

王 敏, 丁 锋, 万卫星等. 与日夜交替线移动相关的中尺度电离层扰动 GPS 网观测. 地球物理学报, 2009, 52(5): 1146~1155, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.05.003

Wang M, Ding F, Wan W X, et al. GPS observations of TID events generated by the moving solar terminator. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(5): 1146~1155, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.05.003

与日夜交替线移动相关的中尺度 电离层扰动 GPS 网观测

王 敏^{1,2,3,4}, 丁 锋¹, 万卫星¹, 宁百齐¹, 陈一定^{1,3}

1 中国科学院地质与地球物理所, 北京 100029

2 中国科学院武汉物理与数学研究所, 武汉 430071

3 中国科学院研究生院, 北京 100049

4 中国科学院空间天气学国家重点实验室, 北京 100080

摘 要 本文选取由国际 GPS 服务中心(IGS)提供的北美中纬度地区 GPS 网 TEC 观测数据, 通过多通道最大熵频谱分析方法研究了 2005 年(太阳活动低年)地磁活动平静期间日出和日落时由于日夜交替线的移动而激发的中尺度电离层扰动(MSTID), 并统计分析其季节变化特性. 结果表明: (1) 日出或日落期间, 在中纬度地区经常观测到由日夜交替线移动激发的中尺度电离层扰动. 扰动主要沿日夜交替线运动方向传播, 平均持续时间约 2~3 h; 振幅在 0.2~0.8 TECU 之间, 水平波长, 水平相速度和周期分别为 300 ± 150 km, 150 ± 80 m/s 和 25 ± 15 min; (2) 由日夜交替线移动激发的中尺度电离层扰动在春秋分出现率较少; 在夏季, 扰动在黄昏时出现率达最大值, 在日出后少量出现; 而冬季则日出后的扰动效应更为明显. 分析表明, 在中纬地区, 这种扰动出现率随季节的变化与不同季节的日出日落时刻太阳 EUV 辐射通量变化过程的快慢, 以及电离层中离子损失过程快慢有关.

关键词 日夜交替线(Solar terminator), 中尺度电离层扰动(MSTID), GPS, 最大熵谱分析

DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.05.003

中图分类号 P352

收稿日期 2008-01-15, 2009-03-20 收修定稿

GPS observations of TID events generated by the moving solar terminator

WANG Min^{1,2,3,4}, DING Feng¹, WAN Wei-Xing¹, NING Bai-Qi¹, CHEN Yi-Ding^{1,3}

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

2 Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China

3 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4 State Key Laboratory of Space Weather, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

Abstract GPS-TEC data from the International GNSS Services (IGS) were used in this paper to analyze the medium scale traveling ionospheric disturbances (MSTIDs) which are generated by the moving solar terminator (ST) during the quiet days in 2005. We collected the most comprehensive and dense GPS network's data from North-America region and introduce here a strategy that combines polynomial fitting and multi-channel maximum entropy spectral analysis to obtain TID parameters. The results of our study are summarized as follows: (1) MSTIDs stimulated by the moving ST (ST-MSTIDs) are detected at mid-latitudes after the passage of the

基金项目 国家自然科学基金项目(40774090, 40636032)和国家重点基础研究规划项目(2006CB806306)资助, 空间天气学国家重点实验室开放课题支持.

作者简介 王 敏, 女, 1980 年生, 理学博士, 主要从事电离层物理研究工作. E-mail: wangmin@seis.ac.cn

solar terminator with the life time of 2~3 h and the variation amplitude of 0.2~0.8 TECU. Spectral analysis indicated that the horizontal wavelength, average period, horizontal phase velocity of the MSTIDs are around 300 ± 150 km, 150 ± 80 m/s, and 25 ± 15 min, respectively. In addition, ST-MSTIDs have wavefronts elongated in the moving ST direction and almost parallel to ST. (2) The statistical results demonstrate that the dusk MSTIDs stimulated by ST is more obvious than the dawn MSTIDs in summer days. On the contrary, the more-pronounced dawn MSTIDs occur in winter days. Further analysis indicates that the seasonal variations of ST-MSTIDs occurrence frequency are most probably related to the seasonal differences of the variations of EUV flux in the ionosphere region and recombination process during sunrise and sunset period at mid-latitudes.

Keywords Solar terminator (ST), Medium scale traveling ionospheric disturbances (MSTID), Global positioning system, Maximum entropy method

1 引言

中尺度行进式电离层扰动(全称 Medium-scale traveling ionospheric disturbances, 缩写为 MSTIDs)是发生在电离层高度上的周期为 15~50 min, 水平相速度在 100~400 m/s 范围内的大气声重力波引起的电离层扰动^[1,2]. 以往研究表明, 绝大部分 MSTIDs 有向上传播的群速度分量, 起源于低层大气的扰动, 如剧烈气象活动(台风、雷暴、龙卷风、脊背风、穿透性对流、急流不稳定、气象锋面与低涡)、地震、海啸、核爆炸等都可能是中尺度电离层扰动的源^[3,4]. 另一方面, 源自电离层本身的扰动例如极区或赤道电流扰动、电离层的日食效应、太阳照射在地球表面产生的运动的明暗界线(Solar terminator (ST), 本文称为日夜交替线)等也可能是中尺度电离层扰动的源. 其中, 日夜交替线的移动是一个重复稳定的、每天都存在的电离层扰动激发源. 在日出或日落时, ST 的经过使得太阳能量注入发生变化, 通过光化学、对流和扩散效应等引起中高层大气的参数(如: 能量, 温度, 压力和电子密度梯度等)急剧变化, 使得 180~600 km 高度上的大气处于不稳定状态, 这种梯度辐射不稳定性和 ST 的超声速运动会引起大气的低频波动, 激发重力波, 引起 MSTIDs^[5~7].

Galushko 等^[8]通过非相干散射雷达观测到日出时 ST 运动引起的电离层扰动, 发现扰动传播方向与 ST 运动方向一致. Kotake 用 GPS TEC 统计分析了 2002 年(太阳活动高年)南加州全年发生的 MSTIDs 特性, 发现这种由 ST 引起的 MSTIDs 经常出现在夏季黄昏, 波阵面大致平行于 ST 沿西北向传播^[9].

本文尝试用 GPS TEC 数据研究由 ST 引起的 MSTIDs 的传播特性. 我们对基于国际 GPS 服务中心(IGS)提供的北美 GPS 台站密集区的 TEC 观测数据进行预处理和滤波, 并通过三通道最大熵频谱方法研究了在太阳活动低年(2005 年)地磁活动平静日期间由 ST 引起 MSTIDs 的传播特性, 并统计分析了传播参量随季节变化的特性. 本文第二部分介绍数据处理方法, 第三部分给出观测结果的个例分析及统计结果. 第四部分给出结论.

2 数据及处理方法

本文使用的数据来源于 IGS (International GNSS Service)^[10]分布在北美地区的 700 多个 GPS 接收机观测到的 TEC 数据. 这些 GPS 接收机覆盖了 $130^{\circ}\text{W} \sim 70^{\circ}\text{W}$, $20^{\circ}\text{N} \sim 50^{\circ}\text{N}$ 的区域. 为了避免互谱分析时由台站间距过长引起的数据时序相位整周模糊度问题, 我们在这些台站中选取一系列台站间距小于 40 km 的短基线 GPS 观测台阵, 将这些台阵的 RINEX 格式 GPS 观测文件转换成文本的斜向 TEC 数据, 对斜向 TEC 时序进行修正, 去除野点后转化为垂直 TEC 数据; 我们所选取的数据是 2005 年(太阳活动低年)地磁活动平静日期间(地磁指数 $Dst \geq -30$ nT, $Kp < 3+$)仰角大于 40° 的 TEC 数据(仰角过低, 由于电波穿越电离层的会有路径衰减, 时间延迟, 大气噪声, 多径效应, 电离层衰落等因素, 影响 TEC 值的准确性, 仰角越低, 由观测方向上的多路径效应引入的误差越明显, 观测值越不可靠.).

其次, 我们对预处理后的垂直 TEC 时序加 1.8 h 时间滑动窗, 通过在滑动窗内对 TEC 时序 n 阶分段

拟合求残差的方法和带通滤波的方法,去除由 TEC 的日变化、仰角改变引起的 TEC 值变化、TEC 随经纬度的变化等背景趋势,以及由卫星运动引起的多普勒效应对星下点 TEC 值的影响^[11~13]. 我们选取窗口的大小是由波的尺度决定的,窗口要略大于波的周期. 考虑到中尺度的重力波其周期范围为 15~50 min, 1.8 h 的窗口长度足够包含至少一个周期的波. 其中通过使 n 阶分段拟合后 TEC 值和原始的 TEC 值的均方根误差最小,来确定拟合的阶数 n 的大小,用此方法足可以使我们在短时序内很容易去除长期趋势.

图 1 是对台站 rbut(40.8°N, -111.8°W) (LT = UT - 7.5 h) 原始的斜向 TEC 进行滤波、去除背景趋势之后的 dTEC 扰动时序. 可以看出 TEC 扰动量变化的时段均出现在日出和日落后 02:00 UT ~ 06:00 UT (18:33 ~ 22:33 LT) 和 12:30 UT ~

18:30 UT (05:00 ~ 11:00 LT), 而不是在午后 TEC 日变化最强烈的时段 19:30 UT ~ 22:30 UT (12:00 ~ 15:00 LT). 由此,显示我们的滤波方法是有效的.

然后,应用三通道最大熵互谱方法^[14]分析滤波后的 GPS TEC 扰动时序,获取电离层扰动的主频率以及扰动时序在三个台站之间的相位差. 最大熵互谱方法是将已知有限长度的自相关序列以外的数据用外推的自相关函数法求得,使其时间序列表现出极大熵,我们对于较短的时间序列也可以得到较高的频域分辨率,细致准确地解算出不同尺度电离层扰动的传播参量值在时域或频域中的演变特性. 本文细节的计算和扰动参数的确定同文献[15],只是这里输入参量 I_1, I_2, I_3 是同一时段内 GPS 观测阵的三个站的 TEC 扰动时序. 输出 f 是波的频率, ϕ_{21}, ϕ_{31} 是三站的 TEC 时序间的相差. 其中我们

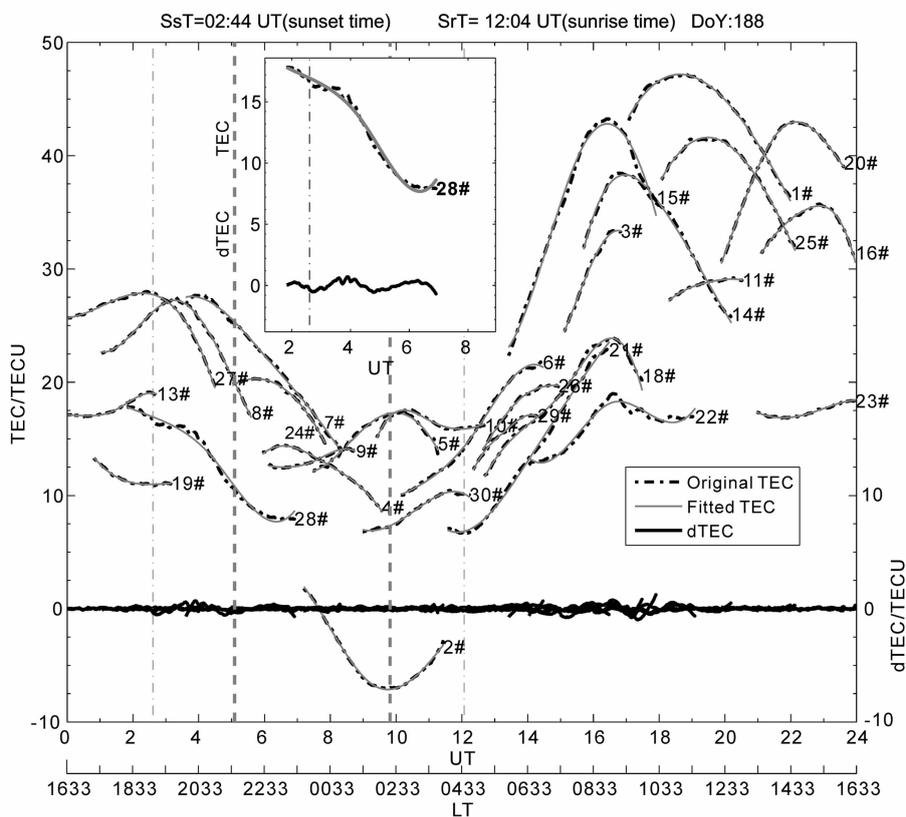


图 1 对原始的斜向 TEC 进行滤波、去除背景趋势之后的 dTEC 扰动时序

黑色点划线表示对应于 31 颗卫星的原始斜 TEC, 灰色细实线表示对原始斜 TEC 进行拟合的结果, 图下部黑色粗实线是斜向 TEC 进行滤波以后的 dTEC 扰动时序. 2 条垂向点画线分别标出了该台阵地面的日落日出世界时间, 2 条垂向粗虚线表示该台阵对应的电离层高度 370 km 平均日落日出世界时间.

Fig. 1 Background trends were removed using residues obtained from polynomial fits

Observed slant TEC data from 31 GPS satellites are indicated by the black dash-dot curves (upper). The fitted TEC by polynomial fits were demonstrated by the thin grey solid curves (upper). The black thick solid lines (lower) represent dTEC obtained from residues derived from multi-order polynomial fits TEC time series. Universal times of the sunset and sunrise terminator passage at ionosphere over the array are indicated by the 2 thick dashed vertical lines and the universal times of the sunset and sunrise terminator passage on the height of ground are indicated by the 2 thin dash-dot vertical lines.

通过伽利略变换,去除了由于 GPS 卫星运动及电离层穿透点运动引起的 TEC 扰动时序的多普勒频移^[16]:

$$\omega_{wave} = \omega_{observe} + \mathbf{k}_{wave} \cdot \mathbf{u}_{ipp}, \quad (1)$$

\mathbf{u}_{ipp} 是 GPS TEC 在电离层穿透点的运动速度.

通过最大熵频谱分析方法得到电离层 TEC 扰动时序在不同台站间的相位差以及主频,进而解算出扰动的周期、水平相速度等参量;通过不同台阵的扰动参量的解算,可以得到相对广阔区域内由运动的 ST 引起的电离层扰动的传播情况.

3 结果分析

3.1 扰动基本形态

图 2 给出了我们选取的 GPS 接收台站. 图中给出了接收机地理位置分布及 GPS 31 颗卫星与接收机连线在电离层穿透点的运动轨迹(灰色实线). 图中“⊙”标出所选 GPS 台站地理位置,这些台站在北纬 40° 纬圈附近,跨越 10 个经度的范围. 将这些台站中相邻较近的站组合成三站的短基线 GPS 台阵(“*”)显示了参于最大熵谱分析计算的其中一组台

阵位置),以便在后文中的互谱分析中求扰动传播参量.“☆”给出 31 颗卫星仰角最大处星下点所在位置,从图中可以看出,即便是单个台站或台阵的 GPS TEC 观测也可覆盖较为广阔的经纬度的范围,有助于研究相对较大范围内日夜交替线移动引起的电离层扰动的变化规律.

图 3 显示的是日落和日出以后观测到的电离层 TEC 的扰动随 LT 时间的变化情况. 我们选择了 8# 和 28# 卫星 GPS TEC 数据,观测时间分别为 2005 年 7 月 8 日 17:00~24:00 LT,和 2005 年 12 月 21 日 04:00~11:00 LT. 虚线标出了每个台站对应的电离层观测点上空的日出日落地方时,即卫星观测到的 TEC 对应仰角最大处星下点(如图 2 “☆”所示)所在的地理经纬度的 LT 时间. 可以看到,在日落或日出之后,TEC 时序出现明显扰动,扰动持续 2 h 左右,幅度约为 0.5 个 TECU 左右. 从不同经度上的台站观测结果来看,扰动随经度变化有时间和相位上的延迟(同一地方时处,波的相位并不一致,仍有一定的相差.)并且可以看到波的等相面的传播方向不同(相位差的符号相反),可以判断扰动在夏季日落和冬季日出相位传播方向不同.

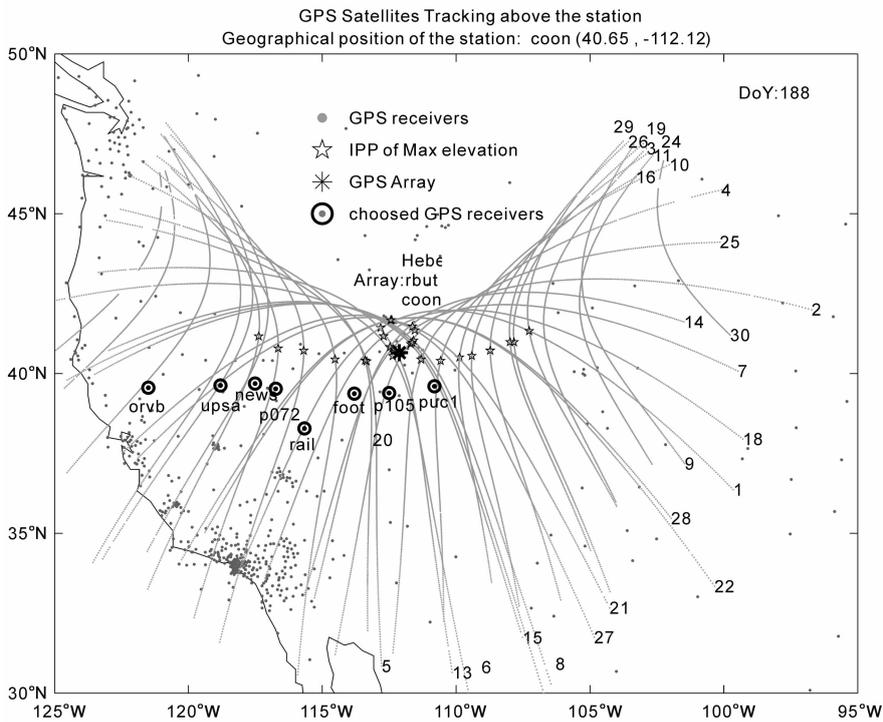


图 2 GPS 接收机地理位置分布(黑色点)及 GPS 卫星与接收机连线在电离层穿透点的运动轨迹(灰色曲线) 图中“⊙”标出所选 GPS 台站地理位置;“*”标出台阵位置;“☆”给出 31 颗卫星仰角最大处星下点所在位置.

Fig. 2 The dots show the geographic distribution of more than 700 GPS receivers of North America The symbol“⊙”represents the chosen GPS stations and “*”is the chosen arrays, each one of which consists of three GPS stations. The “☆”denotes the location of the maximum elevation of 31 GPS satellites on the tracks of ionospheric pierce point (grey curves).

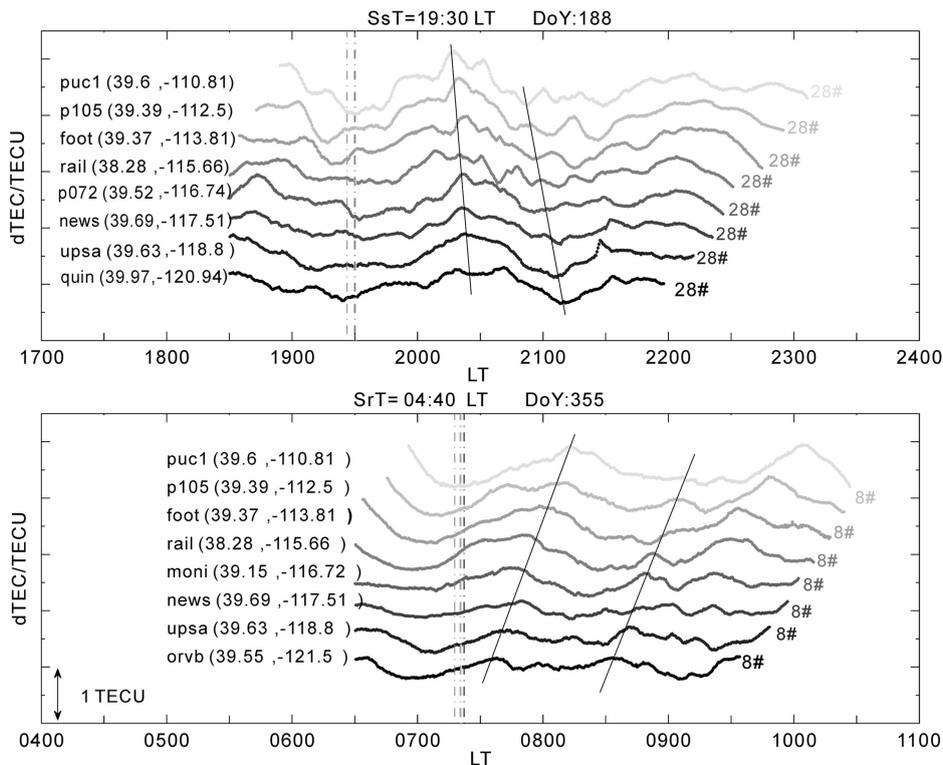


图 3 夏季日落和冬季日出时段的 dTEC 扰动时序

图中渐近的灰度实线是沿 39°N 纬线的 8 个 GPS 台站 8# 和 28# 卫星的垂直 TEC 进行滤波以后的 dTEC 扰动时序, 不同站的时序人为抬升 0.5 TECU 以避免重叠. 垂向渐近的灰度虚线标出了 8 个不同台站日落和日出的地方时. 图上方给出的是 8 个台站地面日落日出的平均地方时.

Fig. 3 dTEC fluctuation time series during dusk in summer and dawn in winter

The gradual grayscale solid curves represent disturbed TEC obtained from residues derived of multi-order polynomial fits TEC time series of GPS sites locating along the latitude of 39°N . Curves for different GPS stations are artificially shifted to avoid overlapping. Universal times of the sunset and sunrise terminator passage at ionospheric pierce point over the observatory are exhibited by the vertical gradual grayscale dash-dot, and mean local times of ST are also indicated above each panel.

3.2 扰动传播参量及季节变化

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观测周期, 水平相速, 传播的方位角. 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数也会随时间平稳变化, 也就是说平稳变化的参数是可靠的.

(1) 夏季

基于 ($40^{\circ}\text{N}, 111^{\circ}\text{W}$) 附近一组 GPS 短基线台阵观测数据, 用三通道最大熵谱分析结果得到该台阵太阳活动低年 2005 年夏季 (第 188 天) 由日出和日落时 ST 激发的扰动方向、周期以及相速度等传播参量如图 4(b~d) 所示. 从图中可以看到在日落后 (02:50~05:00 UT) 时段这些波参量随时间非常连续, 且平稳变化. 从图 4a 可以看出, 日落后比日出后得到了较为明显的 ST-MSTIDs 扰动. 这里我们只给出了 18#、21#、28# 卫星的探测结果, 以便可

以更简洁、清晰地看到明显的规则的扰动结构. 事实上, 后文的统计均为基于所有 31 颗星的数据参与计算的结果.

在日落后 02:48~04:50 UT 期间, 可以得到随时间平稳变化的扰动传播参量, 反应出该时段出现稳定波场. 扰动的优势传播方向角为 $320^{\circ}\sim 340^{\circ}$ (正北为 0° , 顺时针为正), 即扰动沿西北向传播. 水平相速度为 $100\sim 200\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 周期约为 30 min. 这一计算结果与 Kotake^[9] 用南加州台站密集区 GPS TEC 数据统计的太阳活动高年 (2002 年) 黄昏后 MSTIDs 扰动传播参量得到的计算结果几乎一致 (如表 1 所述). 说明我们得到的扰动确为日夜交替线移动引起的扰动. 而在日出时间 12:04 UT 附近 12:00 UT~14:00 UT 这两个小时内得到的功率谱比较弱, 且没有得到相对连续稳定的扰动参量, 所以我们推断没有出现由日出 ST 引起的这一尺度的重力波.

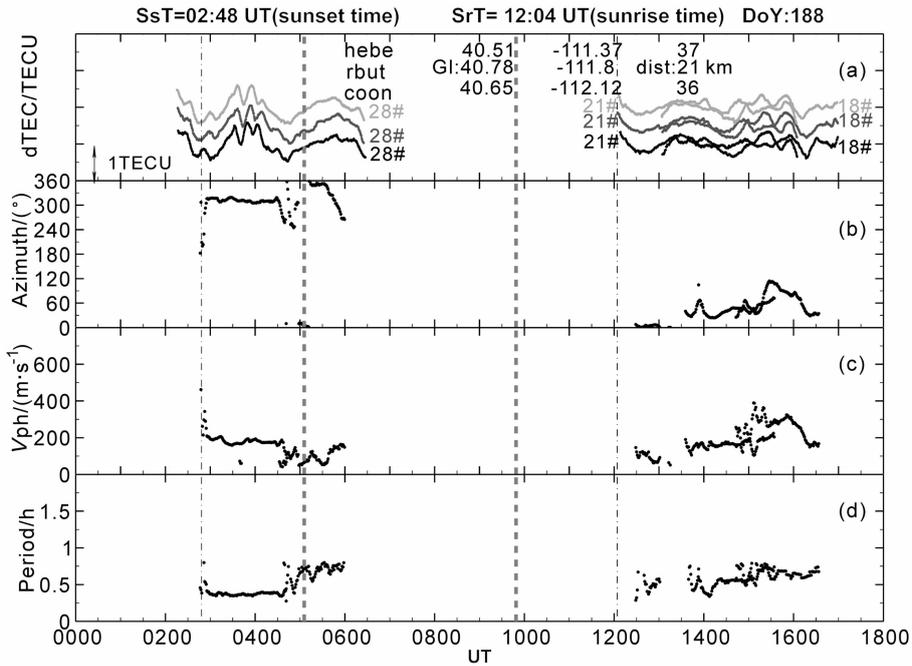


图 4 应用三通道最大熵谱分析方法对一组台阵夏季 dTEC 扰动时序频谱分析结果

(a)为 18#、21#、28# 卫星探测垂直 TEC 进行滤波以后的 dTEC 扰动时序. 三组灰度不同的曲线分别是三个不同台站探测的结果.

图中给出了台站名称, 地理经纬度及站间距. (b~d) 分别为频谱分析得到的日出日落附近时刻扰动的方向角, 相速度, 及周期.

垂向点画线分别标出了该台阵地面的日落日出时间, 垂向粗虚线表示该台阵对应的电离层高度 370 km 平均日落日出时间.

Fig. 4 The distribution plots and wave parameters derived from 3-channel maximum entropy spectral analysis in summer. Panel (a) represents dTEC corresponding to the three receivers of an array. The location of this array is given above the upper panel. (GL: geographic latitude and geographic longitude, dist: the distances between 2 stations). The deduced azimuth (degree), velocities (m/s) and periods (in hours) are presented by (b)~(d). Universal times of the sunset and sunrise terminator passage at ionosphere over the array are indicated by the thick dashed vertical lines and the universal times of the sunset and sunrise terminator passage on the height of ground are indicated by the thin dash-dot lines.

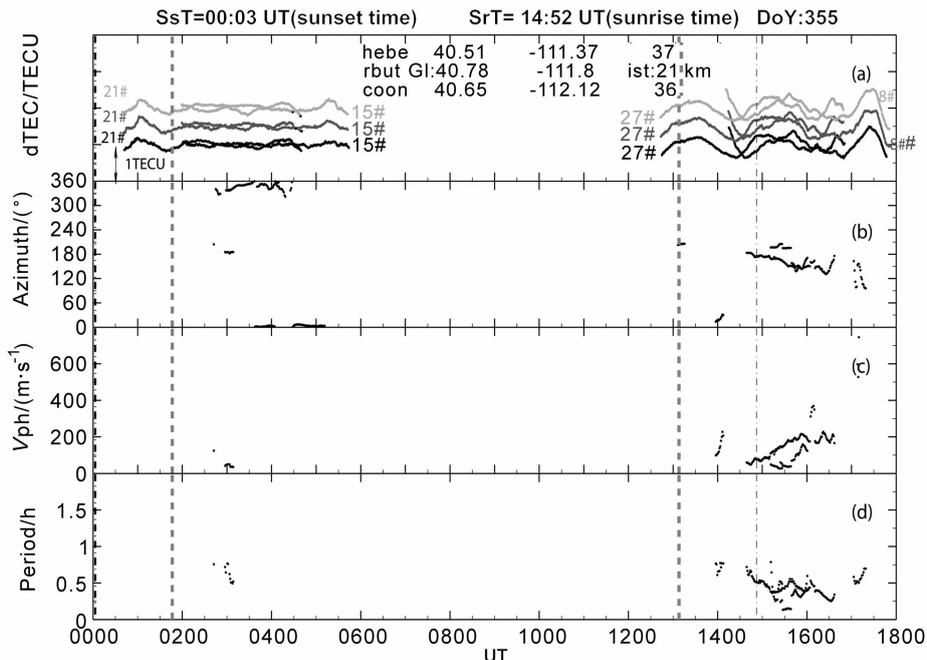


图 5 应用三通道最大熵谱分析方法对一组台阵冬季 dTEC 扰动时序频谱分析结果. 其他标注解释如图 4.

Fig. 5 Same as Figure 4, but for winter

(2) 冬季

同上,图 5 给出冬季(第 355 天)此台阵 15 #、21 #、27 #、8 # 卫星探测到的 MSTIDs 扰动传播参量计算结果. 从图中可以看出在日落 00:00 UT 后 00:00 UT~03:00 UT(16:33~19:33 LT)期间没有得到相对连续稳定的扰动参量,所以推断没有出现由日落 ST 激发的重力波引起这一尺度的 TIDs. 而在日出时间 14:50 UT 附近 14:50 UT~17:00 UT 期间可以得到比较稳定的波场参数. 统计此时段内扰动传播参量结果得到其优势传播方向角为 $140^{\circ}\sim 180^{\circ}$, 水平相速度为 $80\sim 250$ m/s, 周期为 30 ± 10 min.

(3) 讨论

我们知道,日落时地面附近大气受到地球遮蔽最先进入夜侧而冷却,辐射梯度变化很快;而此时上空电离层高度的大气仍在接受到太阳辐射,辐射梯度变化很小,370 km 高度的电离层比地面要延迟 2 h 左右进入被地球屏蔽的夜侧. 图 4a 垂向细点画线(左)分别标出了该台阵地面的日落时间为 02:48 UT,粗虚线(左)标出该台阵对应的电离层高度 370 km 平均日落时间 05:02 UT. 我们发现在夏季,明显的电离层行进式扰动发生在地面日落时间 02:40 UT 后,06:00 UT 之前,这说明该扰动极有可能是由低层大气激发的重力波上传到电离层 F 层 370 km 高度形成的 MSTIDs. 低层大气的冷却,致使中高层大气的温度、压力、电子密度梯度急剧变化以及辐射梯度的不稳定性,快速引起大气的低频波动,激发重力波上传,使得我们在电离层高度探测到这种类波结构的行进式扰动,有如日食期间,月影以超声速移过地球大气而使局部大气冷却而激发的上传重力波. Chimonas 和 Hines(1970)^[17]认为大气冷却的结果产生激波,诱发大气重力波. 然而,我们在春、秋分和冬季日落后探测到的这种扰动却较少.

日出情况刚好相反,当日夜交替线附近地面的大气还处在夜侧时,其上空电离层高度的部分大气已可以接收到太阳辐射,需要 2 h 左右后地面大气才进入日侧. 但我们在全年统计结果中,在电离层高度日出之后到地面日出之前这段时间均很少发现有明显的电离层行进式扰动(如图 4~6);在冬季,却发现明显的 MSTIDs 出现在地面日出时间 14:50 UT 后. 这说明我们探测到的 MSTIDs 确实是来自 ST 激发的声重波,并且是从低层大气上传到电离层 F 层高度. 也说明虽然日出时,在电离层高度的大气受太阳辐射通量增加而膨胀,但并不能激发重力波

从而引起等离子密度的起伏;而只有低层大气受太阳辐射加热膨胀,温度、压力、浓度产生一定的梯度后,才能诱发重力波,并上传到已受太阳辐射的电离层引起行进式扰动. 但从图 5(e~h)可以看出,由日出 ST 激发的 MSTIDs 响应较慢,比日落时 ST 激发的 MSTIDs 有几十分钟的延迟,表明大气冷却机制更容易激发较强的中低层大气中尺度重力波,向上传播到电离层高度.

(4) 不同季节的扰动传播参量的统计结果

为进一步考察日夜交替线移动引起的电离层扰动是否具有明显的季节变化特征,选取全年($Dst\geq -30$ nT, $Kp<3+$)31 颗卫星探测的数据,对不同季节的扰动传播参量进行统计. 统计的结果显示在春秋分季,没有发现明显日出日落扰动效应,即 ST-MSTIDs 出现率非常少,所以这里我们只给出台阵(hebe, rbut, coon)夏、冬两季频谱分析统计结果:图 6 每张小图以 72×60 网格统计了各扰动传播参量随 UT 时间变化的出现率. 从图 6(a~d)和(e~h)对比可以看出,在夏季, MSTIDs 在黄昏时出现率最大,在黄昏 02:00~05:00 UT 的出现率比黎明后 12:00~18:00 UT 日出到中午这一时段的出现率要高;而冬季则是 MSTIDs 在白天的发生率明显比夜间高,在 15:00~18:00 UT 日出后这一时段发生率最高. 这种扰动出现率的季节变化与不同季节日出和日落时段电离层高度接收到的太阳 EUV 辐射通量的变化过程快慢不同有关,也可能是由电离层中离子损失过程快慢不同造成的. 对测高仪峰值电子浓度的长期观测结果研究显示^[18],在中纬地区冬季日落期间电离层 F2 层的离子损失过程比较快,日落后 N_mF_2 很快衰减到较低值(冬季日落 N_mF_2 的值要低于夏季日落 N_mF_2),所以在冬季日落后 ST-MSTIDs 现象不明显;而冬季日出前, N_mF_2 相对较低,且日出时电离层高度接收到的太阳辐射增强过程比夏季要快,日出后 N_mF_2 很快增长到较高的值,所以观测到的日出 ST-MSTIDs 在冬季的出现率明显比夏季高. 相应的夏季太阳辐射变化比较缓慢,同时日落期间电离层 F2 层的离子损失过程比冬季要慢,日落后很长时间内 N_mF_2 的衰减并不明显,仍保持一个很高的值,有利于日落后观测到更多的 ST-MSTIDs. 此外, Galushko 通过非相干散射雷达在 1995 年秋分日出后探测到了 ST 引起明显的大尺度的扰动^[8],但在本文中秋季 ST-MSTIDs 并不明显,这个问题还有待进一步研究.

从 ST-MSTIDs 传播方向的统计结果(图 6(a,e))

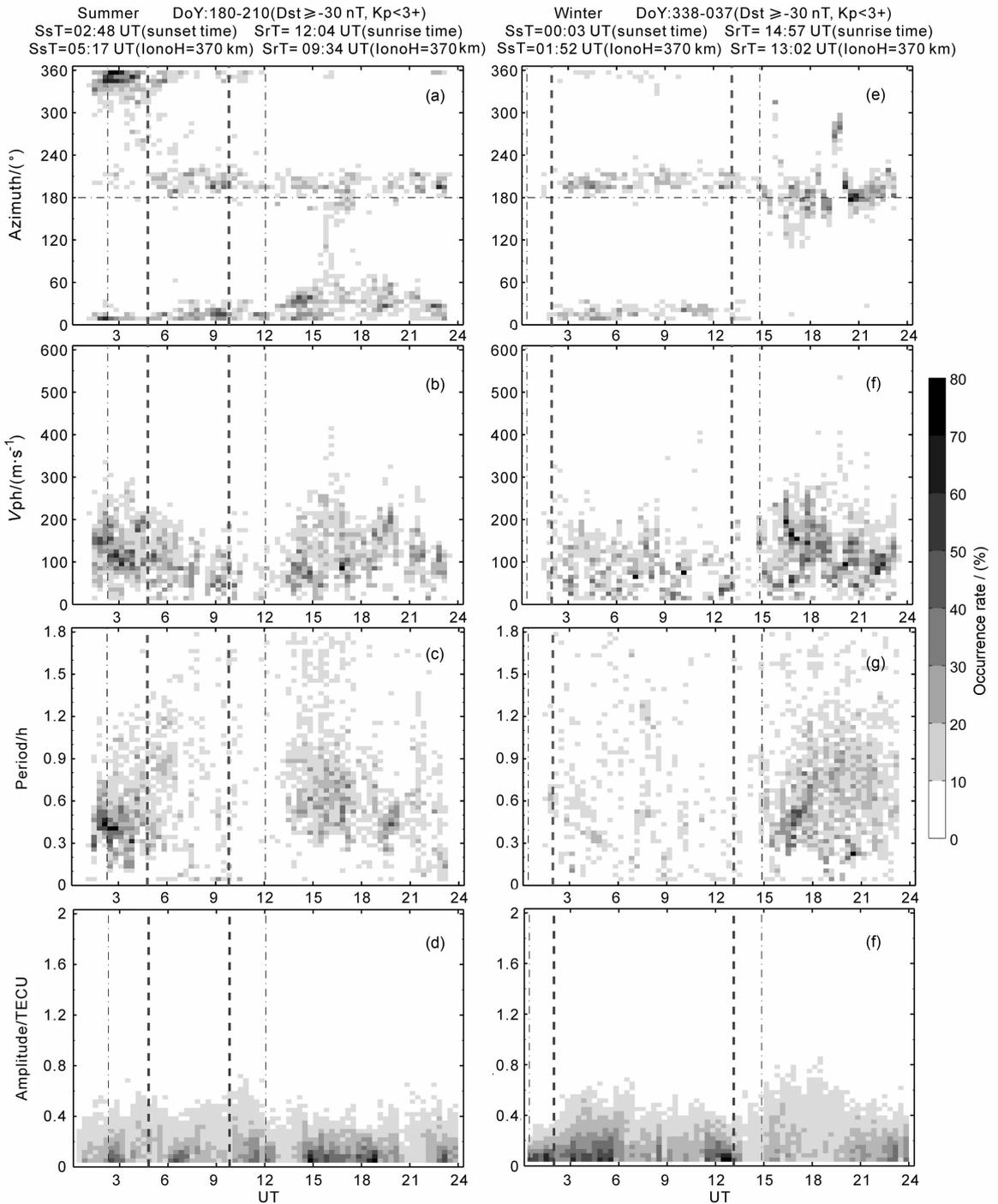


图 6 夏、冬二季平静日期间($Dst \geq -30$ nT, $Kp < 3+$)对 ST 移动激发的电离层扰动时序进行频谱分析后的统计结果
 (a)~(d)分别为夏季随 UT 变化的扰动方向角,相速度,周期及振幅。(e)~(h)为冬季的扰动传播参量。
 垂向点画线分别标出了该台阵对应的平均日落日出时间,垂直粗虚线表示该台阵对应的
 电离层高度 370 km 平均日落日出时间。

Fig. 6 The statistical results of propagation parameters of ST-MSTIDs, which were derived from 3-channel maximum entropy spectral analysis

The deduced azimuth (degree), velocities (m/s), periods (in hours) and amplitude (TECU) are presented in plot (a)~(d) in summer and (e)~(h) in winter. Universal times of the sunset and sunrise terminator passage at ionosphere over the array are indicated by the thick dashed vertical lines and the universal times of the sunset and sunrise terminator passage on the height of ground are indicated by the thin dash-dot lines.

来看,夏季,日落时 ST-MSTIDs 的传播方向主要是西北方向($330^{\circ}\sim 360^{\circ}$),而日出后的优势传播方向主要是东北方向($0^{\circ}\sim 45^{\circ}$),与日本学者 Kotake^[9]得到的

黄昏时($210^{\circ}\sim 330^{\circ}$)和黎明后($90^{\circ}\sim 120^{\circ}$)略有偏差.这可能与 Kotake 使用的是太阳活动高年(2002 年)的 TEC 数据,并且没有去掉地磁扰动日的观测

表 1 本文工作与其他学者所做相关工作进行比较

Table 1 The comparison between other scholars' work and our work

	探测手段	数据	周期	相速度	传播方向	波长
	Somsikov ^[5-7]	理论模型研究	$\sim > 30$ min		波阵面平行于 ST 并沿 ST 运动方向	\sim 几百 km
比较结果	基本一致,证实了理论研究中 ST 激发的重力波波阵面平行于 ST,并沿 ST 运动方向传播的结果.					
	Galushko ^[8]	非相干散射雷达	1995(低年) 秋季一天	1.5~2 h	160~270 m/s	扰动传播方向与 ST 运动方向一致
结果比较	周期不同, Galushko 探测到 ST-LSTIDs, 对雷达数据时序滤波选取滑动窗口 2.5 h, 我们选取 1.8 h 滑动窗; 且 GPS TEC 数据长度较短, 更适宜于探测中尺度扰动.					
	Kotake ^[9]	GPS TEC	2002(太阳活动高年)全年数据	25~45 min	100±50 m/s	夏季黄昏,波阵面大致平行于 ST 沿西北向传播 ($210^{\circ}\sim 330^{\circ}$)
比较结果	传播方向有偏差. Kotake 使用太阳活动高年 TEC 数据, 没有去掉地磁扰动日的观测, 使得统计中包含有其他源引起的 MSTIDs 扰动有关. Kotake 没有得到冬季日出后的 ST-MSTIDs, 这可能是由于其统计结果的网格精度不够所致.					
	本文工作	GPS TEC	2005(太阳活动低年)全年数据	25±15 min	150±80 m/s	日落($330^{\circ}\sim 360^{\circ}$) 日出($0^{\circ}\sim 45^{\circ}$) 300±150 km
结果	探测到来自于低层大气 ST-AGWs 上传引起的类波扰动结构的 MSTIDs, 其平均持续时间约 2~3 h, 振幅在 0.2~0.8 TECU 之间. 统计结果显示 ST-MSTIDs 有明显的季节变化. 在夏季, 扰动在日落后比日出后出现率高; 冬季, 日出后的出现率高. 扰动在不同季节的优势传播方向与日夜交替线在不同季节在中纬度的移动方向基本一致. 并且阐述了这种季节变化特征的物理机制.					

结果使得统计中包含有其他源引起的 MSTIDs 扰动有关. 冬季日出后, 扰动优势传播方向明显由夜侧的西南向($180^{\circ}\sim 220^{\circ}$)偏向东南向($120^{\circ}\sim 190^{\circ}$); 而日落后 MSTIDs 出现率仅为日出的 1/8, 我们还记录到夜晚 MSTIDs 大量的西南向优势传播方向和少量的东北向. Kotake 没有得到冬季日出后的 ST-MSTIDs, 这可能是由于其统计结果的网格精度不够所致. 由传播方向的统计结果(表 1), 证实了以往理论研究中 ST 激发的重力波波阵面平行于 ST 并沿 ST 运动方向传播的结果^[6]. 从扰动的周期和相速度的统计结果来看(图 6(b, f, c, g)), 夏季日落和冬季日出时激发的 ST-MSTIDs 的周期 15~40 min 与 Kotake 得到的结果几乎一致, 与 Galushko 通过非相干散射雷达得到的扰动 1.5~2 h 周期不一致, 可能是由于我们用的 GPS TEC 数据长度较短, 更适宜于探测中尺度扰动的缘故.

4 结论

本文利用 GPS TEC 数据, 通过最大熵频谱分析方法计算得到日夜交替线(ST)移动引起的中尺度电离层扰动(MSTIDs)的扰动传播参量, 并统计

分析了其随季节变化的特性并与以前学者所做的相关研究作了比较(表 1). 分析结果表明: 用 GPS TEC 数据可以探测到中纬地区由 ST 引起的 MSTIDs 扰动, 并有明显的季节变化特性. 其特点如下: (1) ST-MSTIDs 扰动在 ST 经过时开始响应, 平均持续时间约 2~3 h, 振幅在 0.2~0.8 TECU 之间. 水平波长、水平相速度和周期分别为 300 ± 150 km, 150 ± 80 m/s 和 25 ± 15 min. 平均持续时间约 2 h, 振幅约为 0.2~0.8 TECU. (2) 统计结果显示 ST-MSTIDs 有明显的季节变化. 由日夜交替线移动激发的中尺度电离层扰动在春秋分出现率较少; 在夏季, 扰动在黄昏时出现率达最大值, 在日出后少量出现; 而冬季则日出后的扰动效应更为明显. 分析表明, 在中纬地区, 这种扰动出现率随季节的变化与不同季节的日出日落时刻太阳 EUV 辐射通量的变化过程快慢, 以及电离层中离子损失过程快慢有关. 在夏季日出和日落 ST-MSTIDs 扰动主要沿着 ST 运动方向传播, 分别为东北($0^{\circ}\sim 45^{\circ}$)和西北($330^{\circ}\sim 360^{\circ}$)方向, 冬季的日出和日落电离层扰动优势传播方向分别为东南和西南方向. 扰动在不同季节的优势传播方向与日夜交替线在中纬地区不同季节的移动方向一致, 证实了理论研究中 ST 激发的重力波波阵面基

本平行于 ST 沿 ST 运动方向传播的结果。

参考文献(References)

- [1] Hunsucker R D. Atmospheric gravity waves generated in the high latitude ionosphere; a review. *Rev. Geophys.*, 1982, **20**: 293~315
- [2] Hocke K, Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and traveling ionospheric disturbances; 1982~1995. *Ann. Geophys.*, 1996, **14**: 917~940
- [3] Xiao Z, Xiao S G, Hao Y Q, et al. Morphological features of ionospheric response to typhoon. *J. Geophys. Res.*, 2007, A04304; **112**, doi: 10. 1029/2006JA011671
- [4] Hao Y Q, Xiao Z, Zhang D H. Responses of the ionosphere to the great sumatra earthquake and volcanic eruption of pinatubo. *Chinese Physics Letters*, 2006, **23**(7): 1955~1957
- [5] Somsikov V M. Solar Terminator and Dynamics of the Atmosphere. Alma-Ata, Nauka, Russian, 1983, 169
- [6] Somsikov V M, Ganguly B. On the formation of atmospheric inhomogenities in the solar terminator region. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1995, **57**(12): 1513~1523
- [7] Somsikov V M, Ganguly B. On the mechanism of formation of atmospheric inhomogenities in the solar terminator region. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1995, **57**: 75~83
- [8] Galushko V G, Paznukhov V V. Incoherent scatter radar observations of AGW/TID events generated by the moving solar terminator. *Ann. Geophysicae*, 1998, **16**: 821~827
- [9] 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**(2): 95~102
- [10] Beutler G, Rothacher M, Schaer S, et al. The International GPS Service (IGS): An interdisciplinary service in support of earth sciences. *Adv. Space Res.*, 1999, **23**(4): 631~635
- [11] Ding F, Yuan H, Wan W, et al. Occurrence characteristics of medium-scale gravity waves observed in OH and OI night glow over Adelaide (34. 5°S, 138. 5°E). *J. Geophys. Res.*, 2004, D14104; **109**, doi: 10. 1029/2003JD004096
- [12] Wang M, Ding F, Wan W, et al. Monitoring global traveling ionospheric disturbances using the worldwide GPS network during the October 2003 storms. *Earth Planets Space*, 2007, **59**: 407~419
- [13] Wan W X, Yuan H, Ning B Q, et al. Traveling ionospheric disturbances associated with the tropospheric vortexes around Qinghai-Tibet Plateau. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**(20): 3775~3778
- [14] Strand O N. Multichannel complex maximum entropy (autoregressive) spectral analysis. *IEEE Trans. Autom. Control*, 1977, **22**(4): 634~640
- [15] 江 葵, 丁 锋, 万卫星等. Adelaide 地区大气重力波的气辉观测. *空间科学学报*, 2007, **27**(6): 496~502
Jiang K, Ding F, Wan W X, et al. Observation of atmospheric gravity waves in airglow over adelaide. *Chin. J. Space Sci.* (in Chinese), 2007, **27**(6): 496~502
- [16] Wan W X, Ning B Q, Yuan H, et al. TID observation using a short baseline network of GPS receivers. *Acta Geod. Geoph. Hung.*, 1997, **2**(3-4): 321~327
- [17] Chimonas G, Hines C O. Atmospheric gravity waves launched by auroral currents. *Planet. Space Sci.*, 1970, **18**: 565~582
- [18] Ivanov-Kholodny G S, Mikhailov A V. The Prediction of Ionospheric Conditions. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, 1986, **4**: 112~121

(本文编辑 胡素芳)