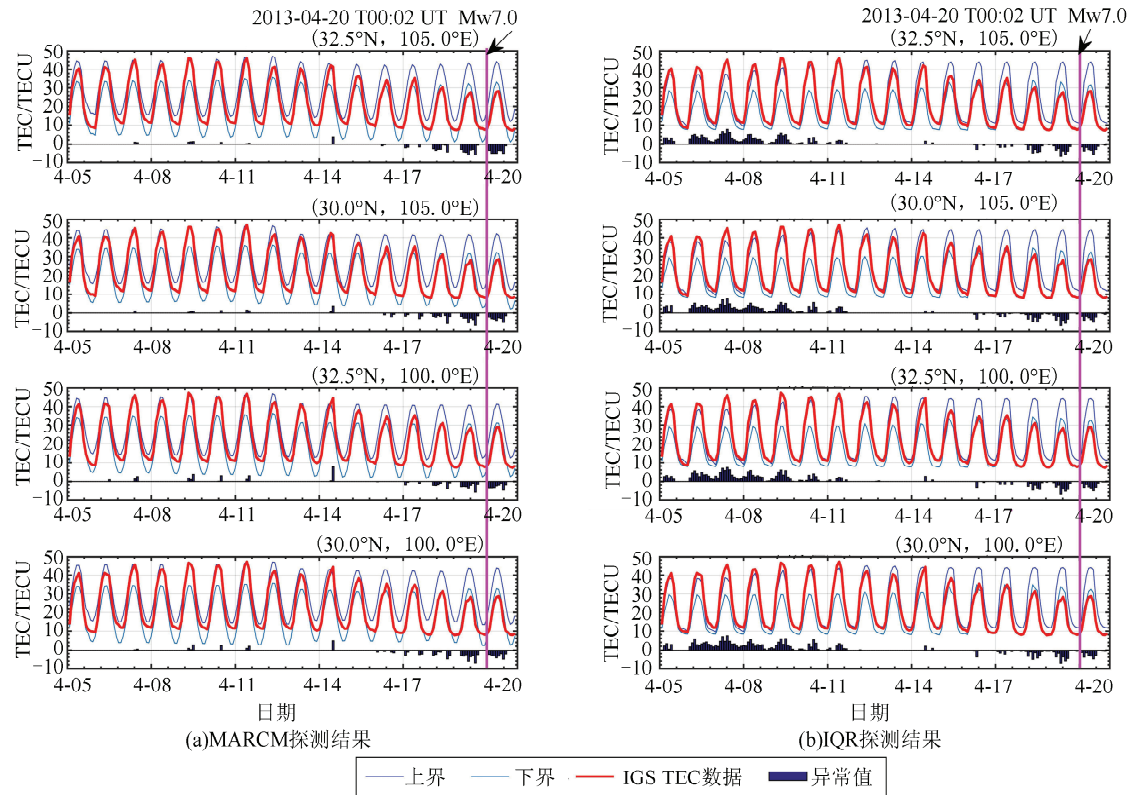


图 5 MARCM 和 IQR 探测结果
Fig. 5 Detection Results of MARCM and IQR

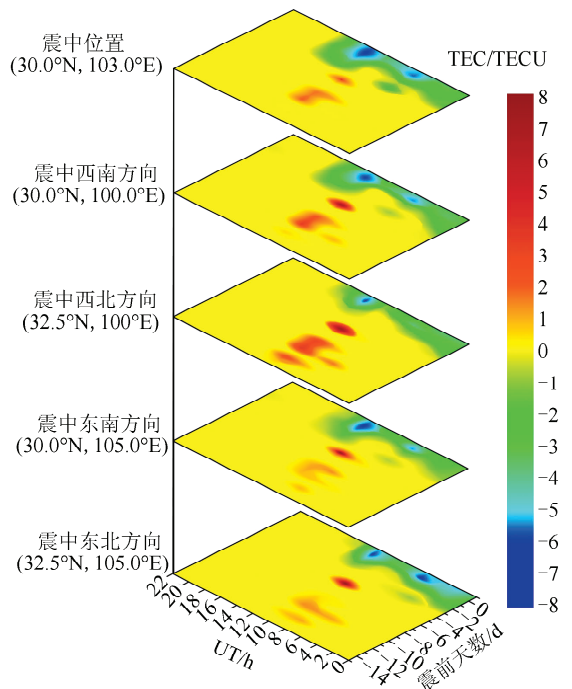


图 6 MARCM 探测的异常值分布情况
Fig. 6 Distribution of Anomalies Detected by Multi-scale ARMA Residual Correction Model

分析了该模型与其他 3 种算法对参考背景值的预测精度,结果表明,MARCM 参考背景值预测精度明显优于 ARMA 模型、IQR 和滑动时窗法。还分析了 2013-04-20 四川雅安市芦山县 Mw7.0

级地震震前 15 d 及地震当天的地磁和太阳活动指数,表明了 4 月 9 日、10 日及 14 日电离层扰动可能不是地震引起。震中位置附近 4 个方向的电离层 TEC 异常,说明芦山地震震中偏南方向的 TEC 负异常分布更能表征震中位置,而东面的正异常在数值上更能表征震中位置正异常值。

然而,本文采用 IGS 提供的电离层格网数据作为 TEC 真值,IGS TEC 在全球陆地的精度约 5 TECU,由于 IGS TEC 在建模时利用的中国区域的 GNSS 测站数量较少,故 IGS TEC 在中国区域的精度偏低,这在一定程度上影响了 TEC 异常判定依据构建模型的精度。因此在后续研究中,将利用中国地区密集的地面 GNSS 区域观测数据重建局部 TEC 值,从而构建更高精度的预测模型和进行定量分析地震相关研究。同时,由于地震的产生机理复杂,且目前还没有相对完整的理论支撑震前电离层扰动与地震有关,因此,利用电离层扰动与地震相关性还需进一步研究。

参 考 文 献

[1] Zhang Xiaohong, Ren Xiaodong, Wu Fengbo, et al. A New Method for Detection of Pre-earthquake Ionospheric Anomalies [J]. Chinese Journal of Geo-

- physics*, 2013, 56(2): 441-449 (张小红, 任晓东, 吴风波, 等. 震前电离层 TEC 异常探测新方法[J]. 地球物理学报, 2013, 56(2): 441-449)
- [2] Zhu Fuying, Wu Yun, Lin Jian, et al. Study on Method of Detecting Ionospheric the Anomaly Before Earthquake [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2009, 29(3): 50-54 (祝芙英, 吴云, 林剑, 等. 震前电离层 TEC 异常探测方法研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(3): 50-54)
- [3] Lin Jian, Wu Yun, Zhu Fuying. Ionosphere TEC Anomalous Disturbance of Pre-seism [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(8): 975-978 (林剑, 吴云, 祝芙英. 震前电离层 TEC 异常扰动研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(8): 975-978)
- [4] Shah M, Jin S. Statistical Characteristics of Seismo-ionospheric GPS TEC Disturbances Prior to Global Mw ≥ 5.0 Earthquakes (1998—2014) [J]. *Journal of Geodynamics*, 2015, 92: 42-49
- [5] Tang J, Yao Y, Zhang L. Temporal and Spatial Ionospheric Variations of 20 April 2013 Earthquake in Yaan, China [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(11): 2 242-2 246
- [6] Yao Y, Chen P, Wu H, et al. Analysis of Ionospheric Anomalies Before the 2011 M9.0 Japan Earthquake [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(5): 500-510
- [7] Liu J Y, Chuo Y J, Shan S J, et al. Pre-earthquake Ionospheric Anomalies Registered by Continuous GPS TEC Measurements [J]. *Annales Geophysicae*, 2004, 22(5): 1 585-1 593
- [8] Ulukavak M, Yalcinkaya M. Precursor Analysis of Ionospheric GPS-TEC Variations Before the 2010 M 7.2 Baja California Earthquake [J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2016, 8(2): 295-308
- [9] Li Lei. Research on Forecasting and Application of the Ionospheric Total Electron Content Based on GNSS [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2015 (李磊. 基于 GNSS 的电离层总电子含量的预测与应用研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2015)
- [10] Akhoondzadeh M. Least Square Support Vector Machine for Detection of TEC-Seismo-Ionospheric Anomalies Associated with the Powerful Nepal Earthquake (Mw=7.5) of 25 April 2015 [J]. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 2016, 3(8): 3-11
- [11] Liu Jing, Wan Weixing. Spatial-Temporal Distribution of the Ionospheric Perturbations Prior to Mw ≥ 6.0 Earthquakes in China Main Land [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(7): 2 181-2 189 (刘静, 万卫星. 中国 6.0 级以上地震临震电离层扰动时空分布特征研究[J]. 地球物理学报, 2014, 57(7): 2 181-2 189)
- [12] Chen Peng, Chen Jiajun. Coseismic Ionospheric Anomaly of Sumatra Earthquake in April 11th, 2012 [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(7): 882-886 (陈鹏, 陈家君. 2012-04-11 苏门答腊地震同震电离层异常研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(7): 882-886)
- [13] Ma Yifang, Jiang Weiping, Xi Ruijie. Analysis of Seismo-ionospheric Anomalies in Vertical Total Electron Content of GIM for Lushan Earthquake [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(9): 1 274-1 278 (马一方, 姜卫平, 席瑞杰. 利用全球电离层地图分析芦山地震电离层异常变化[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(9): 1 274-1 278)
- [14] Zheng Jinde, Cheng Junsheng, Yang Yu. Modified EEMD Algorithm and Its Applications [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(21): 21-26, 46 (郑近德, 程军圣, 杨宇. 改进的 EEMD 算法及其应用研究 [J]. 振动与冲击, 2013, 32(21): 21-26, 46)
- [15] Li Lei, Zhang Shufang, Hu Qing, et al. Application of ARMA Model in Detecting Ionospheric TEC Anomaly Prior to Earthquake [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2015, 35(1): 62-66 (李磊, 张淑芳, 胡青, 等. ARMA 模型在地震电离层 TEC 异常探测中的应用[J]. 大地测量与地球动力学, 2015, 35(1): 62-66)
- [16] Chen Peng, Yao Yibin, Wu Han. TEC Prediction of Ionosphere Based on Time Series Analysis [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(3): 267-270 (陈鹏, 姚宜斌, 吴寒. 利用时间序列分析预报电离层 TEC[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(3): 267-270)
- [17] Zhang Meijun, Chen Hao, Cao Qin, et al. The Improved EEMD Method Based on SVM Signal Continuation [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2013, 33(1): 93-98, 168 (张梅军, 陈灏, 曹勤, 等. 基于 SVM 信号延拓改进的 EEMD 方法[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(1): 93-98, 168)
- [18] Ou Ming, Zhen Weimin, Xu Jisheng, et al. Regional Ionospheric TEC Reconstruction by Data Assimilation Technique [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(8): 1 075-1 081 (欧明, 甄卫民, 徐继生, 等. 利用数据同化技术实现区域电离层 TEC 重构[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2017, 42(8): 1 075-1 081)
- [19] Xie Yibing, Wu Jicang, Chen Junping, et al. Per-

turbation Analysis of the Ionospheric TEC Before and After the Lushan Ms7.0 Earthquake [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2014, 36(1): 95-105 (谢益

炳, 伍吉仓, 陈俊平, 等. 芦山 Ms7.0 地震前后电离层电子含量扰动分析[J]. *地震学报*, 2014, 36(1): 95-105)

Multi-Scale ARMA Residual Correction Model for Detecting Pre-earthquake Ionospheric Anomalies

TANG Jun^{1, 3} MAO Wenfei²

1 School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China

2 School of Geodesy and Geomatics, East China University of Technology, Nanchang 330013, China

3 State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China

Abstract: To improve the prediction accuracy of the background values of the ionospheric total electronic content (TEC) disturbance, we have proposed multi-scale autoregressive moving average (ARMA) residual correction model (MARCM) by comparing the precision of this method, ARMA model, inter quartile range(IQR)and sliding window method in predicting the ionospheric total electronic content reference background values. The results show that the average relative accuracy of TEC background value predicted by MARCM is 89.78%, which is higher than the ARMA model, IQR and sliding window method with values of 5.18%, 1.41% and 1.42% respectively and show that the percentage of absolute residual values less than or equal to 3.0 TECU predicted by MARCM is 91.67%, significantly better than the other three methods, It is demorstrated that using MARCM to detect pre-earthquake ionospheric anomalies is feasible. We use this method to detect pre-earthquake ionospheric anomalies of the earthquake happened in Lushan on April 20, 2013, and prove the effectiveness of the proposed method. The results show that obviously ionospheric positive anomalies on 9 and 13 days before the earthquake and apparently ionospheric negative anomalies on 1 to 4 days before the earthquake, are most likely to be caused by the earthquake. And positive anomalies mainly emerge in the 08:00 UT to 10:00 UT, the negative anomalies are mainly concentrated in 00:00 UT to 14:00 UT

Key words: multi-scale; ARMA; residual correction; earthquake; ionospheric TEC anomaly

First author: TANG Jun, PhD, associate professor, specializes in GNSS data processing and ionosphere model estimation. E-mail: tj928@163.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41504025, 41761089; the Natural Science Foundation of Jiangxi Province, No. 20181BAB203027; the China Postdoctoral Science Foundation (CPSF), No. 2015M582312; the Foundation of Jiangxi Educational Committee, No. GJJ170362.