

全球电离层图和国际参考电离层在中国区域的评估^{* 1}

王 成 王解先

(同济大学测绘与地理信息学院,上海 200092)

摘 要 根据全球电离层图和国际参考电离层两种常用的电离层模式,对2011年中国区域三个电离层测高仪的观测数据进行了分析,并对其进行比较。结果表明全球电离层图比国际参考电离层能够更好地反映电离层电子含量的变化,而国际参考电离层当前最新版本 IRI2011 的精度比 IRI2007 的有了较大提高。

关键词 电离层;全球电离层图;国际参考电离层;测高仪;电子含量

中图分类号:P352 文献标识码:A

ASSESSMENT OF GLOBAL IONOSPHERIC MAPS AND INTERNATIONAL REFERENCE IONOSPHERE IN CHINA

Wang Cheng and Wang Jiexian

(College of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract The global ionospheric maps and international reference ionosphere as common ionosphere model are described. Observations in 2011 derived from three ionosondes in China are analysed. Comparative analysis between the measured data in China with global ionospheric maps and international reference ionosphere are represented in the work. The result indicates that global ionospheric maps is better than international reference ionosphere to describe the variation of electron content of ionosphere, and the accuracy of IRI2011 which is the latest version of international reference ionosphere is much higher than IRI2007.

Key words: ionosphere; global ionospheric map; international reference ionosphere; ionosonde; electron content

1 引言

电离层观测是研究电离层的重要手段,目的是为了获取电离层有关的物理参数^[1-3]。电离层测高仪是电离层地面观测最直接最常用的设备,它能获取电离层 E/F2 层临界频率、E/F2 层峰值高度、F2 层剖面厚度与形状参数、回旋频率、电子含量等参数,但只能获得观测台站所在的固定地理位置上电子密度的时空分布,难以获得大范围电离层空间结构以及电离层 D、E、F 层的谷区等信息^[4,5]。为了满足应用需求,研究人员依据电离层的物理特性以及各种观测数据,构建了各种电离层模式,如全球

电离层图(GIM, Global Ionospheric Maps)、国际参考电离层(IRI, International Reference Ionosphere)等。本文将中国区域的电离层实测数据和全球电离层图以及国际参考电离层三者进行对比分析。

2 基本理论

设频率与电子密度的关系为^[6,7]:

$$f = 9 \times 10^{-3} \sqrt{Ne} \quad (1)$$

其中 f 为频率, Ne 为电子密度。

根据全球电离层图可以计算格网点上以经纬度及世界协调时为函数的 TEC 值^[8]:

* 收稿日期:2012-10-15

基金项目:国家自然科学基金(40974018, 41174023)

作者简介:王成,男,1985年生,博士研究生,主要研究方向为卫星大地测量与应用. E-mail: acex@foxmail.com

$$TEC(\beta, \lambda, t) = \frac{T_{i+1} - t}{T_{i+1} - T_i} TEC_i(\beta, \lambda) + \frac{t - T_i}{T_{i+1} - T_i} TEC_{i+1}(\beta, \lambda), T_i \leq t \leq T_{i+1} \quad (2)$$

其中 β, λ 表示格网点的经纬度, t 为观测时刻, T_i, T_{i+1} 与 TEC_i, TEC_{i+1} 分别代表两个相邻历元所对应的观测时刻与 TEC 值。

国际参考电离层模型的最新版是 IRI2011, 其最主要的更新是构建了基于神经网络模型的 F2 层峰值密度和高度。此外, 对电子温度和离子成分也做了改进^[9]。

3 数据分析

3.1 电离层测高仪数据分析

从子午工程数据中心获得 2011 年漠河(MHT)、左岭镇(ZLT)、富克(FKT)三个台站(图 1)的电离层测高仪数据。有效观测数据的时间分布如图 2, 各台站 F2 层峰值密度(NmF2)、F2 层峰值高度(hmF2)如图 3。由图 3 可知, F2 层峰值密度随纬度增加而减

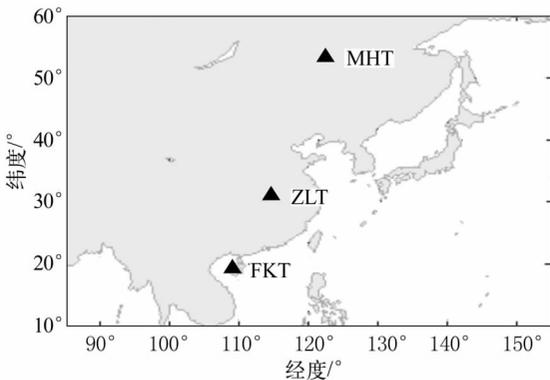


图 1 台站地理位置

Fig. 1 Geographic location of stations

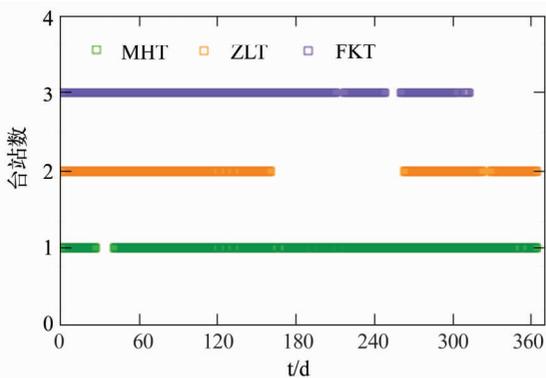


图 2 观测数据的时间分布

Fig. 2 Time distribution of observed data

小, 冬季高于夏季, 即冬季异常, 尤其是地处高纬的漠河台站和中纬左岭镇台站尤为明显, 低纬富克台站不是非常明显。主要因为低纬地区电离层受地球磁场的控制而形成“双峰”, 赤道异常的影响使得电

子密度复杂多变。而 F2 层峰值密度在春季大于夏季有可能因为季节性气候或中性风等因素使得离子的捕获率增高。从整体来看, 各台站 F2 层的峰值高度较为稳定, 漠河台站 F2 峰值高度大约为 250 km, 左岭镇台站 F2 峰值高度大约为 275 km, 富克台站 F2 峰值高度大约为 290 km。

3.2 电子含量的对比

从欧洲定轨中心(CODE)获取全球电离层图的格网文件, 根据式(2)计算电子含量(TEC), 并用国际参考电离层 IRI2007、IRI2011 分别计算相应时刻的 TEC 与 2011 年中国区域电离层实测 TEC 对比。本文所采用的中国区域电离层 TEC(范围为 15° ~ 45°N; 75° ~ 135°E; 时空分辨率为 2 小时, 经度 1.5°, 纬度 1.5°; 样本个数: 3 771 180)是由中国地震局地壳研究所根据中国地壳运动观测网络中 28 个台站的原始观测数据解算得到的电离层电子含量格网数据内插而来。并根据

$$DM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - X_i^0) \quad (3)$$

$$DRMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - X_i^0)^2} \quad (4)$$

$$DME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|X_i - X_i^0|}{X_i^0} \quad (5)$$

分别计算出模型值与实测值的偏差平均值 DM 、偏差均方根 $DRMS$ 、相对误差平均值 RME (表 1)。式中 j_n 表示数据的个数, X_i 为模型值, X_i^0 为实测值。

表 1 实测 GPS TEC 数据与 GIM、IRI 模型的 TEC 对比结果
Tab. 1 Comparison of TEC derived from GPS with those calated with GIM, IRI model

TEC	偏差平均值 (TECU)	偏差均方根 (TECU)	相对误差 平均值(%)
GIM	1.63374	5.04536	22.958
IRI2007	6.07636	11.1949	51.295
IRI2011	-4.70326	10.3509	26.598

由表 1 可知, 全球电离层图比国际参考电离层更接近于中国区域实测电子含量, 其偏差均方根约 5TECU, 相对误差均值约为 23%。而国际参考电离层是一种经验模型, 无法反映真实的电离层变化, 故与实测 TEC 存在较大的偏差。同时, 由于 IRI2011 采用了更多的观测数据以及更好的数学模型, 比 IRI2007 能够更好地反映电离层的平均变化, 其偏差均方根约 10TECU, 相对误差均值约 27%。

3.3 NmF2、hmF2 的对比

将三个台站的电离层测高仪数据分别与 IRI2007、IRI2011 对比, 得到 NmF2、hmF2 实测值与模型值相关性示意图, 并通过最小二乘拟合得到线性方程(图 4、5), 相关统计结果见表 2、3。

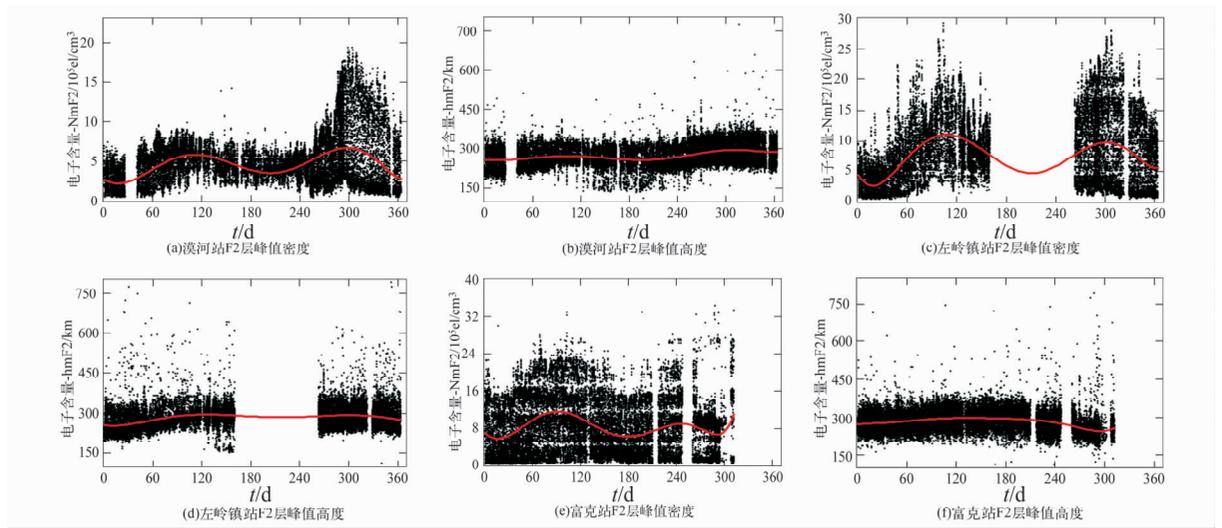


图3 各台站观测的F2层峰值密度及峰值高度

Fig. 3 F2 peak density and peak height observed by each station

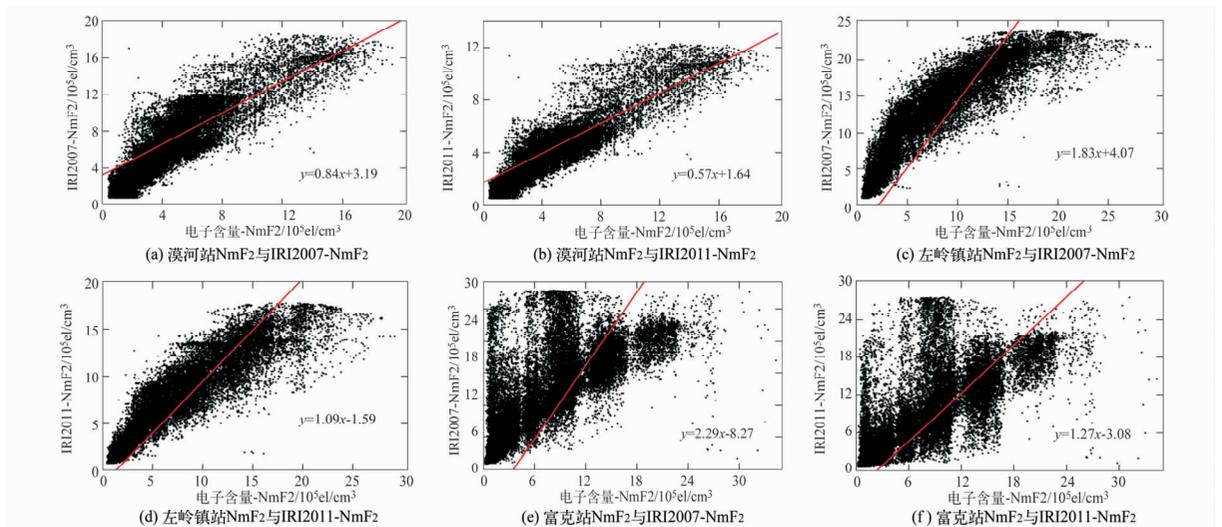


图4 各台站观测的NmF2与IRI-NmF2的对比

Fig. 4 Comparison of NmF2 observed by each station with IRI-NmF2

表2 电离层测高仪数据与IRI模型值的NmF2对比结果

Tab. 2 Comparison of NmF2 observed with ionosonde with those with IRI model

台站-模型	偏差平均值 (10^5el/cm^3)	偏差均方根 (10^5el/cm^3)	相对误差 平均值(%)
MHT-IRI2007	1.696 70	2.459 68	51.045
MHT-IRI2011	-0.75185	1.653 99	24.895
ZLT-IRI2007	4.450 26	5.287 31	86.929
ZLT-IRI2011	-0.200 62	2.364 78	25.638
FKT-IRI2007	7.171 85	9.327 11	207.436
FKT-IRI2011	1.411 95	5.123 56	83.713

表3 电离层测高仪数据与IRI模型值的hmF2对比结果

Tab. 3 Comparison of hmF2 observed with ionosonde with those with IRI model

台站-模型	偏差平 均值(km)	偏差均 方根(km)	相对误差 平均值(%)
MHT-IRI2007	19.093 6	34.644 1	10.639
MHT-IRI2011	7.221 56	27.441 3	7.623
ZLT-IRI2007	4.3635 8	34.693 9	7.698
ZLT-IRI2011	-5.204 1	34.116 0	6.986
FKT-IRI2007	33.338 6	53.747 2	16.603
FKT-IRI2011	22.832 5	47.736 9	14.113

由图4可知,各台站电离层测高仪获取的F2层峰值密度与国际参考电离层IRI2007、IRI2011模型值呈现了不同程度的线性相关,高纬线性相关程度

较好,中纬次之,低纬较差。这是由于低纬地区受赤道异常影响使得电离层变化复杂,而模型不能很好地反映出电离层的真实信息。此外,IRI2011模型

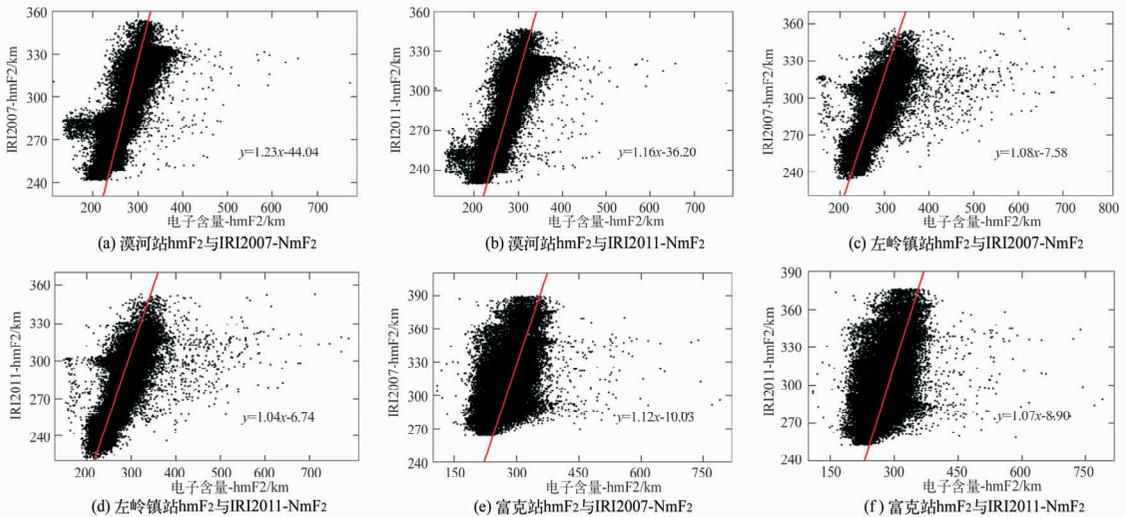


图5 各台站观测的 hmF2 与 IRI-hmF2 的对比

Fig. 5 Comparison of hmF2 observed by each station with IRI-hmF2

值与中、低纬实测数据的线性相关程度比 IRI2007 好,而相比高纬略有降低。

由图5可知,各台站电离层测高仪观测的 F2 层峰值高度与国际参考电离层 IRI2007、IRI2011 模型值呈现较强的线性相关,中纬线性相关程度最高,低纬次之,高纬最低。此外,与 IRI2007 模型相比,IRI2011 模型值与各台站实测数据的线性相关程度均有所提高。

由表2、3可知,IRI 模型值与实测值的 F2 层峰值密度和峰值高度的偏差在中高纬低于低纬地区。就 F2 层峰值密度而言,IRI 模型精度有了较大提高,尤其是中低纬地区。IRI2011 的偏差均方根和相对误差比 IRI2007 降低了约 50%,偏差均方根在中高纬地区约为 2×10^5 el/cm³,低纬地区约为 5×10^5 el/cm³,相对误差均值在中高纬地区为 25% 左右,在低纬地区大约为 84%。就 F2 层峰值高度而言,IRI 模型精度也有所提高,偏差均方根在中高纬地区约为 30 km,低纬地区约为 50 km,相对误差均值在中高纬地区为 7% 左右,在低纬地区大约为 14%。

4 结论

全球电离层图比国际参考电离层能更好地表达电离层电子含量的变化,其偏差均方根大约为 5TECU,平均相对误差约为 23%。国际参考电离层 IRI2011 的精度比 IRI2007 的有较大提高,其模型值与各台站电离层测高仪数据的线性相关程度均有所提高,F2 层峰值密度的偏差均方根和平均相对误差降低了约 50%,F2 层峰值高度的偏差均方根和平均相对误差也有所降低。

致谢 感谢子午工程提供科学数据和中国地震局地震研究所提供中国区域电离层电子含量格网数据。

参 考 文 献

1 Bilitza D and Reinisch B W. International reference iono-

- sphere 2007: Improvements and new parameters [J]. Advances in Space Research, 2008, 42:599-609.
- 2 Bilitza D, Lee-Anna McKinnell and Bodo Reinisch. The international reference ionosphere today and in the future[J]. Journal of Geodesy, 2011, 85:909-920.
- 3 闻德保. 基于 GPS 的电离层层析算法及其应用研究[D]. 中国科学院测量与地球物理研究所,2007. (Wen Debao. Investigation of GPS-based ionospheric tomographic algorithms and their applications[D]. Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences,2007)
- 4 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]. 中国科学院测量与地球物理研究所,2002. (Yuan Yunbin. Study on theories and methods of correcting ionospheric delay and monitoring ionosphere based on GPS [D]. Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences,2002)
- 5 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]. 中国科学院上海天文台,2006. (Zhang Hongping. Study on monitoring ionosphere and correcting ionospheric delay in China by ground-based GPS [D]. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, 2006)
- 6 Wikipedia. Ionosphere [EB/OL]. <http://en.wikipedia.org/wiki/Ionosphere>, 2012.
- 7 Wiki Pedia. Ionogram[EB/OL]. <http://en.wikipedia.org/wiki/Ionogram>, 2011.
- 8 李征航,张小红. 卫星导航定位新技术及高精度数据处理方法[M]. 武汉:武汉大学出版社,2009. (Li Zhenghang and Zhang Xiaohong. New techniques and precise data processing methods of satellite navigation and positioning [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2009)
- 9 王成,王解先. 国际参考电离层在电离层电子密度特征分析中的应用[J]. 大地测量与地球动力学,2012,(2): 55-59. (Wang Cheng and Wang Jiexian. International reference ionosphere and its application in features analysis of ionosphere electron density[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2012,(2):55-59)