

宋 茜, 丁 锋, 万卫星等. 北美地区夜间中尺度电离层行进式扰动的 GPS 台网监测研究. 地球物理学报, 2011, 54(4): 935~941, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.04.007

Song Q, Ding F, Wan W X, et al. Monitoring nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances using the GPS network over North America. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(4): 935~941, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.04.007

北美地区夜间中尺度电离层行进式扰动的 GPS 台网监测研究

宋 茜^{1,2}, 丁 锋^{1*}, 万卫星¹, 刘立波¹, 宁百齐¹

1 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘 要 本文利用 2007 年 6 月~2008 年 5 月期间北美 GPS 台站密集地区的 TEC 观测资料, 对夜间中尺度电离层行进式扰动(MSTIDs)的传播特性进行了分析研究. 结果表明: 北美地区的夜间电离层行进式扰动一般发生在美国西部时间 21:00~02:00LT (05:00~10:00UT)时段, 表现在 TEC 中的最大扰动幅度为 0.45~0.6TECU. 扰动以 20~40 min 的周期, 100~200 m/s 的水平相速度朝西南方向传播, 覆盖磁纬 24°N 到 44°N, 经度 130°W 到 70°W 的广大范围. 统计结果显示, 夜间电离层行进式扰动呈现明显的半年变化特征, 扰动振幅的峰值在春秋分前后达到最大, 在至日前后最小; 扰动传播的水平相速度在夏季比冬季约大 20%. 进一步分析表明, 夜间电离层扰动振幅的半年变化是由电离层背景电子浓度的半年变化引起的, 而扰动速度的季节变化则与热层风场的季节变化密切相关.

关键词 GPS, TEC, 夜间中尺度电离层行进式扰动

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.04.007

中图分类号 P352

收稿日期 2010-02-01, 2011-02-28 收修定稿

Monitoring nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances using the GPS network over North America

SONG Qian^{1,2}, DING Feng^{1*}, WAN Wei-Xing¹, LIU Li-Bo¹, NING Bai-Qi¹

1 Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2 Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Using the total electron content (TEC) data observed from a dense GPS network in North America from June 2007 to May 2008, we analyzed the propagation characteristics of the nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances (MSTIDs) over North America. The results show that, the nighttime MSTIDs occur frequently between the local time of 21:00LT (05:00UT) and 02:00LT (10:00UT), which can be characterized by the maximum amplitude of 0.45~0.6TECU and the average period of 20~40 minutes in the TEC perturbation series. The nighttime MSTIDs tend to propagate southwestward at the horizontal velocities of 100~200 m/s covering large area in the range of magnetic latitude (24°N~44°N) and longitude (130°W~70°W). The statistical results indicate that, the nighttime MSTIDs have a clear semiannual variation, with the

基金项目 国家自然科学基金项目(40974089, 40774090)和国家重点基础研究发展计划项目(2006CB806306, 2011CB811405)资助.

作者简介 宋 茜, 女, 1986 年生, 在读硕士研究生, 主要从事电离层物理研究. E-mail: songqq198641@163.com

* **通讯作者** 丁 锋, 男, 1972 年生, 副研究员, 主要从事电离层物理研究. E-mail: dingf@mail.iggcas.ac.cn

maximum amplitudes around equinox and the smallest ones around solstice; the horizontal velocities in summer are about 20% larger than that in winter. Further studies have revealed that, the semiannual variation of nighttime MSTIDs is caused by the semiannual variation of background TEC, while the seasonal variation of the horizontal velocity is closely related with the seasonal variation of the thermospheric wind.

Keywords GPS, TEC, Nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances

1 引言

夜间中尺度电离层行进式扰动(MSTIDs)是中纬度地区磁平静日的夜间经常发生的一种扰动现象. 一般认为, 夜间中尺度电离层扰动的源与 F 层等离子体的不稳定性即 Perkins 不稳定性有关^[1, 2]. Perkins^[1]指出, 夜间 F 层等离子体的不稳定性产生沿磁力线伸展的不均匀体, 导致电子浓度波状扰动. Miller 和 Kelly 等(1997)^[3~6]发现, 由于重力波的存在, 中纬度电离层会沿着磁力线向上或向下运动, 从而改变了电离层总的积分电导率的空间分布, 最终导致电离层 F 层局部电场的产生. 但在白天, 由于电离层 E 层的高等离子体电导率, 该局部电场不可能持续存在. 而在夜间, 电离层 E 层等离子体的电导率降低, 故该局部电场可持续存在. 该局部电场可以增大电离层的扰动幅度, 减少离子曳力, 最终导致夜间中尺度电离层行进式扰动的产生. 近年来, 有很多学者对夜间中尺度电离层扰动的传播特性进行了研究. Saito 等(1998)^[7], Shiokawa(2003, 2005)等^[8, 9]和 Tsugawa 等(2006)^[10]利用 GPS 网对日本列岛(中低纬)夜间中尺度电离层行扰进行了监测, 发现该地区的夜间中尺度电离层行扰以 100~150 m/s 的水平相速度向西南方向传播, 周期为 40 min 左右; Tsugawa 等(2007)^[11]和 Kotake 等(2007)^[12]则分别对北美地区和加州南部(中高纬)的夜间中尺度电离层行扰进行了分析研究, 结果表明扰动以 60~150 m/s 的水平相速度向西南方向传播, 周期为 15~60 min.

本文利用北美 GPS 台站密集地区的 TEC 观测资料, 使用最大熵频谱分析方法, 对夜间中尺度电离层行进式扰动做了研究, 得到其传播特性, 并且对不同月份的夜间中尺度电离层行进式扰动的传播特性做了比较, 得到了夜间中尺度电离层行进式扰动的季节变化特性.

2 资料分析及数据处理方法

GPS 是美国在 20 世纪 70 年代建立起来的全球卫星导航系统, 其高时空分辨率、数据量大、全天候连续观测、基本全球覆盖等优点, 为电离层的监测提供了一个全新的途径. 20 世纪 90 年代以来, 利用 GPS 双频观测量来监测电离层电子浓度总含量(TEC, 是单位面积内电子浓度沿高度的积分)的时空变化已经成为研究电离层特性的一种重要手段. 随着 GPS 永久监测网的布设, 各区域、局域 GPS 综合应用网的建成, 利用密集分布的 GPS 监测网进行高时空分辨率的电离层动态监测已广泛用于探测和研究电离层的各种特性. 我们使用的 TEC 观测资料来自北美 GPS 台站密集地区的 GPS 观测, 这一地区覆盖的纬度范围为 30°N~50°N(磁纬 24°N~44°N), 台站总数达 700 多个, 主要集中在美国的西部地区. 台站分布如图 1 所示.



图 1 北美地区 GPS 观测台阵的分布图

Fig. 1 Distribution of GPS stations over North America

GPS 卫星采用两个工作频率 $f_1 = 1.57542$ GHz, $f_2 = 1.2266$ GHz 发射卫星信号. 沿传播路径(从 GPS 卫星到接收台站的路径)上的电子浓度总含量 TEC 可以通过差分载波相位得到, 公式如下^[13]:

$$I_s = \frac{1}{40.3} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \times [(L_1 - L_2) - (\lambda_1 n_1 - \lambda_2 n_2) + b_r + b_s], \quad (1)$$

式中 I_s 为斜向 TEC, L_1 和 L_2 是卫星信号的载波相位(已经转换成了长度单位), λ_1 和 λ_2 是卫星信号的波长, n_1 和 n_2 是整周模糊度, b_r 和 b_s 分别是接收机和卫星的误差项. 本文通过多项式拟合得到背景 TEC 的变化趋势 I , 然后由 $I_s - I$ 得到 TEC 的扰动部分 dTEC. 图 2 为台站 p262(38.0°N, 122.1°W) 观测到的斜向 TEC 进行滤波之后的 dTEC 扰动时序.

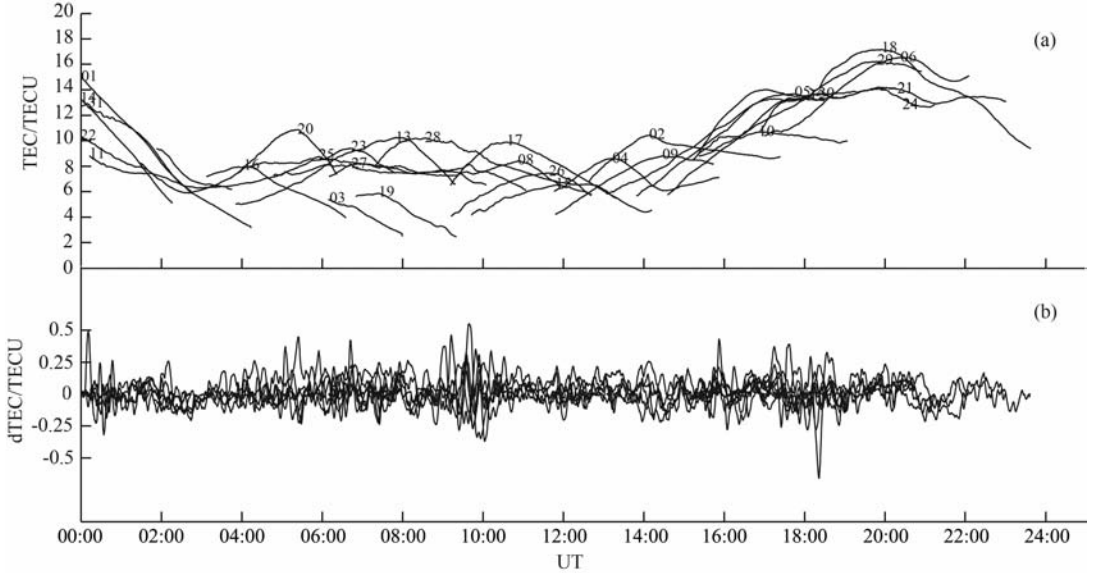


图 2 GPS 台站 p262(38.0°N, 122.1°W) 观测到的原始垂直 TEC 时序(a), 以及波进行滤波、去除背景趋势之后的 TEC 扰动时序(b)

图(a)每条垂直 TEC 时序对应的卫星号已标出.

Fig. 2 Panel (a) and (b) represent the vertical TEC series and the TEC perturbation series obtained from multi-order polynomial fits, respectively. The satellite number of each TEC series is marked in panel (a).

本文采用三通道最大熵互谱方法来分析滤波后的 GPS TEC 扰动时序, 获取电离层扰动的视在角频率 ω_{observe} 以及扰动时序在三个台站之间的相位差(即两两观测点间扰动的差 $\delta\varphi_{12}$, $\delta\varphi_{13}$ 和 $\delta\varphi_{23}$). 我们在时间长度为 Δt 的 dTEC 扰动时序上加 1.7 h 时间滑动窗, 产生一系列 1.7 h 内的短时序. 所选窗口的大小应该至少大于夜间中尺度电离层行扰的一个周期, 而 1.7 h 足以包含夜间中尺度电离层行扰的周期(夜间中尺度电离层行扰的周期一般低于 1 h). 首先从初始时刻起, 按 1.7 h 的窗口进行滑动, 并对窗口内的扰动时序进行最大熵互谱分析, 每次滑动的间隔为 30 s, 从而得到动态的最大熵互谱分析结果, 形成 ω_{observe} , $\delta\varphi_{12}$, $\delta\varphi_{13}$ 和 $\delta\varphi_{23}$ 的时间序列. 然后对计算得到的夜间中尺度电离层行扰的传播参数做统计分析.

$$(\omega_{\text{observe}}, \phi_{21}, \phi_{31}) = \text{MEM}(I_1, I_2, I_3), \quad (2)$$

(2)式中 I_1, I_2, I_3 是同一时段内 GPS 观测阵的三

图 2a 中的实线表示对应 31 颗卫星的原始垂直 TEC, 图 2b 中的实线是斜向 TEC 分段拟合求残差并滤波后的 dTEC 扰动时序. 从图 2a 中可以看出, 在 TEC 的值比较小的夜晚, 在 TEC 时序中叠加有中尺度的电离层扰动. 图 2b 显示, 扰动主要发生在 05:00~10:00 UT 时段, 对应于 21:00~02:00 LT 的夜间.

个台站的 TEC 扰动时序. ϕ_{21}, ϕ_{31} 是三站的 TEC 时序间的相差. 本文利用伽利略变换^[14] 去除了卫星在星下点运动产生的多普勒频移引起的误差.

$$\omega_{\text{wave}} = \omega_{\text{observe}} + \mathbf{k}_{\text{wave}} \cdot \mathbf{u}_{\text{ipp}}, \quad (3)$$

(3)式中 ω_{observe} 和 ω_{wave} 分别是扰动的视在角频率和真实角频率, 所谓视在角频率 ω_{observe} 即指包含了卫星运动引起的多普勒频移. \mathbf{u}_{ipp} 是 GPS TEC 的电离层穿透点的运动速度.

由最大熵方法得到的频率 ω_{observe} 和相位差 ϕ_{21} 和 ϕ_{31} 可以确定夜间中尺度电离层行扰的其他传播参量. 假设观测点附近的地球表面是一个平面, 选取观测阵中的任意 1 个台站所在位置为坐标原点建立直角坐标系, 则 3 个台站的位置坐标分别是 $(0, 0)$, (x_{21}, y_{21}) 以及 (x_{31}, y_{31}) . 孤立平面行波因子表示为 $\exp[j(\omega t - k_x x' - k_y y' + \varphi_0)]$, 设待求的扰动水平波数是 k_x 和 k_y , 则

$$\begin{cases} k_x x_{21} + k_y y_{21} = \phi_{21}, \\ k_x x_{31} + k_y y_{31} = \phi_{31}. \end{cases} \quad (4)$$

由方程组(4)解得:

$$\begin{cases} k_x = \frac{y_{21} \phi_{31} - y_{31} \phi_{21}}{x_{31} y_{21} - x_{21} y_{31}}, \\ k_y = \frac{x_{21} \phi_{31} - x_{31} \phi_{21}}{x_{21} y_{31} - x_{31} y_{21}}. \end{cases} \quad (5)$$

由此,可以获得水平相速度 v_{ph} 、传播方位角 σ 和周期 T

$$v_{ph} = 2\pi\omega_{wave} / \sqrt{k_x^2 + k_y^2}, \quad (6)$$

$$\sigma = \arctan(k_x/k_y), \quad (7)$$

$$T = 1/\omega_{wave}. \quad (8)$$

由此可见,只要在时序里有类波结构,就可以用最大熵谱分析方法得到传播的水平相速度、方位角和观测周期. 如果是一个持续时间较长的稳定波场通过 GPS 观测点,解算出的扰动传播参量也会随时间平稳变化,即平稳变化的参量是可靠的.

3 结果分析

3.1 夜间电离层行进式扰动的经纬度分布和当地时间变化

图 3(a~d)为 2008 年 2 月 23 日(地磁活动平静日 $0 < Kp < 2+$)夜间观测到的不同经纬度的四组 TEC 扰动曲线. 其中,图 3(a, c)分别是沿 123° 经线的不同纬度的台站分别通过 25 号和 27 号 GPS 卫星观测到的 TEC 扰动曲线. 图 3(b, d)分别是 25 号和 27 号 GPS 卫星分别沿 $45^\circ N$ 和 $38^\circ N$ 的不同经度的台站观测到的 TEC 扰动曲线. 图中标出了各曲线所对应的 GPS 台站及其所在的地理经纬度.

在 2008 年 2 月 23 日夜间,我们观测到两次中尺度电离层扰动事件. 一次扰动发生在午夜前 $21:30 \sim 22:30$ LT ($05:30 \sim 06:30$ UT) 时段(图 3

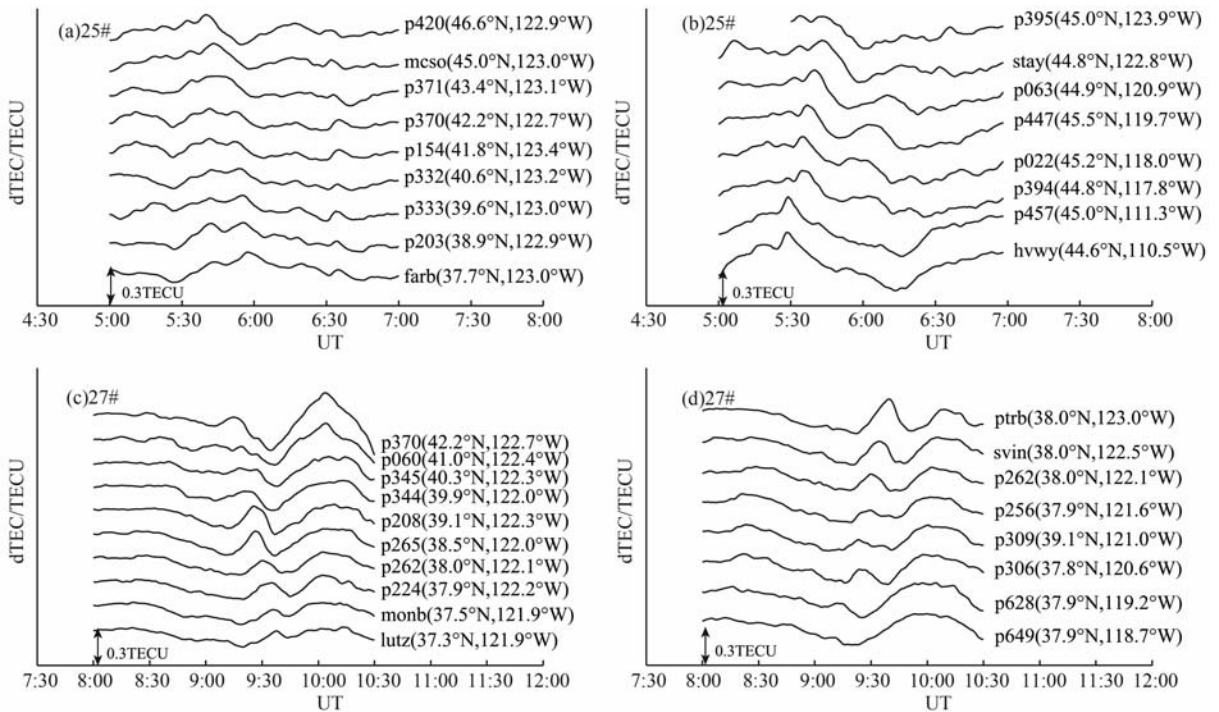


图 3 2008 年 2 月 23 日(地磁活动平静日 $0 < Kp < 2+$)夜间不同经纬度台站观测到的四组 TEC 扰动曲线. 图(a, c)分别是沿 123° 经线的不同纬度的台站分别通过 25 号和 27 号 GPS 卫星观测到的 TEC 扰动曲线. 图(b, d)分别是 25 号和 27 号 GPS 卫星分别沿 $45^\circ N$ 和 $38^\circ N$ 的不同经度的台站观测到的 TEC 扰动曲线. 图中标出了各曲线所对应的 GPS 台站及其所在的地理经纬度. 不同站的时序人为抬高 0.2TECU 以免重复.

Fig. 3 Nighttime TEC perturbation series obtained from different latitudes and longitudes on February 23, 2008 ($0 < Kp < 2+$)

Panel (a, c) plot the TEC perturbation series observed at different GPS stations along longitude 123° with satellite number 25 # and 27 #, respectively. Panel (b, d) plot the TEC perturbation series observed from different GPS stations along latitude $45^\circ N$ and $38^\circ N$, respectively. The names and locations of the GPS stations are given and curves for different GPS stations are artificially shifted by 0.2TECU to avoid overlapping in each panel.

(a, b)), 另一次发生在午夜后的 01:00~02:30LT (09:00~10:30UT) 时段(图 3(c, d)). 从扰动时序沿经线和纬线的相位移动情况来看, 两次扰动均向西南方向传播. 从图 3a 和 3b 可以看出, 午夜前的这次扰动的最大振幅达到 0.64TECU, 扰动传播范围跨越 10 个纬度和 13 个经度, 持续时间达到 1 h 左右. 午夜后的扰动的最大振幅为 0.56TECU(图 3(c, d)), 扰动传播范围跨越 5 个纬度和 5 个经度, 持续时间达 90 min 左右. 与午夜前的扰动相比, 午夜后的扰动传播范围较小. 并且, 由于午夜前 TEC 本底值大于午夜后, 午夜后的扰动振幅也小于午夜前的扰动振幅.

日本学者 Saito 等(1998)^[7], Tsugawa 等(2007)^[11] 和 Kotake 等(2007)^[12] 利用 GPS 监测台网分别对日本列岛、北美地区和加州南部的夜间中尺度电离层行扰进行了分析研究. 夜间中尺度电离层行扰的发生时段在日本地区约为 21:00~23:00LT; 在北美地区约为 21:50~03:00LT; 在加州南部约为 21:00~00:10LT. 可见本文在北美地区午夜前后所观测到的夜间中尺度扰动发生的时间段(21:30~

02:30LT) 与以往学者在同一地区的观测结果基本一致, 而与日本的观测相比, 北美地区的夜间电离层扰动发生时间明显晚于日本的发生时间. 考虑到北美位于中高纬地区而日本位于低纬地区, 上述夜间中尺度扰动的发生时间的差别可能是由这两个地区的纬度差异引起.

两次扰动相应的最大熵频谱分析结果在图 4 中给出. 其中图 4a 为 25 号和 27 号 GPS 卫星探测斜向 TEC 进行滤波后的 dTEC 扰动时序. 六组曲线分别是六个不同台站探测的结果. 图中给出了台站名称、地理经纬度以及卫星号. 这六个台站组成了两组 GPS 观测台阵, 每组台阵之间的距离都小于 40 km, 以避免互谱分析时由于台站间距过长引起数据时序相位整周模糊度问题. 图 4(b~d) 分别为两组 GPS 观测台阵经谱分析得到的扰动传播方位角(由正北方向起, 顺时针到扰动的传播矢量之间的夹角)、相速度及周期(两组台阵的结果分别用星号线和点线表示). 从图 4(b~d) 的最大熵计算结果可知, 午夜前扰动的周期为 30~40 min, 传播方位角为 210°~250°, 平均相速度为 139 m/s(星号线); 午夜后扰动

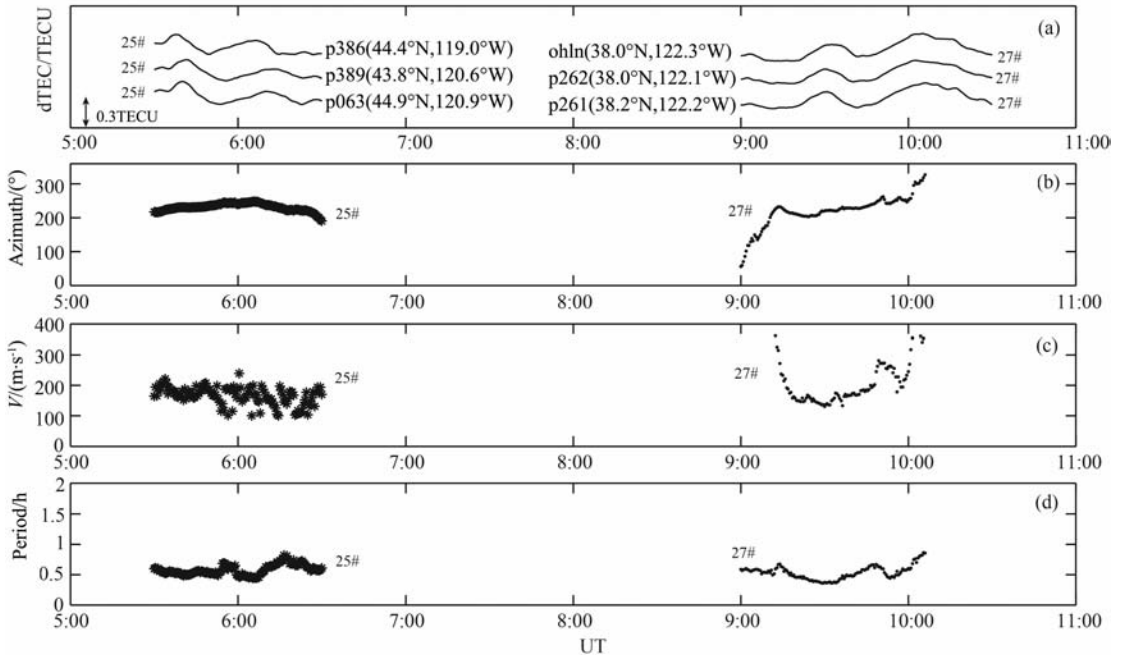


图 4 应用三通道最大熵谱分析方法对两组 GPS 台阵 dTEC 扰动时序的频谱分析结果

(a) 为 25 号和 27 号 GPS 卫星探测斜向 TEC 进行滤波后的 dTEC 扰动时序. 六组曲线分别是六个不同台站探测的结果. 图中给出了台站名称、地理经纬度以及卫星号. (b)~(d) 分别为频谱分析得到的扰动的方位角、相速度及周期. 其中星号线和点线分别表示两组不同台站组合所得到的扰动传播参量. 图中的 25# 和 27# 分别代表 25 号和 27 号 GPS 卫星.

Fig. 4 Propagation parameters of nighttime MSTIDs obtained from the multichannel maximum entropy method. Panel (a) plots the dTEC time series of satellite 25 and 27 observed from six GPS stations. The names, locations and satellite numbers of these six GPS sites are given in the upper panel. The deduced azimuth ($^{\circ}$), velocities (m/s) and periods (h) are presented by (b)~(d). The asterisk lines and dot lines represent the wave parameters of two GPS arrays. Satellite 25 and 27 are represented by 25# and 27#, respectively.

的周期为 20~40 min,传播方位角为 $220^{\circ}\sim 300^{\circ}$,平均相速度为 156 m/s(点号线).与午夜前相比,午夜后的扰动周期和传播方位角的变化范围以及平均相速度都要大于午夜前的情形.

Tsugawa 等(2007)^[11]和 Kotake 等(2007)^[12]分别对北美地区和加州南部夏季(5~8月)夜间中尺度电离层行扰的研究表明,扰动的最大振幅大于 0.5TECU,以 60~150 m/s 的水平相速度向西南方向传播,周期约为 15~60 min.而由图 4(a~d)的最大熵计算结果可以看出,本文所观测到的夜间中尺度扰动的最大扰动振幅为 0.64TECU,以 100~250 m/s 的水平相速度向西南方向传播,周期约为 20~40 min.本文所得到的水平相速度要比以前学者所得到的水平相速度的变化范围大,而周期的变化范围相对比较小,这可能是由于数据处理方法的不同导致的,也可能是由于观测夜间扰动的季节不同所致.

3.2 季节变化

为了研究北美地区夜间中尺度电离层行扰随季节的变化,我们选取 2007 年 6 月~2008 年 5 月期间该地区的 TEC 观测资料,计算了每个月地磁活动最平静的两天的夜间中尺度电离层扰动的传播参量,结果如图 5 所示,图中显示了 2007 年 6 月到 2008 年 5 月的夜间中尺度电离层行扰的最大振幅(图 5a)、水平相速度(图 5b)以及传播方位角(图 5c)的变化情况.由图 5a 可以看出,夜间中尺度电离层行扰的最大振幅变化范围在 0.45~0.6TECU 之间,夏季的扰动振幅大于冬季,这与日本学者 Tsugawa^[11]的观测一致. Tsugawa 在北美对夜间电离层扰动的观测结果表明,扰动振幅在夏季约为 0.6TECU,略大于本文图 5a 中在同一地区冬季的观测值.扰动幅度在 2007 年 9 月和 2008 年 3 月的分点附近达到峰值.扰动幅度的半年变化与背景电离层 TEC 的半年变化密切相关.

由图 5(b~c)可以看出大部分夜间中尺度电离层行扰的水平相速度为 100~200 m/s,传播方向基本为西南方向($200^{\circ}\sim 300^{\circ}$),但是夏季(2007 年 6~8 月,2008 年 4~5 月)的水平相速度明显比冬季(2007 年 11 月~2008 年 2 月)的要大,传播速度的季节变化与午夜前后热层风的季节变化有关.热层风是电离层 F 层的主要风系,其纬向分量一般从午后($\sim 16:00$ LT)至黎明前($\sim 04:00$ LT)为东向,而在其余时段则表现为西向风场;其经向分量在白天是向极区,夜间是向赤道的^[15].图 6 为利用 HWM07 模式计算得到的 2007 年 6 月~2008 年 5 月期间,

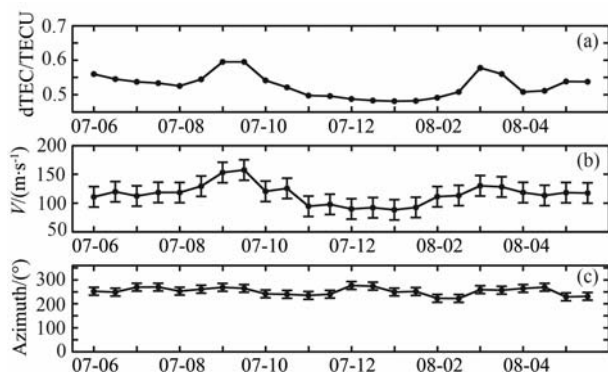


图 5 用三通道最大熵谱分析方法对 2007 年 6 月~2008 年 5 月期间每月地磁活动最平静的两天的夜间 TEC 扰动进行谱分析得到的结果

图(a)为夜间 MSTIDs 的最大扰动幅度,图(b)为夜间 MSTIDs 的水平相速度,图(c)为夜间 MSTIDs 传播的方位角.图中的垂直竖线表示标准差.

Fig. 5 Seasonal dependence of the maximum amplitudes (a), horizontal phase velocities (b) and azimuth (c) of the nighttime MSTIDs from June 2007 to May 2008. We chose the data observed on two quietest days of each month. The vertical bars indicate standard deviation.

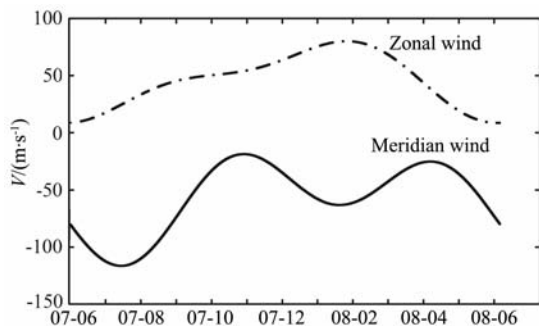


图 6 利用 HWM07 模式得到的 2007 年 6 月~2008 年 5 月,午夜时刻(08:00UT)热层风的的东西向分量和南北向分量

图中的点划线表示热层风的纬向分量(向东为正),实线表示热层风的经向分量(向北为正).

Fig. 6 Seasonal dependence of zonal and meridional components of the thermospheric wind derived from HWM07 model at midnight (08:00UT) from June 2007 to May 2008. The zonal (the eastward is positive) and meridional (the northward is positive) components are presented by dot dash line and solid line, respectively.

午夜时刻(08:00UT)热层风的纬向分量(向东为正)和经向分量(向北为正)的变化情况,图中的点划线表示纬向分量,实线表示经向分量.由图可以看出,午夜时刻热层风的经向分量都是赤道向的,纬向分量都是向东的,但是夏季(2007 年 6~8 月,2008

年 4~5 月)的热层风的赤道向分量要比冬季(2007 年 11 月~2008 年 2 月)的大,而东向分量要比冬季的小.而夜间中尺度电离层行进式扰动的传播方向是西南方向,故热层风的赤道向分量会增大扰动的视在水平传播速度,而热层风的东向分量会减弱扰动的视在水平传播速度,所以两者叠加的结果就是夏季夜间中尺度电离层行扰的水平相速度要大于冬季.

4 结 论

本文利用北美 GPS 台站密集地区的 TEC 观测资料,应用三通道最大熵谱分析方法对磁纬为 $24^{\circ}\text{N}\sim 44^{\circ}\text{N}$ 地区的夜间(21:00~02:00LT)中尺度电离层行进式扰动(MSTIDs)的传播特性进行了研究分析.结果表明:夜间中尺度电离层行进式扰动一般是向西南方向传播,可覆盖磁纬 $24^{\circ}\text{N}\sim 44^{\circ}\text{N}$,经度 $130^{\circ}\text{W}\sim 70^{\circ}\text{W}$ 的广大范围.扰动最大幅度为 0.45~0.6TECU,周期为 20~40 min,水平相速度为 100~200 m/s,传播方向基本为西南方向.扰动幅度的峰值出现在春秋分附近,夏季的扰动水平相速度要大于冬季.分析表明,扰动幅度的半年变化是由 TEC 的半年变化引起的,扰动速度的季节变化则与夜间热层风的经向分量和纬向分量的季节变化密切相关.

参考文献(References)

- [1] Perkins F. Spread F and ionospheric currents. *J. Geophys. Res.*, 1973, **78**: 218~226
- [2] Garcia F J, Kelley M C, Makela J J, et al. Airglow observations of mesoscale low-velocity traveling ionospheric disturbances at midlatitude. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**: 18407~17415
- [3] Miller C A, Swartz W E, Kelly M C, et al. Electrodynamics of midlatitude spread F —1. Observations of unstable, gravity wave-induced ionospheric electric fields at tropical latitudes. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**: 11521~11532
- [4] Miller C A. Electrodynamics of midlatitude spread F —2. A new theory of gravity wave electric fields. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**: 11533~11538
- [5] Kelley M C. Electrodynamics of midlatitude spread F —3. Electrohydrodynamic waves? A new look at the role of electric fields in thermospheric wave dynamics. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**: 11539~11547
- [6] Kelly M C, Saito A, Nishimura M, et al. Observations of traveling ionospheric disturbances and 3-m scale irregularities in the nighttime F-region ionosphere with the MU radar and a GPS network. *Earth Planets Space*, 2002, **54**: 31~44
- [7] Saito A, Fukao S. High resolution mapping of TEC perturbations with the GSI GPS network over Japan. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**: 3079~3082
- [8] Shiokawa K, Ihara C, Otsuka Y, et al. Statistical study of nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances using midlatitude airglow images. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**: 1052
- [9] Shiokawa K, Otsuka Y, Tsugawa T, et al. Geomagnetic conjugate observation of nighttime medium-scale and large-scale traveling ionospheric disturbances: FRONT3 campaign. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**(A):303
- [10] Tsugawa T, Kotake N, Otsuka Y, et al. Medium-scale traveling ionospheric disturbances observed by GPS receiver network in Japan: A short review. *GPS Solut.*, 2006, **11**: 139~144
- [11] Tsugawa T, Otsuka Y, Coster A J, et al. Medium-scale traveling ionospheric disturbances detected with dense and wide TEC maps over North America. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, **34**(L): 22101
- [12] Kotake N, Otsuka Y, Ogawa T, et al. Statistical study of medium-scale traveling ionospheric disturbances observed with the GPS networks in Southern California. *Earth Planets Space*, 2007, **59**: 95~102
- [13] Mannucci A J, Iijima B A, Lindqwister U J, et al. GPS and ionosphere. *URSI Reviews of Radio Science*, 1999, 625~665
- [14] 万卫星, 宁百齐, 刘立波等. 电离层扰动的 GPS 探测. 空间科学学报, 1998, **18**(3): 247~251
Wan W X, Ning B Q, Liu L B, et al. GPS detection of ionospheric disturbances. *Chinese J. Space Sci.* (in Chinese), 1998, **18**(3):247~251
- [15] 雷久侯, 刘立波, 万卫星等. 热层风场的理论模拟与分析. 地球物理学报, 2003, **46**(6):736~742
Lei J H, Liu L B, Wan W X, et al. Theoretical modeling and analysis of thermospheric winds in ionosphere. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2003, **46**(6):736~742

(本文编辑 何 燕)