

解海永, 宁百齐, 刘立波等. 2014. 北京地区电离层 Chapman 标高的统计分析. 地球物理学报, 57(11): 3523-3531, doi:10. 6038/cjg20141104.

Xie H Y, Ning B Q, Liu L B, et al. 2014. Statistical analysis of the ionospheric Chapman scale height at Beijing. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(11): 3523-3531, doi:10. 6038/cjg20141104.

北京地区电离层 Chapman 标高的统计分析

解海永^{1,2}, 宁百齐^{1,2}, 刘立波^{1,2}, 余涛³, 胡连欢^{1,2},
吴宝元^{1,2}, 郑建昌^{1,2}, 常首民^{1,2}

1 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京空间环境国家野外科学观测研究站, 北京 100029

2 中国科学院地质与地球物理研究所, 中国科学院行星与地球物理重点实验室, 北京 100029

3 国家空间天气监测预警中心, 北京 100081

摘要 利用 F₂ 层峰值处的 Chapman 标高 H_m 可以构建电离层顶部的电子浓度剖面. 本文通过对北京站 (40. 3°N, 116. 2°E) 从 2010 年 1 月到 2014 年 5 月的电离层频高图人工度量后获得了 F₂ 层峰值处的 Chapman 标高 H_m , 分析研究了 H_m 随周日、季节和太阳活动变化, 并探讨了 H_m 与 F₂ 层特征参数 f_oF_2 、 h_mF_2 以及 IRI 底部厚度参数 B_0 的相关性. 研究表明, (1) 北京地区标高 H_m 的周日变化明显, 在正午左右有最大值, 夏季和春秋季节的最小值出现在午夜左右, 而冬季有两个谷值, 在日出后和 20:00LT 左右; H_m 在日出前有较小的增加, 但不是很明显; (2) 白天标高 H_m 有明显的季节变化, 夏季最强, 冬季最弱, 而夜间的季节变化较小; (3) H_m 随太阳活动的增强而增大, 地磁扰动会引起 H_m 偏离正常水平; (4) H_m 与 h_mF_2 相关性很弱, 但白天和夜间各自的相关性较强, 并且夜间大于白天; H_m 与 B_0 有很强相关性; (5) 由 IRI2012 给出的 B_0 与 H_m 在冬季的相关性很小, 表明 IRI 模式还需要进一步改进.

关键词 频高图; 电子浓度剖面; 标高; IRI

doi:10. 6038/cjg20141104

中图分类号 P352

收稿日期 2014-09-14, 2014-10-17 收修定稿

Statistical analysis of the ionospheric Chapman scale height at Beijing

XIE Hai-Yong^{1,2}, NING Bai-Qi^{1,2}, LIU Li-Bo^{1,2}, YU Tao³, HU Lian-Huan^{1,2},
WU Bao-Yuan^{1,2}, ZHENG Jian-Chang^{1,2}, CHANG Shou-Min^{1,2}

1 *Beijing National Observatory of Space Environment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

2 *Key Laboratory of Earth and Planetary Physics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

3 *National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*

Abstract The Chapman scale height around F₂ peak (H_m) can be used to extrapolate the topside electron density profile. In this paper, plenty of manual work has been done to scale the ionograms recorded at Beijing (40. 3°N, 116. 2°E) during the period from January 2010 to May 2014, and the scale height H_m around F₂ peak is deduced. The diurnal, seasonal and solar activity variations of H_m are statistically analyzed, and the correlations between H_m and the F₂ peak parameters f_oF_2 , h_mF_2 and the IRI bottomside thickness parameter B_0 are also discussed. The present study showed that: (1) H_m has an obvious diurnal variation with the peak occurring around noontime and the valley occurring at midnight. For winter seasons, the diurnal variation

has two valleys with one after sunrise and the other at about 20:00LT. H_m has an increase before sunrise, but it is not distinct. (2) H_m during daytime shows a clear seasonal variation with the maximum in summer and minimum in winter, while exhibits a much weaker seasonal variation at night. (3) H_m increases with increasing solar activity, and significantly deviates from normal behavior during geomagnetic disturbance. (4) The correlation between H_m and $h_m F_2$ is very weak, while they have a moderate correlation during nighttime and daytime respectively, and the former is stronger than the latter. H_m is strongly correlated with thickness parameter B_0 . (5) The small correlation between H_m and B_0 from IRI2012 in winter indicates that the IRI model needs further improvement.

Keywords Ionogram; Electron density profile; Scale height; IRI

1 引言

在卫星导航和定位中,当超高频和甚高频无线电波穿过电离层时会发生折射等现象,从而产生附加时间和距离延迟,造成误差.对电波穿过电离层的时间延迟进行校正非常重要,时延校正与电波传播路径上的电子浓度总含量 TEC (total electron content)成正比.因此,对电离层电子浓度剖面的研究具有重要的科学意义.

学者提出了许多数学函数,例如 Chapman 函数,指数函数,抛物线函数,Epstein 函数等来描述电离层剖面(Booker, 1977; Rawer et al., 1985; Rawer, 1988; Di Giovanni and Radicella, 1990; Stankov et al., 2003).在这些函数中,Chapman 函数表述简单并且在分析建模方面有很大的潜力(Huang and Reinisch, 1996),它最大的特点是只需要 F_2 层峰值电子浓度、 F_2 层峰值高度和标高 H_m ,就可以很好地构建顶部的电子浓度剖面.Huang 和 Reinisch 等(2001)基于地面观测的电离图信息提出了一个外推顶部电离层的方法,该方法基于 α -Chapman 函数,以 F_2 层峰值高度($h_m F_2$)处的标高 H_m 来估计 $h_m F_2$ 附近及以上高度的电子浓度剖面.Wright(1960)的研究表明 α -Chapman 函数可以很好地描述电离层 F 层的剖面.Reinisch 等(2004)通过对比由 α -Chapman 函数模拟的剖面 and 由非相干散射雷达、卫星观测得到的剖面后,发现在 $h_m F_2$ 以上 300 km 范围内三者有很好的一致性.然而 Lei 等(2005)发现对于更高高度,用随高度线性变化的标高可以更好地拟合电子浓度剖面,Reinisch 等(2007)也发现对于更高处的电子浓度剖面需要比 $h_m F_2$ 处更大的标高.

在电离层电子浓度剖面研究中,标高是一个非常重要的参数,特别是对顶部的电子浓度剖面研究

(Stankov et al., 2003; Belhaki et al., 2006).利用 UMLCAR SAO-Explorer(<http://ulcar.uml.edu/>)软件度量频高图后可以得到标高 H_m ,由全球分布的电离层测高仪台站可以获得丰富的标高数据.对标高 H_m 的研究建模可以为 IRI 构建顶部电子浓度剖面提供一种选择(Zhang et al., 2006).本文利用北京站(40.3°N, 116.2°E)从 2010 年 1 月到 2014 年 5 月的数据,研究了标高 H_m 的周日变化,季节变化,随太阳活动的变化,以及 H_m 与 F_2 层特征参数 $f_o F_2$ 、 $h_m F_2$ 、IRI 底部厚度参数 B_0 的相关性,并与 IRI2012 给出的 B_0 进行了对比.

2 数据

利用 UMLCAR SAO-Explorer 软件人工标定了北京站(40.3°N, 116.2°E)2010 年 1 月到 2014 年 5 月超过 34000 张由 DPS-4D 数字式测高仪观测得到的频高图,获得了电离层 F_2 层临界频率 $f_o F_2$,峰值高度 $h_m F_2$,IRI 底部厚度参数 B_0 的小时值,同时得到了峰值高度附近的标高 H_m 的小时值.

作为国内首个进入国际 INTERMAGNET 网地磁观测的标准站,中国科学院地质与地球物理研究所北京站对当地的地球磁场进行实时监测.本文利用了 2010 年 1 月到 2014 年 5 月北京站的地磁 k 指数数据.太阳 10.7 cm(2800 MHz)射电流量指数 F107 数据从 <http://www.noaa.gov/ftpdir/> 网站下载.

3 结果与讨论

3.1 周日变化和季节变化

2010 年 1 月至 2014 年 5 月期间北京站电离层标高 H_m 月中值的周日变化和逐月变化如图 1 所示.从图中可以看出,标高 H_m 的最大值出现在正午

左右,并且有很强的季节变化,夏季最大,春秋季节次之,冬季最小;从 2011 年开始,标高 H_m 逐年增加,这与太阳活动有较强的相关性。

将标高周日变化相似的月份划分在一个季节,6 月,7 月和 8 月为夏季,3 月,4 月,5 月,9 月,10 月和 11 月为春秋季节,12 月,1 月和 2 月为冬季. 图 2 表示电离层标高 H_m 夏季、春秋季节和冬季的周日变化. 由图可见,标高在白天的季节变化较大,夜晚的季节变化较小. 标高的最大值出现在白天的正午左右,有很明显的季节变化,夏季最大,冬季最小. 标高的最小值随季节有明显的不同,夏季和春秋季节在午夜出现;冬季有两个谷值,一个在日出后,一个在 20:00LT 左右. Zhang 等(2006)研究发现,在中国低纬地区的海南,标高在日出前有明显的增大,冬季最强,春秋季节和夏季次之,而北京所在的中纬地区与低纬地区不同,日出前的增强较微弱. 标高 H_m 在日出时段和 20:00LT 左右都有所减小,冬季最明显.

Chapman 标高的定义与中性大气标高相关联. 中性大气标高(Rishbeth and Garriott, 1969)为 $H = kT/mg$, 其中 k 是玻耳兹曼常数, T 是大气温度, m 是

平均分子量, g 是重力加速度, H 正比于中性成分的温度 T . 因此 H_m 的周日变化和季节变化或许可以用中性成分温度的变化来解释(Zhang et al., 2006; Mosert et al., 2012). 在 F_2 层,扩散、电场漂移等过程都会对电子浓度剖面产生影响. H_m 日出时段的增大或许不仅与温度有关,还受电子浓度剖面形状改变的影响(Lee and Reinisch, 2006). 标高日落增大也许与电场反向增强(Yu et al., 2002)有关,但是北京所在的中纬地区相比于磁倾赤道附近不明显.

3.2 太阳活动变化

在中低纬地区,电离层 F 层的主要离化源是太阳 EUV(Extreme Ultraviolet)辐射. 电离层中的许多现象受到太阳活动的显著影响. Liu 等(2006b)研究了中低纬地区武汉的标高,发现不同的太阳活动条件下,标高的周日变化趋势相似,并且标高随太阳活动增强而增大. Zhang 等(2006)的研究发现标高与太阳活动有较强的相关性.

太阳 F107 指数表示太阳 10.7 cm(2800 MHz)射电流量,是表征太阳活动的一个重要指数. k 指数是当地磁场扰动的表征参数,本文以北京站的 k 指

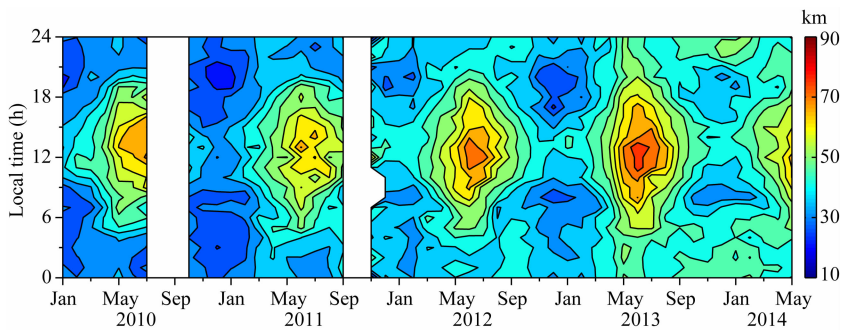


图 1 2010 年 1 月至 2014 年 5 月期间标高 H_m 月中值的当地时间 and 月份的等值线图

Fig. 1 Contour plot of monthly median H_m against local time and months during the period from January 2010 to May 2014

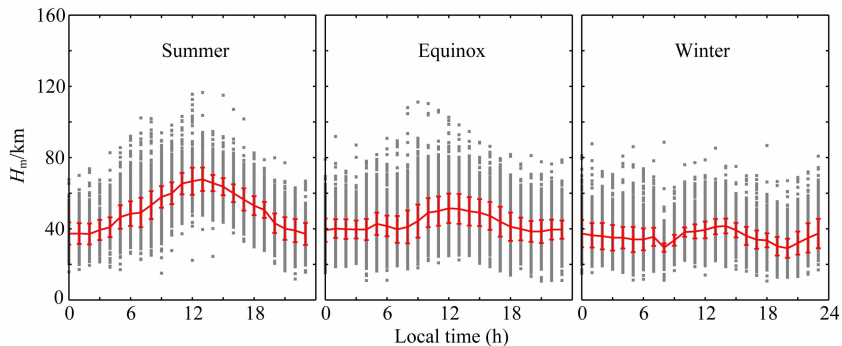


图 2 夏季、春秋季节和冬季标高 H_m 的周日变化

灰色散点表示每小时的观测值,实线表示小时值的季节平均,误差棒表示标准差.

Fig. 2 Diurnal variation of H_m for summer, equinox and winter seasons

Gray dots represent hourly values. The solid lines with vertical bars are the seasonal averages with the standard deviations.

数表示地磁场扰动情况. 选取了标高 H_m 在低等太阳活动和中等太阳活动条件下各 3 天的数据, 用 3 天的均值来考察太阳活动对标高周日变化的影响. 2010 年 12 月 10 日至 12 日太阳活动指数 F107 的均值 $F107_m = 88.0$, 地磁指数 Σk (一天 8 个 k 指数的和) 的均值为 $\Sigma k_m = 13.0$. 2011 年 12 月 10 日至 12 日 $F107_m = 135.3$, $\Sigma k_m = 17.3$. 可见在这两个时间段内地磁场较平静, 而前者为低等太阳活动水平, 后者为中等太阳活动水平, 对应的标高 H_m 的周日变化如图 3 所示. 由图 3 可知, 在低等和中等太阳活动水平下, 标高有相似的周日变化规律, 日出后增大, 下午减小, 20:00LT 以后又较快地增大, 其后逐渐减小; 太阳活动对标高的大小有显著的影响, 标高随太阳活动的增强而增加, 中等太阳活动较低等太阳活动标高增加了 10 km 左右.

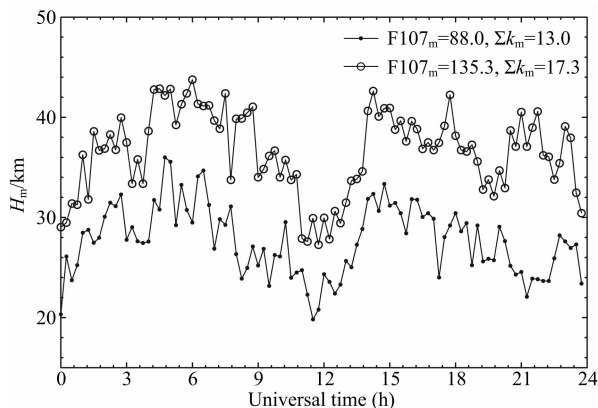


图 3 低等太阳活动(2010 年 12 月 10—12 日, F107 的均值 $F107_m = 88.0$, 带点实线)和中等太阳活动(2011 年 12 月 10—12 日, $F107_m = 135.3$, 带圈实线)条件下, 北京地区标高 H_m 三天均值的周日变化, 图中也包括 k 指数三天的平均值 Σk_m

Fig. 3 Three days mean diurnal variations of H_m under low (mean F107=88.0 during Dec. 10th to 12th, 2010, the solid line with dots) and moderate (mean F107=135.3 during Dec. 10th to 12th, 2011, the solid line with circles) solar activity levels at Beijing. The mean k -indices are also included

图 4 表示太阳活动指数 $F107 > 120$ (灰色实线) 和 $F107 < 100$ (黑色实线) 时, 标高 H_m 在不同季节的周日变化. 由图 4 可见, 标高随太阳活动增强而增大; 较低的太阳活动条件下, 夏季和春秋季节白天日出增强的时间相对于较高的太阳活动条件晚 1 个小时左右, 而正午最大值出现的时间晚约 2 个小时.

不同太阳活动条件下, 标高周日变化的差别可以反映太阳活动对标高周日变化的影响程度. 对于夏季和春秋季节, 标高 H_m 周日变化的差异类似, 在

06:00LT 和 15:00LT 出现两个差异的转折点, 恰好是日出和日落前. 夏季, 白天和夜晚的差别相当; 春秋季节夜晚的差别大于白天. 电离层的物理过程或许可以解释这一现象, 白天太阳辐射对标高的变化起主导作用, 北京夏季的日照时间长, 天顶角小, 所以白天标高的差异大于春秋季节; 夜晚电离层的电动势过程(主要是 F_2 层的扩散)对标高起主导作用, 夏季和春秋季节夜晚的差别相当.

与夏季和春秋季节不同, 冬季的转折时间在 11:00LT 和 18:00LT, 并且夜晚的差别大于白天. 夜晚电动势过程对标高的影响冬季最大. 白天太阳辐射较其他季节小, 而差别反而比春秋季节大, 这里电动势过程的作用值得考虑. 另外, 标高 H_m 冬季差别大于其他季节或许与电离层的冬季异常有关.

Richards 等(1994)和 Liu 等(2006a)指出在高层大气物理研究中, 用 F107p 指数可以准确地表示太阳活动的周期变化. $F107p = (F107 + F107A)/2$, 其中 F107A 是 F107 指数 81 天的滑动平均. 本文研究的时间范围内, F107p 有最大值 196.8, 最小值 71.0, 平均值 112.8, 基本覆盖了由低到高的太阳活动水平. 为了研究标高 H_m 随太阳活动的变化, 分析标高 H_m 与 F107p 的关系. 图 5 表示不同季节标高 H_m 与 F107p 关系的散点图. 图 5 表明, 标高 H_m 随太阳活动指数 F107p 线性增加, 午夜的增加率 ($dH_m/dF107p$) 大于正午, 冬季最为明显. 图 6 表示 $dH_m/dF107p$ 在夏季、春秋季节和冬季的周日变化. 可见, 对于春秋季节和冬季, 标高 H_m 随 F107p 的增加率夜晚大于白天, 白天为 0.1 左右, 夜晚约是白天的 2 倍; 夏季较复杂, 白天 07:00—14:00LT 明显大于其他季节, 而在 15:00LT 小于其他季节, 夜晚的变化趋势与其他季节一致, 只是变化率稍大一些.

3.3 地磁活动变化

磁暴对电离层有着复杂的影响. Liu 等(2006b)对武汉标高的研究发现, 磁暴期间标高显著偏离平均水平. 本文利用北京当地的地磁 k 指数来研究磁场扰动对标高 H_m 的影响. 以 2013 年 3 月 9 日 ($F107 = 140$, $\Sigma k = 20$) 和 2012 年 3 月 9 日 ($F107 = 119$, $\Sigma k = 40$) 为例, 这两天的太阳活动中等偏低, 但前者磁场较平静, 后者磁场扰动强烈. 图 7 表示在磁场平静和扰动时, 标高 H_m 的周日变化. 由图可知, 2013 年 3 月 9 日的磁场较平静并且没有明显偏离平均活动水平, 相应的标高 H_m 也没有明显的偏离; 而 2012 年 3 月 9 日的磁场扰动强烈且大于平均活动水平, 相应的标高 H_m 对平均值有显著的偏离.

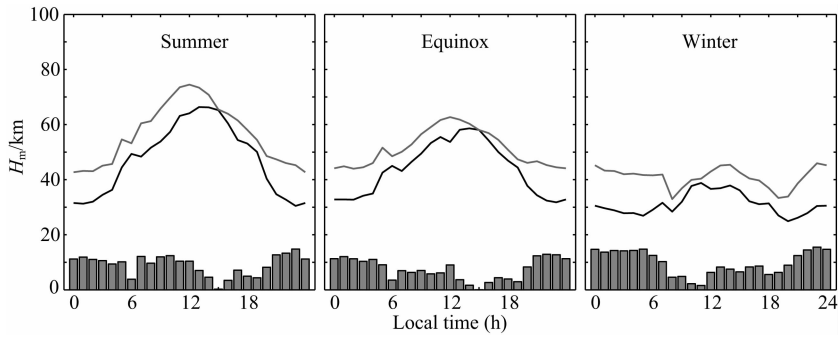


图 4 在 $F107 > 120$ (灰色实线) 和 $F107 < 100$ (黑色实线) 条件下,北京地区标高 H_m 在夏季、春秋分和冬季的周日变化,灰条表示两者的差异

Fig. 4 Diurnal variations of H_m for $F107 > 120$ (gray lines) and $F107 < 100$ (black lines) for summer, equinox and winter at Beijing. The gray bars are the differences between the two

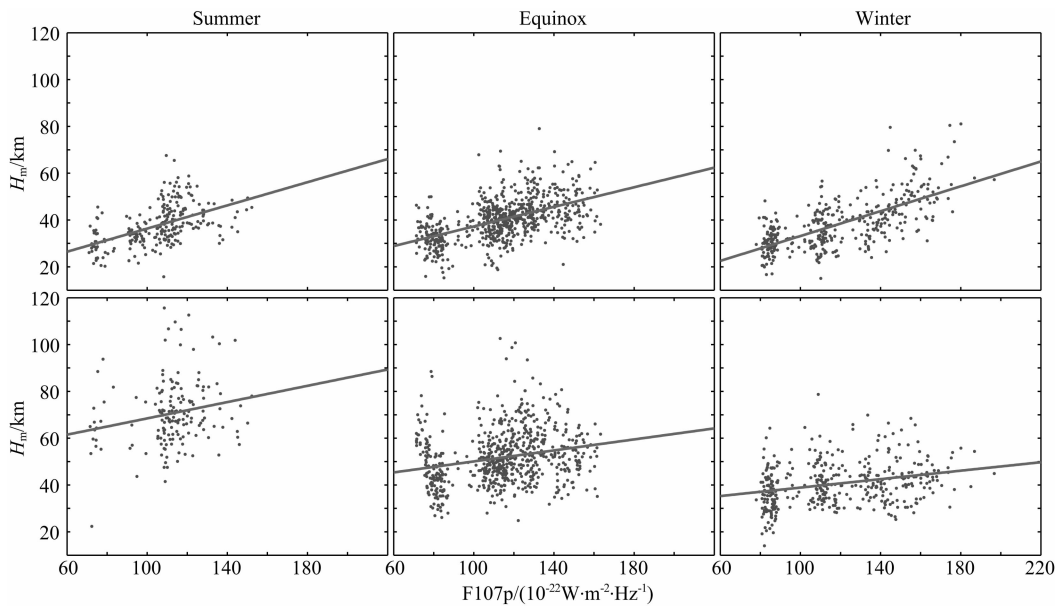


图 5 夏季、春秋分和冬季标高 H_m 与太阳活动指数 $F107p$ 关系的散点图

上三幅图表示 00:00LT,下三幅图表示 12:00LT. 实线表示线性回归趋势.

Fig. 5 Scatterplot of H_m versus the solar activity index $F107p$ for summer, equinox and winter

The upper panels are at 00:00 LT, and the bottom panels are at 12:00 LT.

The solid lines show the trend of the linear regression.

这表明磁场的扰动确实引起了标高的扰动,但磁场对标高的影响较复杂.

3.4 标高与 f_oF_2 、 h_mF_2 和 B_0 的相关性

研究了标高 H_m 与电离层 F_2 层的特征参数 f_oF_2 、 h_mF_2 和国际电离层参考模式 IRI(International Reference Ionosphere)底部厚度参数 B_0 的相关性.通常,标高 H_m 和 f_oF_2 的相关性非常弱, H_m 与 h_mF_2 有一个中等的正相关,而 H_m 与 B_0 的相关性非常强.图 8 是标高 H_m 与 f_oF_2 的散点图.从图 8 可知, H_m 与 f_oF_2 的相关性很弱.

标高 H_m 与 h_mF_2 的散点图如图 9 所示.由图 9 左图可知, H_m 与 h_mF_2 几乎没有相关性($r=0.18$),

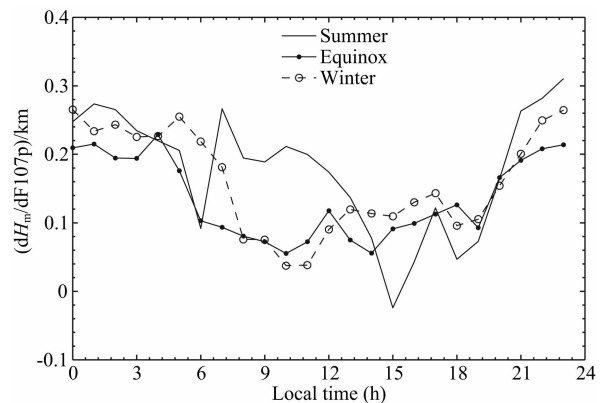


图 6 夏季、春秋分和冬季标高 H_m 随 $F107p$ 增加率的周日变化
Fig. 6 Diurnal variations of the rate of H_m increase with $F107p$ for summer, equinox and winter

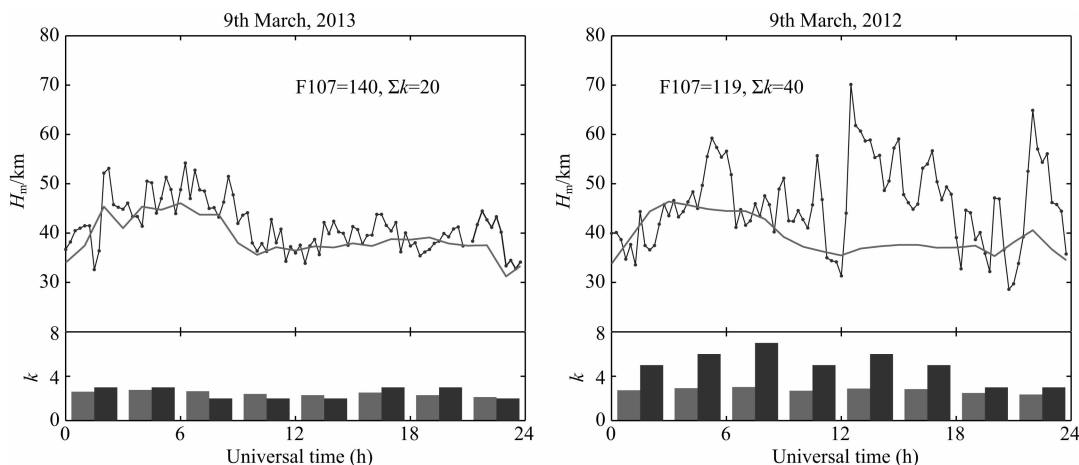


图7 地磁平静(2013年3月9日)和扰动(2012年3月9日)期间北京地区标高 H_m 的周日变化

黑色带点实线和黑条分别表示当天每 15 min 的标高 H_m 和每 3 h 的 k 指数. 作为参考,

灰色实线和灰条分别表示 2 月和 3 月标高 H_m 和 k 指数的平均值.

Fig. 7 Diurnal variations of H_m for geomagnetically quiet (9th March, 2013) and disturbed (9th March, 2012) days at Beijing. The black lines with dots and the black bars represent 15-minute H_m and 3-hour k index of the day respectively. As reference, the gray solid lines and the gray bars are mean value of H_m and 3-hour k index respectively of February and March.

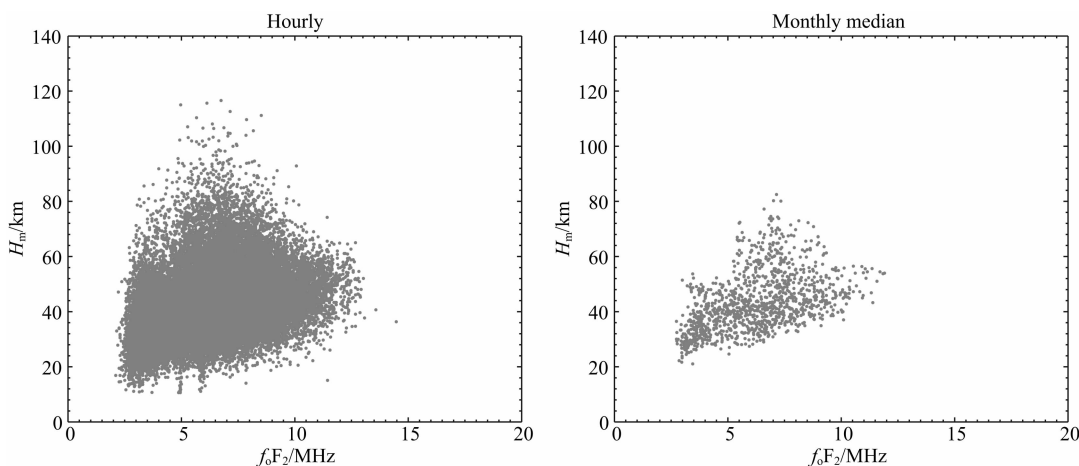


图8 北京地区标高 H_m 和 F_2 层临界频率 f_0F_2 的散点图

左图表示小时值,右图表示月中值

Fig. 8 Scatter plots of H_m versus f_0F_2 for Beijing

Left panel shows daily hourly data, and right panel shows monthly median data

没有预想的中等强度的相关,有趣的是散点出现了两个分支.将数据分为两组(08:00—16:00LT 一组,20:00—04:00LT 一组)后,恰好对应散点图的两个分支,如图9右图所示,可见两组数据的 H_m 与 h_mF_2 都有中等强度的相关,并且晚间的相关性强于白天,达到了 0.79.

B_0 的观测值由频高图度量得到的电子浓度剖面通过最小二乘拟合方法来获得,拟合高度从 h_mF_2 到 h_mF_1 ,如果没有 F_1 层,则从 h_mF_2 到 0.24h(电子浓度等于 $0.24 \times N_mF_2$ 的高度).图10表示标高 H_m 与 B_0 观测值的散点图.左图小时值线性拟合关系

为 $H_m = 0.3951 \times B_0 + 12.6125$,相关系数为 0.9025.但仔细观察发现,当 B_0 大于 50 km 时, H_m 的变化率有减小的趋势,因此对月中值进行二次拟合,结果为 $H_m = -0.0016 \times B_0^2 + 0.6801 \times B_0 + 0.9174$,发现有更高的相关系数 0.9588.

3.5 IRI 计算的 B_0 与 H_m 的对比

通过研究发现,标高 H_m 与 IRI 的底部厚度参数 B_0 有很强的相关性.可以利用 IRI 提供的参数推算出标高 H_m ,进而外推电离层 h_mF_2 以上的电子浓度剖面(Bilitza, 2001).在 IRI 中用 N_mF_2 , h_mF_2 , B_0 和 B_1 来描述电离层的电子浓度剖面(Bilitza et al.,

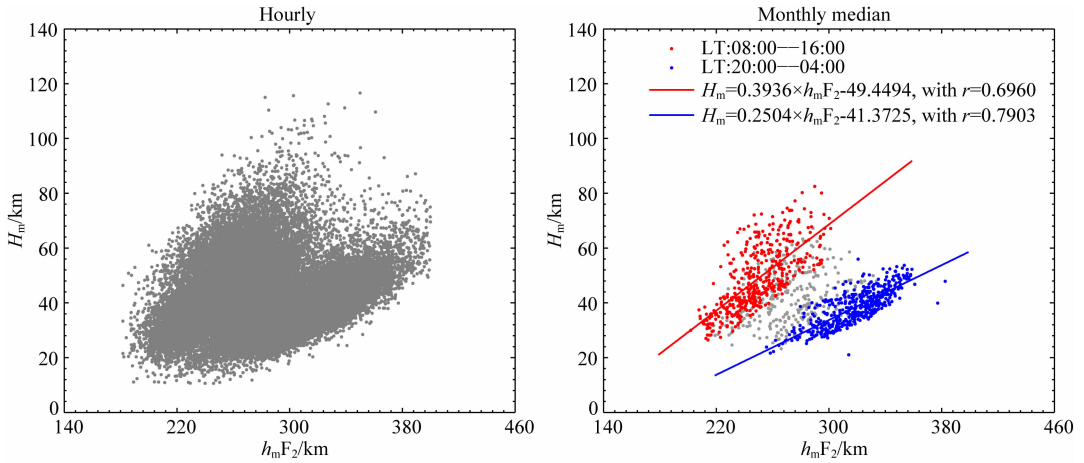


图 9 北京地区标高 H_m 和 F_2 层峰值高度 h_mF_2 的散点图

左图表示小时值,右图表示月中值

Fig. 9 Scatter plots of H_m versus h_mF_2 for Beijing

Left panel shows daily hourly data, and right panel shows monthly median data

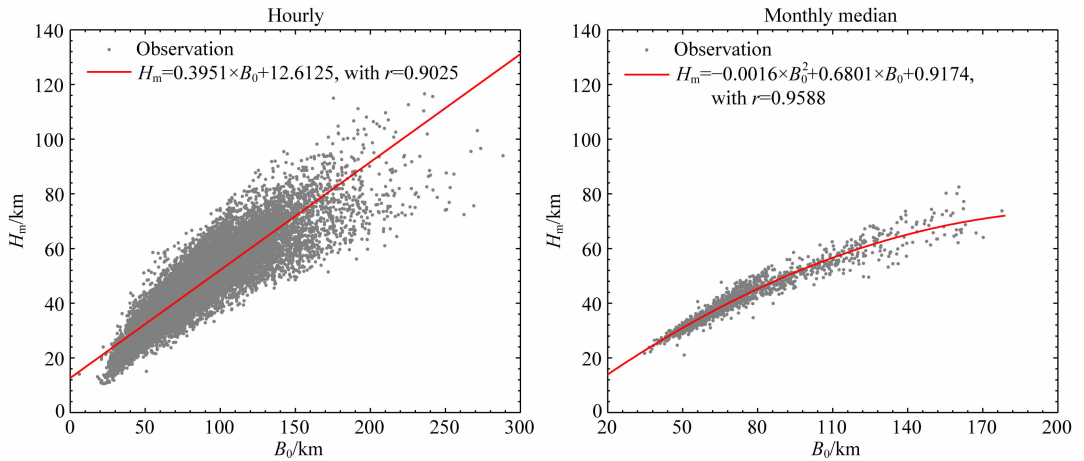


图 10 北京地区标高 H_m 和厚度指数 B_0 的散点图

左图表示小时值,右图表示月中值.

Fig. 10 Scatter plots of H_m versus thickness parameter B_0 for Beijing

Left panel shows daily hourly data, and right panel shows monthly median data

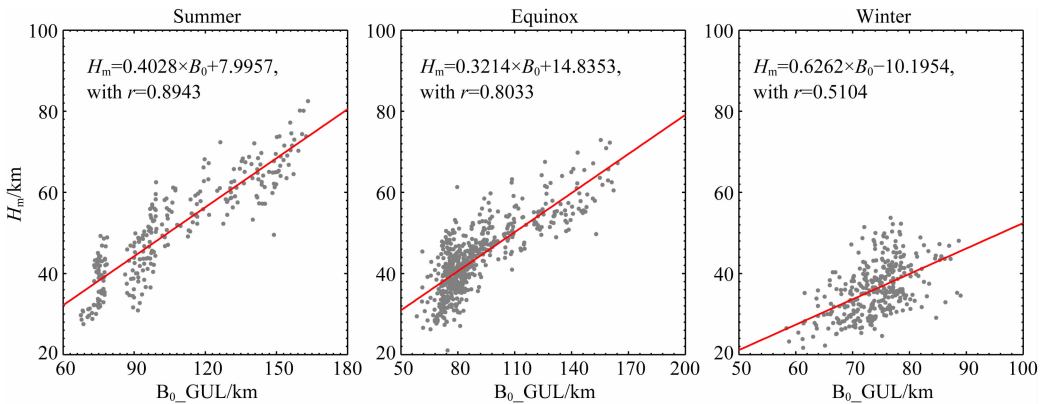


图 11 夏季、春秋分和冬季北京地区标高 H_m 和

IRI2012 给出的厚度指数 B_0 的散点图

Fig. 11 Scatter plots of H_m versus thickness parameter B_0_GUL from IRI2012

at Beijing for summer, equinox and winter

2014),公式如下:

$$N_e(h) = N_m F_2 \frac{\exp(-Z^{B_1})}{\cosh(Z)}; Z = (h_m F_2 - h)/B_0. \quad (1)$$

F_2 层底部的厚度参数 B_0 和形状参数 B_1 是决定电子浓度剖面的重要参数. IRI2012 为用户提供 3 种选择来获得 B_0 , 标准模式(standard table), Gulyaeva 模式和 Altadill 模式, 以下分别简称 B_0_TAB , B_0_GUL 和 B_0_ABT . 标准模式是基于由中纬地区的频高图得到的 B_0 数据表格, 磁倾赤道处由外推获得, IRI2001 加入了更新的数据表格, 提高了模式的准确性(Bilitza et al., 2000; Radicella et al., 1998); Gulyaeva 模式(Gulyaeva, 1987)在 F_2 层底部选取了电子浓度减小为 $N_m F_2$ 一半时的高度(0.5h), 即 $N_e(0.5h) = 0.5 \times N_m F_2$; Altadill 等(2009)提出的模式被 IRI2012 引入, 并推荐为默认的模式使用, 该模式利用 1998—2006 年全球分布的 27 个台站测高仪的数据, 基于球谐分析的方法建立.

由 IRI2012 给出的 B_0_GUL 和观测得到的标高 H_m 的关系如图 11 所示, 可见在不同的季节, B_0_GUL 和 H_m 之间线性相关, 并且两者的相关性夏季大于春秋大于冬季, 相关系数分别为 0.8943, 0.8033 和 0.5104, 冬季的相关性较弱, 这反映了 IRI2012 冬季 B_0 的结果还有很大的提升空间. 经计算, B_0_ABT 和 H_m 的相关系数为夏季 0.8307、春秋 0.7603 和冬季 0.3252; B_0_TAB 和 H_m 的相关系数为夏季 0.7367、春秋 0.6677 和冬季 0.3720, 可见 B_0_GUL 和 H_m 之间的相关性最好. 由于构建 Gulyaeva 模式的数据主要来自中纬地区的台站(Gulyaeva, 1987), 因此北京地区的标高 H_m 与 B_0_GUL 的相关性最强不难理解.

4 结论

利用 UMLCAR SAO-Explorer 软件人工度量了中纬地区北京站(40.3°N, 116.2°E)2010 年 1 月至 2014 年 5 月的频高图, 获得了 Chapman 标高 H_m 数据, 并统计分析了 H_m 的周日变化, 季节变化, H_m 随太阳活动和地磁活动的变化, H_m 与 F_2 层特征参数 $f_o F_2$ 、 $h_m F_2$ 、IRI 底部厚度参数 B_0 的相关性, 以及 H_m 与 IRI2012 给出的 B_0 的相关性. 主要的研究结果总结如下:

(1) 月中值的周日变化表明标高 H_m 在白天有明显的季节变化, 夏季最强, 冬季最弱, 而夜间的季

节变化较小. H_m 随太阳辐射通量的增强而增大, 春秋和冬季增加率夜晚大约是白天的 2 倍, 夏季上午大于其他季节.

(2) 对于不同的季节 H_m 有相似的周日变化, 正午左右有最大值, 夏季和春秋的最小值出现在午夜左右, 而冬季有两个谷值, 在日出后和 20:00LT 左右; H_m 在日出前有较小的增加, 但不是很明显. 地磁扰动会引起 H_m 的扰动, 但是过程很复杂.

(3) H_m 与 $f_o F_2$ 的相关性很弱, 同时, H_m 与 $h_m F_2$ 相关性也很弱, 但白天和夜间不同时段各自的相关性较强, 并且夜间大于白天; H_m 与由频高图获得的 B_0 有很强的相关性; 由 IRI2012 给出的 B_0 与 H_m 在夏季强相关, 春秋较强, 但冬季的相关性很小, 表明 IRI 模式还需要进一步改进.

致谢 感谢中国科学院地质与地球物理研究所北京观测站的同事在频高图的标定工作以及在地磁观测工作中的辛勤付出. 地磁数据来自于国家重大科技基础设施“子午工程”.

References

- Altadill D, Torta J M, Blanch E. 2009. Proposal of new models of the bottom-side B_0 and B_1 parameters for IRI. *Adv. Space Res.*, 43(1): 1825-1834, doi: 10.1016/j.asr.2008.08.014.
- Belehaki A, Marinov P, Kutiev I, et al. 2006. Comparison of the topside ionosphere scale height determined by topside sounders model and bottomside digisonde profiles. *Adv. Space Res.*, 37(5): 963-966. doi: 10.1016/j.asr.2005.09.014.
- Bilitza D, Radicella S M, Reinisch B W, et al. 2000. New B_0 and B_1 models for IRI. *Adv. Space Res.*, 25(1): 89-95.
- Bilitza D. 2001. International Reference Ionosphere 2000. *Radio Science*, 36(2): 261-275.
- Bilitza D, Altadill D, Zhang Y L, et al. 2014. The International Reference Ionosphere 2012—a model of international collaboration. *J. Space Weather Space Clim.*, 4, A07, doi: 10.1051/swsc/2014004.
- Booker H G. 1977. Fitting of multi-region ionospheric profiles of electron density by a single analytic function of height. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 39(5): 619-623.
- Di Giovanni G, Radicella S M. 1990. An analytical model of the electron density profile in the ionosphere. *Adv. Space Res.*, 10(11): 27-30.
- Gulyaeva T L. 1987. Progress in ionospheric informatics based on electron-density profile analysis of ionograms. *Adv. Space Res.*, 7(6): 39-49.
- Huang X Q, Reinisch B W. 1996. Vertical electron density profiles from the digisonde network. *Adv. Space Res.*, 18(6): 121-129.

- Huang X Q, Reinisch B W. 2001. Vertical electron content from ionograms in real time. *Radio Sci.*, 36(2): 335-342.
- Lee C C, Reinisch B W. 2006. Quiet-conditions $h_m F_2$, $N_m F_2$, and B_0 variations at Jicamarca and comparison with IRI-2001 during solar maximum. *J. Atmos. Sol. -Terr. Phys.*, 68(18): 2138-2146.
- Lei J H, Liu L B, Wan W X, et al. 2005. Variations of electron density based on long-term incoherent scatter radar and ionosonde measurements over Millstone Hill. *Radio Sci.*, 40(2), RS2008, doi: 10.1029/2004RS003106.
- Liu L B, Wan W X, Ning B Q, et al. 2006a. Solar activity variations of the ionospheric peak electron density. *J. Geophys. Res.*, 111, A08304, doi: 10.1029/2006JA011598.
- Liu L B, Wan W X, Ning B Q. 2006b. A study of the ionogram derived effective scale height around the ionospheric $h_m F_2$. *Ann. Geophys.*, 24: 851-860, doi: 10.5194/angeo-24-851-2006.
- Mosert M, Buresova D, Magdaleno S, et al. 2012. An analysis of the scale height at the F_2 -layer peak over three middle-latitude stations in the European sector. *Earth Planets Space*, 64(6): 493-503.
- Radicella S M, Bilitza D, Reinisch B W, et al. 1998. IRI task force activity at ICTP: proposed improvements for the IRI region below the F peak. *Adv. Space Res.*, 22(6): 731-739.
- Rawer K, Bilitza D, Gulyaeva T L. 1985. New formulas for the IRI electron density profile in the topside and middle ionosphere. *Adv. Space Res.*, 5(7): 3-12.
- Rawer K. 1988. Synthesis of ionospheric electron density profiles with Epstein functions. *Adv. Space Res.*, 8(4): 191-199.
- Reinisch B, Nsumei P, Huang X, et al. 2007. Modeling the F_2 topside and plasmasphere for IRI using IMAGE / RPI and ISIS data. *Adv. Space Res.*, 39(5): 731-738.
- Reinisch B W, Huang X Q, Belehaki A, et al. 2004. Modeling the IRI topside profile using scale heights from ground-based ionosonde measurements. *Adv. Space Res.*, 34(9): 2026-2031.
- Richards P G, Fennelly J A, Torr D G, et al. 1994. EUVAC: A solar EUV flux model for aeronomic calculations. *J. Geophys. Res.*, 99(A5): 8981-8992.
- Rishbeth H, Garriott O K. 1969. Introduction to Ionospheric Physics. New York: Academic Press.
- Stankov S M, Jakowski N, Heise S, et al. 2003. A new method for reconstruction of the vertical electron density distribution in the upper ionosphere and plasmasphere. *J. Geophys. Res.*, 108(A5): 1164, doi: 10.1029/2002JA009570.
- Wright J W. 1960. A model of the F region above $h_{max} F_2$. *J. Geophys. Res.*, 65(1): 185-191.
- Yu T, Wan W X, Liu L B. 2002. Numerical study of the ionospheric electric field at mid and low latitudes. *Science in China (Series A)* (in Chinese), 32(8): 688-696.
- Zhang M L, Reinisch B W, Shi J K, et al. 2006. Diurnal and seasonal variation of the ionogram-derived scale height at the F_2 peak. *Adv. Space Res.*, 37(5): 967-971.

附中文参考文献

- 余涛, 万卫星, 刘立波. 2002. 中低纬电离层电场理论模式. *中国科学(A)*, 32(8): 688-696.

(本文编辑 何燕)