行星际激波引发的电离层总电子含量波动的观测研究

李想, 陈兴燃, 宗秋刚*, 李泉翰, 张东和

北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

* E-mail: qgzong@pku.edu.cn

收稿日期: 2020-12-25; 接受日期: 2021-03-26; 网络版发表日期: 2021-08-02

民用航天技术预先研究项目(编号: D020301)和国家自然科学基金项目(批准号: 42011530080)资助

摘要 行星际激波能使近地空间发生剧烈扰动. 本文使用高时间分辨率(1 s)的地面GPS接收机数据, 分析了2015年3月17日行星际激波事件中电离层总电子含量(TEC)的扰动. 研究发现, 激波到达地球后, TEC扰动呈现出超低频波动的特征, 且不同纬度区域的波动特征不同: 极区台站观测到的TEC波动幅度为~0.4 TECU, 持续时间10 min以上, 波动周期2~3 min, 随穿刺点纬度的升高而增大; 中低纬地区台站观测到的TEC波动幅度为~0.2 TECU, 持续时间5~10 min, 波动周期均为2 min左右. 我们认为等离子体层的存在可能是导致这种TEC波动差异的原因, 同时我们认为极区的TEC波动可能与磁力线共振有关, 中低纬地区的TEC波动可能与空腔模振荡有关. 本工作利用GPS TEC技术探测到了由行星际激波引发的电离层TEC波动, 这将有助于进一步理解超低频波动在地球磁层-电离层系统中的性质, 同时也进一步显示出GPS TEC技术在近地空间环境研究中的重要作用.

关键词 总电子含量(TEC), 行星际激波, 超低频波, 磁力线共振, 空腔模振荡

1 引言

行星际激波对地球电离层的作用^[1,2]一直是空间物理学的重要问题. 在近些年的观测研究中, 电离层的形态变化通常由电离层总电子含量(total electron content, TEC)表示. TEC定义为沿电波传播路径积分的总电子浓度, 主要由地面接收机测量. 全球定位系统(global positioning system, GPS)发射编码无线电信号, 这种信号被地面GPS接收机接收, 无线电波在传播过程中会穿过近地空间中分布着大量等离子体的区域. 由

于等离子体对于电磁波而言是色散介质, 故利用双频接收机可以测量TEC^[3~5]. 通过观测TEC的变化, 可以深入研究磁层-电离层系统对行星际激波的响应过程.

Jayachandran等人^[6]首次报道了在行星际激波的作用下发生的电离层TEC短时扰动现象: 在2010年4月12日, 在行星际激波到达地球约5 min后, 高纬地区部分地面GPS接收机观测到了TEC的突然上升, 之后又下降回上升前的水平. 他们把这种现象归因于激波导致的电子沉降. 这种高纬地区的TEC扰动, 可由激波冲击地球的位置(约14 MLT)向东西两侧传播, 并且传

引用格式: 李想, 陈兴燃, 宗秋刚, 等. 行星际激波引发的电离层总电子含量波动的观测研究. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 948–958
Li X, Chen X R, Zong Q G, et al. Observational study of ionosphere TEC fluctuations triggered by interplanetary shock (in Chinese). Sci Sin Tech, 2021, 51: 948–958, doi: 10.1360/SST-2020-0506

播速度与激波引发的极光的传播速度相吻合^[7]. 此后, Hao等人^[8]又在2015年3月17日的激波事件中, 利用30 s时间精度的地面GPS接收机观测到的电离层总电子含量(TEC)数据, 首次发现了中低纬度电离层TEC的扰动, 扰动的出现时间、幅度等特征均与Jayachandran等人^[6]报道的高纬地区的扰动不同. Hao等人^[8]将这种中低纬度TEC的扰动归因于激波对等离子体层的压缩. 此外在这一天的激波事件中, 除了GPS卫星, 北斗卫星的TEC观测也出现了类似的扰动^[9].

一般情况下, 行星际激波冲击地球时, 会在地球磁层内激发超低频波^[10,11]. 这种波动对空间等离子体环境有着重要影响^[11]. 然而, 有关电离层范围内的超低频波的研究工作还很少. 地磁暴期间电离层TEC的超低频波动曾被报道过^[12,13]. 而由行星际激波冲击地球而直接引发的电离层TEC的超低频波动, 目前还没有相关工作报道.

在本文中, 我们在Hao等人^[8]工作的基础上, 利用从地面GPS接收机的观测数据中提取的1 s高时间精度的电离层TEC数据, 继续深入研究2015年3月17日这一天激波事件对电离层的影响, 揭示由激波引发的电离层TEC的波动. 本文第2节将回顾2015年3月17日这一天的激波事件, 并给出研究数据的来源; 第3节给出TEC波动观测的一系列结果, 并分析特点; 第4节简要讨论TEC波动的产生机制; 第5节给出结论, 并对未来的工作进行展望.

2 事件及数据

本文研究的事件是发生在2015年3月17日的行星际激波事件. 该事件的太阳风和地磁参数数据图如图1所示. 由图1可知, 该激波于约0445 UT到达地球磁层顶, 同时SYM-H指数迅速上升, 在0448 UT升至67 nT. Wind卫星测量到太阳风离子密度从 16 cm^{-3} 增加到 74 cm^{-3} , 太阳风动压从4 nPa升至28 nPa, 可见这是一次较强烈的激波事件.

NASA官网提供全球数百个GPS台站的高时间精度的观测文件, 这些台站接收GPS卫星的信号, 可以计算出1 s时间精度的TEC数据. 而TEC是沿电波传播路径积分的总电子浓度, 与地面台站和GPS卫星的实时位置都有关系, 因此得到精确的GPS位置信息尤为重要. GPS卫星的位置需要利用GPS卫星的广播星历文

图 1 2015年3月17日行星际激波事件时的太阳风和地磁参数. (a) GSM坐标系下的行星际磁场 B_z ; (b) GSM坐标系下的太阳风速度 V_x ; (c) 等离子体密度 N_p ; (d) 太阳风动压FP; (e) AE指数; (f) SYM-H指数. 其中(a)~(d)为Wind卫星的数据, (e)和(f)为OMNI的数据. 我们对Wind卫星数据进行了+46 min的时间平移, 使其与AE指数、SYM-H指数对齐. 红色虚线是激波冲击磁层顶的时间0445 UT

Figure 1 Overview of the solar wind and geomagnetic parameters during the interplanetary shock event on 17 March 2015. (a), (b) IMF B_z and solar wind velocity V_x in GSM coordinates; (c) solar wind plasma density N_p ; (d) solar wind flow pressure FP; (e) AE index; (f) SYM-H index. In this figure, (a)–(d) are the data of Wind, and (e), (f) are the data of OMNI. Note that the data of Wind are shifted 46 min right to align with the data of OMNI. The shock time 0445 UT is marked with a vertical dashed red line.

件解算, 这种文件中包含星历文件发布时刻GPS卫星的轨道根数、轨道摄动校正项等参数, 利用这些参数我们就可以计算出任意时刻GPS卫星的实时位置. 图2展示了2015年3月17日激波到达前后(0435~0510 UT)GPS卫星星下点的轨迹, 以及拥有高时间精度观测文件的台站的地理位置.

图 2 本文所使用的地面1 s分辨率GPS接收机的地理位置和激波事件发生前后(0435~0510 UT)GPS卫星星下点的轨迹。方点为这些地面接收机的位置, 卫星轨迹的加粗一头为轨迹开始处(即0435 UT时卫星星下点位置)。其中彩色的方点为后文展示的观测中涉及的台站, 相同颜色的轨迹为对应台站观测的卫星轨迹, 灰色的方点、卫星轨迹均为后文展示的观测中不涉及的台站和卫星。图中还标出了地磁赤道、地磁南北纬45°以及激波到达时刻(0445 UT) MLT=0, 6, 12, 18的位置

Figure 2 Geographical locations of ground-based receivers with high time-resolution observation files, and the trajectories of GPS satellites' subsatellite points before and after the shock time (0435–0510 UT). Square points are the locations of receivers, and the bolded end of the trajectory is the beginning of the trajectory (the location of the satellite's subsatellite point at 0435 UT). Colored square points are the receivers related to the observations shown below, and the trajectory of the same color as the receiver means that this satellite was observed by the receiver. Gray square points and satellite trajectories are the receivers and satellites not related to the observations shown below.

3 观测与分析

3.1 行星际激波引发的TEC波动——中低纬地区地面GPS接收机的观测

利用高时间精度的TEC数据, 我们发现中低纬地区的台站可以观测到明显的TEC波动。这里我们取10个能观测到PRN 25的台站和10个能观测到PRN 31的台站, 以它们的观测结果为例来说明这一点。这些台站的位置和卫星的轨迹见图2。由图2可知, 在激波到达地球时, 这两颗GPS卫星都处于地球的日侧, 且在赤道附近。

图3(a)和(b)展示了选取的10个观测PRN 25的台站的观测情况。如图3(a)所示, 这些台站观测PRN 25所得的TEC均在激波到达磁层顶后约半分钟就开始出现波动, 但振荡幅度较小, 约为0.2 TECU, 而且只能看到两个明显的峰。图3(b)展示了它们的小波分析图, 我们可以看到这些TEC波动的周期都约为2 min, 且波动持续时间很短, 仅5 min左右。另外从小波分析结果来看, 赤道附近的台站观测到的波动要更强烈一些, 例如tuva

(8.47°S, 179.20°E), guam (13.50°N, 144.87°E); 而相比之下, 纬度偏高的中纬地区台站观测到的波动要明显弱一些, 如mizu(38.95°N, 141.13°E)。

图3(c)和(d)是选取的10个观测PRN 31的台站的观测情况。这些台站观测到的TEC波动也是在激波到达磁层顶后约半分钟开始的, 并且振荡幅度约为0.2 TECU, 周期约为2 min。此外, 赤道附近低纬台站测到的TEC波动比中纬台站更加强烈的这一特征也很明显(对比xmish(10.38°S, 105.69°E)和bshh(32.60°N, 35.02°E))。这些与前文展示的PRN 25的观测情况类似。

而仔细观察, PRN 31的观测也有与PRN 25不太一样的地方, 即波动持续时间有差别: 观测PRN 31所得的TEC波动持续时间要大于5 min。尤其是xmish(10.38°S, 105.69°E), jog2(7.71°S, 110.37°E)这两个台站, 它们去除背景趋势得到的TEC曲线有3个明显的峰, 而且从右边的小波分析图可以看到这个波动持续了近10 min。这个持续时间明显长于PRN 25的观测。由图2可知, 在激波到达地球的时刻, PRN 31的位置偏晨侧, 而PRN

图 3 中低纬度地区的接收机从PRN 25, PRN 31的信号中检测到的TEC短时波动. (a) 从PRN 25信号中检测到的TEC波动, 这里展示的是原始TEC经2 min滑动平均处理后得到的去除背景趋势的TEC波动形态, 右侧还列出了每个台站的名称以及地理纬度、经度; (b) (a)中每个TEC波动曲线对应的小波分析图, 其中用黑色虚线标出了小波功率最大处对应的周期, 作为TEC波动的周期; (c), (d) 从PRN 31信号中检测到的TEC波动, 格式与数据处理方式和(a), (b)相同. 四列图中均用红色竖虚线标出了激波到达磁层顶的时刻0445 UT

Figure 3 Short-time TEC fluctuations observed by receivers in middle- and low-latitude areas. (a) TEC fluctuations derived from the PRN 25 signals after subtracting the 2 min running average, where the receiver names and geographic locations are listed on the right side; (b) wavelet analysis of the residual TEC time series in (a), and in each panel, the period corresponding to the maximum wavelet power is marked with a horizontal dashed black line as the period of the TEC fluctuation; (c), (d) TEC fluctuations derived from the PRN 31 signals, which are displayed in the same format as (a) and (b). The vertical dashed red line denotes the shock time 0445 UT.

25的位置偏昏侧. GPS卫星位置的不同可能是导致这种波动差异的原因.

除了PRN 25, 31之外, PRN 18, 15这两颗处于日侧赤道附近的卫星的TEC观测也有较明显的波动, 它们观测到的波动特征相似, 周期均为2 min左右, 此处不再具体展示; 而夜侧卫星的TEC观测没有出现明显的波动. PRN 15, 18, 25, 31这四颗GPS卫星观测到的TEC扰动, Hao等人^[8]也曾报道过, 他们利用30 s较低时间分辨率的TEC数据, 发现在2015年3月17日激波事件发生之时, PRN 15, 18, 25, 31四颗GPS卫星观测的TEC突然出现小幅上升, 上升幅度约0.3 TECU, 而后又迅速恢复原水平. 这里我们利用更高时间精度的1 s分辨率的数据, 更加清楚地看到这种扰动呈现出了波动的形态特征, 即在激波到达地球后, TEC出现了2~3个周期的波动, 而后才恢复原水平.

而这四颗处于日侧赤道附近的GPS卫星, 它们观测到TEC波动的时间也有细微的差别. 我们选取四组观测, 通过解算Residual TEC的相位差来研究这一点, 观测分别为guam台站观测PRN 15, kat1(14.28°S, 132.15°E)台站观测PRN 25, mizu(38.95°N, 141.13°E)台站观测PRN 18, jog2台站观测PRN 31. 解算出相位差, 结果如图4所示.

可以看到, 在激波到达地球(0445 UT)后的10 min

内, guam-PRN15与kat1-PRN25波动的相位差约为 -45° , kat1-PRN25与mizu-PRN18波动的相位差几乎为0, 而mizu-PRN18与jog2-PRN31之间的相位差约为 $20^\circ\sim 30^\circ$. 这个结果表明, guam-PRN15和jog2-PRN31的波动都要比kat1-PRN25, mizu-PRN18出现得晚. 而从图2我们可以看到, PRN18和PRN25在正午侧, PRN31在晨侧, PRN15在昏侧, 这个结果可以反映出在中低纬地区, 正午侧TEC波动先出现, 晨侧、昏侧的TEC波动后出现, 表明TEC波动有这样的传播特征: 先出现在正午侧, 然后再分别向东、西方向传播.

3.2 波动周期与纬度明显相关的TEC波动——极区地面GPS接收机的观测

在利用中低纬地区的台站看到TEC波动的同时, 我们还发现有三个极区台站可以观测到明显的多个周期的TEC波动, 这三个台站分别为北极圈内的kiru(67.72°N, 20.97°E), kir0(67.74°N, 21.06°E), 和南极圈内的maw1(67.47°S, 62.87°E). 由于kiru和kir0两个台站位置十分相近, 它们的观测结果也几乎一样, 故此处我们不再展示kir0台站的观测结果, 只展示kiru, maw1的观测结果. 这两个台站的地理位置及其观测到有TEC波动的GPS卫星的轨迹如图2所示.

图5展示了北极圈内kiru台站的观测情况. 从

图4 三组TEC观测的相位差解算结果. 从上到下依次为 guam与kat1、kat1与mizu、mizu与jog2观测的相位差关系. 红色竖直虚线为激波冲击地球的时刻0445 UT

Figure 4 Phase difference results of three sets of TEC observations. From top to bottom, they are respectively the phase differences between guam and kat1, kat1 and mizu, mizu and jog2. The red vertical dashed line is the shock time 0445 UT.

图5(a)中我们可以明显地看到, 在0445 UT后, kiru台站观测PRN 11, 4, 3, 1, 32, 14这六颗GPS卫星所得到的TEC均出现了的多周期波动. 对这些TEC时间序列进行2 min的滑动平均处理, 并进行小波分析, 得到更加清楚的TEC扰动形态和特征, 如图5(b)和(c)所示. 可以看到, kiru台站观测这六颗卫星所得TEC的波动开始于约0446 UT, 即激波到达磁层顶后1 min; TEC波动的持续时间为10~15 min, 波动周期为2~3 min; TEC振荡最大幅度约为0.3 TECU, 且第一个波峰最大, 之后波动逐渐衰减.

通过更加仔细的观察, 我们不难看出kiru观测PRN 1, 32, 14卫星得到的TEC波动的周期为2.5~3 min, 明显大于kiru观测PRN 11, 4, 3卫星得到的TEC波动的周期(2~2.5 min). 而更有趣的是, 图2显示, 在出现TEC波动的这段时间内, PRN 1, 32, 14这三颗卫星的地磁纬度要高于PRN 11, 4, 3. 这表明kiru台站观测的卫星所处纬度越高, 得到的TEC的波动周期会越大. 后文将对此进行进一步的分析.

图6展示了南极圈内maw1台站的观测情况. 从图6(a)中我们可以明显地看到, 在0445 UT后, maw1台站观测PRN 8, 19这两颗GPS卫星所得到的TEC均出现了的多周期波动. 对其进行2 min的滑动平均处理, 并进行小波分析, 结果如图6(b)所示. 可以看到, maw1台

站观测这两颗卫星所得TEC的波动开始于约0447 UT, 即激波到达磁层顶后2 min; TEC波动周期为约3 min, 且波动持续时间较长; 波动也呈逐渐衰减的趋势, 最大振荡幅度约为0.4 TECU.

kiru, kir0, maw1是极区范围内仅有的三个能观测到明显TEC波动的地面台站. 它们观测到的波动开始于激波到达地球后1~2 min, 且波动持续了多个周期. 另外从图2可以看到, maw1台站的位置恰好在kiru台站的地磁共轭点附近, 这说明这两个台站的MLT十分接近, 结合时间易知激波到达时这三个台站均处于地球的晨侧. 另外, 从图2可知, 北极圈内的昏侧、南极圈内正午侧附近还有其他台站, 然而这些台站均未能观测到TEC的波动. 我们据此认为在本次激波事件中, 极区只有晨侧出现了电离层TEC的波动. 而在3.1节中, 我们发现在中低纬地区的台站观测到的TEC波动中, 偏晨侧的波动大持续时间要长于偏昏侧的波动. 将这些观测结果结合起来, 我们认为在这个激波事件中, 晨侧的TEC波动要比昏侧的TEC波动更加显著.

3.3 极区与中低纬地面GPS接收机的观测的比较

与3.1节中低纬台站的观测相比, 极区台站观测到的TEC波动幅度较大, 并且波动的持续时间也明显要

图 5 kiru台站从GPS卫星(PRN 1, 3, 4, 11, 14, 32)信号中提取的1 s时间分辨率TEC数据的多周期波动. (a) kiru观测这6颗卫星的原始TEC时间序列, 这里将各条曲线垂直平移使其错开; (b) 原始TEC曲线进行2 min滑动平均后得到的去除背景趋势的TEC波动曲线; (c) 每条去除背景趋势的TEC曲线对应的小波分析图, 其中用黑色虚线标出了功率最大处对应的周期, 作为波动的周期. 三列中的红色竖虚线均表示激波冲击磁层顶的时刻0445 UT

Figure 5 Multi-period fluctuations of 1 s time-resolution TEC data derived from GPS satellites (PRN 1, 3, 4, 11, 14, 32) signals observed by kiru receiver. (a) The original TEC time series, where the curves are vertically shifted to stagger from each other; (b) TEC fluctuations after subtracting the 2 min running average; (c) wavelet analysis of the residual TEC time series in (b). In each panel of (c), the period corresponding to the maximum wavelet power is marked with a horizontal dashed black line as the period of the TEC fluctuation. The vertical dashed red line denotes the shock time 0445 UT.

图 6 maw1 台站从 GPS 卫星 (PRN 8, 19) 信号中提取的 1 s 时间分辨率 TEC 数据的多周期波动. (a) maw1 观测这两颗卫星的原始 TEC 时间序列, 这里将各条曲线垂直平移使其错开; (b) 原始 TEC 曲线进行 2 min 滑动平均后得到的去除背景趋势的 TEC 波动曲线及其对应的小波分析图, 其中用黑色虚线标出了功率最大处对应的周期, 作为波动的周期. 两图中的红色竖虚线均表示激波冲击磁层顶的时刻 0445 UT

Figure 6 Multi-period fluctuations of 1 s time-resolution TEC data derived from GPS satellites (PRN 8, 19) signals observed by maw1 receiver. (a) The original TEC time series, where the curves are vertically shifted to stagger from each other; (b) TEC fluctuations after subtracting the 2 min running average, and their wavelet analysis, where the period corresponding to the maximum wavelet power is marked with a horizontal dashed black line as the period of the TEC fluctuation. The vertical dashed red line denotes the shock time 0445 UT.

短一些: 由图3可知中低纬地区台站观测到 TEC 波动最多有 3 个明显的峰, 而极区台站观测到的 TEC 波动有较多的峰, 持续时间超过 10 min, 个别观测可以看到至少 6 个峰 (如 maw1 (67.47°S, 62.87°E), 见图6).

我们选取两组中低纬地区的 TEC 观测 (guam 观测 PRN 25 和 xmis 观测 PRN 31) 和两组极区的 TEC 观测 (kiru 观测 PRN 1 和 maw1 观测 PRN 8), 对其做了三个 cross-spectral analysis, 结果如图7所示. 可以看到, 中低纬两个台站之间、极区两个台站之间的观测结果均有较好的相关性, 相关系数接近 1.0, 而中低纬台站和极区台站之间的观测结果相对而言相关性较低, 仅为 0.8 左右. 这表明不同纬度地区 TEC 波动出现的物理机制可能不同.

此外, 图3反映出中低纬地区的 TEC 波动周期与纬度关系不明显, 而极区台站观测到的 TEC 波动周期与纬度有明显的关系.

下面我们定量地分析 TEC 波动周期与纬度的关系. 我们在前文中已经利用小波分析定出了 TEC 波动的周期, 现在我们将小波功率谱最大值对应的时间作

为波动的时间, 并将该时刻相应地面接收机观测对应 GPS 卫星的穿刺点的位置作为波动的位置. 其中穿刺点为 GPS 信号传播路径与某一高度电离层薄层的交点^[14,15], 本文取这一高度为 350 km. 我们做出前文展示的所有 TEC 观测的波动周期与波动位置的关系图, 结果如图8所示.

从图8我们可以清楚地看到, 非极区台站观测到的 TEC 波动周期均在 110 s 左右, 与纬度无明显关系; 而极区台站观测到的 TEC 波动周期明显随地磁纬度的升高而增大, 从约 130 s 增加至约 180 s.

4 讨论

在 2015 年 3 月 17 日的行星际激波事件中, 地球日侧各个纬度区域的电离层 TEC 均出现了波动, 而且波动均在激波到达地球后 2 min 内开始. 从时间上可以判断, 该事件中的电离层 TEC 波动应是由激波冲击地球磁层顶所激发的.

本文使用的卫星是 GPS 卫星, 轨道高度低于地球

图 7 三组TEC观测的cross-spectral analysis结果. 从上到下依次为 guam与xmis、kiru与maw1、xmis与kiru观测的相关性. 红色竖直线为激波冲击地球的时刻0445 UT

Figure 7 Cross-spectral analysis results of three sets of TEC observations. From top to bottom, they are respectively the correlations of guam and xmis, kiru and maw1, xmis and kiru. The red vertical dashed line is the shock time 0445 UT.

图 8 TEC波动的穿刺点地磁纬度和波动周期的关系图. 其中×号表示极区台站的观测, +号表示非极区台站的观测

Figure 8 Relationship between geomagnetic latitudes of pierce points and fluctuation periods, where × indicates observations of receivers in polar regions, and + indicates observations of receivers in middle- and low-latitude areas.

同步轨道, 故穿刺点存在运动. 以jog2台站观测PRN 31为例, 取穿刺点高度为350 km, 在0445 UT之后, 穿刺点几乎完全在南北方向上运动, 运动速度约为0.0006度每秒, 即约0.07 km/s, 实际的波动速度还要比这个速度略小. 这个速度相对很小, 故穿刺点的运动对TEC波动的影响可以忽略.

高纬地区与中低纬地区的TEC波动特征有很多不同, 表明这两种波动的产生机制可能也不一样. 一般情况下, 极区都暴露等离子体层外, 而中低纬地区都在等离子体层内. 故等离子体层可能是影响TEC波动特点的重要原因.

极区台站观测GPS卫星时, 信号路径上绝大多数电子都在等离子体层外. 它们观测到的TEC波动周期明显随纬度的升高而增大, 这种波动特征与磁力线共振十分相似. 在磁力线共振中, 波动沿着磁力线传播, 传播速度为阿尔芬速度 v_A , 其表达式为

$$v_A = \frac{B}{\sqrt{\mu_0 \rho}},$$

式中, B 为磁场强度, ρ 为等离子体密度, μ_0 为真空磁导率. 设共振的基频为 f , 运用time-of-flight方法进行估算^[16], 则有

$$\frac{1}{f} = 2 \int \frac{ds}{v_A}.$$

该积分式为沿整条磁力线进行积分. 假设 v_A 基本恒定, 由于地磁纬度越高磁力线越长, 显然 f 会越小, 从而共振周期 T 随纬度的升高而增大. 事实上 v_A 与 B 和 ρ 有关, 而 B 和 ρ 在同一条磁力线的不同地方也不一样, 故实际考虑要更复杂一些. 而无论是理论推导^[17]、实际观测^[18]还是数值模拟^[19], 都仍然可以得到共振周期 T 随纬度的升高而增大这一结论. 据此, 我们初步认为高纬地

区的TEC波动可能与激波导致的磁力线共振有关, 可能是磁力线共振导致的电子的振荡运动导致了高纬地区的TEC波动. 具体的物理过程还需要进一步分析.

中低纬地区的TEC观测, GPS卫星信号传输到地面接收机的路径完全在等离子体层内, 表明该区域的TEC波动可能与等离子体层的存在有密切关系. 相对于极区的观测, 中低纬地区的TEC波动周期较为一致, 均在2 min左右, 与纬度无明显关系. 如果简单地考虑地球磁层和等离子体层之间为一个“空腔”, 那么行星际激波冲击磁层顶时, 它会在在这个“空腔”里产生振荡, 即空腔模振荡, 类似于拍打鼓面后鼓内空气的振荡, 各处的振荡频率一致. 在空腔模振荡的影响下, “空腔”中的等离子体会做振荡运动^[20]. Claudepierre等人^[21]利用LFM模型^[22]进行三维MHD模拟, 结果显示太阳风动压中的ULF波动可以激发磁层内的空腔模振荡, 且振荡基频约为10 mHz, 即周期约100 s, 与本文所示的中低纬地区的TEC波动较吻合. 对比分析, 中低纬地区的TEC波动可能与激波导致的空腔模振荡有关, 这个也需要进一步的工作来验证.

5 结论

本文利用1 s高时间精度的电离层TEC数据, 研究

了2015年3月17日行星际激波事件引发的电离层TEC的波动现象. 本研究工作发现:

(1) 地球日侧各个纬度区域的电离层TEC在激波到达地球后2 min内均出现波动, 而夜侧没有TEC波动;

(2) 极区的TEC波动振幅较大, 持续时间较长, 中低纬地区TEC的波动振幅较小, 持续时间较短;

(3) 极区的TEC波动周期随纬度的升高而增大, 中低纬地区的TEC波动周期则与纬度无明显关系;

(4) 极区的TEC波动在晨侧出现, 中低纬地区的TEC波动在日侧各个经度范围都有分布, 但晨侧波动持续时间要比昏侧长, 总的来说晨侧的TEC波动比昏侧更加明显;

(5) 对于中低纬地区的TEC波动, 从纬度上看, 低纬地区的波动要比中纬地区更强烈, 从经度上看, 波动先在正午处出现, 之后分别向东西方向传播.

行星际激波在地球日侧的极区、中低纬地区激发的TEC波动有着明显不同的特征, 初步认为极区的TEC波动可能与磁力线共振有关, 中低纬地区的TEC波动可能与空腔模振荡有关. 这些还需通过其他卫星的观测数据来进一步分析论证. 本文的工作是首次利用电离层TEC直接观测到由行星际激波引发的波动, 这将有助于我们进一步理解电离层波动的性质, 对于近地空间环境的研究具有重要意义.

致谢 Wind卫星的数据和OMNI的数据来自NASA CDAWeb (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov>); GPS台站的高时间精度观测文件来自<ftp://cddis.nasa.gov/gnss/data/highrate>; 广播星历文件来自<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/highrate>; 利用星历文件计算GPS卫星位置的代码来自 <https://github.com/gregstarr/PyGPS>.

参考文献

- 1 Araki T. A Physical Model of the Geomagnetic Sudden Commencement. In: Solar Wind Sources of Magnetospheric Ultra-Low-Frequency Waves. Washington: American Geophysical Union, 1994, 81: 183–200
- 2 Sibeck D G. A model for the transient magnetospheric response to sudden solar wind dynamic pressure variations. *J Geophys Res*, 1990, 95: 3755–3771
- 3 Lanyi G E, Roth T. A comparison of mapped and measured total ionospheric electron content using global positioning system and beacon satellite observations. *Radio Sci*, 1988, 23: 483–492
- 4 Coco D S, Coker C, Dahlke S R, et al. Variability of GPS satellite differential group delay biases. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, 1991, 27: 931–938
- 5 Zhang D H, Xiao Z. Method of calculating TEC with GPS data and its application to the ionospheric disturbances (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2000, 43: 451–458 [张东和, 萧佐. 利用GPS计算TEC的方法及其对电离层扰动的观测. *地球物理学报*, 2000, 43: 451–458]
- 6 Jayachandran P T, Watson C, Rae I J, et al. High-latitude GPS TEC changes associated with a sudden magnetospheric compression. *Geophys Res*

- [Lett](#), 2011, 38: L23104
- 7 Jin Y, Zhou X, Moen J I, et al. The auroral ionosphere TEC response to an interplanetary shock. [Geophys Res Lett](#), 2016, 43: 1810–1818
 - 8 Hao Y, Huang J, Liu W, et al. Prompt GPS TEC response to magnetospheric compression. [J Geophys Res Space Phys](#), 2017, 122: 4357–4366
 - 9 Hao Y Q, Li Q H, Zhang D H, et al. Using GNSS TEC technique to observe compression of the plasmasphere by an interplanetary shock (in Chinese). [Sci Sin Tech](#), 2018, 48: 853–862 [郝永强, 李泉翰, 张东和, 等. 应用GNSS TEC技术观测行星际激波对等离子体层的压缩. 中国科学: 技术科学, 2018, 48: 853–862]
 - 10 Zhang X Y, Zong Q G, Wang Y F, et al. ULF waves excited by negative/positive solar wind dynamic pressure impulses at geosynchronous orbit. [J Geophys Res](#), 2010, 115: A10221
 - 11 Zong Q G, Zhou X Z, Wang Y F, et al. Energetic electron response to ULF waves induced by interplanetary shocks in the outer radiation belt. [J Geophys Res](#), 2009, 114: A10204
 - 12 Belakhovsky V, Pilipenko V, Murr D, et al. Modulation of the ionosphere by Pc5 waves observed simultaneously by GPS/TEC and EISCAT. [Earth Planet Space](#), 2016, 68: 102
 - 13 Pilipenko V, Belakhovsky V, Murr D, et al. Modulation of total electron content by ULF Pc5 waves. [J Geophys Res Space Phys](#), 2014, 119: 4358–4369
 - 14 Komjathy A, Sparks L, Wilson B D, et al. Automated daily processing of more than 1000 ground-based GPS receivers for studying intense ionospheric storms. [Radio Sci](#), 2005, 40: RS6006
 - 15 Rideout W, Coster A. Automated GPS processing for global total electron content data. [GPS Solut](#), 2006, 10: 219–228
 - 16 Warner M R, Orr D. Time of flight calculations for high latitude geomagnetic pulsations. [Planet Space Sci](#), 1979, 27: 679–689
 - 17 Obayashi T, Jacobs J A. Geomagnetic pulsations and the Earth's outer atmosphere. [Geophys J Int](#), 1958, 1: 53–63
 - 18 Samson J C, Rostoker G. Latitude-dependent characteristics of high-latitude Pc4 and Pc5 micropulsations. [J Geophys Res](#), 1972, 77: 6133–6144
 - 19 Sandhu J K, Yeoman T K, James M K, et al. Variations of high-latitude geomagnetic pulsation frequencies: A comparison of time-of-flight estimates and IMAGE magnetometer observations. [J Geophys Res Space Phys](#), 2018, 123: 567–586
 - 20 Wright A N. Dispersion and wave coupling in inhomogeneous MHD waveguides. [J Geophys Res](#), 1994, 99: 159–168
 - 21 Claudepierre S G, Wiltberger M, Elkington S R, et al. Magnetospheric cavity modes driven by solar wind dynamic pressure fluctuations. [Geophys Res Lett](#), 2009, 36: L13101
 - 22 Lyon J G, Fedder J A, Mobarry C M. The Lyon-Fedder-Mobarry (LFM) global MHD magnetospheric simulation code. [J Atmos Sol-Terrestrial Phys](#), 2004, 66: 1333–1350

Observational study of ionosphere TEC fluctuations triggered by interplanetary shock

LI Xiang, CHEN XingRan, ZONG QiuGang, LI QuanHan & ZHANG DongHe

School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

Interplanetary shocks can cause violent disturbances in near-earth space. In this paper, we use high time-resolution (1 s) data from ground-based global position system (GPS) receivers to analyze the perturbations of ionosphere total electron content (TEC) when an interplanetary shock impacted the Earth's magnetosphere on March 17, 2015. We found that after the shock arrived at the Earth, TEC perturbations demonstrated the characteristics of ULF waves, and the fluctuation characteristics were different in different latitude regions. The amplitude of TEC fluctuations observed by the receivers in the polar region was approximately 0.4 TECU, which lasted for more than 10 min, and the fluctuation period was 2 to 3 min, which increased with the increasing latitude of the pierce point. The amplitude of the TEC fluctuations observed by the receivers in middle and low latitude areas was approximately 0.2 TECU, which lasted for 5 to 10 min, and the fluctuation period was approximately 2 min. We suggest that the existence of plasmasphere may be the reason for such difference in TEC fluctuations, and that the TEC fluctuations in polar regions may be related to field line resonances. The TEC fluctuations in the middle and low latitude areas may be related to cavity mode oscillations. We used GPS TEC technology to detect ionosphere TEC fluctuations triggered by interplanetary shock, which can help us further understand the nature of ULF waves in the Earth's magnetospheric-ionospheric system and can further demonstrate the important role of GPS TEC technology in the study of the near-earth space environment.

total electron content (TEC), interplanetary shock, ULF waves, field line resonances, cavity mode oscillations

doi: [10.1360/SST-2020-0506](https://doi.org/10.1360/SST-2020-0506)