



活跃期区域电离层总电子短期预报及适用性分析

刘立龙^{1,2} 陈雨田^{1,2} 黎峻宇^{1,2} 田祥雨^{1,2} 贺朝双^{1,2}

1 桂林理工大学测绘地理信息学院,广西 桂林,541004

2 广西空间信息与测绘重点实验室,广西 桂林,541004

摘要:太阳活跃期受太阳风高能粒子影响易发生磁暴,使得电离层总电子含量异常扰动,其非平稳性与非线性特征较平静期明显增强。分别利用2011年区域内多个测站的实测数据与IGS(International GNSS Service)发布的全球电离层模型(global ionosphere model,GIM)进行逐点建模,选取db4小波基对样本序列进行分解后,采用时间序列模型对各分量进行预报并重构,实现对ARIMA(auto regressive integrated moving average)模型的改进。通过分析ARIMA模型与改进模型预报值的残差比例和实验区域内均方根误差的分布情况,来评定改进模型的预报精度与适用性。结果表明,改进模型的残差与实验区域内的均方根误差较ARIMA模型总体减小,且该模型对区域内均方根误差峰值能起到较大的削弱作用。

关键词:VTEC预报;地磁指数;小波分解;时间序列;短期预报;区域电离层

中图分类号:P228

文献标志码:A

近年来,随着全球定位系统(Global Positioning System,GPS)等卫星星座的不断完善,基于卫星的导航、定位、通讯以及各种科学研究越来越普遍。而电离层对电磁波的折射、散射、反射和吸收作用对卫星信号的传播影响巨大,其中电离层垂直总电子含量(vertical total electron content,VTEC)是决定电离层延迟的重要参数,对其进行预报研究具有重要的现实意义^[1-8]。传统经验模型对电离层VTEC的估计精度仅有50%~60%,且无法实时提供延迟改正^[9],因此有学者尝试将时间序列作为一种电离层短期预报方法,并取得了一些有益结论。其中最早被引入电离层预报领域的自回归模型(auto regressive model,AR)虽然待估参数较少、建模简单,但未能较好考虑电离层VTEC的季节性变化,预报精度较低^[10];在其基础上发展的自回归积分滑动平均模型(auto regressive integrated moving average model,ARIMA)较为全面地考虑了VTEC的短期趋势与周期变化,在平静期的不同纬度地区相对精度可达80%以上,有效提高了预报值的可靠

性^[11-12]。然而,电离层受日地相对距离、太阳的周期性活动等因素影响较大^[13],在太阳活动的活跃期,受太阳风高能粒子影响使得电离层总电子含量的周日变化较平静期更为显著^[14-15],研究表明,采用同一方法对VTEC进行预报时,活跃期预报值的残差较平静期明显增大^[16-17]。当磁暴发生时,伴随地磁水平经历初相、主相和恢复相的过程,电离层VTEC同样会产生异常扰动^[18],其非线性与非平稳性特征增强,大幅降低了预报精度。

为此,本文将小波分解与时间序列分析法相结合改进了ARIMA模型,并分别采用16个GPS观测站的实际VTEC解算值和全球电离层模型(global ionosphere model,GIM)格网数据,利用长度为10d的样本序列进行预报,验证改进模型的预报精度与适用性。

1 小波分解改进ARIMA模型

1.1 小波分解基本原理

非平稳时间序列随时间的变化可以分为慢

收稿日期:2018-11-03

项目资助:广西八桂学者团队资助项目;国家自然科学基金(41664002,41704027);广西空间信息与测绘重点实验室基金(16-380-25-27);广西高校(教育厅中青年能力提升项目)科研项目(KY2016YB189,2017KY0267)。

第一作者:刘立龙,博士,教授,主要从事GNSS技术及应用研究。hn_liulilong@163.com

通讯作者:黎峻宇,博士生。lijunyu@glut.edu.cn

变和快变两部分,慢变对应时间序列的低频部分,描绘了序列的主体信息;快变对应时间序列的高频部分,表示序列的细节纹理。小波分解在局部范围内具有伸缩、平移和放大功能,对信号可以进行多尺度分析,在处理非平稳时间序列时具有一定的优势。小波分解与重构采用的是 Mallat 塔式算法,分解过程的表达式如下:

$$\begin{cases} a'_{i+1} = Ha_i \\ d'_{i+1} = Gd_i \end{cases} \quad (1)$$

式中, H 为低通滤波器; G 为高通滤波器; a_i 、 d_i 分别为高频分量与低频分量; a'_{i+1} 和 d'_{i+1} 分别是1/2减采样后得到的低频与高频系数。通过对分解后得到的低频系数与高频系数进行重构,得到与原始序列长度相等的低频率序列 a_{i+1} 与高频率序列 d_{i+1} ,重构过程的 Mallat 算法表达式为:

$$\begin{cases} a_{i+1} = H^* a'_{i+1} + G^* d'_{i+1} \\ d_{i+1} = x_i - a_{i+1} \end{cases} \quad (2)$$

式中, H^* 为重构低通滤波器; G^* 为重构高通滤波器,分别与 H 、 G 互为对偶算子。按上述算法对原始序列 $\{a\}$ 进行 i 级分解后得到的各级分量与原始序列的关系为: $a = a_i + d_i + d_{i-1} + \dots + d_1$ 。

1.2 ARIMA 模型及改进

利用 ARIMA 模型预报电离层 VTEC 时首先需要判断样本序列的平稳性,若序列不平稳,则需要先对其进行平稳性处理,得到平稳序列后根据样本序列表现出的自相关与偏自相关特性选取合适的模型参数完成建模。VTEC 序列是季节性与短期相关性显著的时间序列,故本文采用季节乘积模型 $ARIMA(p, d, q) \times (P, D, Q)$ 进行预报实验,该模型的完整表达为:

$$\begin{cases} \Phi(B)\Phi_s(B)\nabla^d \nabla_s^D x_t = \Theta(B)\Theta_s(B)\epsilon_t \\ \Phi_s(B) = 1 - \varphi_1 B^S - \dots - \varphi_p B^{pS} \\ \Theta_s(B) = 1 - \theta_1 B^S - \dots - \theta_q B^{qS} \end{cases} \quad (3)$$

式中, S 为季节性周期; $\nabla_s^D = (1 - B^S)^D$ 是以周期 S 为步长的季节差分过程; D 为差分阶数; $\Phi_s(B)$ 是季节性自回归算子; P 为季节性自回归阶数; $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_p$ 为季节性自回归参数; $\Theta_s(B)$ 为季节性滑动平均算子; Q 为季节性滑动平均阶数; $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$ 为季节性滑动平均参数。

利用小波分解能够快速高效地将 VTEC 序列的细节成分进行分离,使得样本序列的短期趋势与周期变化更为显著,从而提高预报精度。但由于预报结果是通过小波分解后各分量的预报值重构而获得,过多的分解层数会导致预报误差的积累。以往的研究通常采用 1~3 级分解对

样本序列进行处理^[7,15],本文通过实验证明一级分解后的预报结果精度最高,同时操作简单,避免了反复建模过程中误差的累积。通过小波分解改进的 ARIMA 模型建模流程如下:

1) 利用 db4 正交小波对样本序列进行一级分解,得到长度减半的低频系数与高频系数,分别对其重构得到与原始序列等长的低频与高频分量;

2) 判断各分量是否平稳,若不平稳,则进行差分处理,直到平稳后根据其表现出的自相关与偏自相关特性确定模型的其他参数;

3) 分别对低频率序列和高频率序列进行预报并重构预报值,得到最终预报结果。

2 基于多测站观测值的 VTEC 预报

2.1 数据来源与地磁活动分析

本文选取中国境内的 16 个 GPS 观测站于 2011 年年积日 66~78 天(3月7日至3月19日)的观测数据,采用载波相位平滑伪距法(参见文献[1])以 15 min 为间隔分别对单站 VTEC 进行解算,为方便实验,以 1 h 为间隔提取每天 24 个 VTEC 值构成样本序列。为更好地研究活跃期电离层的变化特性以及预报值均方差的分布情况,本文主要研究范围为 75°E~125°E, 17.5°N~45°N,使得测站能够尽可能均匀分布于实验区域内。

为考察预报期实验区域内的地磁扰动强度,图 1 给出了预报期内扰动暴实时指数 (disturbance storm time index, Dst) 与 K_p 指数。Dst 指数表征环电流强度,时间分辨率为 1 h,而 K_p 指数用以描述每 3 h 内的平均地磁强度。由图 1 可知,在太阳活动剧烈时,受太阳风高能粒子吹拂,地球自东向西的环电流强度会大幅增强,其电磁场与地磁场反向,故 Dst 指数会下降;当 Dst 指数低于 -30 nT 即可能发生小磁暴,小于 -50 nT 时有可能发生中等磁暴。实验期间内 3 月 11 日,多个时刻的 Dst 指数小于 -50 nT,当天与之相对应的 K_p 指数多个时刻达到 5 或 6 (发生中小磁暴),当

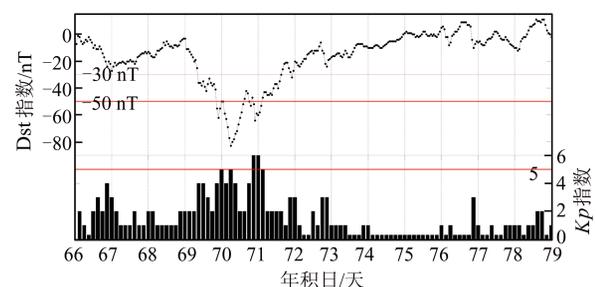


图1 年积日 66~78 天的地磁 K_p 与 Dst 指数
Fig.1 Geomagnetic K_p and Dst Index (DOY 66-78)

日 K_p 指数之和大于 30,故可以确定当日地磁活动剧烈且有磁暴发生。

为分析磁暴对电离层总电子含量的影响,选取实验区域内不同经纬度的 3 个测站(BJSH (116.20°E,40.20°N)、WUHN(114.50°E,30.50°N)、QION(109.84°E,19.03°N))解算 VTEC 值,结果如图 2 所示。从图 2 中可以看出,3 个测站的 VTEC 的总体变化趋势随 Dst 指数的减小和 K_p 指数的增大而增大,在磁暴发生当日 VTEC 达到最大值,受磁暴影响,VTEC 序列周日变化幅度较大且总体平稳性较差。

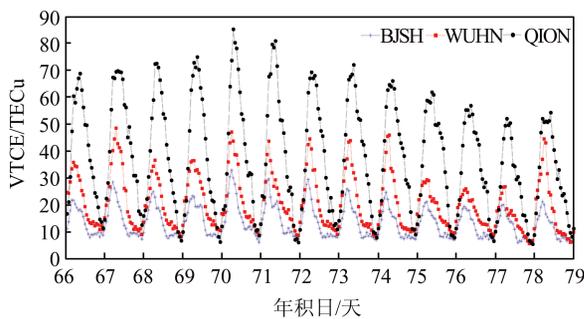


图 2 预报期 VTEC 变化趋势

Fig.2 Changing Trend of VTEC in the Forecast Period

可见,VTEC 值随纬度的降低总体增大,其残差也呈现增大趋势。ARIMA 及其改进模型在每日 VTEC 的极大值处预报误差较大,在极小值处误差较小,改进模型的预报值残差明显减小,尤其在每日 VTEC 的极大值点附近能够较大幅度地削弱残差峰值,较原模型具有更高的预报精度。

2.2 模型精度及适用性分析

单站解算得到的 VTEC 经过筛选提取后构成的时间序列时间分辨率为 1 h,为使实验过程中原模型与改进模型的样本序列最大程度地受到磁暴的影响,以年积日 66~75 天(前 10 d)的 VTEC 作为样本序列,对年积日 76~78 天(后 3 d)的 VTEC 值进行预报,并将预报值与实际解算值进行比较分析。由于测站数量较多,本文选取 6 个测站(DXIN、BJSH、ZHNZ、WUHN、LHAS、QION)的预报结果与预报值残差(Δ)进行分析,结果如图 3 所示,其他测站表现了相同的特性。

进一步分析上述 6 个测站的预报值残差并进行统计,表 1 给出了以 1、2、3 TECu 为节点的不同区间内的残差比例。可以看出,原模型与改进模

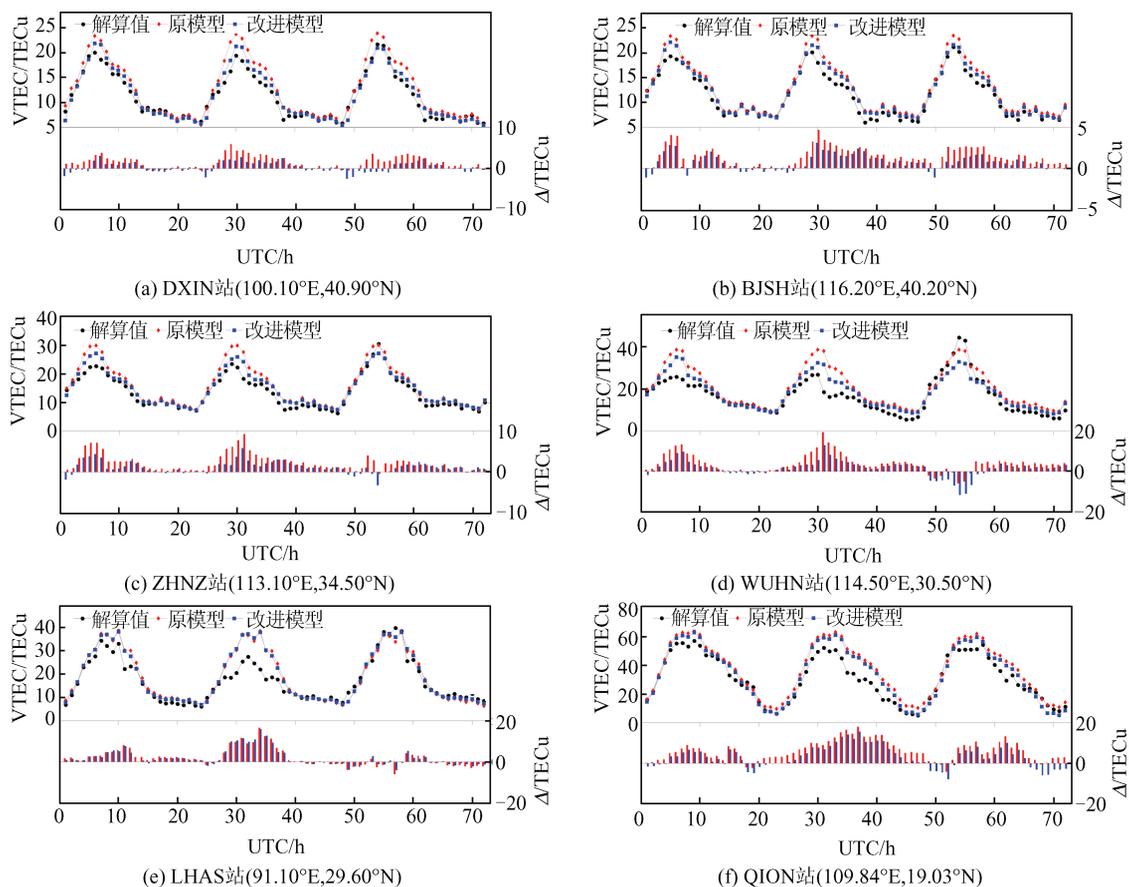


图 3 不同经纬度 6 个测站 3 天预报结果及残差

Fig.3 Three-Day Prediction Results and Residuals of Six Stations with Different Longitudes and Latitudes

型在纬度较低测站的残差要大于高纬度的测站,原模型对纬度较低的QION测站的预报结果中残差小于1 TECu的仅有8.33%,而大于3 TECu的达到了70.83%;即使在预报效果较好的DXIN测站,小于1 TECu的残差值也仅有45.83%;改进

模型较ARIMA模型的预报精度有明显提升,其中小于1 TECu的残差比例最高可达63.89%,而预报结果不理想的QION测站改进后的模型也较大程度地提高了小于1 TECu的残差比例,降低了大于3 TECu的残差比例。

表1 测站3天预报值残差Δ比例/%

Tab.1 Three-Day Forecast Residual Ratio of Stations/%

测站(经度,纬度)	$\Delta < 1 \text{ TECu}$	$1 \text{ TECu} \leq \Delta \leq 2 \text{ TECu}$	$2 \text{ TECu} \leq \Delta \leq 3 \text{ TECu}$	$\Delta > 3 \text{ TECu}$
DXIN(100.10°E,40.90°N)	45.83/59.72	15.28/29.17	20.83/9.72	18.06/1.39
BJSH(116.20°E,40.20°N)	37.50/63.89	31.94/22.22	20.83/12.50	9.72/1.39
ZHNZ(113.10°E,34.50°N)	29.17/44.44	27.78/31.94	19.44/12.50	23.61/11.11
WUHN(114.50°E,30.50°N)	18.05/16.67	4.17/15.28	13.89/27.78	63.89/40.28
LHAS(91.10°E,29.60°N)	26.39/36.11	19.44/26.39	26.39/11.11	27.78/26.39
QION(109.84°E,19.03°N)	8.33/18.05	11.11/9.72	9.72/11.11	70.83/61.11

注:“·/·”表示原模型Δ/改进模型Δ

图4给出了原模型和改进模型在实验区域内16个测站3天预报值各1152个残差的分布情况,可以直观看出改进模型的残差较原模型明显减小。通过统计分析得到ARIMA模型与改进模型置信度为95%的残差区间分别为(2.77±8.56)TECu和(1.60±6.89)TECu,就残差分布的统计结果而言,改进模型的预报精度要高于原模型。

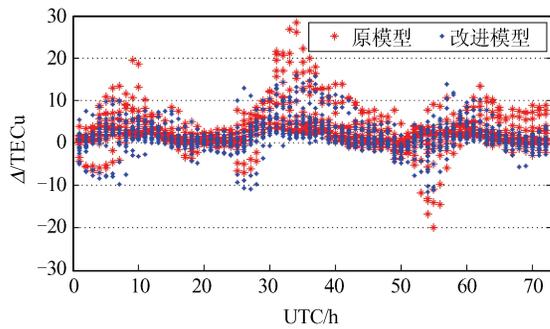


图4 原模型和改进模型残差对比

Fig.4 Residual Comparison of Two Models

均方根误差(root mean square error, RMSE)

能够较好地反映预报值的可靠性^[7,14-15],本文采用实验区域内RMSE的大小来评定模型的预报精度。同时,为论证改进模型在实验区域内是否具有良好的适用性,分别利用ARIMA模型和改进模型对区域内的16个测站进行VTEC预报,通过预报值分别求取年积日为76~78天的每日RMSE,统计值见表2,图5描绘了区域内3d的RMSE分布情况。从图5中可以直观看出,预报过程中第2日(年积日77天)的RMSE最大,预报精度最低,原模型在纬度较低的局部地区峰值可达12 TECu左右,而改进模型能将该区域内的RMSE峰值有效降低约4 TECu;此外,预报的第1日和第3日原模型预报值在大部分区域的RMSE均在5 TECu以内,最大峰值不超过9 TECu,与之对应的改进模型预报值在大部分区域的RMSE均在3 TECu左右,且最大峰值不超过6 TECu。可见,在实验区域内,改进模型预报结果的RMSE较原模型总体降低,具有更高的预报精度和良好的区域适用性。

表2 16个测站的RMSE统计/TECu

Tab.2 RMSE Statistics of 16 Stations/TECu

测站	1 d	2 d	3 d	均值	测站	1 d	2 d	3 d	均值
XIAA	2.59/1.32	4.11/2.55	1.83/1.39	2.84/1.75	XIAM	5.35/4.31	11.45/9.64	8.73/4.58	8.51/6.18
SHAO	4.44/4.48	6.10/5.34	2.00/1.97	4.18/3.93	ZHNZ	3.10/1.82	3.83/2.18	1.74/1.34	2.89/1.78
KMIN	7.27/4.84	13.15/7.20	7.29/5.64	9.24/5.89	QION	4.77/3.57	10.81/8.43	6.39/5.14	7.32/5.71
URUM	1.59/2.14	3.22/3.70	2.00/2.56	2.27/2.80	TASH	2.26/2.23	3.29/3.19	2.70/2.51	2.75/2.64
WUSH	1.61/2.16	2.66/3.22	2.08/2.68	2.12/2.69	CHUN	1.67/1.38	3.01/2.71	1.88/1.50	2.19/1.86
LHAS	3.32/2.86	6.91/6.84	2.52/2.05	4.25/3.92	WUHN	5.66/3.55	7.68/4.53	3.78/4.62	5.71/4.23
XIAG	5.05/4.90	10.9/5.83	6.93/5.08	7.63/5.27	BJSH	1.65/1.19	2.14/1.45	1.63/0.83	1.81/1.16
YANC	2.11/1.26	2.7/1.61	1.61/0.96	2.14/1.28	DXIN	1.66/1.11	2.62/1.44	1.98/1.19	2.09/1.25

注:“·/·”表示原模型RMSE/改进模型RMSE

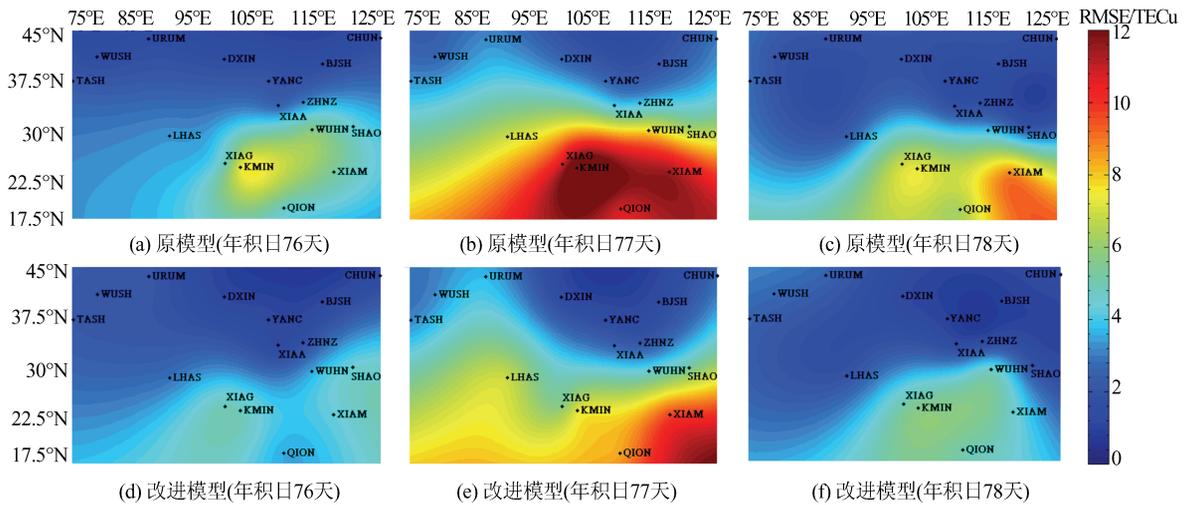


图 5 实验区域内 16 个测站 3 d 预报值 RMSE 分布

Fig.5 Three-Day Forecast RMSE Distribution of 16 Stations in the Experimental Region

3 基于 GIM 的 VTEC 预报

GIM 是欧洲定轨中心 (Center for Orbit Determination in Europe, CODE) 通过选取 IGS 分布在全球范围内的 150 个 GPS 观测站的观测数据,采用 15 阶球谐函数拟合的适用于全球范围的电离层模型,该模型能够有效反映全球范围的电离层特性。GIM 数据的空间分辨率为 $2.5^{\circ} \times 5^{\circ}$ (纬度 \times 经度),时间分辨率为 2 h,一天共提供 13 幅全球电离层图像。为方便建模,本文选取单个格网点上 00:00~22:00 间隔为 2 h,每天共 12 个 VTEC 数据构成样本序列 (年积日的选取与 §2 实验一致)。为使实验区域保持一致,选取 $75^{\circ} \text{E} \sim 125^{\circ} \text{E}$ (间隔 10°)、 $17.5^{\circ} \text{N} \sim 45^{\circ} \text{N}$ (间隔 7.5°),共 30 个格网点,分别利用 ARIMA 与改进模型进行 3 d 预报。

利用 §2.2 中方法对 30 个格网点上 1 080 个预

报值的残差进行统计分析,得到原模型和改进模型置信度为 95% 的残差区间分别为 $(3.01 \pm 9.23) \text{TECu}$ 和 $(1.81 \pm 8.36) \text{TECu}$ 。表 3 给出了实验区域内 30 个格网点上 3 d 预报值的 RMSE 均值,除个别格网点外,改进模型的 RMSE 均小于原模型。实验区域内各格网点上每天的 RMSE 分布见图 6,总体反映了实验区域内 ARIMA 及其改进模型预报值 RMSE 的分布情况。与以上实验结果相似,预报过程中 RMSE 最大峰值出现在预报第 2 日的较低纬度区域,原模型在该区域的误差峰值可达 14TECu 左右,而改进模型降低了约 3TECu ;在预报的第 1 日与第 3 日,两种模型的预报效果均比第 2 日理想,单日的 RMSE 峰值也并不明显;但从图 6 上可以直观反映出改进模型在这两日中减小了区域范围内的 RMSE。因此,改进模型较大程度地提高了活跃期 VTEC 单点预报的精度,且在实验区域内具有良好的适用性。

表 3 不同经纬度下实验区域内 RMSE 均值/TECu

Tab.3 Mean Values of RMSE in the Experimental Region with Different Longitudes and Latitudes/TECu

纬度	经度					
	75°E	85°E	95°E	105°E	115°E	125°E
45°N	2.08/1.60	1.95/1.38	1.64/1.27	1.50/1.18	2.02/1.18	1.80/1.32
37.5°N	2.64/2.19	2.49/2.22	2.00/1.91	2.28/1.76	2.22/1.73	2.15/1.66
30°N	3.95/3.68	3.12/4.42	3.78/4.45	5.45/4.03	3.64/3.88	4.45/3.34
22.5°N	6.35/5.64	8.64/6.76	10.02/8.56	9.81/7.95	8.89/6.89	7.57/6.13
17.5°N	5.63/5.27	8.03/5.21	8.99/6.89	5.80/5.08	5.60/4.83	5.29/4.79

注:“·/·”表示原模型 RMSE/改进模型 RMSE

4 结 语

本文分析了太阳活跃期磁暴发生前后地磁指数与电离层总电子含量变化的关系,利用 db4

正交小波分解样本序列改进 ARIMA 模型,并通过测站实际解算的 VTEC 数据与 IGS 提供的 GIM 分别验证了改进模型的预报精度,得到以下结论。

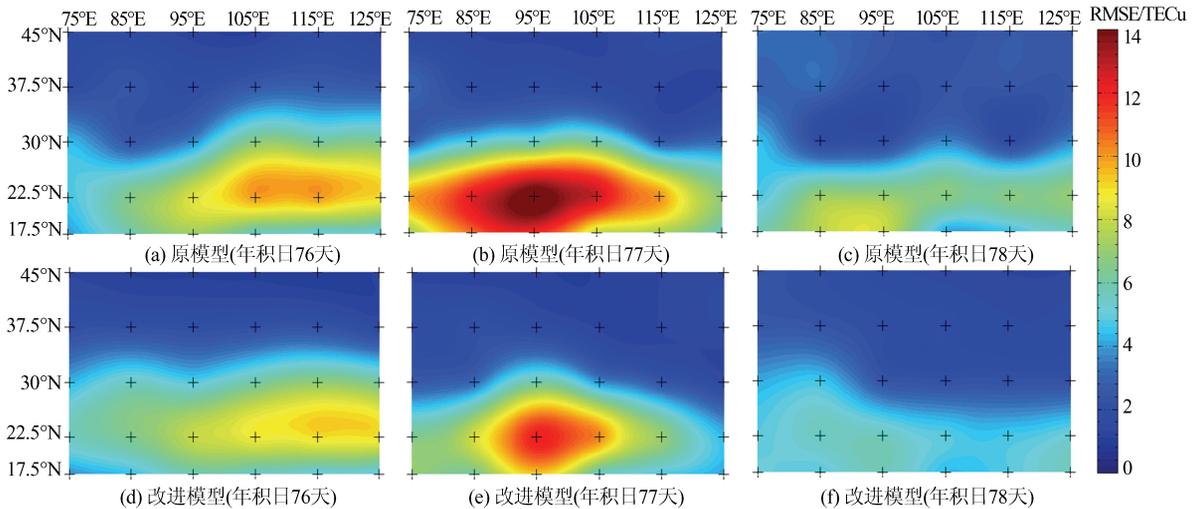


图6 实验区域内30个格网点预报值RMSE分布

Fig.6 Forecast RMSE Distribution of 30 Grid Points in the Experimental Region

1)在磁暴发生过程的前后,Dst指数经历了先增大后减小再增大,最终趋于平稳的过程,其中磁暴发生时Dst指数达到最小值;而 K_p 指数表现为先减小后增大再减小,最终趋于平稳,其中磁暴发生时 K_p 指数达到最大值;对应时刻的总电子含量同样在磁暴发生时达到最大值,该影响对低纬度地区最为显著,随纬度升高,影响逐渐减弱。

2)利用db4小波分解改进的ARIMA模型在活跃期的预报结果残差较原模型明显减小;通过不同数据源分析实验区域内预报值RMSE的分布情况,结果表明,改进模型的预报精度要高于原模型,且在实验区域内具有良好的适用性。

另外,电离层除受到太阳活动影响外,还会受到日地相对距离、磁层、热层、中层大气的物理化学等变化的影响,对流层的雷暴等天气亦会对电离层底部电子密度产生影响,单层模型无法细致反映这些因素引起的电离层变化。因此,在后续研究中,可以考虑利用电离层的层析方法,同时结合各种电离层影响因素的观测资料,进行更加详细、可靠的相关性分析,进一步提高VTEC预报精度。

参 考 文 献

- [1] Yuan Yunbin. Study on Theories and Methods of Correcting Ionospheric Delay and Monitoring Ionosphere Based on GPS [D]. Wuhan: Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2002(袁运斌. 基于GPS的电离层监测及延迟改正理论与方法的研究[D]. 武汉:中国科学院测量与地球物理研究所, 2002)
- [2] Nie Wenfeng, Hu Wusheng, Pan Shuguo, et al. Extraction of Regional Ionospheric TEC from GPS Dual Observation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(9): 1 022-1 027(聂文锋, 胡伍生, 潘树国, 等. 利用GPS双频数据进行区域电离层TEC提取[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(9): 1 022-1 027)
- [3] Zhang Hongping. Study on Ionospheric Monitoring and Delay Correction in China Based on Ground-based GPS[D]. Shanghai: Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, 2006(章红平. 基于地基GPS的中国区域电离层监测与延迟改正研究[D]. 上海: 中国科学院上海天文台, 2006)
- [4] Wang Ningbo, Yuan Yunbin, Li Zishen, et al. Performance Analysis of Different NeQuick Ionospheric Model Parameters [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(4): 421-429(王宁波, 袁运斌, 李子申, 等. 不同NeQuick电离层模型参数的应用精度分析[J]. 测绘学报, 2017, 46(4): 421-429)
- [5] Kuang Culin, Jin Lei. Higher-order Ionospheric Error Correction for Precise Point Positioning [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(8): 888-891(匡翠林, 金蕾. 精密单点定位的高阶电离层误差改正研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(8): 888-891)
- [6] Huo Xingliang, Yuan Yunbin, Ou Jikun, et al. A New Ionospheric Tomographic Algorithm Taking into Account the Variation of the Ionosphere [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(7): 2 393-2 401(霍星亮, 袁运斌, 欧吉坤, 等. 顾及电离层变化的层析反演新算法[J]. 地球物理学报, 2016, 59(7): 2 393-2 401)

- [7] Bao Yadong, Liu Changjian, Chai Hongzhou. Time Series Prediction Model of Ionospheric VTEC Improved by Wavelet Decomposition[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2015, 35(5): 784-787 (鲍亚东, 刘长建, 柴洪洲. 小波分解改进电离层 VTEC 时间序列预报模型[J]. 大地测量与地球动力学, 2015, 35(5): 784-787)
- [8] Meng Yang, Wang Zemin, E Dongchen. Ionospheric TEC Anomalies of Pre-Earthquake Based on GPS Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(1): 81-84 (孟泱, 王泽民, 鄂栋臣. 基于 GPS 数据的地震前电离层 TEC 异常研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(1): 81-84)
- [9] Li Zhigang, Cheng Zongyi, Feng Chugang, et al. A Study of Prediction Models for Ionosphere[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2007, 50(2): 327-337 (李志刚, 程宗颐, 冯初刚, 等. 电离层预报模型研究[J]. 地球物理学报, 2007, 50(2): 327-337)
- [10] Li Xiuhai, Guo Dazhi. Prediction of Ionospheric Total Electron Content Based on Semiparametric Autoregressive Model [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2011, 36(2): 149-151 (李秀海, 郭达志. 应用半参数 AR 模型的电离层 TEC 建模与预测 [J]. 测绘科学, 2011, 36(2): 149-151)
- [11] 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)
- [12] Tang Jun, Yao Yibin, Chen Peng, et al. Prediction Models of Ionospheric TEC Improved by EMD Method [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(4): 408-411 (汤俊, 姚宜斌, 陈鹏, 等. 利用 EMD 方法改进电离层 TEC 预报模型 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(4): 408-411)
- [13] Yang Zhe, Song Shuli, Xue Junchen, et al. Accuracy Assessment of Klobuchar Model and NeQuick Model in China [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(6): 704-708 (杨哲, 宋淑丽, 薛军琛, 等. Klobuchar 模型和 NeQuick 模型在中国地区的精度评估 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(6): 704-708)
- [14] Chen Yanan, Xu Jisheng. Longitudinal Structure of Plasma Density and Its Variations with Season Solar Activity and Dip in the Topside Ionosphere [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(6): 1843-1852 (陈亚楠, 徐继生. 顶部电离层离子密度经度结构的特征及其随季节、太阳活动和倾角的变化 [J]. 地球物理学报, 2015, 58(6): 1843-1852)
- [15] Yao Yibin, Zhang Shun, Kong Jian. Analysis of 21.5 d Period in Ionospheric and Solar Indices During 2011 [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(1): 9-15 (姚宜斌, 张顺, 孔建. 2011 年电离层和太阳活动指数的准 21.5 天振荡分析 [J]. 测绘学报, 2017, 46(1): 9-15)
- [16] Zhang Xiaohong, Ren Xiaodong, Wu Fengbo, et al. Short-term TEC Prediction of Ionosphere Based on ARIMA Model [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(2): 118-124 (张小红, 任晓东, 吴风波, 等. 自回归移动平均模型的电离层总电子含量短期预报 [J]. 测绘学报, 2014, 43(2): 118-124)
- [17] Liu Lilong, Chen Jun, Huang Liangke, et al. TEC Forecast of Short-term Ionosphere Based on Wavelet-ARIMA [J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2016, 36(2): 294-299 (刘立龙, 陈军, 黄良珂, 等. 基于小波-ARIMA 电离层短期总电子含量预报 [J]. 桂林理工大学学报, 2016, 36(2): 294-299)
- [18] Xu Jisheng, Zhu Jie, Cheng Guanghui. GPS Observations of Ionospheric Effects of the Major Storm of Nov. 7-10, 2004 [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(4): 950-956 (徐继生, 朱劫, 程光辉. 2004 年 11 月强磁暴期间武汉电离层 TEC 的响应和振幅闪烁特征的 GPS 观测 [J]. 地球物理学报, 2006, 49(4): 950-956)

Short-term Prediction and Applicability Analysis of Regional Ionospheric Total Electron Content in Active Period

LIU Lilong^{1,2} CHEN Yutian^{1,2} LI Junyu^{1,2} TIAN Xiangyu^{1,2} HE Chaoshuang^{1,2}

1 College of Geomatics and Geoinformation, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China

2 Guangxi Key Laboratory of Spatial Information and Geomatics, Guilin 541004, China

Abstract: In the solar active period, the earth's magnetic field is easily affected by the high energy particles of the solar wind, which makes the total electron content of the ionosphere abnormally disturbed, and its non-stationary and nonlinear characteristics are obviously enhanced compared to the calm period. Using the measured data from multiple stations in the 2011 region and the GIM (global ionosphere model) published by the IGS (International GNSS Service) to perform point-by-point modeling, the db4 wavelet basis is used to decompose the sample sequence, and the time series model is used to forecast each component and forecast. Each component is reconstructed so that the ARIMA (auto regressive integrated moving average) model can be improved. The prediction accuracy and applicability of the improved model are evaluated by analyzing the residual ratio of the ARIMA model and the improved model and the distribution of the root mean square error in the experimental region. The results show that the residual error of the improved model and the root mean square error in the experimental area are reduced compared with the ARIMA model, and the improved model can greatly weaken the peak value of the root mean square error in the area.

Key words: VTEC forecast; geomagnetic index; wavelet decomposition; time series; short-term prediction; regional ionospheric

First author: LIU Lilong, PhD, professor, specializes in the research of GNSS technology and application. E-mail:hn_liulilong@163.com

Corresponding author: LI Junyu, PhD candidate. E-mail:lijunyu@glut.edu.cn

Foundation support: The Foundation of Guangxi Bagui Scholars Funded Project Team; the National Natural Science Foundation of China, Nos.41664002, 41704027; Foundation of Key Laboratory of Spatial Information and Mapping of Guangxi, No.16-380-25-27; Guangxi University (To Enhance the Ability of Youth Education Hall Project) Scientific Research Project, Nos. KY2016YB189, 2017KY0267.