

文章编号 1005-0388(2011)06-1141-07

电离层总电子含量的短期预报方法的误差评估

武业文^{1,2} 刘瑞源² 吴振森¹ 张北辰² 刘俊明²

(1. 西安电子科技大学理学院, 陕西 西安 710071; 2. 中国极地研究中心, 上海 200136)

摘要 用统计学的方法分析了用自相关分析法和改进的克里格插值法对中国地区电离层总电子含量(TEC)进行短期预报的预报误差。结果表明:预报误差的大小在地域上呈现出由北向南逐渐增大的趋势,时间上,在二分季节误差较大,误差日变化的峰值出现在午后。而相对误差则是在冬季最大,在夏季最小;相对误差的日变化为双峰结构,峰值出现的时间在 8 点和 20 点附近。从总体上看,在提前一小时预报中国地区电离层 TEC 时,相对误差为 12% 左右。通过统计对比单站预报和区域重构对最终预报误差的影响可以看出,单站预报误差起主要作用。因此,改进单站预报方法十分重要,可以有效地提高预报精度。同时,也需要增加并合理布局全球定位系统(GPS)接收台站。

关键词 电离层 TEC 短期预报;单站预报;区域重构;预报误差

中图分类号 P352.1

文献标志码 A

1. 引言

电离层总电子含量(TEC)作为电离层的一个重要特征参数,对穿越电离层的无线电信号具有重要影响,而且由电离层引起的一些测距(角)误差、附加时延等传播效应直接正比于电离层 TEC 值。因此,对于电离层 TEC 的准确预报非常重要。为此,国内外很多专家学者在继早期对电离层临界频率(f_oF_2)做了相关的预报技术^[1-17]研究之后,又对电离层 TEC 提出了很多现报、预报的方法。目前很多网站都能提供电离层 TEC 的全球分布图,如全球导航卫星系统国际服务机构的电离层分析中心 IGS/IAAAs^[18],万卫星等^[19]建立了一种中国地区电离层 TEC 的现报系统, Mao, T. 等^[20]用经验正交模函数法实现了对中国地区电离层 TEC 的现报,李志刚等^[21]提出了用自回归滑动平均(ARMA)模型预报全球电离层电子含量的方法。但是对电离层 TEC 的短期预报方法的报道不多。为此,我们最近提出了一种用于中国地区电离层 TEC 的短期预报

方法^[22]。该方法是时域和空域上线性无偏、最优估值的方法,它先用自相关分析法进行单站预报,然后引入电离层距离,用改进的克里格插值的方法进行区域重构,从而完成对我国地区电离层 TEC 的短期预报。预报的提前量为 15 min 到 24 h。

为了更好地说明该方法的可行性,并着手提高我国地区电离层 TEC 的预报精度,本文对我们提出的这一短期预报方法的预报误差,进行了较为细致的分析,得到了它们的时空分布特性,并通过讨论单站预报误差与重构误差的大小关系来确定预报误差的主要来源,提出了改善我国地区电离层 TEC 短期预报精度的可能途径。

2. 误差评估使用的数据和方法

在评估预报误差时,使用的数据是 2004 年中国及周边地区 27 个 GPS 台站的 TEC 观测数据,用文献^{[22][23]}的方法,将原始的观测数据处理成时间间隔为 15 分钟的 TEC 时间序列。台站的名称及相应的地理位置见表 1。

收稿日期: 2010-12-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 40890164); 公益性行业(气象)科研专项(No. 200806072); 国家电磁环境重点实验室项目(No. 9140C08060107 ZCZJ09); 国家海洋局青年海洋科学基金(No. 2010614); 国家自然科学基金青年项目(No. 41104105)

联系人: 刘瑞源 E-mail: ryliu@pric.gov.cn

表1 参与误差评估的台站名称、地理位置和单站预报误差/TECu

台站	纬度/°N	经度/°E	3月	6月	9月	12月
hlar	49.27	119.74	1.12	1.03	1.53	0.9
suiy	44.43	130.91	1.22	1.1	0.87	0.9
urum	43.81	87.60	2.3	1.08	1.11	0.98
sele	43.18	77.02	1.24	1.15	1.11	1.61
wush	41.21	79.21	1.42	1.22	1.13	1.11
dxin	40.99	100.20	1.42	1.12	1.14	0.93
bjsh	40.25	116.22	1.35	1.13	1.1	0.93
mizu	39.14	141.13	1.48	1.29	1.18	1.05
tash	37.78	75.24	1.58	1.3	1.39	1.45
yanc	37.78	107.444	1.57	1.23	1.18	0.97
dlha	37.38	97.38	1.63	1.32	1.31	1.07
suwn	37.28	127.05	1.47	1.31	1.17	0.97
xnin	36.60	101.77	1.69	1.34	1.33	1.11
daej	36.40	127.37	1.32	1.54	1.44	0.74
tain	36.22	117.12	2.68	1.35	1.25	1.03
usud	36.13	138.36	1.6	1.42	1.34	1.1
tskb	36.11	140.09	1.62	1.43	1.33	1.11
xiaa	34.18	108.98	1.88	1.55	1.38	1.1
jsgy	32.79	119.45	1.92	1.55	1.38	1.23
shao	31.10	121.20	2.28	1.58	1.62	1.45
whjf	30.52	114.49	2.38	1.7	1.61	1.41
xiag	25.61	100.25	4.47	2.4	2.87	2.31
twtf	24.95	121.16	3.38	2.07	2.55	2.22
xiam	24.45	118.08	4.03	2.26	2.83	2.28
guan	23.18	113.34	4.02	2.36	2.35	2.61
qion	19.03	109.84	3.43	2.03	2.94	2.57
yong	16.84	112.33	3.34	1.81	2.65	2.28
China			2.35	1.56	1.71	1.5

基于表1中TEC数据,用统计学的方法,以一个月的数据为基本样本组,对“中国地区电离层TEC短期预报方法”的预报误差进行评估。误差的评估主要从两方面着手:一方面考察某一地点的预报误差,另一方面是考察整个中国地区的预报误差情况。对于某一地点的预报误差的计算公式为

$$RMSE =$$

$$\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [\text{TEC}_i(\text{pre.}) - \text{TEC}_i(\text{Meas.})]^2} \quad (1)$$

式中: $\text{TEC}_i(\text{pre.})$ 为某一台站TEC的预报; $\text{TEC}_i(\text{Meas.})$ 为该台站TEC的实测值; N 为样本数。对于整个中国地区的整体预报误差的计算公式为

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \sigma_{i,t}^2} \quad (2)$$

式中: $\sigma_{i,t}$ 是第*i*个台站在*t*时刻的预报误差; M 为参与统计的GPS台站数,本文中*M*值为27。通过

上述两式的计算,便可以得到预报误差。在此基础上,再除以相应的电离层TEC均值便可以得到相对预报误差。

3. 误差评估的计算结果

3.1 预报误差的地域分布

应用该预报方法可以计算出全国各地某一月份、某一时刻提前15 min至24 h的电离层TEC预报结果,与实测值相比,利用公式(1)就可以计算出该地点在相应时间的预报误差。作为例子,图1给出了2004年3月份15点(北京时间:BST,下同)全国各地提前一小时预报电离层TEC的误差分布。总的来说,不难看出预报误差呈现出由北向南逐渐增大的趋势,但是北回归线附近地区,即所谓的赤道异常北驼峰区的预报误差较大,达7 TECu左右,要大于海南地区的4.74 TECu。

3.2 预报误差随地方时和季节的变化

图1(见1228页)作为例子,给出的是某一月份某一时刻全国各地的预报误差值。为了从整体上评估预报误差,采用式(2),同样以提前一小时预报为例,计算了3、6、9、12四个月各时刻全国整体的预报误差,结果如图2所示。总的来说:①预报误差在8点左右,也就是日出前后有一个小峰值,并在午后15点左右达到各个月预报误差的最大值。最大值在3、9两月为4 TECu左右,6、12两月的预报误差则为2 TECu左右。就平均值来说,预报误差的范围在1.25~3 TECu。②除了个别时刻外,3、9两个月的预报误差都要大于6、12两个月对应时刻的预报误差,尤其是午后15点左右,预报误差之差值达2 TECu左右。说明二分季节的预报误差要大于夏、冬两个季节。

3.3 相对预报误差随地方时和季节的变化

图3是3、6、9、12四个月各时刻全国整体的相对预报误差,其中粗实线为4个月的平均值。这里的相对预报误差是全国所有台站在一个月各时刻的预报误差(图2的结果)与该时刻全国所有台站的电离层TEC值在该月的均值的比值。图中的虚线是所有时刻所有月份的相对预报误差均值,约为12%,即在提前1 h预报中国地区电离层TEC时,相对误差约为12%。另外,由图3可见相对预报误差在8点和20点左右,即日出日落前后出现了峰值。就平均值来说,峰值的大小接近15%,最小值通常在12点左右取得,约为9%。而在季节上,6

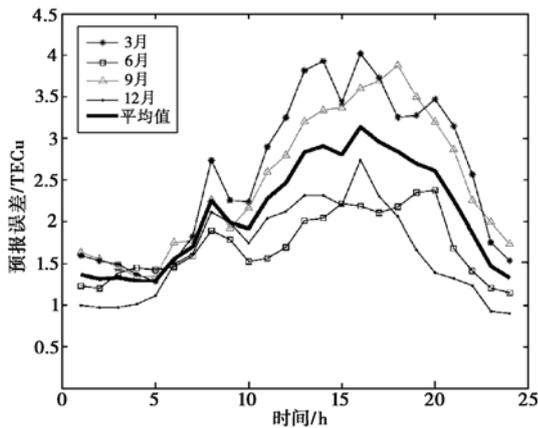


图 2 整体预报误差在 3、6、9、12 四个月随时间的变化(提前 1 h 预报)

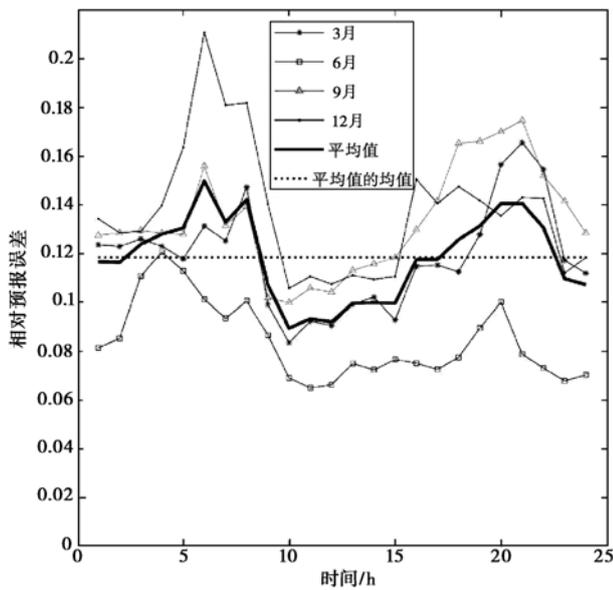


图 3 整体相对预报误差在 3、6、9、12 四个月随时间的变化(提前 1 h 预报)

月份的相对预报误差最小,最小值接近 6%,12 月的相对误差最大,尤其是在早晨,最大值为 20%。

4. 讨论

前面用统计学的方法分析了整体方案的预报误差及相对误差的变化情况。由该方案的实施步骤不难看出,整体方案是由单站预报和区域重构两部分构成的。因此,下面将结合单站预报误差与重构误差来讨论整体预报方案的(相对)预报误差的变化。

4.1 整体预报误差的分解

首先,在利用式(1)计算某一地点的单站预报误差和重构误差的时候,TEC_i(pre.)分别为单站预报的 TEC 值和由其他台站的实测值经改进的克里格

插值得到的 TEC 值。图 4(见 1228 页)是提前一小时预报 2004 年 3 月份 15 点的电离层 TEC 的单站预报误差分布图,图 5(见 1228 页)是该时刻的重构误差分布图。对比图 1、4、5,总体上不难看出:整体方案的预报误差和单站预报误差的分布较为相像,都呈现出由北向南递增的趋势,在北回归线附近的预报误差最大。除个别台站外,在相同位置处,整体方案的预报误差略大于单站预报误差。重构误差的分布亦有类似的趋势,但在华北和内蒙古地区则具有一个明显的槽状结构,这与台站的分布有着直接的关系。

图 1、4、5 作为例子给出了 3 月份某一时刻的整体方案的预报误差以及单站预报误差、重构误差的分布。利用公式(2)可以计算出三者在整个中国地区、各时刻的整体误差值。图 6 中的曲线是三者在中国地区、取 11 点滑动平均后的结果。从图 6 可以清晰地看出,在提前一小时预报的情况下,在中国地区,整体方案的预报误差为 2.7 TECu;单站预报误差要大于重构误差,平均来说,单站预报误差是重构误差的 1.2 倍。

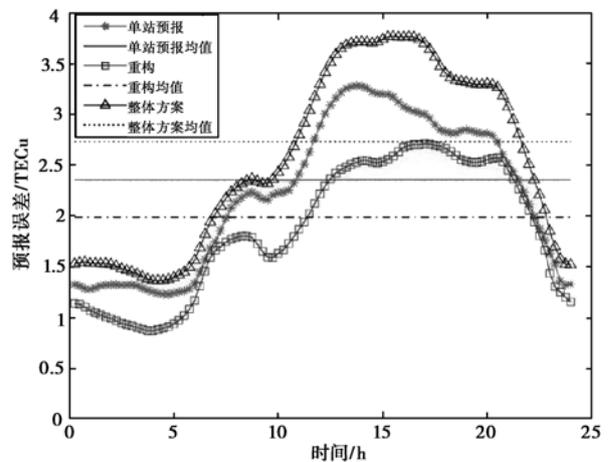


图 6 预报误差、单站预报误差、重构误差随时间的变化(2004 年 3 月)

4.2 单站预报误差的变化特性

首先,在区域上,由图 4 可以看出,单站预报误差的变化是由北向南递增的,在北回归线附近地区(赤道异常北驼峰区)的误差最大。结果表明:预报误差的大小与电离层 TEC 的基值以及电离层自身复杂的电动力学过程有关,以上海武汉一线为界限,南方的低纬地区的预报误差明显大于北方,但是在北驼峰所能到达的广州、厦门一线其预报误差略大于比其纬度更低的海南地区

其次,在时间上,以2004年3月份的单站预报为例,图7给出了提前一小时预报时的中国地区整体的单站预报误差及其相对预报误差。由图7可见,单站预报误差呈单峰结构,峰值出现时间为午后13点左右,大小将近3.5 TECu,误差的平均值为2.2 TECu。另外,在8点和20点,单站预报误差分别比各自的临近时刻略大。对于单站的相对预报误差,则呈现出双峰结构,峰值出现的时间分别在8点和21点,峰值接近15%,均值接近10%。

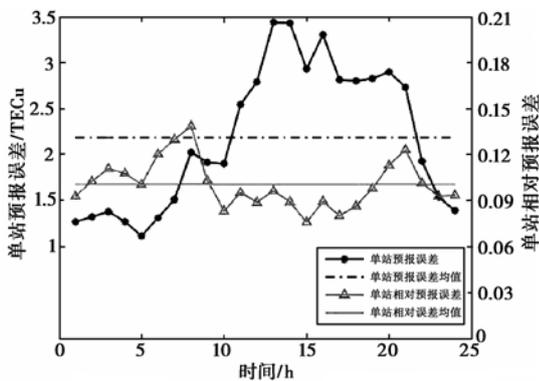


图7 单站预报误差以及相对预报误差随时间的变化(3月)

然后,在季节上,选取3、6、9、12四个月提前一小时预报的单站预报误差结果,如表1所示。就各个台站而言,除了 hlar 和 daej 两站之外,预报误差在季节上都是3月份的预报误差最大,最大值出现在下关(xiag),为4.47 TECu;各台站预报误差最小的月份通常出现在6月或者12月,最小的预报误差要小于1 TECu。就全国整体来说,预报误差在3月份最大,平均为2.35 TECu,较最小的12月的1.5 TECu大了将近2 TECu,6、9两个月的预报误差则略大于12月,分别为1.56 TECu和1.71 TECu。总的来说,二分季节预报误差较冬、夏季节大,尤其是三月份明显大于其他季节。

讨论单站预报误差随提前量的变化。以上关于预报误差的分析,都是基于提前1 h预报的结果进行的,而方案中的预报是以15 min为间隔从15 min至24 h的系列值。图8是北京地区6月份单站预报误差随预报提前量的变化。结果表明单站预报误差随着预报提前量的增加而增大,在提前量大于2.5 h时,预报误差基本不变,趋于一个饱和值,约为2.6 TECu。另外,图中“A”点代表的是用前一小时TEC的观测值来代替当前时刻TEC所得到的预报误差,为2.37 TECu,其明显大于自相关分析法在

提前一小时预报的误差1.33 TECu。即使是用前15 min的TEC值来代替现在电离层TEC值,其误差(图2中“B”点所示)也是要大于用自相关分析法在提前量为15 min的预报误差。由此可见,预报电离层TEC不能简单地利用以前的观测值做时间上的平移来预测当前时刻的TEC值,这样的误差较大。另外,这里还可以定义一个比例系数 k 为饱和值与提前一小时预报误差的比值。在北京地区,该值为1.94,就全国平均来说, k 值为1.88。即在提前量为2.5 h以上对电离层TEC进行单站预报时,其预报误差将是提前1 h单站预报误差的1.88倍。由此,基于前文的结果:提前1 h预报电离层TEC时,单站预报的相对误差约为10%;单站预报误差约是重构误差的1.2倍,以及电离层的背景值和重构误差与预报提前量没有关系这一事实,我们可以估算,在提前量为2.5 h以上时对中国地区电离层TEC进行预报,单站预报的相对误差接近19%,此时的单站预报误差将是重构误差的2.3倍左右。

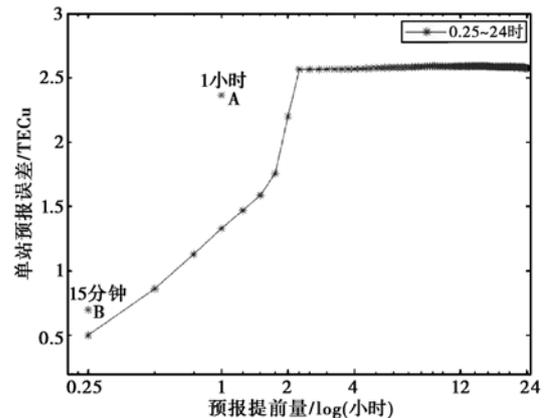


图8 单站预报误差随预报提前量的变化(2004年6月,北京)

4.3 重构误差的分布特性

这里仍以图5为例来对重构误差的分布特性进行分析。从图5以及文中4.1节的叙述中都可以看出重构误差与台站的分布有密切关系。我国华北和内蒙地区由于台站分布较为密集,因此,该地区的重构误差远小于单站预报误差,而在边远地区,尤其是在中国西藏和西南地区,参加重构的台站稀疏,这里的重构误差与单站预报误差相当,甚至在某些地区会超过单站预报误差。

4.4 提高短期预报精度的可能途径

由上分析讨论可知,在提前1 h预报中国地区电离层TEC时,单站预报误差将近重构误差的1.2

倍,对于 2.5 h 以上的预报来说,这一比例增大到 2.3 倍以上。由此可见,在现有台站分布情况下,改进单站预报方法十分重要,可以有效地提高预报精度。

由重构误差的分布特性可以看出,增加台站并合理布局 GPS 接收台站,尤其是在西藏和西南地区,可以显著提高该地区的预报精度。

5. 结 论

1) 利用自相关分析法和改进的克里格插值方法可以实现对我国及周边地区电离层 TEC 的短期预报,具有相当高的精度,并易于实施。

2) 本方案预报误差的大小在地域上呈现出由北向南逐渐增大的趋势,在时间上,在二分季节较大,误差日变化的峰值通常出现在午后 15 点左右。而相对预报误差则是夏季最小,冬季最大,并在 8 点和 20 点呈现双峰结构,变化的范围在 9%~15%。从总体上看,在提前 1 h 预报中国地区电离层 TEC 时,相对预报误差约为 12%左右。

3) 单站预报误差在整体方案的预报误差中起主要作用。在提前 1 h 预报电离层 TEC 时,单站预报误差是重构误差的 1.2 倍,在提前量为 2.5 h 以上时,单站预报误差所占的比重会更大,为重构误差的 2.3 倍。此时单站的相对误差会增加到将近 19%。

4) 改进单站预报方法十分重要,可以有效地提高预报精度。同时增加并合理布局 GPS 接收台站,尤其是在我国的西南以及西藏地区,也能够提高预报精度。

参考文献

- [1] RUSHM C M and EDWARDS W R, Jr. An automated mapping technique for representing the hourly behavior of the ionosphere[J]. *Radio Science*, 1976, 11(11): 931-937.
- [2] LIU Ruiyuan, SMITH P A and KING J W. A new solar index which leads to improved foF2 predictions using the CCIR Atlas[J]. *Telecommunication Journal*, 1983, 50(VIII): 408-414.
- [3] MARIN D, MIRO G and MIKHAILOV A V. A method for foF2 short-term prediction[C]//4th COST 251 Workshop proceedings. Madeira, Portugal, 1999, 8: 214-222.
- [4] CANDLER L J R, MILOSAVLJEVIC M, STANKOVIC S, et al. Ionospheric forecasting technique by artificial neural network[J]. *Electron, Lett.*, 1998, 34(6): 1573-1574.
- [5] MUHTAROV G and KUTIEV I. Autocorrelation method for temporal interpolation and short-term prediction of ionospheric data[J]. *Radio Science*, 1999, 34(2): 459-464.
- [6] ARAUJO-PRADERE E A, FULLER-ROWELL T J and CODRESCU M C. Storm: An empirical storm-time ionospheric correction model, I, Model Description[J]. *Radio Science*, 2002, 37(5): 3-1-3.12. doi: 10.1029/2001RS002467.
- [7] ARAUJO-PRADERE E A, FULLER-ROWELL T J and CODRESCU M C. Storm: An empirical storm-time ionospheric correction model, II, Validation[J]. *Radio Science*, 2002, 37(5): 4-1-4.14. doi: 10.1029/2002RS002620.
- [8] SECAN J A and WILKINSON P J. Statistical studies of an effective sunspot number[J]. *Radio Science*, 1997, 32(4): 1717-1724.
- [9] SOJKA J J, THOMPSON D C, SCHUNK R W, et al. Assimilation Ionospheric Model: Development and testing with combined ionospheric campaign caribbean measurements[J]. *Radio Science*, 2001, 36(2): 247-259.
- [10] FRANCIS N M, BROWN A G, CANNON P S, et al. Prediction of the hourly ionospheric parameter foF2 a novel non-linear interpolation technique to cope with missing data points[J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, 106(A12): 30077-30083.
- [11] SCHUNK R W, SCHERLIESS L and SOJKA J J. Recent approaches to modeling ionospheric weather[J]. *Adv. Space Res.*, 2003, 31(4): 819-828.
- [12] 王世凯, 焦培南, 柳文. 改进的克里格技术实时重构区域电离层 foF2 的分布[J]. *电波科学学报*, 2006, 21(2): 166-171.
WANG Shikai, JIAO Peinan, LIU Wen. Improved Kriging technique of ionospheric parameter foF2 instantaneous mapping[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2006, 21(2): 166-171. (in Chinese)
- [13] LIU R, XU Z, WU J, et al. Preliminary studies on ionospheric forecasting in China and its surrounding area[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2005, 67(12): 1129-1136.
- [14] LIU R, LIU S, XU Z, et al. Application of autocorrelation method on ionospheric short-term forecasting in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(3): 352-357.
- [15] KOUTROUMBAS K, TSAGOURI I and BELEHAKI A. Time series autoregression technique imple-

- mented online in DIAS system for ionospheric forecast over Europe[J]. *Ann. Geophys.*, 2008, 26(2), 371-386.
- [16] 刘瑞源, 刘国华, 吴健, 等. 中国地区电离层 foF2 重构方法及其在短期预报中的应用[J]. *地球物理学报*, 2008, 51(2): 300-306.
LIU Ruiyuan, LIU Guohua, WU Jian, et al. Ionospheric foF2 reconstruction and its application to the short-term forecasting in China region[J]. *Chinese J. Geophys.*, 2008, 51(2): 300-306. (in Chinese)
- [17] 班盼盼, 奚迪龙, 陈春, 等. 支持向量机方法在电离层短期预报中的应用[J]. *现代电子技术*, 2009, 32(7): 114-116.
BAN Panpan, XI Dilong, CHEN Chun, et al. Application of support vector machines method to ionospheric short-term forecast[J]. *Modern electronics technique*, 2009, 32(7): 114-116. (in Chinese)
- [18] COSTER A and KOMJATHY A. Space weather and the global positioning system[J]. *Space Weather*, 2008, 5(2): 15-19.
- [19] 万卫星, 宁百齐, 刘立波, 等. 中国电离层 TEC 现报系统[J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(4): 1040-1045.
WAN Weixing, NING Baiqi, LIU Libo, et al. Nowcasting the ionospheric total electron content over China[J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(4): 1040-1045. (in Chinese)
- [20] MAO T, WAN W, YUE X, et al. An empirical orthogonal function model of total electron content over China[J]. *Radio Sci.*, 2008, 43(2): RS2009. doi: 10.1029/2007RS003629.
- [21] 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*[J], 2007, 50(2): 327-337.
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. (in Chinese)
- [22] 刘瑞源, 王建平, 武业文, 等. 用于中国地区电离层总电子含量短期预报方法[J]. *电波科学学报*, 2010, 26(1): 18-24.
LIU Ruiyuan, WANG Jianping, WU Yewen. Method for the short-term forecasting of the ionospheric total electron content in Chinese region[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2010, 26(1): 18-24. (in Chinese)
- [23] 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: 中国科学院研究生院(上海天文台), 2006.
ZHANG Hongping. Research for Monitoring The Ionosphere in China and Correcting The Ionospheric Delay Based on Ground GPS [D]. Shanghai: Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, 2006. (in Chinese)

作者简介



武业文 (1983—), 男, 辽宁人, 西安电子科技大学无线电物理专业在读博士生, 现在中国极地中心做博士论文, 主要从事电离层物理研究。



刘瑞源 (1941—), 男, 江苏人, 研究员、博士生导师, 享受政府特殊津贴。中国电子学会会士, 中国空间科学学会理事。长期从事电离层与无线电波传播、极区高空大气物理研究, 发表论文 120 余篇, 获国家部级以上科技进步奖 10 项。



吴振森 (1946—), 男, 湖北人, 西安电子科技大学教授, 博士生导师, 无线电物理学科和光学学科带头人, 近几年负责国家高科技发展计划、国家自然科学基金和国防科技预研等项目三十余项。在国内外学术刊物发表论文近三百篇, 被 SCI 和 EI 检索有 100 余篇, 作为主持人获国家及省部级奖多项。主要研究方向(无线电物理方面): 目标与环境的电磁特性、随机介质和复杂结构的电磁波传播和散射、电磁环境的模化技术、计算电磁学。

Evaluation of the prediction errors from the method for the ionospheric TEC short-term forecasting in China region

WU Ye-wen^{1,2} LIU Rui-yuan² WU Zhen-sen¹

ZHANG Bei-chen² LIU Jun-ming²

(1. *Science of school, Xidian University, Xi'an Shaanxi 710071, China;*

2. *Polar Research Institute of China, Shanghai 200136, China*)

Abstract The prediction errors are statistically analyzed for the method of the ionospheric total electron content (TEC) short-term forecasting in China region. The results show that the prediction error rate gradually becomes larger from north to south China, and have the larger value in vernal and autumnal equinoxes. The diurnal variation of prediction errors has a single-peak at about 15:00. While the relative errors have the largest values in winter and the smallest values in summer, and exist two obvious peaks at around 8:00 and 20:00. Overall, the mean of the relative errors is about 12% with 1 hour in advance. At the same time, it can be found that the prediction error for the single station forecasting has larger proportion in the whole method by comparing it to the reconstruction error. Therefore, to improve the single station prediction is such an effective way to improve the accuracy of the whole method. In the meantime, it is necessary to increase and well distribute the GPS receiving stations.

Key words ionospheric TEC; short-term forecasting; single station forecasting; reconstruction; prediction errors